

臺北市無人機教育 進階教材

—— 適用國中 ——



飛向未來·科技啟航
探索無限可能·翱翔智慧天空



S
SCIENCE



T
TECHNOLOGY



E
ENGINEERING



A
ARTS



M
MATHEMATICS



市長的話

臺北市秉持「教育是城市永續發展最重要的基石」，持續推動科技教育與智慧治理，期盼讓每一位孩子都具備面向未來的能力，也讓城市因科技而更加安全、便利與宜居。115年，輝達（NVIDIA）於臺北市設立臺灣總部，展現臺北作為全球科技創新重鎮的發展潛力；同年，臺北市榮獲新加坡「李光耀世界城市獎」，這項榮耀，不僅肯定臺北在城市治理、創新發展及永續建設上的努力，更彰顯臺北市持續以科技提升公共服務品質，打造智慧城市的成果。

臺北市近年來逐步將無人機科技導入市政工作，運用於消防救災、山域與水域搜救、災情勘查及公共設施巡查等面向，協助第一線人員即時掌握現場資訊，提升災害應變效率與公共安全。無人機已不再只是新興科技，更逐漸成為智慧城市治理的重要工具，也展現科技改善生活、服務市民的價值，因此，我們深信，城市的進步不僅來自科技的創新，更有賴人才的培育；而人才的養成，必須從教育扎根。

臺北市於114年3月領先全國成立「無人機教育中心」，率先推動高級中等以下學校無人機教師研習課程，並全國首創補助考照通過教師考照費用，同時發布高級中等以下學校無人機教育領航計畫、辦理全市性無人機競賽及學生營隊，並於115年攜手跨校、跨學層教師團隊，研發全國首套國民小學與國民中學無人機教材，循序引導學生認識無人機基本構造、飛行原理、安全觀念，國中階段則進一步結合自然科學、資訊科技等領域知識，搭配實作探究課程，讓無人機不再只是操作工具，而是連結學習與世界的橋樑。

教育，是城市持續創新的根本動力，臺北市逐年提升無人機教育預算，全面普及無人機教育，透過深化師資培育、精進課程發展、結合競賽交流與體驗學習，建構系統性無人機技職人才培育體系，培養具備實作素養、創新科技思維的新世代人才。期盼本教材能陪伴每一位師生勇於探索無人機領域、樂於無人機科技學習，讓無人機教育成為城市創新的基石，共同打造更智慧、更永續、更具國際競爭力的臺北。

臺北市市長 蔣萬安

謹筆

115年7月



局長的話

教育的目的，不只是傳授知識，更重要的是培養孩子面對未來的能力。隨著人工智慧（AI）、無人機新興科技快速發展，教育更應引導學生從真實情境中探索，STEAM 教育正是實踐這項理念的重要途徑，鼓勵學生透過探究與實作，將課堂所學連結生活經驗，從「學習科技」走向「應用科技」，培養學生自主學習、團隊合作及全球公民素養，迎向快速變遷的新時代。

在眾多新興科技中，無人機兼具科技性、實作性與跨域整合特色，可做為推動 STEAM 教育的學習載體，學生透過無人機飛行操作、程式控制、情境應用及專題製作，進一步思考無人機如何創造更多可能。為此，臺北市於 114 年首度發布「高級中等以下學校無人機教育領航計畫」，補助 23 校共 184 萬元，鼓勵學校開設無人機社團或專題課程，115 年分為基礎學校及進階學校兩類，累計補助 45 校，共計 669 萬元，以校內全面普及無人機教育為核心目標，並首辦「臺北市 AI 無人機教育論壇」，攜手中央、學界、產業及教育界共同擘劃無人機教育發展藍圖，提供學生更多機會接觸與學習無人機科技，拓展無人機多元學習面向。

今年，我們領先全國編撰首套國民小學及國民中學無人機教材，本教材融合 STEAM 教育理念，為不同學齡階段學生適性規劃無人機課程內容，逐步建構對無人機科技的理解與情境應用能力；對教師而言，本教材提供清晰的無人機教學脈絡與實作設計，引導學生於思考與實作中發展多元能力，培養學生主動探索與持續學習的態度，讓無人機教育真正融入學生生活與課堂學習。

本教材的出版，凝聚了臺北市無人機教育中心、教材諮詢委員及種子教師團隊的專業與熱忱，共同打造兼具系統性、實作性與前瞻性的教學資源。期盼本教材成為教師推動無人機教育的重要夥伴，陪伴學生在操作與探究無人機的學習歷程中持續成長，具備面向未來的科技素養與全球視野，共同迎向智慧科技的未來。

臺北市教育局局長 徐士良

謹筆

115 年 7 月

目錄

第 0 章 飛行之前

一 關於本教材手冊	2
二 整體課程架構	2
三 學習進程建議	2
本手冊的使用說明	3

第 1 章 飛行概說

1-1 什麼是無人機？揭開它的面紗	4
📖 學習點 認識你身邊這個新夥伴	4
🕒 知識面 無人機新手知識入門	5
1-2 無人機的發展史——從軍事用途到消費民用	8
📖 學習點 科技的演進，從戰場到你的手中	8
🕒 知識面 無人機百年發展歷程	9

第 2 章 飛行原理

2-1 飛行定理——牛頓運動定律與白努利定律	11
📖 學習點 科學，讓飛翔成真	11
🕒 知識面 兩大物理定律與飛行的關係	12
2-2 飛行四力——升力、重力、推力與阻力	15
📖 學習點 飛行是力的精密對話	15
🕒 知識面 飛行四力詳解與平衡條件	15
2-3 飛行動作——Pitch、Roll、Yaw 與 Throttle	17
📖 學習點 飛行的基本動作	17
🕒 知識面 四種飛行動作控制（四軸飛行器）與三軸關係詳解	18
2-4 飛行控制——飛控系統、感測器與自動穩定（進階參考）	20
📖 學習點 無人機的大腦如何讓飛行變得穩定？	20
🕒 知識面 飛控系統的組成與工作原理	20



第 3 章 飛行機構

3-1	無人機系統架構——機架與整體佈局	24
	📖 學習點 認識無人機的系統架構，理解每個子系統的角色與分工	24
	🔍 知識面 六大子系統的功能定位與相互依存關係	24
3-2	機體設計——機架與材料	25
	📖 學習點 認識無人機的骨架	25
	🔍 知識面 機架的構造、材質與佈局類型	25
3-3	動力與電源系統——電機馬達、螺旋槳、電子調速器、電池	27
	📖 學習點 電機馬達與螺旋槳轉動造成升力與推力？	27
	🔍 知識面 了解整體動力系統的相關構造零件的相關資訊	27
3-4	飛控系統——整合控制的數位大腦	32
	📖 學習點 無人機的大腦如何讓飛行變得穩定？	32
	🔍 知識面 飛控系統的組成、感測器與自動穩定控制原理	32
3-5	通訊系統：頻段與訊號	34
	📖 學習點 無人機如何與地面保持連線與訊號傳遞？	34
	🔍 知識面 控制鏈路與圖傳頻段的特性與訊號干擾應對	34
3-6	酬載系統——無人機附加攜行的任務工作設備	35
	📖 學習點 酬載重量與飛行性能的關係是必須掌握的基礎計算概念	35
	🔍 知識面 飛行任務的目的需求決定酬載系統的相關設計	35

第 4 章 飛行氣象

4-1	風的影響——看不見的推手，風力與風級	37
	📖 學習點 你看不到它，但它決定你能不能飛	37
	🔍 知識面 風的成因、風級與飛行影響	38
4-2	隱形的雲梯——對流與熱氣流	41
	📖 學習點 空氣也有上下起伏的波浪	41
	🔍 知識面 對流的成因、類型與對無人機的影響	42
4-3	消失的視線——溫度、濕度、霧與降水	46
	📖 學習點 當你看不清楚，飛行就危險了	46
	🔍 知識面 溫度、濕度、霧況與飛行能見度	46
4-4	危險的亂流——地形、建築與機械風切	49
	📖 學習點 最難預測的飛行威脅	49
	🔍 知識面 亂流的成因類型與危險地點識別	50



第 5 章 飛行公民

5-1	註冊——無人機的身分證	54
	📖 學習點 你的無人機需要「報戶口」	54
	🔍 知識面 重量分級與機體登錄制度	55
5-2	操作證——你的飛行執照	56
	📖 學習點 會操控，不等於有資格操控	56
	🔍 知識面 操作證分類、考照條件與申請流程	56
5-3	飛行守則——我守法、我驕傲	58
	📖 學習點 打造負責任的飛行	58
	🔍 知識面 禁航與限航、五要五不要	58
5-4	責任飛行——做個優良好飛手	62
	📖 學習點 遙控無人機的飛行倫理與法律責任	62
	🔍 知識面 優良好飛手的幾大面向	62

第 6 章 飛行安全

6-1	人的因素——IMSAFE 自我評估檢核	65
	📖 學習點 最先進的飛行器，也需要最清醒的飛行員	65
	🔍 知識面 IMSAFE 六項自我評估項目	66
6-2	環境覺察——禁限航區與地圖識別	69
	📖 學習點 看懂你周圍的環境，才能做出正確決策	69
	🔍 知識面 飛行前的完整環境評估	69
6-3	自動化危機——當 GPS 與圖傳失效時	74
	📖 學習點 科技幫助你，但你不能完全依賴科技	74
	🔍 知識面 GPS 失效與圖傳中斷的處理	74
6-4	緊急程序——失控、撞擊與火災應變	77
	📖 學習點 希望永遠用不上，但必須知道的應變程序	77
	🔍 知識面 三大緊急狀況應變程序	78



第 7 章 飛行應用

7-1	影像捕捉與空間測繪——從洞察到形塑	82
	📖 學習點 無人機，讓每個人都能擁有上帝視角	82
	🔍 知識面 從空拍到建模，智慧看世界	82
7-2	物資運送與負載——迅速送達，智慧運輸	84
	📖 學習點 無人機正在改寫產業的運作方式	84
	🔍 知識面 讓物資更快到達，讓任務更有效率	84
7-3	環境感測與數據擷取——傾聽環境的聲音	87
	📖 學習點 從大自然蒐集數據，守護地球環境	87
	🔍 知識面 用數據看見環境，用科技守護未來	87
7-4	通訊中繼與群體協作——建構空中網路，實現群體合作	88
	📖 學習點 從單機運作到群體協同	88
	🔍 知識面 智慧通訊與協同作業	89

第 8 章 飛行實務

8-1	專題一 天空的法律——台灣無人機法規概覽	92
8-2	專題二 任務設計與需求分析	94
8-3	專題三 硬體改裝與酬載測試	96
8-4	專題四 編隊飛行與自動執行	98
8-5	專題五 策展與溝通——成果發表技術	100



第0章 飛行之前

Before You Fly

—— 課程架構總覽與學習導引 ——

踏上飛行學習旅程之前

《臺北市無人機教育進階教材》是由臺北市無人機教育中心專為國民中學 7 至 9 年級同學設計的系統性學習課程，以「四軸飛行器無人機」為核心研討對象。從認識無人機的誕生背景，到理解它如何在物理原理的支撐下飛翔；從學會正確操控，到懂得在法規與安全規範下負責任地飛行——這套課程將陪伴你一步一步，從一位好奇的旁觀者，成長為具備知識與技能的無人機學習者。

第0章「飛行之前」是整套課程的起點與手冊地圖。在這裡，你將看到這趟學習旅程的完整面貌：我們將為何而學、學習什麼、如何學習，為什麼這些知識對你有意義。就像每一次飛行前都需要做好的「飛行前檢查」，在正式展開學習之前，讓我們先做好準備，對整個課程有清晰的認識。



一 關於本教材手冊

本手冊由臺北市無人機教育中心編製，專為臺北市國民中學 K7 至 K9 階段學生設計，符合 108 課綱自然科學領域核心素養精神，結合理論知識與實作技能，培養學生具備「科學理解、技術應用、法規認知、安全意識」四大面向的無人機素養。

本手冊以「四軸飛行器（Quadcopter）無人機」作為貫穿全書的主要研討機種，從認識、理解、操控到實作，循序漸進地引導學習，完整涵蓋無人機教育的核心內容。

二 整體課程架構

本手冊共規劃 9 個章節（第 0 章至第 8 章），各章依主題獨立成篇，彼此關聯，形成整體學習知識：

章次	章節名稱	學習核心內容
第 0 章	飛行之前	課程架構總覽、學習導引、使用說明與學習準備
第 1 章	飛行概說	無人機的定義、種類分類、發展歷史與人員定義
第 2 章	飛行原理	飛行定律、飛行四力、飛行姿態、飛行控制
第 3 章	飛行機構	機體結構、馬達、ESC、電池、螺旋槳各部件介紹
第 4 章	飛行氣象	影響飛行的氣象因素：風速、溫度、能見度、雨霧雷電判斷
第 5 章	飛行公民	臺灣無人機相關法規、飛航管制空域、報備申請與罰則認識
第 6 章	飛行安全	飛行前中後安全檢查、緊急狀況處置、飛行倫理與責任
第 7 章	飛行應用	航拍攝影、科學研究、娛樂休閒、軍事國防
第 8 章	飛行實務	模擬器操作、室內基礎飛行、戶外任務飛行與綜合評量

三 學習進程建議

本手冊各章節建議依序學習，理論章節（第 1 至第 6 章）為實作課程（第 7 章）的基礎。建議學習路徑如下：

學習階段	認識階段	理解階段	應用階段
涵蓋章節	第 0 章、第 1 章	第 2 章、第 3 章、第 4 章	第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章
學習重點	建立無人機基本概念與學習動機	深入理解飛行科學與機械原理	整合知識於實際合法安全飛行

四 本手冊的使用說明

本手冊每一章節均依照統一格式編排，方便學生自學與教師授課：

1. **【學習點】** 每節開頭以敘述性文章引導學習動機，說明本節的學習目的與重要性。
2. **【知識面】** 主要學習內容，以主題標題搭配詳細說明文章呈現，包含圖表輔助理解。
3. **【重點精華】** 每節結尾的重點精華整理，以條列方式呈現，適合複習與考前準備。

叮嚀點 | 學習前的重要提醒

1. 本手冊以「四軸飛行器」為主要研討對象，所有原理與操作說明均以此機型為基礎。
2. 無人機是科技工具，也是需要負責任使用的設備——學習法規與安全和學習飛行技術同等重要。
3. 建議循序漸進，不跳過理論章節直接進入實作，扎實的知識基礎是安全飛行的保障。
4. 每章結尾的「重點精華」是考試與評量的重要參考，請務必仔細閱讀。
5. 實作課程（第 7 章）需在教師或合格教練的指導下進行，請勿獨自嘗試進階飛行動作。
6. 本手冊內容符合中華民國現行無人機相關法規（以最新公布版本為準），操作前請確認法規現況。

對應點 | 整體課程與國中課綱的銜接說明

本手冊整體課程設計，與 108 課綱「自然科學領域」及「科技領域」之學習主題具有高度對應性：

手冊章節	對應領域	課綱核心素養對應
第 1 章 飛行概說	自然科學、科技	科技本質、科技與社會發展的關係
第 2 章 飛行原理	自然科學（物理）	力與運動、牛頓定律、能量轉換
第 3 章 飛行機構	自然科學、科技	電與磁、機械系統設計與整合
第 4 章 飛行氣象	自然科學（地球科學）	天氣與氣候、大氣現象的觀測與應用
第 5 章 飛行公民	社會領域、科技與社會	公民責任、法治意識、科技倫理
第 6 章 飛行安全	健體、科技與社會	安全意識、風險評估與危機處理
第 7 章 飛行應用	科技、自然科學	航拍攝影、科學研究、娛樂休閒、軍事國防
第 8 章 飛行實務	科技、自然科學	動手實作、問題解決、跨領域統整應用

透過本課程的學習，學生不僅能掌握無人機的操作技能，更能從科學、科技、社會與人文的多元視角，理解無人機在現代社會中的角色與責任。

準備好了嗎？讓我們一起向天空飛翔去

第 1 章 飛行概說

飛向雲端 —— 無人機概說



1-1 什麼是無人機？揭開它的面紗

學習點 | 認識你身邊這個新夥伴

你或許在公園、海邊、甚至學校操場上，見過有人操控著一台嗡嗡作響、懸浮在空中的飛行器。那就是「無人機」——一種不需要人坐在裡面就能飛行的航空器。

無人機到底是什麼？它和我們印象中的飛機、直升機有什麼不同？當你真正了解它是什麼、由哪些部分組成，後續的飛行原理、操控技術、氣象、法規及使用安全，才能一一串聯起來，形成完整的知識體系。

🔍 知識面 | 無人機新手知識入門

一 無人機的定義

無人機（Unmanned Aerial Vehicle，簡稱 UAV），又稱「無人飛行載具」，是指不需搭載人類駕駛員、可透過遠端遙控或自動程式操控的飛行器。依據中華民國《遙控無人機管理規則》，無人機被定義為：「以無線電遙控或自動飛行方式，在無人駕駛下操作飛行之航空器。」

廣義的無人機涵蓋固定翼無人機、直升機式無人機、多旋翼無人機等多種類型；本課程以應用最廣泛、技術最成熟的「四軸飛行器（Quadcopter）」作為主要研討對象。

二 無人機的主要分類

無人機之分類



種類	代表形式	主要特點
固定翼無人機	飛機造型	優點：飛行速度快、續航力強，適合大範圍巡邏與測繪 缺點：起飛需要跑道或助推裝置、不能停在空中
旋翼無人機	直升機造型 （單旋翼）	優點：可垂直起降，空中懸停、操控靈活 缺點：結構較複雜、維修費高
多旋翼無人機	四軸／六軸／八軸	優點：可垂直起降，空中懸停、穩定性高、操控簡單、適合入門學習 缺點：載重較小、飛行時間較短
混合型無人機	垂直起降固定翼	優點：結合固定翼與多旋翼無人機優點，技術較先進 缺點：成本較高

三 無人機基本系統組成

無人機的基本系統組成了一架無人機的「骨架、心臟、大腦與神經」。以下是針對這四項基本組成的簡要介紹：

① 機體架構 (Airframe)

機體架構是無人機的**物理主體（骨架）**，負責承載所有零組件。它通常包含機體與機臂，設計重點在於「輕量化」與「結構強度」的平衡。常見材質包括碳纖維、塑膠、金屬或複合材料等，以減輕重量並延長飛行時間。良好的機體設計必須考量空氣動力學，減少飛行阻力，並具備足夠的抗震能力，以保護內部的精密感測器。

② 動力能源 (Propulsion System)

動力系統如同無人機的**心臟**，由能源（通常為鋰聚合物電池或航空燃油）、電子調速器（ESC）、馬達與螺旋槳組成。電子調速器負責接收控制訊號並分配電流，驅動馬達旋轉螺旋槳進而產生升力。能源的效率直接決定了續航力與負載能力，是目前無人機技術發展中最具挑戰性的部分，需要精密的電力管理以維持飛行穩定。

③ 飛行控制 (Flight Controller)

飛行控制系統（FC）是無人機的**大腦**。它整合了陀螺儀、加速度計、氣壓計及衛星定位計（GPS）等感測器，每秒進行千百次運算，以維持機身的動態平衡。當環境（如強風）干擾飛行狀態時，系統感測後會自動調整各個馬達的轉速來修正姿態。它也負責執行預設航點、自動返航等智能化飛行任務。

④ 通訊傳輸 (Communication System)

通訊傳輸系統是無人機與操縱者之間的**神經連接**，通常包含遙控接收器（地面控制站）與圖傳系統。系統可利用無線通信頻率（如 2.4GHz 或 5.8GHz）來傳遞操控指令與即時影像數據。穩定的通訊不僅能確保遠距操作的精準度，更是安全飛行的關鍵，一旦斷訊，系統通常會啟動失控保護機制以確保無人機安全降落。

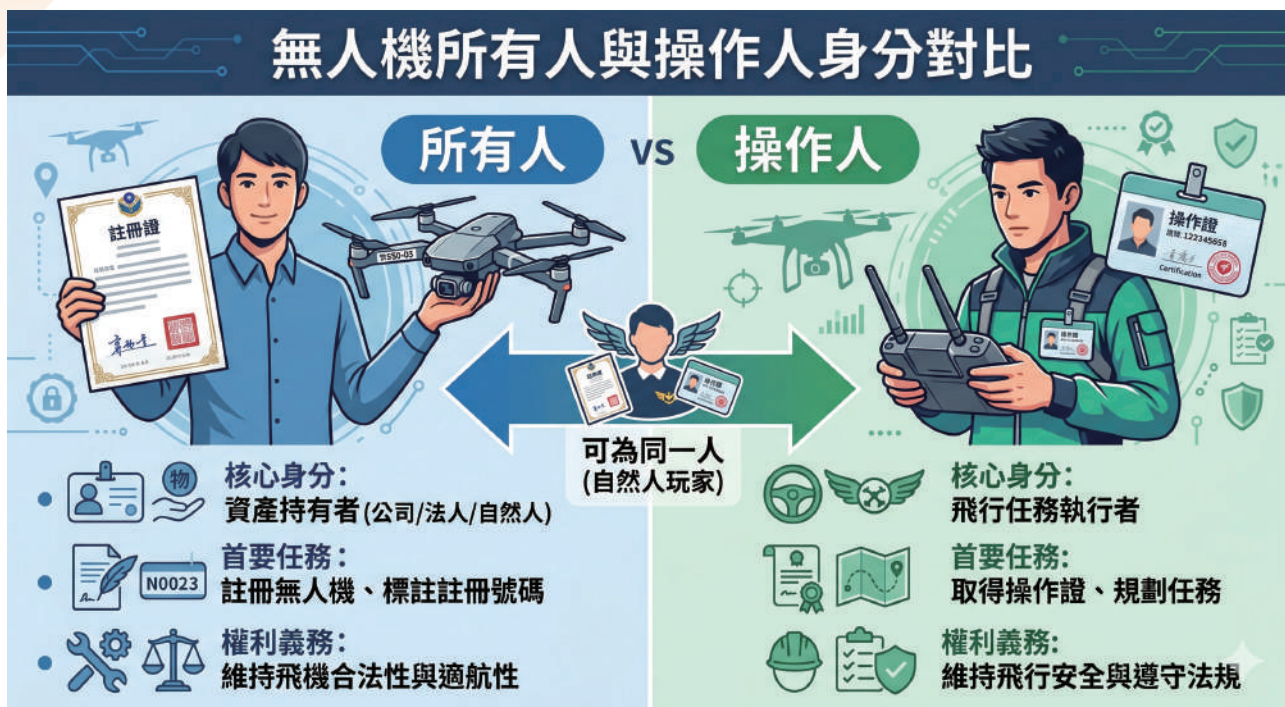


四 飛行團隊人員組成

雖然名為「無人」，但「人」才是飛行安全的靈魂。從規劃到落地，所有指令皆源於人的判斷。根據中華民國《民用航空法》以及《遙控無人機管理規則》，對於「所有人」與「操作人」有明確的法律界定與義務區分：

- **所有人**：是指擁有遙控無人機產權的自然人（個人）、法人（公司）、政府機關或學校。他們對無人機負有妥善維護、註冊及安全飛航的責任。
- **操作人**：必須依據無人機的重量與用途（休閒或商業／政府），取得相對應的遙控無人機操作證（例如：普通操作證或專業操作證），是實際操控無人機的人，必須遵飛行安全規範，確保操作過程不會危及地面人員或財產的安全。若操作人有二人以上，起飛前必須先確認好誰有唯一的遙控無人機之處置的最後決定權，以確保指揮權統一。

所有人與操作人的關係可以為同一人，即自行購買、自行操作，也可以為不同人，例如法人（公司）購買無人機（所有人），聘請飛手（操作人）執行業務。此時，所有人與操作人均需對該項飛行活動負責。



✧ 1-1 重點精華

1. 無人機（Unmanned Aerial Vehicle，簡稱 UAV），不需人類駕駛員在機內操控。
2. 四軸飛行器（Quadcopter）是本課程主研對象，屬於多旋翼無人機的一種。
3. 無人機人員有操作人、所有人
4. 多旋翼無人機的優勢：穩定性高、可垂直起降、操控學習門檻相對低。

1-2 無人機的發展史——從軍事用途到消費民用

📖 學習點 | 科技的演進，從戰場到你的手中

你手中這台小巧的四軸飛行器，背後有著超過一個世紀的科技演進歷史。從第一次世界大戰時期的軍事實驗，到冷戰年代的偵察任務，再到今日隨處可見的消費型無人機，無人機的發展史，就是一部科技如何從軍事應用走向民間普及的精彩故事。

了解這段歷史，不只是認識過去，更是理解「科技為什麼存在、如何演進、對社會產生什麼影響」的最佳學習素材。

🔍 知識面 | 無人機百年發展歷程

一 軍事起源時期（1910 年代～1990 年代）

無人機的最早概念出現於第一次世界大戰（1914～1918 年）。1916 年，英國工程師阿奇博爾德·洛（Archibald Low）研發了第一架遙控飛行器 AT（Aerial Target），用於作為防空砲兵的練習靶機。這是人類歷史上第一架成功飛行的遙控飛行器。

二次世界大戰期間，無人靶機廣泛應用於各國軍事訓練。冷戰時期，美國開發出多款偵察型無人機，大量用於越戰期間的情報蒐集任務，奠定了現代無人機軍事應用的基礎。

二 科技突破時期（2000 年代）

進入 21 世紀，微電子技術、GPS 全球定位系統、微機電感測器的成熟，讓無人機的小型化、智慧化成為可能。2001 年後，無人機在戰爭中大量使用，展現了無人機在現代戰爭中的關鍵地位。

與此同時，民間研究者開始嘗試將這些軍事技術轉化為民用。飛行社群的興起，讓自製多旋翼飛行器成為全球玩家的熱門興趣。

三 消費普及時期（2010 年代至今）

無人機不再是軍方的專利，在民間的應用多元發展。

多旋翼無人機的崛起，以前無人機像小飛機（固定翼），現在常見的是四軸無人機。這種設計操作簡單，無人機價格變得更便宜，大家有能力以合理的價格購置並應用於商業與消費。2010 年，全球第一款消費型四軸飛行器，可用智慧型手機操控，2013 年，穩定的雲台相機與易用操控介面，將空拍無人機帶入一般消費市場。

2015 年後，無人機進入爆炸性成長期。全球無人機年出貨量突破百萬台，應用領域從休閒娛樂迅速擴展至農業、建築、救災、快遞等各行各業。臺灣也在 2017 年起陸續建立無人機相關法規，正式將無人機納入民用航空管理體系。

無人機發展史：從軍事起源到民用普及

• 無人機三階段發展示意圖 •



無人機從軍事工具，逐步發展成為日常生活與產業應用的重要科技。



✧ 1-2 重點精華

1. 無人機最早起源於第一次世界大戰，作為防空訓練靶機使用。
2. 冷戰時期美軍大量使用偵察型無人機，奠定現代無人機的軍事應用基礎。
3. 2000 年代，GPS、感測器的成熟是無人機小型化的關鍵技術突破。
4. 2010 年消費型四軸飛行器問世，是無人機從軍事走向消費普及的重要里程碑。
5. 臺灣於 2017 年起建立無人機相關法規，操作無人機須遵守現行法律規範。

準備好了嗎？

下一章，我們將深入無人機的飛行物理世界！

—— 第 1 章結束 請翻至第 2 章飛行原理 ——

第2章 飛行原理

飛行秘密——基礎飛行原理



2-1 飛行定理——牛頓運動定律與白努利定律

學習點 | 科學，讓飛翔成真

機體加上旋轉的螺旋槳，就能克服地球重力，在空中自由飛翔——這看似神奇的事情，背後其實是兩位物理學巨人在幾百年前就已建立的定律在運作：牛頓（Isaac Newton）與白努利（Daniel Bernoulli）。

牛頓三大運動定律，是整個古典力學的基石，也是解釋無人機如何飛行的核心框架。而白努利定律，則告訴我們「流動的流體，速度越快，壓力越小」——這是空氣繞過翼面、產生升力的根本原理。

你在自然課學過的這些知識，在這裡將以全新的方式復活。當你下次看著無人機騰空而起，腦海中將不再只是「好酷」，而是能清晰看見物理定律如何在每一秒鐘精準運作。

知識面 | 兩大物理定律與飛行的關係

一 牛頓運動第一定律 —— 慣性定律

「一個物體，若沒有外力作用，將保持靜止或等速直線運動的狀態。」

對無人機而言，這意味著：靜止的無人機不會自己飛起來，需要螺旋槳產生向上的力才能升空；而在空中飛行的無人機，若所有力達到平衡，將維持穩定的飛行狀態。飛控板持續調整馬達轉速，正是為了維持這種動態平衡。



二 牛頓運動第二定律 —— 加速度定律

「物體的加速度，與作用在物體上的合力成正比，與物體質量成反比。」公式為：
 $F = ma$ (力 = 質量 × 加速度)

這條定律直接說明了無人機的重量（質量 m ）與所需升力（力 F ）之間的關係。無人機越重，需要的升力越大；螺旋槳轉速越快，產生的力越大，加速度越大，無人機上升越快。這也是為什麼無人機載重越多，飛行時間就越短的原因——馬達需要更大功率輸出更大的力，消耗更多電能。

$$\text{合力} = \text{質量} \times \text{加速度}$$

$$F = m \times a$$

F ：合力（單位：牛頓 N）
 m ：質量（單位：公斤 kg）
 a ：加速度（單位：公尺/秒² m/s²）



1 合力產生加速度，改變運動狀態



2 合力越大，加速度越大（質量固定）



3 質量越大，加速度越小（合力固定）



三 牛頓運動第三定律——作用力與反作用力定律

「每一個作用力，都有一個大小相等、方向相反的反作用力。」

這是無人機升力產生的最直接解釋：螺旋槳高速旋轉，向下推送大量空氣（作用力），空氣便以相同大小的力向上推動螺旋槳（反作用力），這個向上的反作用力就是「升力（Lift）」。四顆螺旋槳的升力總和超過無人機重量時，無人機即可升空。



作用力與反作用力 **大小相等、方向相反**，且作用在 **不同物體上**。

1 旋翼向下推空氣（作用力）

空氣向上推無人機（反作用力）



2 無人機向後推空氣（作用力）

空氣向前推無人機（反作用力）



3 無人機向左推空氣（作用力）

空氣向右推無人機（反作用力）



4 排出空氣向下（作用力）

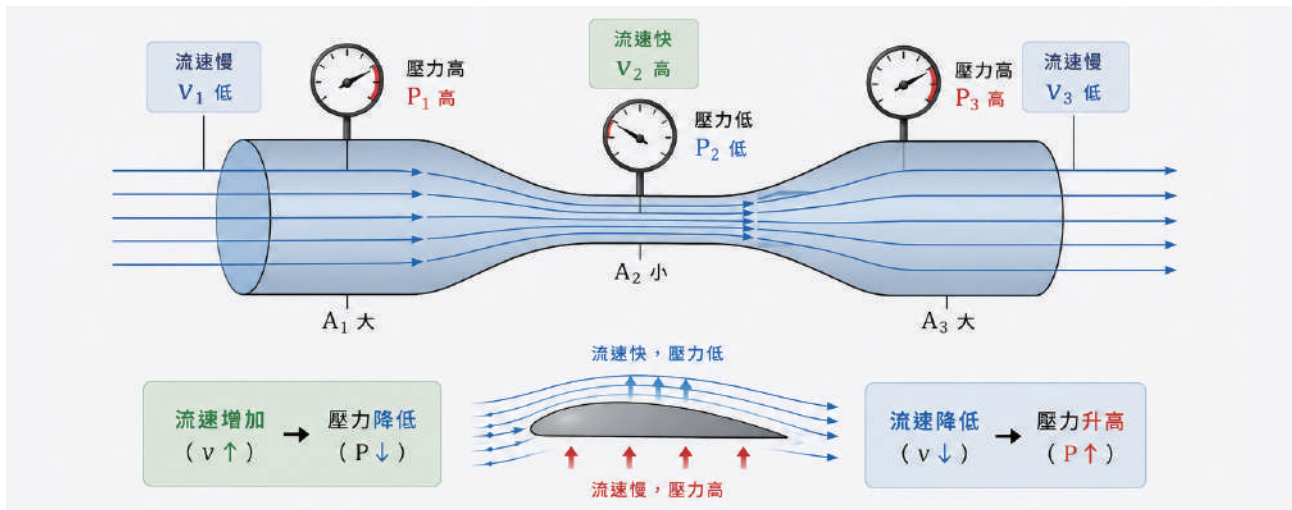
空氣向上推無人機（反作用力）



四 白努利定律——壓力與速度的關係

白努利定律：在一個流動的流體（如空氣）中，流速越快的地方，壓力越低；流速越慢的地方，壓力越高。

螺旋槳的葉片設計與機翼（Airfoil）類似，具有特殊的弧形截面。當空氣通過螺旋槳時，流過弧形上方的空氣速度較快（壓力較低），流過平坦下方的空氣速度較慢（壓力較高）。這個上下的壓力差，額外增加了向上的升力，配合牛頓第三定律的推力，共同使無人機騰空飛起。



定律名稱	核心概念	在無人機飛行中的應用
牛頓第一定律（慣性）	無外力則維持原狀態	飛控板持續修正，維持無人機動態平衡
牛頓第二定律（ $F=ma$ ）	力越大加速越快	無人機重量 $\uparrow$ $\rightarrow$ 需要升力 $\uparrow$ $\rightarrow$ 消耗電量 $\uparrow$
牛頓第三定律（反作用力）	作用力 = 反作用力	螺旋槳下推空氣 $\rightarrow$ 空氣上推產生升力
白努利定律	速度快 $\rightarrow$ 壓力低	螺旋槳弧形截面產生壓力差，增加升力

✧ 2-1 重點精華

1. 牛頓第一定律：無外力 $\rightarrow$ 維持靜止或等速直線運動，飛控板調整馬達維持無人機動態平衡。
2. 牛頓第二定律： $F = ma$ ，無人機越重需要越大的升力，耗電越多、飛行時間越短。
3. 牛頓第三定律：螺旋槳向下推氣（作用力） $\rightarrow$ 空氣向上推螺旋槳（反作用力） = 升力。
4. 白努利定律：流速快 $\rightarrow$ 壓力低；螺旋槳弧形截面上下壓力差額外增加升力。
5. 無人機飛行是牛頓定律與白努利定律「共同作用」的結果，缺一不可。
6. 載重越重 $\rightarrow$ 需要更大馬達功率 $\rightarrow$ 電池消耗更快 $\rightarrow$ 飛行時間縮短。

2-2 飛行四力——升力、重力、推力與阻力

學習點 | 飛行是力的精密對話

任何一個飛行中的物體，同時都有四種力在作用：升力（Lift）、重力（Gravity）、推力（Thrust）與阻力（Drag）。飛行，就是在這四種力的動態博弈中找到平衡點的過程。

對四軸飛行器而言，這四種力的平衡方式與固定翼飛機不同——它沒有機翼產生升力，而是完全依靠四顆螺旋槳的旋轉，同時產生升力與推力。理解這四種力如何相互影響，是掌握無人機飛行行為的關鍵。

這一節的內容，與你在自然課學習的「合力」概念直接對應。不同方向的力相加，最終決定物體的運動狀態——這在無人機上，被飛控板以每秒數百次的運算精確地實現。

知識面 | 飛行四力詳解與平衡條件



一 升力（Lift）——對抗重力的向上力

升力是由螺旋槳旋轉產生的、方向向上的力。四軸飛行器的四顆螺旋槳同時高速旋轉，向下推送大量空氣，依據牛頓第三定律與白努利定律，產生總合的向上升力。升力的大小由螺旋槳的轉速、槳葉面積與空氣密度共同決定。

公式記憶：轉速越快 → 升力越大；高海拔空氣稀薄 → 相同轉速的升力較小。

二 重力（Gravity）——無時不在的向下力

重力是地球對無人機的引力，方向垂直向下，大小等於無人機質量乘以重力加速度（ $g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$ ）。重力是固定且恆常的——只要無人機在地球上，重力就永遠存在，不受飛行姿態或速度影響。

懸停條件：升力 = 重力（合力為零，加速度為零，無人機維持靜止高度）

三 推力（Thrust）——水平移動的驅動力

對四軸飛行器而言，推力並非獨立的水平力，而是由螺旋槳升力向量傾斜所產生的水平分量。當無人機向前傾斜（Pitch），升力方向偏離垂直，其水平分量便成為向前的推力，驅動無人機前進。傾斜角度越大，水平分量越大，無人機前進速度越快。

關鍵觀念：四軸飛行器的「推力」來自於機身傾斜後升力向量的水平分量，而非另有單獨的推進裝置。

四 阻力（Drag）——與運動方向相反的空气阻力

阻力是空氣對飛行中無人機的摩擦與阻礙力，方向始終與無人機運動方向相反。速度越快，阻力越大（阻力與速度平方成正比）。機體形狀越流線，阻力越小，這也是為什麼競速無人機外殼設計較為流線，而攝影無人機為了穩定性會接受較大阻力。

力的名稱	方向	大小決定因素	在四軸飛行器的表現
升力 Lift	↑ 向上	螺旋槳轉速、槳葉面積、空氣密度	四顆螺旋槳旋轉產生的向上合力
重力 Gravity	↓ 向下	機體總重量（固定值）	$g=9.8\text{m/s}^2$ ，恆常向下，不受姿態影響
推力 Thrust	→ 水平 （運動方向）	機身傾斜角度	升力向量傾斜後的水平分量
阻力 Drag	← 與運動反向	飛行速度、機體形狀	與速度平方成正比，限制最大飛行速度

五 四力平衡的四種狀態

飛行狀態	力的關係	無人機行為
懸停（Hover）	升力 = 重力；推力 = 阻力	靜止懸浮在固定高度，不上升不下降
加速上升	升力 > 重力	無人機向上加速爬升
等速前進	推力 = 阻力；升力 = 重力	保持固定高度與速度向前飛行
減速下降	升力 < 重力	無人機向下降落

2-2 重點精華

1. 飛行的四大力：升力（↑）、重力（↓）、推力（→）、阻力（←運動反向）。
2. 懸停條件：升力 = 重力（垂直方向合力為零），推力 = 阻力（水平方向合力為零）。
3. 四軸飛行器的「推力」是升力向量傾斜後的水平分量，不是獨立的推進裝置。
4. 阻力與速度平方成正比：速度加倍 → 阻力變為四倍。
5. 高海拔空氣密度較低 → 相同轉速產生的升力較小，飛行效率下降。
6. 競速無人機流線外形是為了降低阻力；攝影無人機接受較大阻力以換取穩定性。

2-3 飛行動作——Pitch、Roll、Yaw 與 Throttle

學習點 | 飛行的基本動作

無人機遙控器有兩支搖桿，搖桿可往上下左右推動。四個方向的推動，對應的是控制無人機的四種基本動作：俯仰（Pitch）、翻滾（Roll）、偏航（Yaw）與油門（Throttle）。

這四個英文詞彙，是全球無人機操作者共通的「飛行語言」。不論你用的是哪個品牌的無人機，不論在哪個國家，這四個控制軸的定義都是一致的。學會它們，你就掌握了與無人機「溝通」的基本術語。

四種動作背後，是四顆螺旋槳轉速的精密組合——飛行控制單元在毫秒之間計算出最佳轉速分配，將搖桿指令轉化為流暢的飛行動作。理解這個原理，操控能力將從「會玩」提升到「真正懂飛」。



🔍 知識面 | 四種飛行動作控制（四軸飛行器）與三軸關係詳解

一 油門（Throttle）——控制高度（上升下降）

油門控制四顆螺旋槳同時加速或減速，決定無人機的飛行高度。

- 推桿向上（油門加大）→ 四顆馬達同時加速 → 總升力增加 → 升力 > 重力 → 無人機上升。
- 推桿向下（油門減小）→ 四顆馬達同時減速 → 總升力減少 → 升力 < 重力 → 無人機下降。
- 維持中立位置 → 升力 = 重力 → 無人機懸停在當前高度。
- **控制軸**：垂直軸（Z 軸） | 螺旋槳變化：四顆同步加速或減速。

二 俯仰（Pitch）——控制前後移動（前進後退）

俯仰控制無人機機身向前或向後傾斜，產生前後方向的水平推力，使無人機前進或後退。

- 搖桿向前（前俯）→ 前方兩顆馬達減速 → 機身前傾 → 升力向量向前偏斜 → 水平分力向前 → 無人機前進。
- 搖桿向後（後仰）→ 後方兩顆馬達減速 → 機身後仰 → 升力向量向後偏斜 → 水平分力向後 → 無人機後退。
- **控制軸**：橫向水平軸（Y 軸） | 螺旋槳變化：前側或後側兩顆馬達相對速度調整。

三 翻滾（Roll）——控制左右移動（側飛）

翻滾控制無人機機身向左或向右傾斜，使無人機向左或向右側移。原理與俯仰相同，但傾斜方向不同。

- 搖桿向左（左滾）→ 左方兩顆馬達減速 → 機身左傾 → 升力向量向左偏斜 → 水平分力向左 → 無人機左移。
- 搖桿向右（右滾）→ 右方兩顆馬達減速 → 機身右傾 → 升力向量向右偏斜 → 水平分力向右 → 無人機右移。
- **控制軸**：縱向水平軸（X 軸） | 螺旋槳變化：左側或右側兩顆馬達相對速度調整。

四 偏航（Yaw）——控制原地旋轉方向（轉彎）

偏航控制無人機在水平面上的旋轉方向（機頭朝向），不改變位置，只改變機身朝向。

偏航的實現原理與前三種動作不同，它利用的是「反扭矩（Reaction Torque）」原理：四軸飛行器中，對角線方向的兩顆螺旋槳為順時針（CW），另兩顆為逆時針（CCW）。正常飛行時，CW 與 CCW 的扭矩相互抵消，機身保持穩定方向。

當需要偏航時，飛控板加速一側對角線的兩顆 CW 螺旋槳、減速另一側 CCW 螺旋槳（或反之），使 CW 與 CCW 的扭矩失去平衡，多餘的扭矩就帶動機身旋轉。

● 控制軸：垂直軸旋轉（Z 軸旋轉） | 螺旋槳變化：對角線 CW 與 CCW 轉速差產生偏航。

控制名稱	英文	控制軸	螺旋槳動作
油門	Throttle	垂直軸 Z ↓	四顆同時加速（上升）或減速（下降）
俯仰	Pitch	橫向軸 Y（前後傾）	前側或後側兩顆相對減速，機身前後傾斜
翻滾	Roll	縱向軸 X（左右傾）	左側或右側兩顆相對減速，機身左右傾斜
偏航	Yaw	垂直軸旋轉 Z ⤵	對角線 CW 與 CCW 轉速差，產生機身旋轉

✧ 2-3 重點精華

- 1. 四大控制：油門（Throttle）、俯仰（Pitch）、翻滾（Roll）、偏航（Yaw）。
- 2. Throttle：四顆馬達同時加減速 → 控制高度（上升 / 下降）。
- 3. Pitch：前後側馬達轉速差 → 機身前後傾斜 → 升力水平分量 → 前進 / 後退。
- 4. Roll：左右側馬達轉速差 → 機身左右傾斜 → 升力水平分量 → 左移 / 右移。
- 5. Yaw：對角線 CW 與 CCW 馬達轉速差 → 反扭矩失衡 → 機身原地旋轉。
- 6. 前進、後退、左移、右移都是透過「機身傾斜」實現，而非額外推進裝置。
- 7. 偏航（Yaw）是四種控制中唯一利用「反扭矩」原理的動作，最特別！

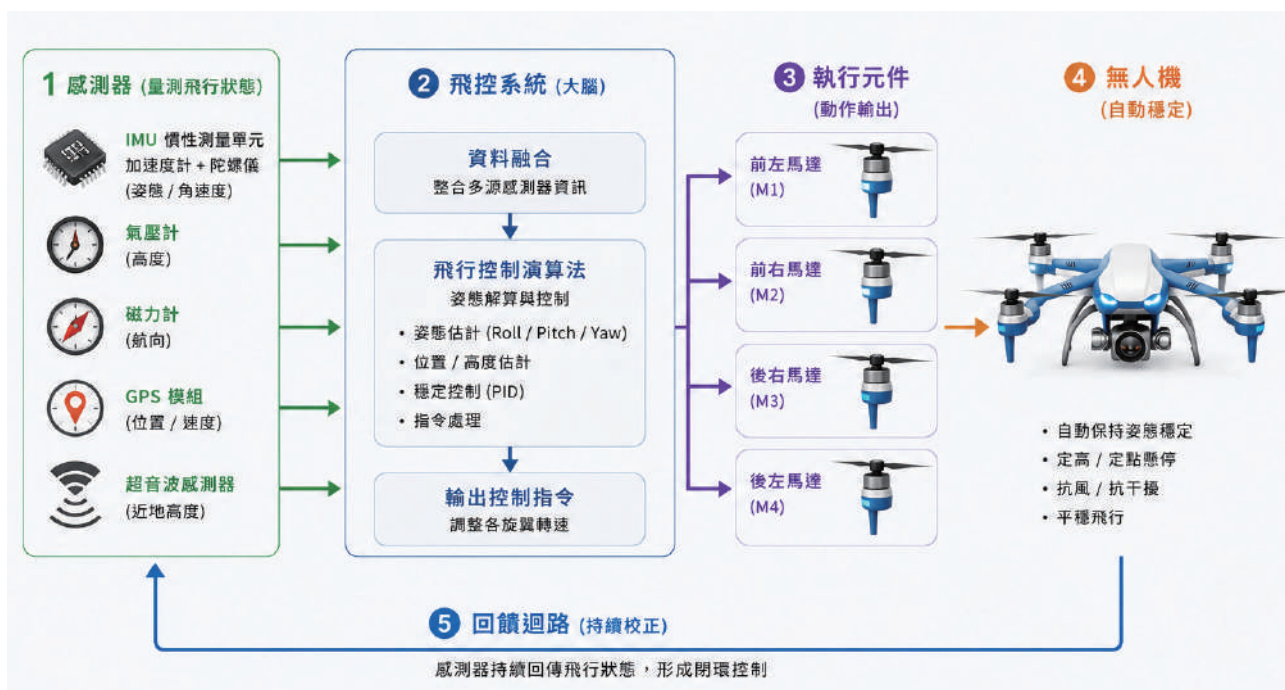
2-4 飛行控制——飛控系統、感測器與自動穩定（進階參考）

學習點 | 無人機的大腦如何讓飛行變得穩定？

你有沒有想過，為什麼現代的消費型無人機，即使是新手第一次操作，也能相對穩定地飛行？在早期的遙控飛機年代，飛行是非常困難的技術——稍有不慎就會墜機。

這個改變，源自於「飛控系統（Flight Controller System）」的誕生。飛控系統是無人機的數位大腦，它整合多種感測器的即時資料，以每秒數百次的運算頻率，自動調整四顆馬達的轉速，讓無人機在各種干擾下（如陣風、重心偏移）仍能保持穩定飛行。

這一節，我們將了解飛控系統的三層組成、感測器的種類，以及 PID 控制演算法這個讓無人機能夠「自我修正」的自動控制機制。



知識面 | 飛控系統的組成與工作原理

飛控系統三層架構

飛控系統可分為三個層次：感知層（Sensing）、決策層（Processing）、執行層（Actuating）。

層次	組成元件	功能
感知層	陀螺儀、加速度計、氣壓計、GPS、磁力計	蒐集機身姿態、高度、位置等即時狀態資料
決策層	飛控板 MCU 處理器、PID 演算法	整合感測器資料與操作指令，計算各馬達所需轉速
執行層	ESC × 4、無刷馬達 × 4	接收飛控板指令，輸出對應電流控制馬達轉速

飛控系統整合多種感測器資料，以 PID 演算法每秒數千次修正機體姿態；通訊系統是無人機的「神經」，負責在操作員與無人機之間傳遞控制指令與狀態回饋。兩者共同確保無人機能被精準操控並安全飛行。

 主要感測元件

感測器名稱	英文名稱	功能說明
陀螺儀	Gyroscope	偵測機身在三個軸向的旋轉角速度，是飛行穩定最核心的感測器
加速度計	Accelerometer	偵測機身在三個軸向的加速度，輔助判斷傾斜角度與移動狀態
氣壓計	Barometer	偵測大氣壓力變化，計算飛行高度，實現定高功能
GPS 模組	GPS Module	提供全球定位座標，實現定點懸停、自動返航、航點飛行
磁力計	Magnetometer (Compass)	偵測地磁場方向，提供機頭朝向（航向）資訊
超音波 / 視覺感測器	Ultrasonic / Vision	近地面障礙物偵測，提供低空精確高度與避障功能

 PID 控制演算法——自動修正的原理

PID 控制是飛控系統的核心演算法，由三個部分組成：比例（Proportional）、積分（Integral）、微分（Derivative）。概念可以用生活中騎腳踏車來對比理解：

想像你在騎腳踏車，想要直線前進，但風把車吹歪了：

- P（比例）：偏離越多，修正越大——感覺偏移了多少就轉動多少的方向手把的轉向角度。
- I（積分）：持續偏向同一邊時，累積修正量——當強風持續往一個方向吹，就持續調整方向。
- D（微分）：預測修正的趨勢，避免過度修正震盪——修正動作太猛會讓車子反向歪掉，須提前收力。

三者合作，讓飛控板在面對陣風或強風、重心偏移等干擾時，能快速且精準地讓無人機回到正確飛行狀態，避免過衝或震盪。PID 參數的調校（Tuning），也是無人機進階技術中重要的一環，而進一步硬體的說明在第 3 章再更詳細探討。

四 飛行模式

現代無人機飛控系統通常提供多種飛行模式，適合不同程度的操作者：

飛行模式	英文名稱	特點與適用對象
姿態模式	Attitude / ATTI Mode	GPS 輔助定位，鬆開搖桿自動懸停，適合初學者
GPS 模式	GPS Mode	完整 GPS 定點懸停、自動返航（RTH），最穩定
手動模式	Manual / Acro Mode	關閉自動穩定，完全依賴操作者技術，適合競速進階
跟隨模式	Follow Me Mode	自動跟隨操作者移動，適合運動攝影

✧ 2-4 重點精華

1. 飛控板是無人機的數位大腦，每秒執行超過 500 次感測→運算→調整的控制循環。
2. 六大感測器：陀螺儀（旋轉）、加速度計（傾斜）、氣壓計（高度）、GPS（位置）、磁力計（方向）、超音波（近地避障）。
3. PID 控制三要素：P（比例）= 偏多少修多少；I（積分）= 累積偏差修正；D（微分）= 預防過衝震盪。
4. 陀螺儀是飛行穩定最關鍵的感測器，偵測機身在 X/Y/Z 三軸的角速度。
5. GPS 模式是消費型無人機最穩定的飛行模式，提供定點懸停與自動返航功能。
6. 初學者應從 GPS 模式或姿態模式開始練習，切勿直接嘗試手動模式（Acro Mode）。

飛行的物理秘密，你已掌握！

下一章，我們將深入飛行器的機械構造世界。

—— 第 2 章結束 請翻至第 3 章飛行機構 ——

第3章 飛行機構

拆解無人機——認識每一個關鍵部件

如果把一架小型四軸無人機解開固定結構的螺絲，仔細看看內部簡單的組件構造，會發現它的每一個零件都有其重要性。這是四軸無人機工程設計之巧妙組合：飛行器在機體重量、結構強度、飛行效能與組建成本之間達成最佳性價平衡點。

一架能夠穩定飛行並執行任務的無人機，是由五大子系統共同構成的精密工程系統。機體系統提供結構骨架，動力與電源系統產生飛行所需的力與提供電能，飛控與通訊系統讓機器能感知、思考並接受操控，酬載系統則讓無人機賦予飛行之外的功能，執行各種實際任務。

本章以「五小節」逐一拆解多軸旋翼無人機五大核心（六大子系統），帶你學習機架設計的工程思維、讀懂馬達編號與電池規格標示、了解感測器如何協同運作，並認識三種不同飛行模式的差異。這些知識不只是理論，更是你日後正確視讀規格、零件組裝、機件保養與排除故障的實用基礎！



3-1 無人機系統架構——機架與整體布局

學習點 | 認識無人機的系統架構，理解每個子系統的角色與分工

一架完整的無人機系統（UAS）可拆解為六大子系統，各子系統各司其職，同時又緊密相依。理解整體架構，有助於我們在學習每個子系統時，清楚知道它在整體中的位置與角色。



知識面 | 六大子系統的功能定位與相互依存關係

子系統	功能類比	主要組成說明
機體系統	骨架	機架、機臂、起落架，承載所有子系統
動力系統	肌肉	馬達、ESC、螺旋槳，產生升力與推力
電源系統	血液	LiPo 電池、電源控制板，提供飛行電能
飛控系統	大腦	飛控器、感測器群，整合姿態控制
通訊系統	神經	遙控器、接收器、圖傳，傳遞指令訊號
酬載系統	雙手	攝影機、雲台、噴灑器，執行作業任務

💡 無人機五大核心（六大子系統）的相依關係

- [機體結構] 機體系統 → 承載並固定 → 所有其他子系統
- [電能動力] 電源系統（電池）→ 提供電力能源 → 動力系統（ESC / 馬達）、飛控系統、通訊系統、酬載系統
- [通訊傳輸] 通訊系統（遙控器）→ 傳送指令 → 飛控系統、酬載系統
- [飛行控制] 飛控系統 → 整合感測器資料後 → 控制 ESC → 調節馬達轉速
- [外掛酬載] 酬載系統依附在飛行機體上執行各項終端目的飛行任務

3-2 機體設計——機架與材料

📖 學習點 | 認識無人機的骨架

一架無人機能夠飛行，首先需要一個能夠承載所有部件的「骨架」。就像人體的骨骼支撐著肌肉與器官，無人機的機架（Frame）承載著馬達、電池、飛控板與所有電子設備，決定了整機的重量、強度與飛行特性。

不同的機架布局，決定了不同的飛行特性與用途。認識機架的結構，是理解無人機設計邏輯的第一步。當你知道為什麼競速無人機要做得那麼小、為什麼農業無人機要做得那麼大，你就真正開始用工程師的眼光看待無人機了。

🔍 知識面 | 機架的構造、材質與布局類型

一 機架的基本構造

機體（機架）是無人機的「骨架」，負責承載並固定所有子系統。機體設計需在重量、強度、飛行特性與製造成本之間取得最佳平衡，是無人機工程設計的第一道關卡。

四軸飛行器的機架通常由中心板（Center Plate）與四支機臂（Arms）組成。中心板是所有電子設備的安裝基座；機臂向外延伸，末端安裝馬達與螺旋槳。機臂的長度決定了軸距（Wheelbase）——即對角線兩顆馬達中心的距離，是描述無人機尺寸的標準指標。

- **軸距單位：**毫米（mm）。常見消費型無人機軸距約 200 ~ 550mm；農業無人機可超過 1500mm。

◆ 多軸旋翼機架類型

機架類型	外形特徵	優點	常見應用
X 型（四軸）	四臂對稱呈 X 形，最普遍	飛行穩定、操控直覺、前後左右對稱	消費空拍機、教育訓練機、競技機
H 型	兩側平行機臂形似 H 字	前後視野佳，適合安裝較大攝影設備	專業空拍機、電影航拍
Y 型（三軸）	三臂呈 Y 形，三個旋翼	結構簡單、重量輕	特定任務機、實驗機型
六軸／八軸	六或八旋翼對稱排列	承載力強，單馬達故障仍可繼續飛行	工業植保、重型物流、測量

▢ 常見機架材料比較

材質	重量	強度	適用場合
碳纖維（Carbon Fiber）	極輕	高	競速機、專業攝影機，性能優先
玻璃纖維（Fiberglass）	中等	中高	入門訓練機，成本與強度均衡
工程塑膠	中等	中	消費型玩具機，成本低、易模製
鋁合金	重	高	工業級農業機，需承受大載重

▢ 減震設計的重要性

飛行中馬達高速旋轉會產生震動，若震動直接傳導至飛控板或相機，將造成感測器讀數不穩定（影響飛行穩定性）或影像模糊。因此，專業無人機在飛控板安裝座與相機雲台之間，均加裝橡膠減震球（Damping Ball）或防震墊，有效吸收高頻震動，確保飛行品質。

✧ 3-2 重點精華

1. 軸距（Wheelbase）是描述四軸飛行器機架尺寸的標準指標，單位為毫米（mm）。
2. 碳纖維機架：最輕最強，適合競速與專業攝影；工程塑膠：成本低，適合入門玩具機。
3. X 型布局是目前最主流的四軸飛行器機臂配置，操控對稱直覺。
4. 中心板承載所有電子設備；機臂末端安裝馬達與螺旋槳。
5. 減震設計（橡膠球 / 防震墊）用於隔離馬達震動，保護飛控板感測器與相機畫質。

3-3 動力與電源系統——電機馬達、螺旋槳、電子調速器、電池

學習點 | 電機馬達與螺旋槳轉動造成升力與推力？

動力系統似無人機的「肌肉」，由馬達、電子調速器（ESC）與螺旋槳三個核心元件組成；電源系統似無人機的「血液」能量，以 LiPo 鋰聚合物電池為核心，兩者共同決定了無人機的飛行性能與時間。組合時三者必須正確匹配，才能發揮最佳飛行效能。

現代無人機幾乎全面使用「無刷馬達（Brushless Motor）」。相較於早期有刷馬達，無刷馬達效率更高、壽命更長、維護更簡單。它的工作原理，直接對應在自然課中的「電磁感應」與「安培力」概念——電流流過導線在磁場中受力，產生旋轉運動。

知識面 | 了解整體動力系統的相關構造零件的相關資訊

一 馬達種類：有刷馬達 vs 無刷馬達

電機馬達是無人機飛行動力系統的核心零件，分為「有刷馬達」與「無刷馬達」兩大類，兩者在工作原理、效能、壽命與編號規則上均有明顯差異：

比較項目	有刷馬達（Brushed）	無刷馬達（Brushless）
工作原理	透過碳刷與換向器傳遞電流	ESC 控制電子換向，無機械接觸
效率	較低（碳刷摩擦損耗）	高（無機械摩擦損耗）
壽命	短（碳刷磨損）	長（無耗損零件）
噪音	較大	較小
成本	低	較高
維護	需定期更換碳刷	幾乎免維護
編號規則	外徑 × 高度（如 720、1020）	定子外徑 × 定子高度 + KV 值（如 2306 2450KV）
常見應用	入門玩具機、微型室內機	專業消費機、工業機、競技穿越機

① 有刷馬達（Brushed Motor）編號規格解讀

有刷馬達的商品編號由「外徑 × 高度」兩組數字組成，單位為公釐（mm）。例如編號「720」代表馬達外徑 7mm、高度 20mm。數字越大，馬達尺寸越大，輸出功率越高。

編號範例	外徑 (mm)	高度 (mm)	適用機型
720	7	20	微型室內機、Tiny Whoop、四軸玩具機
816	8	16	小型玩具機、教育入門微型機
1020	10	20	小型玩具機、GT2 四軸足球無人機
1104	11	4	超薄微型機、穿越微型機 (Micro Whoop)



有刷馬達編號解讀口訣

編號前半 = 馬達外徑 (mm)

編號後半 = 馬達高度 (mm)

範例：「1020」→ 外徑 10mm、高度 20mm，常見於小型教育入門機。

② 無刷馬達 (Brushless Motor) 編號規格解讀

1. 無刷馬達的工作原理

無刷馬達由定子 (Stator) 與轉子 (Rotor) 兩大部分組成。定子是固定的線圈繞組，通以三相交流電後產生旋轉磁場；轉子是附有永久磁鐵的外殼，在旋轉磁場的吸引與排斥作用下持續旋轉。

與有刷馬達不同，無刷馬達沒有碳刷 (物理接觸件)，改由 ESC (電子調速器) 透過電子換向 (Electronic Commutation) 控制三相電流的切換時序，使定子磁場持續旋轉，帶動轉子旋轉。這就是「無刷」名稱的由來。

- **能量轉換路徑：**電池電能 → ESC 控制電流 → 定子線圈電磁力 → 轉子旋轉 (機械能) → 螺旋槳推力。

規格參數	單位／說明	對飛行的影響
KV 值	RPM/V (每伏特轉速)	KV 越高轉速越快但扭力小，適配小螺旋槳；KV 越低扭力大，適配大螺旋槳
定子尺寸	直徑 × 高度 (mm)	定子越大，扭力越大，效率越高，但重量也越重
最大電流 (A)	安培 (Ampere)	決定馬達能承受的最大電流，需與 ESC 及電池規格匹配
效率 (g/W)	每瓦產生多少克推力	效率越高代表同樣電量能產生更多推力，飛行時間更長

無刷馬達的商品編號由「定子外徑 × 定子高度 + KV 值」組成。定子 (Stator) 是馬達內固定不動的磁鐵線圈部分，其尺寸決定了馬達的**扭力大小與重量**；KV 值則決定馬達的**轉速**特性。

編號 (範例)	定子外徑 (mm)	定子高度 (mm)	KV 值 (範例)	常見飛行器應用
1104	11	04	高 KV 4000 ~ 7500	微型穿越機 (65 ~ 75mm 軸距)
2204	22	04	中 KV 2300 ~ 2600	3 ~ 4 吋競速穿越機
2205	22	05	中 KV 2300 ~ 2700	4 ~ 5 吋競速穿越機
2306	23	06	中 KV 2300 ~ 2450	5 吋競速穿越機 (主流規格)
2312	23	12	低 KV 960 ~ 1400	消費空拍機、教育訓練機
3508	35	08	低 KV 380 ~ 700	7 ~ 10 吋大型空拍機、工業機
4114	41	14	低 KV 320 ~ 400	大型工業植保機、重型多軸機
5010	50	10	低 KV 270 ~ 340	超大型工業機、重載酬載機

2. KV 值與應用對照

KV 值 (RPM/V) 代表每增加 1 伏特電壓，馬達每分鐘增加的空載轉速。KV 值是選購無刷馬達時最重要的參數之一：

KV 值範圍	特性	搭配槳徑	適用機型
270 ~ 400 KV	超低 KV，超大扭力，低轉速	15 吋以上大槳	大型工業植保機、重載機
400 ~ 900 KV	低 KV，大扭力，低轉速	10 ~ 15 吋槳	工業測量機、大型空拍機
900 ~ 1500 KV	中低 KV，均衡性能	8 ~ 10 吋中大槳	專業空拍機、長續航機
1500 ~ 2500 KV	中 KV，均衡效能	5 ~ 7 吋中槳	消費機、教育訓練機 (本課程主要機型)
2500 ~ 4000 KV	中高 KV，高轉速輕槳	3 ~ 5 吋小槳	5 吋競速穿越機 (FPV Racing)
4000 KV 以上	高 KV，超高轉速	2 ~ 3 吋微型槳	微型穿越機 (Micro/Tiny Whoop)



無刷馬達編號解讀口訣

編號前兩碼 = 定子外徑 (mm)

編號後兩碼 = 定子高度 (mm)

KV 值 = 每伏特空載轉速 (RPM/V)；KV 越低→扭力越大→適合大槳

範例：「2306 2450KV」→ 定子外徑 23mm、定子高度 6mm、每伏特轉速 2450 轉，適合 5 吋競速穿越機。

二 電子調速器 (ESC)

ESC (Electronic Speed Controller) 是介於飛控器與馬達之間的關鍵元件。飛行控制器送出 PWM (脈寬調製) 控制訊號, ESC 將電池的直流電 (DC) 轉換為三相交流電 (AC), 精準控制無刷馬達的轉速。選擇 ESC 時, 額定電流 (A) 必須大於馬達最大工作電流, 建議預留 20% 安全餘量。

三 螺旋槳

螺旋槳材質主要有三種: 強化塑膠 (PP/Nylon)、碳纖維、木質。消費型無人機多使用強化塑膠, 輕便且碰撞後不易碎裂傷人; 碳纖維槳效率最高但硬脆, 斷裂後碎片鋒利, 具安全風險; 木質槳傳統且效率好, 但怕潮易變形。

槳葉與機翼功能相似, 能利用白努利定律在旋轉時產生壓力差升力。

槳葉沿半徑方向呈現漸進的扭轉角 (Pitch Twist) —— 根部扭轉角較大、末梢較小, 確保葉片各點在旋轉時都能以最佳攻角切入空氣, 最大化推力效率。

四軸飛行器的四顆螺旋槳, 必須按照「兩 CW 兩 CCW」對角線配對安裝。這個設計的目的是抵消反扭矩 (Reaction Torque) —— 每顆旋轉的螺旋槳都會對機身施加一個反向扭矩。若四顆都朝同方向旋轉, 機身就會不斷自轉, 無法穩定。

CW 與 CCW 螺旋槳的配對邏輯; CW (順時針, Clockwise) 與 CCW (逆時針, Counter-Clockwise) 螺旋槳的葉片扭轉方向相反, 不可混裝。現代螺旋槳通常在槳轂上標記「CW」或「CCW」, 或以不同顏色區分 (如黑色為 CW、銀色為 CCW)。

項目	CW (順時針)	CCW (逆時針)
安裝位置	左前、右後 (對角線)	右前、左後 (對角線)
葉片方向	從根部到末梢向右扭轉	從根部到末梢向左扭轉
產生反扭矩	使機身有逆時針旋轉趨勢	使機身有順時針旋轉趨勢
合力結果	兩個 CW 的逆時針扭矩 + 兩個 CCW 的順時針扭矩 = 相互抵消, 機身穩定	(同左說明)

◎ 螺旋槳的規格說明

螺旋槳的規格通常以四位數字表示, 例如「5045」:

數字位置	代表意義	範例說明
前兩位數	槳徑 (英寸)	「50」= 5.0 英寸槳徑 (直徑約 12.7cm)
後兩位數	螺距 (英寸)	「45」= 4.5 英寸螺距 (旋轉一圈理論前進距離)

- **大槳 vs 小槳**：大槳（低轉速）效率高、推力大、適合重載與攝影機；小槳（高轉速）反應快、適合競速機。

⚠ 安全提醒：螺旋槳高速旋轉時動能極大，切勿用手觸碰旋轉中的螺旋槳，否則可能造成嚴重割傷！

四 電池 —— 鋰聚合物電池

無人機的所有動力——馬達旋轉、飛控板運算、GPS 定位、相機錄影——全部來自同一個來源：電池。電池的容量決定了飛行時間，電池的放電能力決定了動力表現，電池的重量影響著飛行效率。

現代無人機使用的是「鋰聚合物電池（LiPo Battery）」，這種電池擁有極高的能量密度與大電流放電能力，讓輕薄的機體能夠攜帶足夠的能量飛行。但 LiPo 電池也是無人機所有部件中最需要謹慎對待的——不當使用可能導致電池膨脹、起火甚至爆炸。

在這一節，我們不只學習電池的技術規格，更要建立正確的電池使用與保存觀念，這是飛行安全的重要一環。

① LiPo 電池的構造與原理

鋰聚合物電池（Lithium Polymer Battery，LiPo）是鋰離子電池的進階版本，以固態聚合物作為電解質，可製成任意形狀，能量密度遠高於傳統鎳氫電池。每個電芯（Cell）的標準電壓為 3.7V（滿電 4.2V，最低安全電壓 3.5V）。

② LiPo 電池的關鍵規格

規格	說明	範例解讀
容量（mAh）	毫安培小時，代表儲電量	1500mAh = 以 1500mA 放電可持續 1 小時
電芯數（S）	串聯電芯數量，決定電壓	3S = 3 顆電芯串聯，電壓 $3.7 \times 3 = 11.1V$ （名義）
C 值（放電倍率）	最大持續放電電流的倍數	$1500mAh \times 25C$ = 最大持續放電 37.5A
重量（g）	直接影響飛行效率與時間	電池越重 → 整機重量 ↑ → 需要升力 ↑ → 飛行時間 ↓

◎ 電池充放電的注意事項

LiPo 電池對過充、過放、短路、撞擊都非常敏感，處理不當可能導致熱失控（Thermal Runaway）電池溫度急劇上升，最終起火甚至爆炸。以下是必須遵守的使用規範：

注意事項	說明
使用專用充電器	必須使用具平衡充電功能的 LiPo 專用充電器，確保每顆電芯電壓均衡
禁止過充過放	單芯電壓超過 4.2V（過充）或低於 3.5V（過放）均會損壞電池
充電時全程看管	充電中禁止離開，應在防火容器（LiPo 安全袋）中充電
避免撞擊與穿刺	電池受到撞擊或穿刺後可能延遲數小時後起火，需觀察後再收納
長期儲存電壓	長期不使用應保存在約 3.8V/ 芯（儲存電壓），避免滿電或過放儲存
環境溫度管理	避免在高溫環境（ $>50^{\circ}\text{C}$ ）充電或儲存；低溫會降低放電性能

3-4 飛控系統——整合控制的數位大腦

📖 學習點 | 無人機的大腦如何讓飛行變得穩定？

如果說馬達是無人機的肌肉，電池是心臟，那麼飛控系統就是無人機的大腦與神經系統。它在每一瞬間接收來自感測器的訊號、處理操作者的指令、執行精密的運算，並輸出控制命令讓四顆馬達各自以精確的轉速旋轉。

在第 2 章 2-4 節，已介紹了飛控系統的工作原理與 PID 演算法。本節將從硬體的角度，更深入認識飛控系統的完整組成，以及飛控板上各個介面的功能——這些知識對於未來自行組裝或維修無人機非常重要。

🔍 知識面 | 飛控系統的組成、感測器與自動穩定控制原理

一 飛控系統的三層架構

飛控系統可分為三個層次：感知層（Sensing）、決策層（Processing）、執行層（Actuating）。

層次	組成元件	功能
感知層	陀螺儀、加速度計、氣壓計、GPS、磁力計	蒐集機身姿態、高度、位置等即時狀態資料

層次	組成元件	功能
決策層	飛控板 MCU 處理器、PID 演算法	整合感測器資料與操作指令，計算各馬達所需轉速
執行層	ESC × 4、無刷馬達 × 4	接收飛控板指令，輸出對應電流控制馬達轉速

飛控系統整合多種感測器資料，以 PID 演算法每秒數千次修正機體姿態；通訊系統是無人機的「神經」，負責在操作員與無人機之間傳遞控制指令與狀態回饋。兩者共同確保無人機能被精準操控並安全飛行。

二 飛控感測器一覽表

感測器	功能說明	飛控應用
陀螺儀 (Gyroscope)	偵測機體三軸旋轉角速度	即時修正翻滾 / 俯仰 / 偏航姿態
加速度計 (Accelerometer)	偵測線性加速度與重力方向	計算傾斜角度，輔助姿態穩定
氣壓計 (Barometer)	量測大氣壓力換算飛行高度	定高懸停、高度保持功能
磁羅盤 (Compass)	偵測地磁方向確定機頭朝向	航向鎖定、GPS 導航方向基準
GNSS 模組 (GPS)	接收衛星訊號提供座標與速度	定點懸停、自動返航 (RTH)、航點飛行
光流感測器	偵測地面影像變化計算水平位移	室內無 GPS 環境下的水平定位懸停
超音波感測器	量測與地面距離 (近距離精確)	低空精確定高、自動降落輔助

三 四種飛行模式

無人機飛控系統提供多種飛行模式，供不同程度的飛手選擇，四種主要模式如下：

飛行模式	特性說明	適用對象	感測器依賴
姿態模式 (Attitude Mode)	飛控自動穩定機體姿態，放開搖桿自動回正水平，無自動定位功能	初學者入門首選	陀螺儀 + 加速度計
GPS 模式 (GPS Mode)	加入 GPS 定位，可自動定點懸停，訊號中斷自動返航 (RTH)，穩定性最高	一般飛行、空拍攝影	陀螺儀 + 加速度計 + GPS + 氣壓計 + 磁羅盤

飛行模式	特性說明	適用對象	感測器依賴
手動模式 (Manual / Acro)	關閉所有自動穩定，機體傾斜後不自動回正，完全由飛手控制	競技穿越機、進階飛手	僅陀螺儀（原始資料）
跟隨模式 (Follow Me Mode)	自動追蹤操作者位置移動，保持固定距離與高度跟隨拍攝。GPS 追蹤型依賴操作者裝置 GPS 定位；影像辨識型依賴攝影機＋影像處理系統（AI 視覺辨識），可辨識人體／臉部進行追蹤	運動攝影、戶外追蹤、創意空拍	GPS 追蹤型：操作者裝置 GPS＋無人機 GPS＋磁羅盤； 影像辨識型：攝影機＋影像處理系統（AI 視覺辨識）

💡 飛控姿態控制運作流程

1. 感測器採集資料（陀螺儀偵測旋轉、加速度計偵測傾角、氣壓計偵測高度等）
2. 飛控器比較「目標姿態」與「當前姿態」，計算誤差
3. PID 演算法根據誤差計算各馬達所需轉速修正量
4. 飛控器輸出 PWM 訊號給四個馬達的 ESC
5. 四個馬達依指令調整轉速，修正機體姿態
6. 回到 1.，持續循環——每秒數百至數千次

3-5 通訊系統——頻段與訊號

📖 學習點 | 無人機如何與地面保持連線與訊號傳遞？

無人機通訊系統主要分為「控制鏈路（RC Link）」與「圖像傳輸（Video Link）」兩部分，分別使用不同頻段（2.4GHz，5.8GHz）以避免互相干擾。

🔍 知識面 | 控制鏈路與圖傳頻段的特性與訊號干擾應對

頻段	2.4 GHz	5.8 GHz
主要用途	遙控器控制訊號（RC Link）	圖像傳輸（FPV Video Link）
穿透障礙物	較強（波長較長）	較弱（波長較短）
干擾情況	較多（與 WiFi 同頻段）	相對較少
傳輸距離	較遠	較短
傳輸頻寬	較低	較高（適合高畫質影像）
常見應用	大多數遙控器使用	FPV 穿越機圖傳、消費機圖傳

💡 訊號干擾的辨識與應對

【常見干擾來源】WiFi 基地台、其他遙控設備、高壓電線、金屬建築物反射

【干擾症狀】遙控延遲增加、無人機反應遲鈍、圖傳畫面出現雜訊或中斷

【應對措施】

- 飛行前確認 RSSI 訊號強度，低於警戒值停止飛行
- 保持飛行距離在遙控器有效範圍 70% 以內（安全餘裕）
- 訊號異常時立即啟動「返航模式（RTH）」，由飛控自動導引返航

3-6 酬載系統——無人機附加攜行的任務工作設備

📖 學習點 | 酬載重量與飛行性能的關係是重要的基礎計算概念

無人機本身只是一個飛行平台，真正決定它「能做什麼」的，是它所攜帶的酬載（Payload）——也就是安裝在機體上、用來執行任務的各種設備。

相機、熱像儀、農藥噴灑系統、投放裝置、喇叭、感測器等不同的酬載，讓同一架飛行平台搖身一變，成為空拍機、救災機、農業機或巡邏機。理解酬載系統，就是理解「無人機的工作能力從何而來」的關鍵。

在這一節，我們也會學習「酬載重量與飛行性能」的關係——這是無人機實際操作中必須掌握的基礎計算概念。

🔍 知識面 | 飛行任務的目的需求決定酬載系統的相關設計

一 常見酬載系統類型

酬載類型	代表設備	主要應用
影像酬載	RGB 相機、熱像儀、多光譜相機、360° 全景相機	空拍攝影、農業監測、建築測量、搜救
雲台系統	單軸／雙軸／三軸穩定雲台	消除飛行震動，提供穩定影像拍攝
噴灑系統	藥液箱、幫浦、噴嘴、流量計	農業植保噴灑、林業防疫
投遞系統	機械爪、磁力釋放裝置、降落傘投遞	物流配送、緊急物資投遞
感測酬載	空品感測器、氣體偵測器、輻射偵測器	環境監測、災害偵查、工業檢測
通訊中繼	訊號中繼器、LoRa 模組	偏遠地區通訊中繼、緊急通訊建立
照明系統	高亮度 LED 燈、探照燈	夜間搜救、夜間巡邏、燈光表演

二 酬載重量與飛行性能的關係

酬載重量直接影響無人機的飛行性能，主要體現在兩個面向：

1. 飛行時間縮短：酬載重量增加 → 整機總重增加 → 需要更大升力 → 馬達轉速提高 → 電流消耗增加 → 電池更快耗盡 → 飛行時間縮短。
 2. 飛行穩定性下降：過重的酬載使整機重心偏移，飛控板需要更頻繁地修正姿態，在強風環境中飛行穩定性下降。
- **最大起飛重量 (MTOW)**：每架無人機都有設計最大起飛重量 (Maximum Take-Off Weight)，酬載重量不得超過 MTOW 與機體自重的差值。

💡 酬載設計的關鍵考量

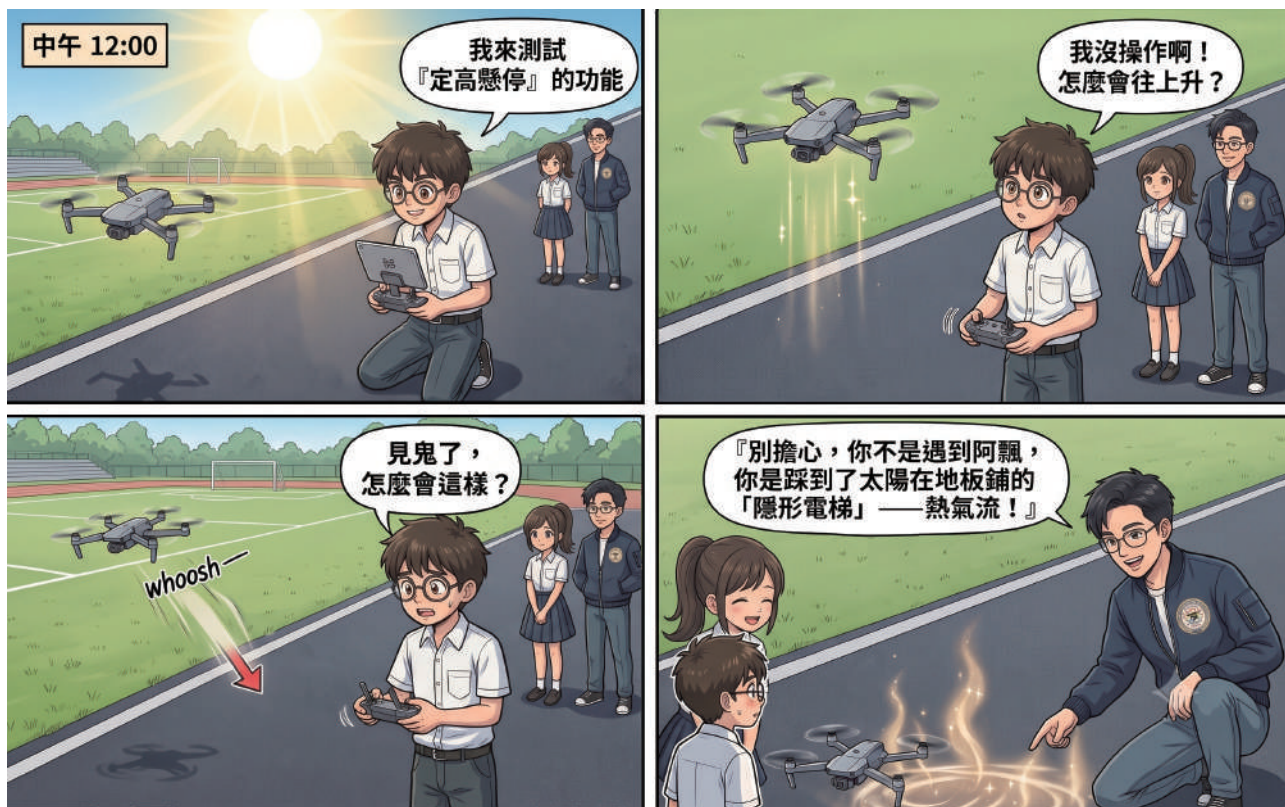
- 最大酬載重量 (Max Payload)：超過此限將無法起飛或飛行不穩定，務必事前計算確認。
- 酬載重量 vs 飛行時間：酬載越重，馬達功率需求越大，電池消耗越快，飛行時間縮短。
- 重心平衡：酬載安裝位置需確保不改變整體重心，偏心酬載需以配重平衡。
- 防護等級 (IP 等級)：戶外作業酬載需具備適當防水防塵等級，農業植保機需達 IP67 以上。

認識了無人機的每一個零件，
我們將仰望天空——學習影響飛行的氣象知識！

—— 第 3 章結束 請翻至第 4 章飛行氣象 ——

第4章 飛行氣象

飛航氣象學——基礎航空氣象



4-1 風的影響——看不見的推手，風力與風級

在這一節中，我們將對國中生介紹看不見的「風」，透過風力的大小與方向，瞭解風對無人機飛行時所造成重大的影響，瞭解掌握風是成為飛手的首要任務。

學習點 | 你看不見它，但它決定你能不能飛

風，是無人機飛行中最常遇到、也最不能忽視的氣象因素。你看不見它，但每一陣吹過的風，都在對你的無人機施加一個持續的外力，使它偏離預定的飛行路徑。

輕柔的微風可能只讓影像微微晃動；強勁的陣風卻可能讓無人機完全失去控制，甚至墜毀。更危險的是「陣風（Gust）」——突然而來的短暫強風，讓飛控板來不及反應。

這一節，我們將認識風的成因、風力的分級，以及風對四軸飛行器飛行性能的具體影響，學會在飛行前正確判讀風況，做出「飛還是不飛」的安全決策。

知識面 | 風的成因、風級與飛行影響

一 風的成因

風是由空氣壓力差（氣壓梯度）驅動的空气水平流動。太陽輻射加熱地表，使不同區域的空氣溫度不同，熱空氣密度小上升，冷空氣密度大下沉，形成氣壓差，空氣便從高壓區流向低壓區，形成風。

在城市環境中，高樓建築、山坡、水域等地形地物會使風向與風速在局部範圍內發生複雜變化，形成難以預測的「局部風場」，這對低空飛行的無人機構成不小的挑戰。

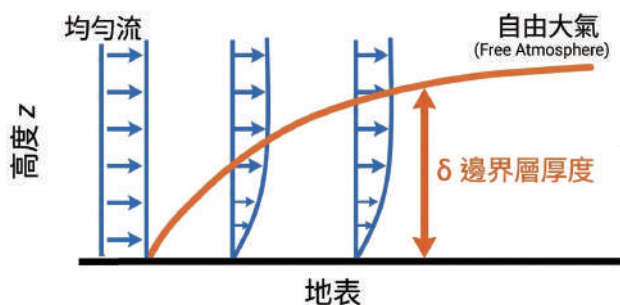
二 蒲福風級與無人機飛行安全

蒲福風級（Beaufort Scale）是國際通用的風力分級系統，由英國海軍上將法蘭西斯·蒲福（Francis Beaufort）於 1805 年制定，共分 0 至 12 級。對無人機操作者而言，了解風級與飛行安全的對應關係至關重要：

風級	名稱	風速 (m/s)	陸地現象	無人機操作建議
0	無風	0-0.2	煙直升	✅ 最佳飛行條件
1 ~ 2	軟風／輕風	0.3-3.3	煙微偏、樹葉微動	✅ 適合飛行，新手可操作
3	微風	3.4-5.4	樹葉不停搖動	✅ 有經驗者可飛，注意姿態
4	和風	5.5-7.9	小樹枝搖動、揚塵	⚠️ 謹慎飛行，消費型無人機接近極限
5	清風	8.0-10.7	小樹搖動	⚠️ 建議停飛，多數消費型無人機達上限
6 級以上	強風以上	>10.8	大樹搖動、步行困難	❌ 禁止飛行，極高墜機風險

三 物理課沒說的事：地面風 vs. 高空風

很多同學會問：「老師，我在地面明明感覺不到風，為什麼飛上去就失控了？」這涉及到一個重要的科學概念：邊界層效應（Boundary Layer Effect）。



大氣邊界層高度與風速關係曲線圖。隨著高度遠離地面障礙物，風速呈現指數型成長。

地面有建築物、樹木、圍牆，這些障礙物會產生摩擦力，把風「擋」下來。但當無人機越過建築物的高度後，風就像脫韁的野馬，沒有障礙物的阻攔，速度會比地面快上 2 至 3 倍。國中階段的我們要建立一個習慣：起飛前，抬頭看雲的流動與遠處高層樹梢的晃動，那才是無人機即將面對的真實戰場。

四 關鍵公式：地速 = 航速 + 風速

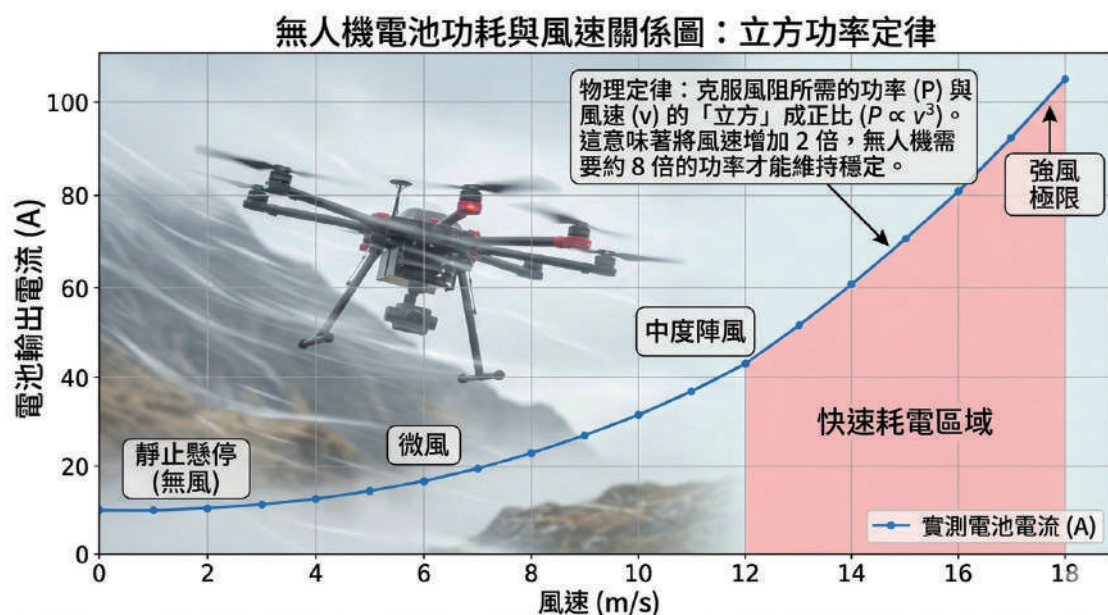
這是一個簡單的向量加法，但卻決定了無人機的生死。

- 航速（Airspeed）：無人機相對於空氣推進的速度（假設最大是 10 m/s）。
- 風速（Wind Speed）：大自然空氣流動的速度。
- 地速（Ground Speed）：我們在地面看無人機移動的速度。

如果你以 10 m/s 的航速「逆風」飛行，而此時風速是 8 m/s，你的地速就只剩下 2 m/s。這意味著原本 1 分鐘能飛回來的路程，現在需要 5 分鐘。如果你的電池只剩 3 分鐘電力，無人機就會在回程的半路上「炸機」（墜落）。

五 風對電池續航力的致命影響

為什麼強風會讓電池掉電變快？因為無人機為了在風中「站穩」，必須提高馬達轉速。這就像你在強風中逆風行走，需要出更多力氣一樣。根據物理定律，克服風阻所需要的功率與風速的「立方」成正比。這代表風速增加 2 倍，無人機要耗費接近 8 倍的功率來維持穩定！



[無人機功耗與風速關係折線圖。橫軸為風速 (m/s)，縱軸為電池輸出電流 (A)。]

六 順風、逆風、側風對飛行的影響

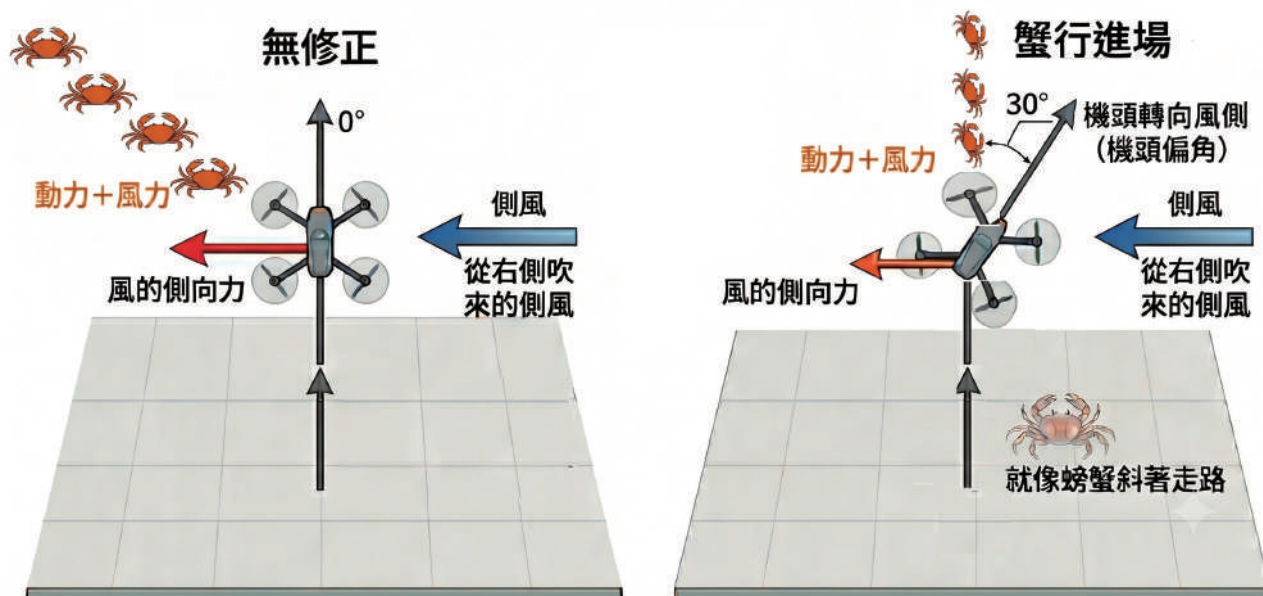
風向相對於無人機飛行方向的不同，會產生截然不同的飛行影響：

風向類型	對飛行的影響	操控注意事項
逆風（頂風）	飛行速度降低，但姿態較穩定，升力略增	電量消耗較大，注意返航電量
順風（背風）	飛行速度加快，煞車距離變長，不易懸停	避免順風長距離飛行，難以急停
側風（橫風）	無人機持續側飄，飛控板需頻繁修正	最消耗電量，高側風時建議停飛
陣風（突發強風）	瞬間大幅偏移，飛控板反應不及	最危險！低空建築旁最易遇到陣風

七 側風與修正：蟹行進場

當風從你的側面吹來時，如果你機頭直直朝前，無人機會被吹偏，路徑會變成斜的。這時候，優秀的飛行員會讓機頭稍微轉向風吹來的地方，就像螃蟹斜著走路一樣，利用動力抵消側向風，這在航空專業上稱為「偏流修正」。

無人機偏流修正示意圖：蟹行進場



✈ 4-1 重點精華

1. 風是空氣從高壓區流向低壓區的水平運動，由太陽不均勻加熱地表所驅動。
2. 蒲福風級：0-2 級最適飛行；3 級有經驗者可飛；4-5 級謹慎或停飛；6 級以上禁飛。
3. 多數消費型無人機（如 DJI Mavic 系列）最大抗風等級約為 5-6 級（10-13m/s）。
4. 陣風最危險——突然而來的強風讓飛控板來不及反應，低空與建築旁最易發生。
5. 順風飛行速度快但煞車距離長；側風最耗電；逆風最穩定但消耗電量大。
6. 飛行前應查詢當地氣象資料（如中央氣象署 app），確認風速風向再決定是否飛行。
7. 預留回航電量：逆風回航時，請務必在電量剩下 40% 時就開始往回飛，不要挑戰低電量警告。
8. [風速飛行口訣]：【235 禁】
 0 1 2，隨便飛（天氣晴朗，放心出航）
 3 級風，高手可（稍微晃動，要有經驗）
 5 級風，快撤回（接近極限，不可冒險）

下一節預告：我們會探討為什麼無人機在中午的大熱天會飛得特別「飄」？我們走進 4-2 節：隱形的雲梯！

4-2 隱形的雲梯——對流與熱氣流

在這一節，我們將從「水平的風」轉向「垂直的空氣運動」。對於國中生來說，理解為什麼無人機在晴朗無雲的操場上會突然「高度不穩」或「自動升高」，是建立飛行手感的重要關鍵。

📖 學習點 | 空氣也有上下起伏的波浪

風是水平的空氣流動，但空氣也會垂直移動。當地面受太陽強烈加熱，空氣膨脹變輕向上升騰，形成「上升氣流（Thermal）」；而周圍較冷的空氣則向下補充，形成「下沉氣流」。這種因溫度差異驅動的垂直空氣循環，稱為「對流（Convection）」。

對熱氣球或滑翔機飛行員而言，熱氣流是寶貴的能量來源，可以讓他們在不消耗燃料的情況下爬升高度。但對無人機操作者而言，強烈的垂直氣流可能使無人機意外急速升降，難以控制，甚至飛超法定高度限制。

了解對流的形成規律，能讓你預判什麼時間、什麼地點可能出現強烈的垂直氣流，提前做好準備或選擇迴避。

🔍 知識面 | 對流的成因、類型與對無人機的影響

一 誰在推我的飛機？熱力對流（Thermal Convection）的形成

晴天午後，地面吸收大量太陽輻射熱能，表面空氣被加熱膨脹、密度降低，像熱氣球一樣向上浮升，形成上升熱氣流柱（Thermal Column）。這種現象在以下地面類型上特別強烈：

- 深色柏油路面、停車場、大型屋頂（吸熱快）
- 農田、草地與林地的交界帶（吸熱差異大）
- 向南坡面（臺灣地區受太陽照射時間較長）

熱氣流上升離地後，隨著高度增加溫度降低，水氣凝結形成積雲（Cumulus Cloud）——這就是為什麼晴天午後天空中常出現棉花糖狀白雲的原因。積雲的底部位置，大約就是熱氣流上升後開始冷凝的高度。

我們在國中自然課學過「熱升冷降」。大氣層並不是靜止的，它就像一鍋正在加熱的水。陽光照在地球上，但地球表面並不是均勻受熱的。深色的柏油路、黑色的屋頂吸收熱量的速度比淺色的沙地或充滿水分的草地快得多。

當柏油路被曬得滾燙時，貼近地面的空氣也會跟著變熱。暖空氣體積膨脹、密度變小，就會像熱氣球一樣往上衝。這股向上的力量，對於重量不到 1 公斤的無人機來說，就是一個強大的「隱形電梯」。

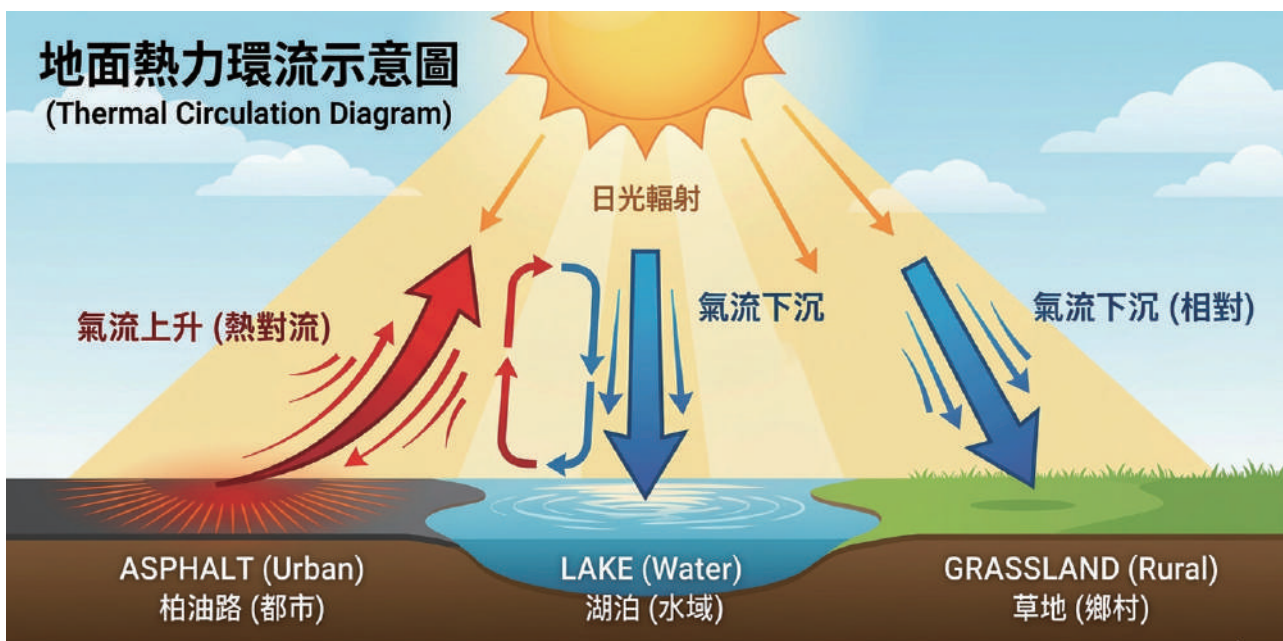
二 對流對無人機飛行的具體影響

對流現象	發生條件	對無人機的影響
強烈上升氣流	晴天午後、深色地面上方	無人機意外上升，可能突破法定高度限制（120m）
強烈下沉氣流	上升氣流旁側的補償氣流	無人機意外快速下降，低空時有觸地風險
對流渦流	上升與下沉氣流交界帶	無人機姿態劇烈震盪，飛控板負擔大
積雨雲對流	午後雷陣雨前	極強垂直氣流伴隨閃電，絕對禁止飛行

三 如何預判對流強度，隱形電梯的陷阱：地表材質與熱力不均

無人機飛行員必須學會「閱讀」地面。在不同的地表上方，你會感受到完全不同的升力：

- 柏油路與水泥地：這些是「熱氣流噴泉」。中午飛行時，無人機會感覺特別「輕」，甚至很難下降高度。
- 草地與水池：這些地方吸熱慢且會蒸散水氣冷卻。空氣在這裡相對冷重，當你從柏油路飛到水池上方，會感受到一股往下拉的力量。
- 森林與樹蔭：由於葉片會遮蔽陽光，這裡的氣流相對穩定，但也容易產生微弱的下沉氣流。



地面溫度對比 High vs. Low

美國聯邦航空局參考 熱力環流與亂流危害示意圖

[不同地貌受熱後的氣流升降示意圖。太陽照射下，柏油路上方為紅色上升箭頭，湖泊與草地上方為藍色下沉箭頭。]

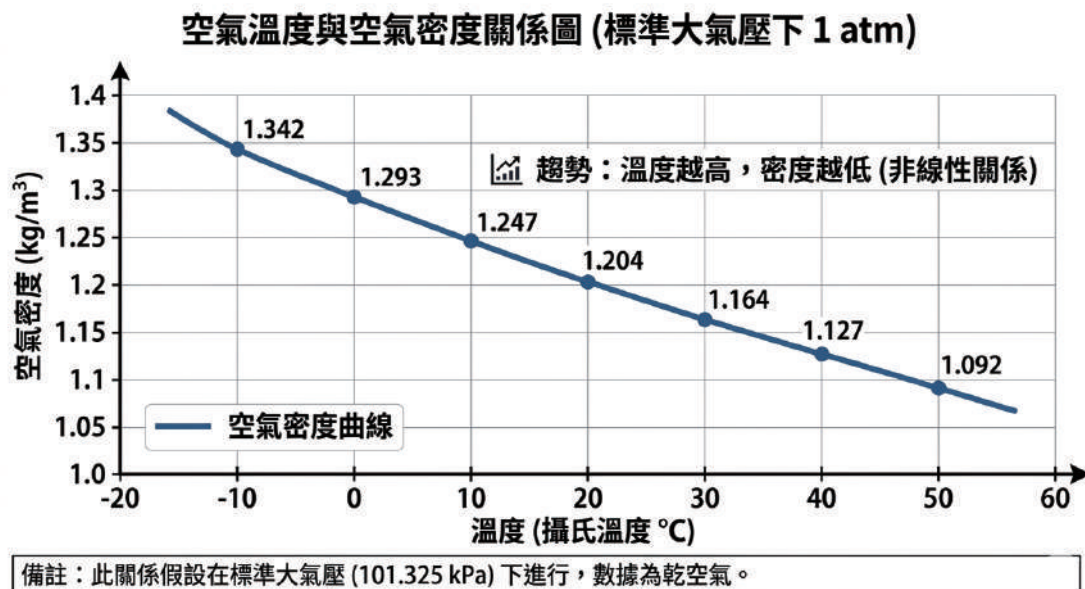
四 氣溫與馬達效率：為什麼夏天飛得比較累？

這是一個銜接高中物理的重要觀念。許多同學認為「熱空氣上升」應該對飛行有利，但事實上，高溫對無人機的硬體並不友好。

空氣的「密度」會隨著溫度升高而降低。當空氣變得稀薄，螺旋槳撥動到的空氣分子就變少了。為了產生跟冬天一樣的升力，馬達必須轉得更快、耗掉更多電。

這就是為什麼在熱天飛行時：

- 起飛變重：感覺推力不如以往。
- 馬達過熱：散熱不良加上高負荷轉動，容易觸發保護機制。



[空氣溫度與空氣密度關係圖。橫軸為溫度（攝氏溫度），縱軸為密度（kg/m³）。顯示溫度越高，密度越低。]

五 靠近地面的魔法：地面效應

當無人機在離地高度小於「旋翼直徑」的一半時，你會發現它變得異常穩定且難以下降。這是因為螺旋槳向下吹的氣流被地面擋住，在機身下方形成了一個高壓氣墊。

這雖然能省電，但也容易讓降落變得像「在肥皂上滑動」一樣停不下來。國中生在練習精準降落時，必須學會克服這個氣墊帶來的浮動力。

六 穩定性的殺手：亂流與渦流

熱氣流上升時並不是平穩的，它往往夾雜著不規則的晃動。當暖空氣氣泡爆裂或與上方的冷空氣交匯時，就會產生「亂流」。

對於四軸無人機來說，內部的飛控系統會每秒計算數千次來補償這些晃動，但這會讓你的畫面抖動，並大幅消耗電池剩餘的電量。

對流強度與時間、季節、地形密切相關，以下是實用的預判規則：

1. 時間：清晨與傍晚對流最弱；晴天正午至午後 3 點對流最強，是最不適合飛行的時段。
2. 天氣：晴天少雲時對流強；陰天雲層遮蔽太陽輻射，對流較弱。
3. 地形：市區大面積建築群加熱效應強；水域上方對流較弱，是相對穩定的飛行環境。
4. 雲況：若看到積雲快速發展（雲底變低、雲頂快速升高），代表對流正在增強，應儘速降落。

⚠ 飛行安全警示：積雨雲（俗稱「雷雨雲」）內部垂直氣流可達 50m/s 以上，並伴隨閃電與冰雹，嚴禁在積雨雲附近飛行！

✂ 4-2 重點精華

1. 對流是因地面受熱不均造成的垂直空氣循環：熱空氣上升，冷空氣下補。
2. 積雲（棉花糖白雲）是熱氣流上升冷凝的可視標誌，其底部即為熱氣流頂端高度。
3. 晴天午後對流最強，是最不適合飛行的時段；清晨與傍晚對流最弱、最穩定。
4. 深色地面（柏油路、屋頂）上方對流強；水域上方對流弱，飛行較穩定。
5. 積雨雲內部垂直氣流可達 50m/s 以上，嚴禁在積雨雲附近飛行！
6. 無人機意外急速上升時，可能超越法定飛行高度限制（臺灣一般地區 120 公尺）。
7. [地面特性飛行口訣]：【黑地燙，易浮；水草涼，會沉】
地面越燙（水泥、深色路面、柏油路面），空氣密度小，飛機感官上變輕（浮力大）；
水面、草地涼爽，飛機感官上變重（浮力小）。

下一節預告：當空氣中的水氣變重，你的無人機會遇到什麼麻煩？讓我們進入 4-3 節：消失的視線！

4-3 消失的視線——溫度、濕度、霧與降水

這節的重點在於教導學生認識「看不見的水分」對電子零件的威脅，以及「能見度」對於目視飛行的影響。

學習點 | 當你看不清楚，飛行就危險了

飛行不只需要好的天氣，也需要良好的「能見度（Visibility）」。無人機操作者必須在視覺範圍內保持對無人機的目視確認（除非使用 FPV 系統），一旦能見度下降——霧、雨、霾、沙塵——無人機就可能在一瞬間「消失在眼前」，造成失控墜機。

溫度與濕度是決定能見度好壞的根本因素。理解露點溫度、相對濕度與霧的形成關係，能幫助你在飛行前就預判能見度風險，避免在「看得到天空卻看不清楚無人機」的危險情況下起飛。

知識面 | 溫度、濕度、霧況與飛行能見度

一 溫度對飛行的影響

氣溫不只影響飛行者的舒適度，更直接影響無人機的電池性能與馬達效率：

溫度條件	對電池的影響	對飛行的影響
高溫（> 35℃）	電池過熱，降低壽命，有膨脹風險	馬達散熱不良，長時間飛行需注意溫度
低溫（< 5℃）	電池內阻增大，容量大幅下降（可降至 70%）	飛行時間明顯縮短，需預熱電池再起飛
極低溫（< 0℃）	電池放電能力急劇下降，可能突然斷電	有空中失電墜機風險，應避免飛行

二 濕度與露點溫度

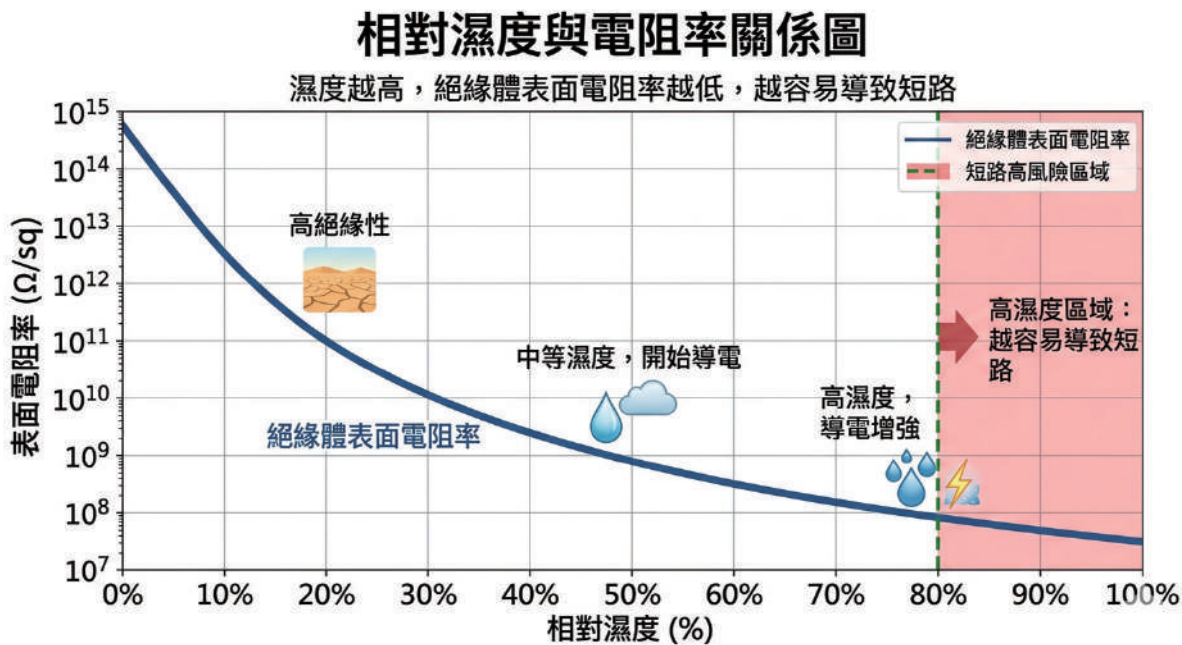
在航空領域，「看得到」跟「飛得好」是兩回事。對無人機來說，濕度不僅僅是體感上的黏膩，它直接影響了光線的傳播與零件的壽命。當空氣中的水氣含量達到最大極限時，我們稱相對濕度為 100%。這時候，隱形的水蒸氣會凝結成微小水滴，形成我們所看到的「霧」。

對於國中生來說，要建立一個核心觀念：無人機不是潛水艇。大多數消費級無人機並不防水，甚至連「防潑水」都做不到。空氣中的高濕度會導致馬達內部的線圈生鏽，或是感測器（如避障感應器）因為起霧而失效。

相對濕度（Relative Humidity, RH%）表示空氣中實際水氣含量佔該溫度下最大水氣含量的百分比。當相對濕度達到 100%，空氣達到飽和，水氣開始凝結為液態水滴。

露點溫度（Dew Point）是指空氣冷卻至開始凝結水氣的溫度。當實際氣溫接近露點溫度（兩者差值小於 3℃），代表空氣接近飽和，容易起霧或形成低雲，能見度將大幅下降。

- 飛行判斷原則：氣溫 - 露點溫度 < 3℃ → 霧況風險高 → 建議延後飛行。



[相對濕度與電阻率關係圖。濕度越高，絕緣體表面電阻率越低，越容易導致短路。]

霧的種類與飛行影響

法規要求飛行員必須在「目視範圍」內操作。但在霧天或細雨中，即使無人機就在你前方 50 公尺，你可能也看不清它的「機頭朝向」，這會導致你下錯命令，讓飛機撞毀。

霧的種類	形成條件	對飛行的影響
輻射霧	晴天夜間地面輻射冷卻，清晨最濃	常見於清晨，日出後 1 ～ 2 小時通常消散
平流霧	暖濕空氣流經冷地面	持續時間長，難以預測消散時間
上坡霧	空氣沿山坡上升冷卻凝結	山區飛行特別需注意，能見度可瞬間消失
蒸發霧	冷空氣流過暖水面蒸發凝結	河面、湖面、海面清晨常見

- 雲底高度：如果你在山區飛行，雲的位置可能比你還低。飛入雲中不僅違法，更會讓無人機因為接收不到 GPS 訊號而進入「姿態模式」隨風漂流。

能見度等級	能見度範圍 (Visibility)	安全飛行建議與規範 (Safe Flight Guidance)
極佳 (Excellent)	> 10 km	最佳飛行狀態。視線清晰，適合所有類型的目視飛行作業。
良好 (Good)	5 ~ 10 km	標準目視飛行門檻。在此範圍內，多數管制空域允許正常起降與飛行。
邊緣 (Marginal)	1 ~ 3 km	特種目視飛行區間。當能見度低於 5km 但高於 1,500m (約 1.5km) 時，須經航管許可方可進行特種目視飛行，且應保持不進雲並能目視地面。
危險 (Dangerous)	< 1 km	嚴禁目視飛行。能見度低於 1,500m 時，除特定搜救或經准許之作業外，一般目視飛行應立即停止，必須依賴儀器飛行規則作業。

出處參考：民航局（CAA）飛行規則及航空氣象測報準則

四 降水條件下的飛行風險

雨水對無人機的危害來自兩個面向：電子設備防水性能限制，以及降雨導致的能見度下降與飛行性能影響。

大多數消費型無人機並無完整防水設計（IP 防水等級不足），水分滲入電子元件可能造成短路損壞。即使標示具備防水功能的機型，也通常只在「小雨」條件下有效，不建議在中雨以上環境飛行。

飛行性能影響則包含了以下 3 項：

1. 重量增加：雨滴黏附在機身與螺旋槳上，會增加無人機的負擔。
2. 升力破壞：螺旋槳上的水膜會改變翼型的形狀，導致飛行效率下降，電池消耗速度加快。
3. 訊號衰減：水分子會吸收 2.4GHz 與 5.8GHz 的無線電波。這意味著在雨天或重霧中，你的圖傳距離會縮短一半以上，飛得太遠就連不上了。

⚠ 絕對禁止在閃電、雷雨、冰雹環境下飛行！雷擊不只損壞無人機，更可能危及地面人員安全。

五 飛行員的氣象儀表板：氣象 App

雖然國中生不需要背誦專業代碼，但應學會看氣象預報中的「降雨機率」與「相對濕度」。當相對濕度超過 90% 時，即使沒下雨，空氣中的水分也已經足夠讓無人機的感測器起霧，應視為「高風險環境」。

✈ 4-3 重點精華

1. 低溫 ($<5^{\circ}\text{C}$) 使 LiPo 電池容量下降至約 70%，飛行前需預熱電池。
2. 氣溫 - 露點溫度差 $< 3^{\circ}\text{C}$ → 霧況風險高，建議延後飛行。
3. 輻射霧（清晨最濃）是臺灣最常見霧況，通常日出後 1 ~ 2 小時消散。
4. 多數消費型無人機無完整防水設計，雨中飛行有電子短路損毀風險。
5. 雨天能見度下降 + 無人機燈光反光，容易造成目視確認困難。
6. ⚠ 閃電、雷雨、冰雹環境絕對禁止飛行！
7. [能見度飛行口訣]：【霧、溼、雨，勿起飛！】

「視線霧、不升空；機身溼、不通電；遇降雨、快降落。」

視線霧：看不清機頭朝向，就絕對不要起飛。

機身溼：剛從冷氣房出來或剛淋雨，一定要擦乾並除溼，否則不通電。

遇降雨：飛行中發現雨滴，立即執行 RTH（自動返航），安全第一。

下一節預告：我們要挑戰最難的「看不見的障礙」——地形產生的亂流！讓我們進入 4-4 節：危險的亂流！

4-4 危險的亂流——地形、建築與機械風切

這一節旨在讓學生理解，「風」在接近地面時會因為地形障礙物而變得雜亂無章，這對小型無人機的穩定性是最大的考驗。

📖 學習點 | 最難預測的飛行威脅

在所有氣象因素中，「亂流（Turbulence）」是最難預測、也最容易讓無人機操作者措手不及的威脅。亂流是空氣流動的不規則擾動，風速與風向在短時間內劇烈變化，使飛行器承受來自不同方向的瞬間衝擊力。

對大型客機而言，亂流主要來自高空氣流；但對低空飛行的無人機而言，最危險的亂流恰恰就在我們周遭——高樓建築的背後、山丘的下風側、橋梁缺口、樹林邊緣……這些看似平靜的地點，都可能隱藏著足以讓無人機瞬間失控的亂流陷阱。

知識面 | 亂流的成因類型與危險地點識別

一 機械亂流——地形與建築造成的亂流（空中的洗衣機）

當風吹過固體障礙物（山丘、建築、橋梁、樹木）時，氣流在障礙物背風側產生不規則的渦旋與回流，稱為「機械亂流（Mechanical Turbulence）」，是將水平風力強行改變方向與速度的現象；亂流強度與障礙物高度、障礙物形狀及風速成正比。

在城市環境中，高層建築群是機械亂流的主要來源。風吹過高樓時，在其背風側形成複雜的渦旋區，且渦旋範圍可延伸至建築高度的 10 至 15 倍距離。這意味著：即使無人機飛在距離大樓看似「安全距離」的位置，仍可能遭遇強烈亂流。

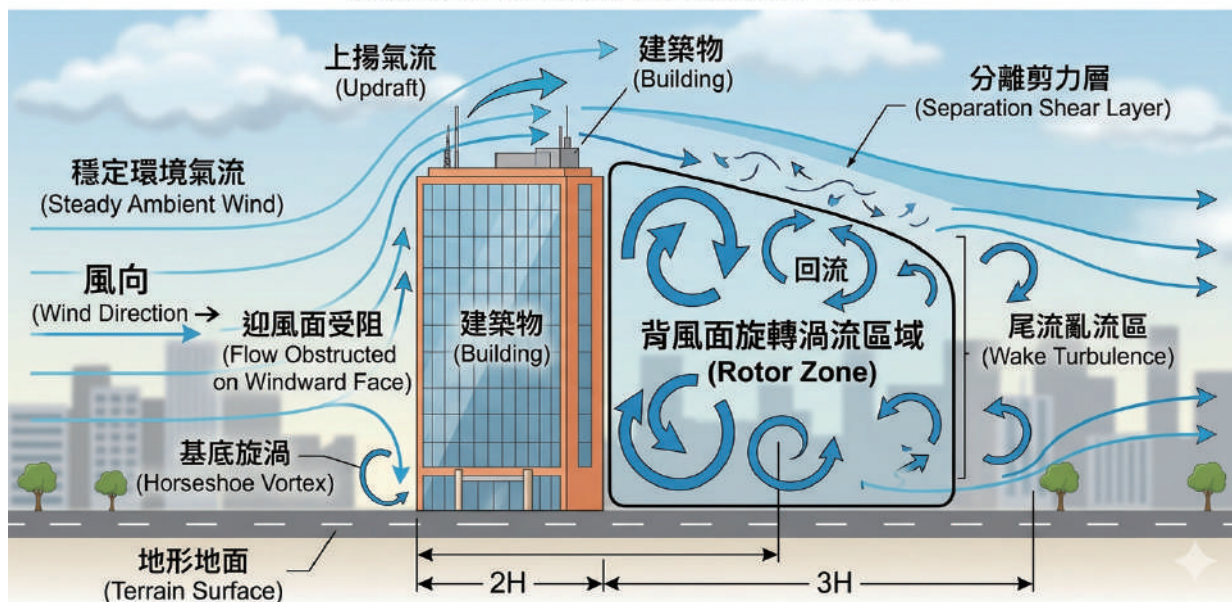
機械亂流的強度，除了與風速相關，另一項粗糙度（Roughness）為地表阻擋風的能力，森林的粗糙度比草地高，因此亂流更強。

二 風切（Wind Shear）——風速或風向的突然改變

風切是指在短距離內風速或風向發生劇烈變化的現象，分為水平風切與垂直風切兩種。對無人機而言，最危險的是「低空風切（Low-Level Wind Shear）」——在接近地面的低空中，風速或風向突然改變，讓飛控板來不及調整而造成急速偏移甚至墜機。

低空風切常見於以下情境：建築邊緣與開闊空間的交界處、山谷與平地的交界帶、前鋒過境時（冷暖氣團交界），以及強對流天氣系統邊緣。

氣流經過建築物後的亂流示意圖



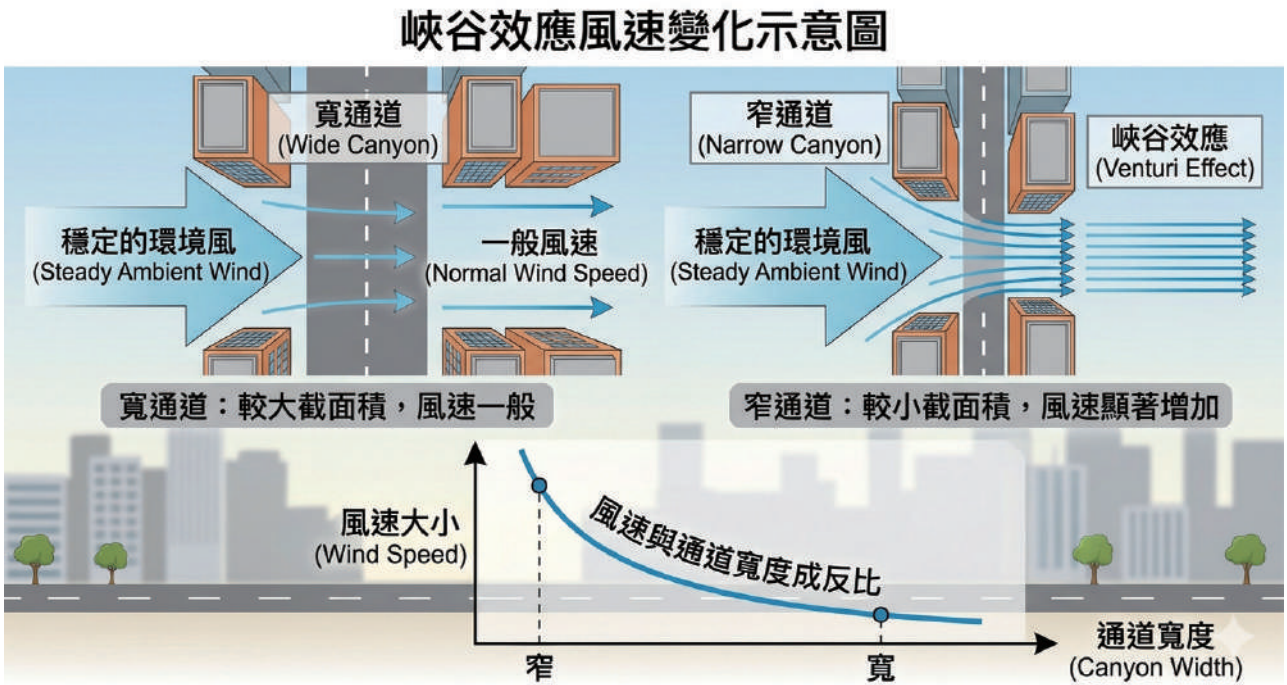
[氣流經過建築物後的亂流示意圖。風力在建築物迎風面受到阻擋，在背風面形成旋轉的渦流區域（Rotor Zone）]

三 危險地點識別與飛行迴避原則

危險地點類型	亂流成因	飛行建議
高樓背風側	建築機械亂流渦旋	與建築保持至少建築高度 2-3 倍的水平距離
山丘 / 山脊背風側	地形機械亂流	山區飛行應在迎風側，避免在背風側低空飛行
橋梁、隧道口附近	氣流加速（文氏效應）	橋洞附近風速可大幅增加，需特別謹慎
樹林邊緣	樹冠層機械亂流	樹林與空曠地交界風場複雜，避免低空穿越
大型建築屋頂	熱力 + 機械亂流疊加	屋頂上方熱氣流與機械亂流並存，風場極複雜
停車場、廣場邊緣	風道效應（峽谷效應）	兩棟建築間的通道風速可遠大於開闊地

在山區飛行時，地形會強烈影響氣流。當風吹向山脈時，空氣會被迫抬升，這在山坡上會產生強烈的上升氣流，但也可能在山脊上方產生劇烈的亂流。

- **峽谷效應 (Venturi Effect)**：當風吹進狹窄的峽谷時，因為通道變窄，風速會瞬間倍增。這就像我們用水管澆花時，捏住水管口水速會變快一樣。在狹窄的巷道或峽谷中飛行，速度感會加倍，且氣流極不穩定。
- **下坡風 (Downslope Wind)**：風從山頂吹下時，會像瀑布一樣快速下沉，容易將無人機直接壓向地面。



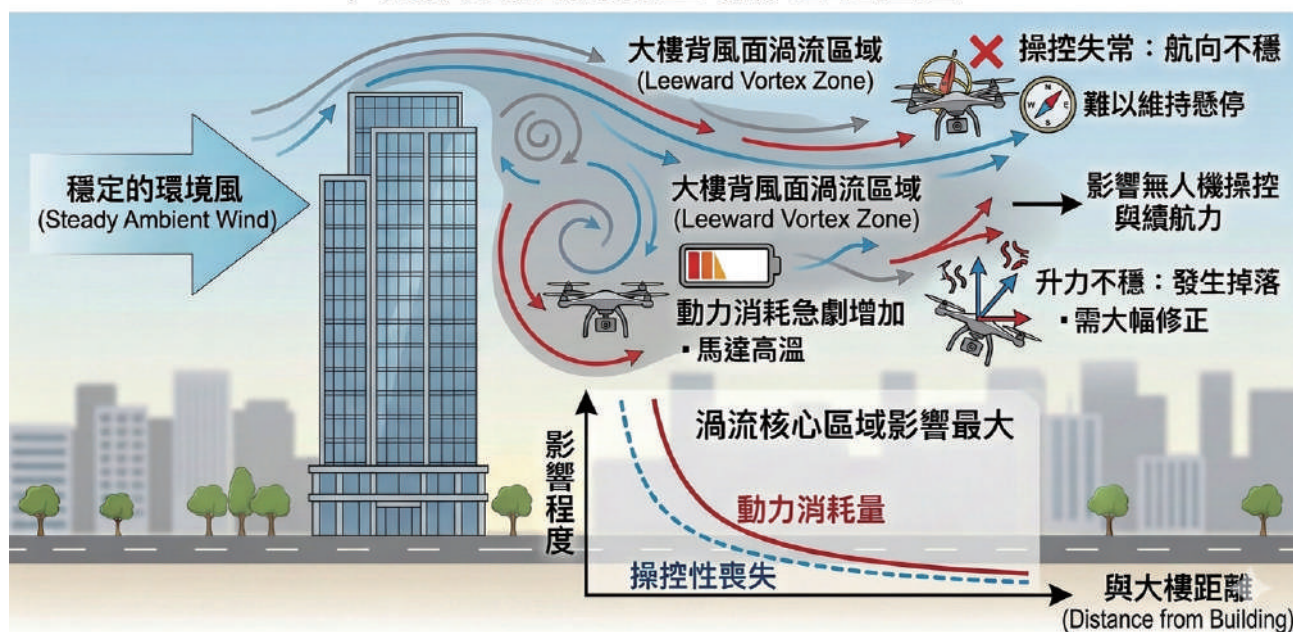
[峽谷效應風速變化圖。橫軸為通道寬度，縱軸為風速大小，顯示通道越窄，風速越大。]

在都市飛行時，大樓就是最大的亂流製造者。即使在平地感覺風很小，只要靠近大樓的背風面（下風處），就可能遇到強烈的捲風。

- **垂直風切**：大樓會將高空的風往下帶，或是把地面的風往上捲。
- **街角捲風**：風吹過大樓轉角時，會產生高強度的旋轉氣流。

國中生在進行城市航拍模擬時，必須學會識別這些區域，通常大樓高度的 2 至 5 倍距離內，都是亂流的高風險區。

大樓背風面渦流區域影響範圍圖



[大樓背風面渦流區域影響範圍圖。顯示渦流區域如何影響無人機的操控性和動力消耗。]

四 亂流遭遇時的應對策略

飛行員於飛行前應該掌握風向與障礙物的關係，必須學會根據當下風向，判斷障礙物的位置。

- **迎風面**：亂流較少，但風速較快，馬達需要較多動力。
- **背風面**：風速可能較慢，但渦流極多，容易失控。

若無人機飛行時遭遇到劇烈亂流時，應如何有效應應面對：

1. **立即降低飛行高度**：亂流強度通常隨高度降低而減弱（靠近地面的穩定層），適當降低飛行高度有助於脫離強亂流區。

2. 增大與障礙物距離：迅速拉開無人機與產生亂流的建築或地形的距離，移往開闊空間。
3. 切換手動控制模式（進階）：GPS 模式在強亂流中可能因 GPS 訊號干擾而失準，有經驗的操作者可切換至姿態模式（ATTI）手動應對。
4. 緊急降落：若亂流過強無法控制，應立即選擇安全的空曠地點緊急降落，保全機體與地面安全。

✈ 4-4 重點精華

1. 機械亂流由固體障礙物（建築、山丘、樹木）的背風側渦旋造成，是城市飛行最常見亂流。
2. 建築背風側的亂流範圍可延伸至建築高度的 10-15 倍距離，「看似安全」可能依然危險。
3. 低空風切是在短距離內風速或風向突然劇變，讓飛控板來不及反應的最危險現象。
4. 橋洞附近的「峽谷效應」可使風速大幅增加，需特別謹慎。
5. 遭遇亂流：降低高度→拉開障礙物距離→移往開闊地→必要時緊急降落。
6. 飛行前應觀察現場風況至少 3 ~ 5 分鐘，判斷有無持續強風與陣風後再起飛。
7. [亂流飛行安全口訣]：【**逢狹速、不背風、渦快高、保安全**】
 - 逢狹速過：在窄巷或峽谷遇到強風，快速飛行通過，避免長時間停滯。
 - 避背風面：不要飛在建築物或山丘的背風側，那裡是捲風區。
 - 遇渦快高：飛機若發生不可控的自轉或下沉（捲入渦流），立即拉高高度脫離混亂區。

掌握了天氣，

下一章我們將了解「合法飛行」的規範與責任！

—— 第 4 章結束 請翻至第 5 章飛行法規 ——

第 5 章 飛行公民

飛行公民——無人機法規與飛行倫理



5-1 註冊——無人機的身分證

學習點 | 你的無人機需要「報戶口」

就像汽車上路前需要完成車輛登記、掛上車牌，超過一定重量的無人機在首次飛行前，必須依法向民航局完成「機體登錄（Machine Registration）」。登錄後，系統會核發一組專屬的登錄號碼，操作者須將此號碼標示於機體明顯處，作為空中的「身分識別」。

這套制度的核心目的有三：一是建立可追溯的責任歸屬——當無人機發生事故或違規飛行，主管機關得以透過登錄資料迅速釐清責任；二是掌握全國無人機數量與分布，有助於空域管理規劃；三是推動操作者的自我約束意識——完成登錄的飛行者，往往對法規有更清楚的認識。

🔍 知識面 | 重量分級與機體登錄制度

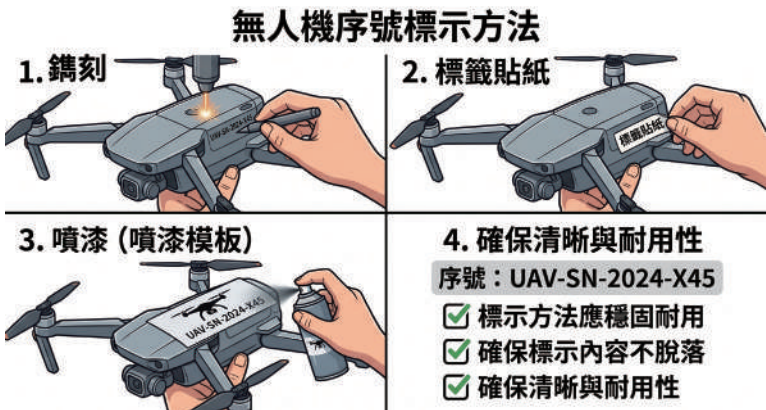
一 遙控無人機註冊重量與類別區分表

依據我國《民用航空法》，無人機的註冊標準主要是根據「所有人身分」以及「最大起飛重量」來區分，以下為詳細的整理表格：

所有人類別	重量範圍	註冊規定
一般民眾（自然人）	未滿 250 公克	免辦理註冊
一般民眾（自然人）	250 公克以上	應辦理註冊
政府機關、學校或法人	不分重量大小	一律應辦理註冊

二 遙控無人機註冊管理要點一覽表

項目	規定內容與要求
誰需要註冊	1. 一般民眾（自然人）：最大起飛重量 250 公克以上。 2. 政府機關、學校或法人：不論重量大小，全部都必須註冊。
申請人年齡	申請人須年滿 14 歲。若未滿 18 歲，應另檢附法定代理人（家長）的同意書。
申請方式	於第一次起飛前，透過民航局指定的資訊系統以電子化方式辦理，需填寫機身型號、序號、性能及所有人聯絡資訊。
號碼標示方法	應以標籤、鐫刻、噴漆等方式標明於固定結構外部，且需確保清潔、不會脫落並能簡單以目視辨認。
標示顏色要求	註冊號碼的顏色應與背景明顯反襯，以便清楚識別。
註冊有效期限	有效期限為 2 年。所有人應於期限屆滿前 30 日內申請延展。
異動與註銷	若所有人資料變更、無人機滅失、損壞不能修復或所有權移轉，應於事實發生日起 15 日內申請變更或註銷。



⚠ **重要觀念：**「免登錄」不等於「免守法」——250 克以下的微型無人機雖免辦登錄，仍須遵守所有相關飛行法規。重量分級決定的是登錄門檻，而非守法義務的起點。

✈ 5-1 重點精華

1. 登錄門檻：最大起飛重量 250g 以上須向民航局辦理機體登錄。
2. 登錄目的：建立責任歸屬、輔助空域管理、提升操作者法規意識。
3. 登錄後取得「登錄號碼」須標示於機體外部明顯處，每次飛行前確認清晰可見。
4. 微型無人機（<250g）雖免登錄，仍須遵守所有飛行法規——「免登錄≠免守法」。
5. 法規持續更新，最新規定以民航局官網公告為準：www.caa.gov.tw

5-2 操作證——你的飛行執照

📖 學習點 | 會操控，不等於有資格操控

「你會開車」和「你有駕照」是兩件不同的事。無人機操作證（也稱操作資格證或飛行執照）的邏輯與此相同——在公共空域操控無人機，操作者的專業素養就顯得至關重要。核發操作證的目的，是為了確保每一位操作人在升空前，都已經具備了足夠的飛航知識、熟悉管理規範，並擁有應對緊急狀況的操縱能力。

對於國中的同學們來說，雖然我們還在學習階段，但了解這套「空中駕照」制度是非常重要的。法律規定，根據無人機的重量、功能以及你是代表「個人」還是「學校/法人」操作，所需要的操作證類別也會有所不同。透過考照過程，我們能從單純的「玩家」蛻變成負責任的「操作人」，確保每一次飛行都能安全升空、平安降落。

🔍 知識面 | 操作證分類、考照條件與申請流程

一 遙控無人機操作證類別與規範一覽表

操作證種類	報考資格（年齡）	操作權限與適用對象	測驗要求
學習操作證	滿 14 歲	需在持有效操作證的人員（不含學習操作證）在旁指導下，操作重量未達 25 公斤的無人機。	無需測驗，直接申請核發。
普通操作證	滿 18 歲	操作自然人所有，重量 2 公斤以上未達 15 公斤且裝置導航設備者。	需通過學科測驗（及格分數 80 分）。
專業操作證	滿 18 歲	1. 政府機關、學校或法人所有之無人機（不分重量）。 2. 自然人所有重量 15 公斤以上者。	需通過體格檢查、學科及術科測驗。

⚠ 課程外切勿獨自飛行！課程中的飛行實作均在合格教練指導下進行，同學們嚴禁在課外自行進行未申請許可的飛行活動。

遙控無人機操作證：種類與報考全攻略

本圖表整理自無人機管理法規，清楚對分「學習」、「普通」與「專業」三類操作證的差異。透過報考年齡、操作限制與測驗程序的對比，幫助使用者判斷適合自己的證照類別。

學習操作證 (Learning License)	普通操作證 (Ordinary License)	專業操作證 (Professional License)
 申請年齡： 滿 14 歲	 報考年齡： 滿 18 歲	 報考年齡： 滿 18 歲
 操作權限與對象： 旁人指導下操作未達 25 公斤無人機	 操作權限與對象： 自然人所有 2-15 公斤 具導航設備者	 操作權限與對象： 政府/機關/學校/法人所有 (不分重量) 或自然人所有 15 公斤以上
 測驗要求： 免測驗，直接申請	 測驗要求： 僅需通過學科測驗 (80分及格)	 測驗要求： 體格檢查、學科及術科 測驗

重要考照要點

- **學科測驗內容**：包含民用航空法規、基礎飛行原理、氣象知識、緊急處置與飛行決策四大項。
- **術科測驗時限**：報考專業操作證時，必須在學科測驗通過後的一年內完成術科測驗，否則學科成績會失效喔！
- **有效期限**：**所有操作證的有效期限均為 3 年**。到期前 30 日內需申請換證，而專業操作證在換證前還需要重新進行體檢與測驗。
- **免證情況**：如果你是操作自己家裡（自然人所有）2 公斤以上未滿 15 公斤，且**沒有裝置導航設備**（如傳統航空模型機）的無人機，是可以免持操作證的。
- **安全至上**：無論持有哪種證件，操作人對飛行的安全性擁有**最後決定權**，必須隨時保持警覺並避讓障礙物

5-2 重點精華

1. 報考年齡：**學習證須年滿十四歲**，普通專業證須十八歲。
2. 法人或學校操作人不分重量皆須專業操作證。
3. 操作十五公斤以上無人機均須取得專業證照。
4. 學科測驗包含法規、原理、氣象及處置與決策四項。
5. 學科八十分及格，專業證另須術科測驗。
6. 專業證術科須在學科通過後一年內完成。
7. **證照有效期 3 年**，換證應於屆期前三十日申請。

5-3 飛行守則——我守法、我驕傲

學習點 | 打造負責任的飛行

遙控無人機的飛航安全不只是操作技巧的展現，更是每一位操作人的法律責任。為了確保空中與地面的公共安全，並調和新興科技與行政管理間的平衡，我國民航法訂定了明確的操作規範與責任歸屬。不論你是為了休閒娛樂還是學術研究，在起飛前都必須掌握「五要五不要」的安全準則並且了解禁航與限航的規範，這不僅能保護他人的生命財產，也能避免自己誤觸法網，成為一名真正專業且負責任的飛手

知識面 | 禁航與限航、五要五不要

一 禁航與限航區域規範

禁航區與限航區的核心差異在於「限制程度」：禁航區（Prohibited Area）為全面禁止任何航空器進入，而限航區（Restricted Area）則是特定條件下限制進入。在臺灣，兩者均由民航局公告，違反將依民航法處罰。

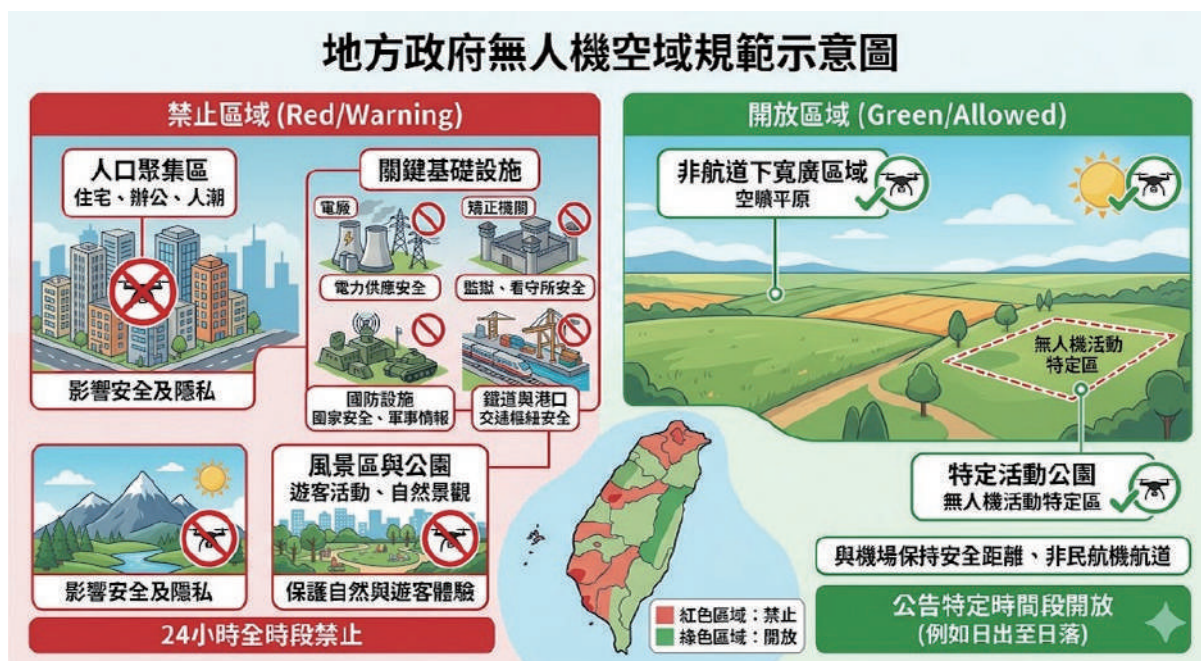


根據《民航法》規定，交通部與國防部共同劃定禁航區、限航區及航空站四周的距離範圍，嚴禁從事遙控無人機飛航活動。**禁航區**特別指總統府、軍事要地及核能電廠等敏感地點，這些區域不僅限制有人航空器，也禁止操作無人機。**限航區**除非是政府機關、學校或法人經過民航局或地方政府許可，否則不得在未經核准的禁止或限制區域內飛行。

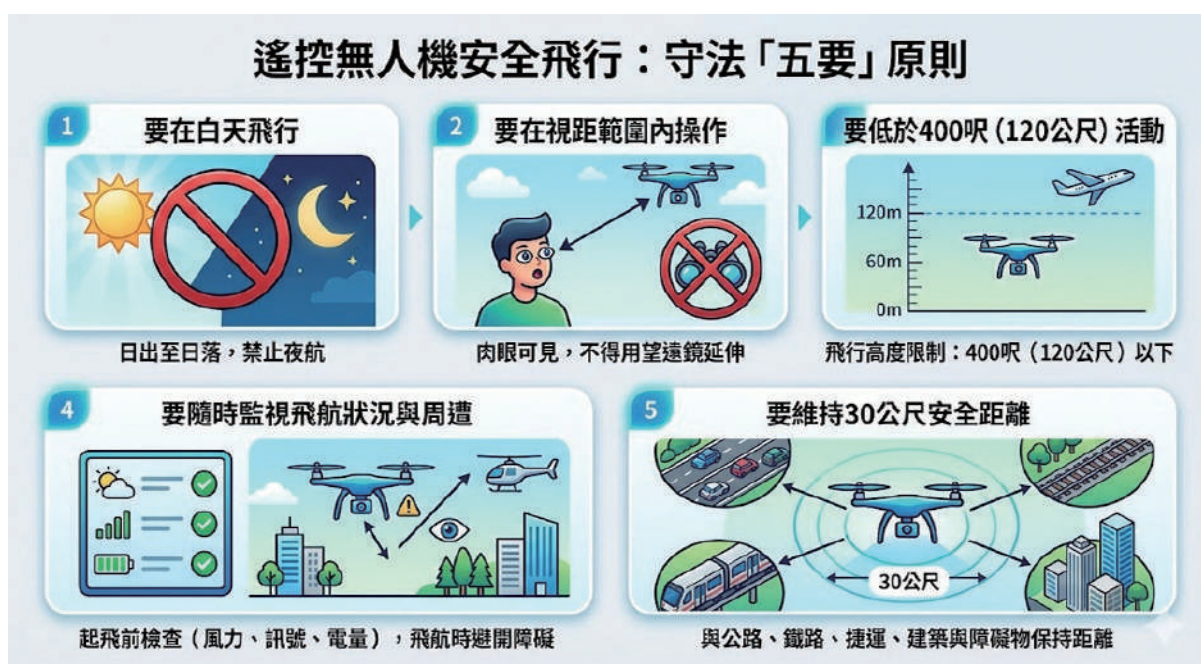
地方政府的區域公告

地方政府會基於公益、安全及隱私等因素，公告無人機的開放或禁止區域與時間：

- **禁止區域**：包含人口聚集區、公園、風景區、鐵道、港口、電廠、水庫、矯正機關及國防軍事設施等關鍵基礎設施。
- **開放區域**：通常為非位於民航機起降航道下的寬廣區域，或是特定可供活動的公園。



五要原則——積極應為的飛行行為



#	五要原則	說明與法規依據
1	要在白天飛行	依據規定，遙控無人機不得於日落後至日出前之時間飛航。這代表你只能在白天操作，因為夜晚視線不佳，容易發生碰撞或失控。除非你是代表政府機關或學校且經過特別申請核准，否則一般人晚上是絕對禁飛的。
2	要在視距範圍內進行操作	操作無人機時，飛機必須維持在肉眼目視範圍內。法律特別規定：除了近視或遠視眼鏡外，不得使用望遠鏡等任何工具來延伸飛行距離。即使你的空拍機有精密的螢幕圖傳功能，那也只能當作輔助，你的眼睛還是要隨時看得到飛機本體。
3	要低於 400 呎活動	為了避免撞到真正的飛機，無人機的飛航高度不得超過地面或水面 400 呎（大約 120 公尺）。如果你飛超過這個高度，不僅危險，還可能面臨高額罰鍰，甚至連無人機都會被沒收。
4	要隨時監視遙控無人機之飛航及其周遭狀況	操作人必須隨時警覺並監控周遭環境，主動避開其他飛機、建築物或障礙物。在起飛前，也要養成檢查的好習慣，確認天氣狀況（如風力、下雨）、遙控訊號是否良好，以及電池電量是否充足。
5	要遵守管理規則之操作限制	飛航時必須與高速公路、鐵路、高鐵、捷運、建築物及障礙物保持 30 公尺以上的安全距離。這是為了確保萬一飛機突然失控，你有足夠的緩衝空間來避免撞上這些重要的設施或建築。

四 五不要原則——明確禁止的飛行行為

#	五不要原則	說明與法規依據
1	不要接近或碰撞航空器、建築物或障礙物	絕對不要想飛近正在降落的飛機，或是在校園走廊內穿梭飛航，應隨時監控並主動避讓，且要遠離建築物、高速公路、鐵路及捷運系統 30 公尺以上。
2	不要投擲或噴灑物件	嚴禁投擲或噴灑任何物件。
3	不要裝載危險物品	不得裝載民航局公告的危險物品，以免墜毀時造成危害。
4	不在人群上方飛行	禁止在演唱會、廟會、體育賽事等聚集人群上方飛行（故障墜落可造成嚴重人身傷害）。
5	不要同一人同時間控制 2 架以上無人機	為了確保你能隨時監視飛行狀況，操作人一次只能控制 1 架無人機。



5-3 重點精華

1. 五要：要在白天飛行、要在視距範圍內進行操作、要低於 400 呎活動、要隨時監視遙控無人機之飛航及其周遭狀況、要遵守管理規則之操作限制
2. 五不要：不要接近或碰撞航空器、建築物或障礙物、不要投擲或噴灑物件、不要裝載危險物品、不在人群上方飛行、不要同一人同時控制 2 架以上無人機。
3. 不超高 120m (距地面) 是避免與有人航空器衝突的關鍵規定，從山頂或高樓起飛需特別注意。

5-4 責任飛行——做個優良好飛手

學習點 | 遙控無人機的飛行倫理與法律責任

遙控無人機的興起為社會帶來了科技便利，但隨之而來的安全與隱私挑戰，使得「飛行倫理」成為每一位操作員的核心素養。這不僅關乎個人操作技巧，更涉及對社會禮儀的尊重、法律責任的承擔以及對公共安全的維護。

知識面 | 優良好飛手的幾大面向

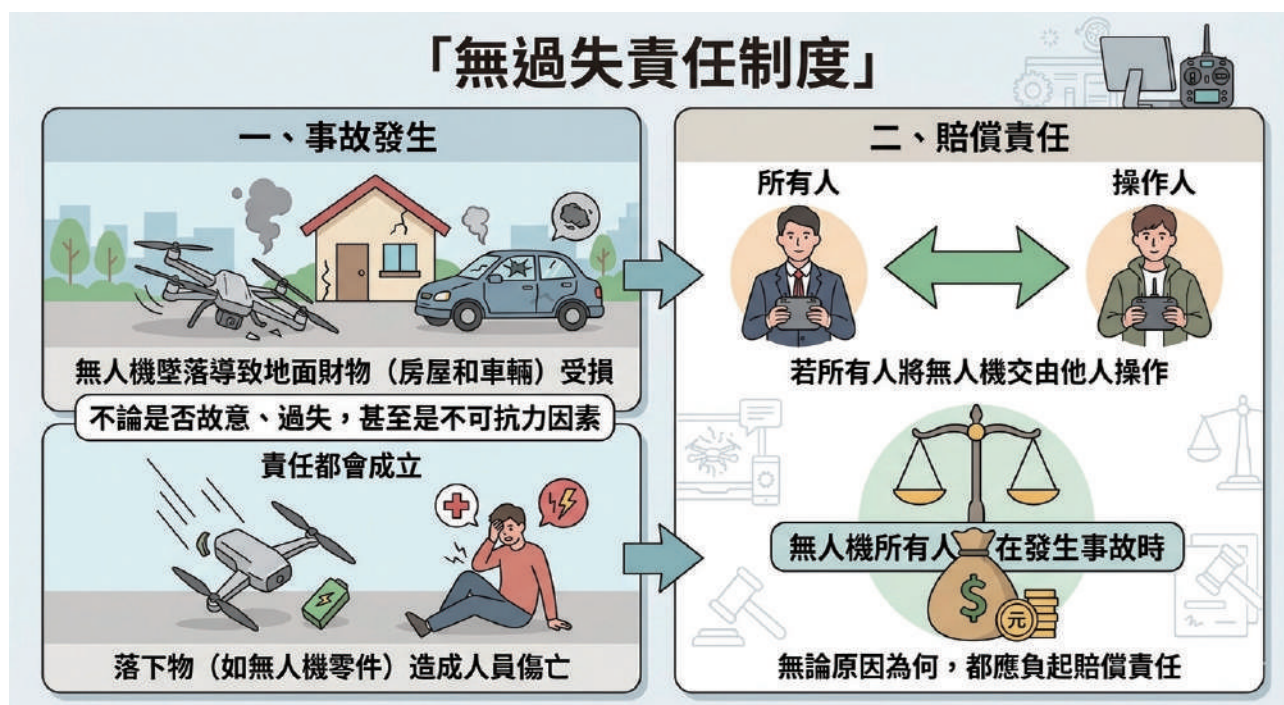
一 尊重隱私：不可逾越的行為底線

飛行倫理的第一步是尊重他人的隱私權與社會禮儀。根據規範，操作人除了遵守基本的飛行規則外，嚴禁利用無人機從事不法行為。這包括不得無故窺視、竊聽他人非公開的活動、言論或身體隱私部位，亦不得進行錄音、照相或錄影等竊錄行為。此外，嚴禁無故侵入他人庭院、校舍、住宅或辦公室區域，以避免干擾大眾活動或侵害私人空間。



二 責任承擔：無過失責任的嚴格約束

在法律層面上，遙控無人機採取嚴格的「無過失責任制度」（嚴格責任）。這代表無論是故意、過失，甚至是不可抗力的因素，只要無人機（或其落下物）導致他人死傷或財物損失，**所有人均應負賠償責任**。若所有人將無人機交由他人操作，發生事故時，**所有人與操作人須負連帶損害賠償責任**。這種制度要求所有人與操作人必須對飛航安全負起最高程度的責任，並對設備進行妥善維護。



誠實通報：建立透明的安全文化

當意外發生時，誠實通報是飛行倫理的重要表現。所有人或操作人若遭遇飛航安全相關事件，應於**發生或得知消息後 24 小時內**，填具報告表通報民航局。必要時民航局為了調查需要或影響飛航安全之情況，得暫停該無人機的操作或飛航活動，以確保風險不再擴大。



四 知法不犯法：違規行為的嚴厲處分

為了維持社會秩序與公共利益，違反規範將面臨處罰，嚴重者甚至會被沒入無人機。以下行為是法律嚴格禁止的重要項目：

- **空域違規**：飛行高度超過 400 呎，或在禁航區、限航區及機場周邊區域活動。
- **資格不符**：未領有有效操作證，或未依規定投保（或足額投保）責任保險者。
- **標示與程序違規**：違反註冊、標明註冊號碼、活動許可或飛安事件通報等相關規定者。



五 總結：自律帶來的飛行自由

飛行倫理的核心在於「自律」。操作人應充分理解產品性能、遵守使用手冊，並在操作時隨時監控周遭環境，主動避讓航空器與障礙物。正如法規所強調，民航法增訂專章的目的在於調和新興科技與地面安全間的平衡。唯有每位操作員都能將法規內化為倫理準則，才能在確保公共安全的前提下，真正享受操控在雲端翱翔的樂趣。

✈️ 5-4 重點精華

1. 禁止窺視、竊聽或無故侵入他人住宅與私密空間。
2. 發生死傷或財損時，不論故意過失，所有人均應賠償。
3. 發生飛安事件應於二十四小時內通報民航局。
4. 逾高、闖禁航區或無證操作者，處罰鍰並沒入無人機。
5. 法人執行任務須投保，未足額投保者將面臨罰則。
6. 嚴禁違法用途，違規者依民刑法與民航法從嚴處分

成為飛行公民，下一步——
學習如何在天空中做出正確的決策！

—— 第 5 章結束 請翻至第 6 章飛行安全 ——

第6章 飛行安全

飛行指揮官——飛行決策與緊急應變

本章內容旨在幫助國中生從「只想趕快飛」的心態，轉變為負責任的「飛行指揮官」。



6-1 人的因素——IMSAFE 自我評估檢核

學習點 | 最先進的飛行器，也需要最清醒的飛行員

研究顯示，航空事故中超過 70% 的原因與「人的因素（Human Factors）」有關，而非單純的機械故障。無人機雖然不需人坐在機艙內，但操作者的身心狀態，仍然直接決定了飛行的安全品質。

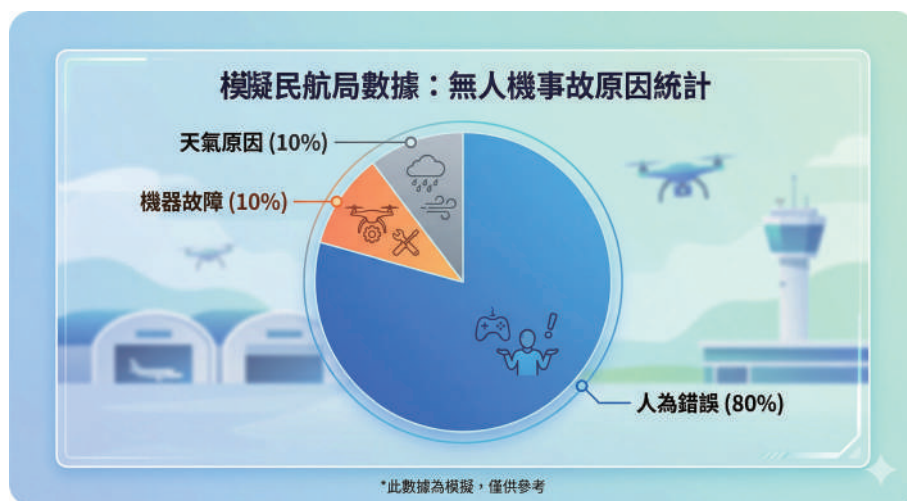
疲憊的飛行員反應變慢；緊張的操作者容易誤判距離；服藥中的人可能注意力分散；帶著情緒飛行的人容易做出衝動決策。這些「人的因素」在專業航空界已被研究多年，並發展出了一套簡單好記的自我評估工具——「IMSAFE 檢核表」。

在每一次飛行前，用 IMSAFE 問問自己：今天的我，適合飛行嗎？這是對自己負責，也是對他人負責的態度。

知識面 | IMSAFE 六項自我評估項目

在無人機技術發達的今天，機器本身的故障率其實非常低。根據民航局的統計報告，在各類無人機飛行事故中，硬體損壞通常只佔極小比例，絕大多數的炸機原因都指向同一個關鍵點：「操作者」。

我們的大腦並不是完美的電腦，它在處理訊息時會受到生理狀況和情緒狀態的劇烈影響。當你在煩躁、疲勞或者急忙時，大腦為了減輕負擔，會自動「忽略」一些它認為不重要的資訊，例如風速的細微變化、電池耗電的異常速度，或者是四周的人群。這在心理學上稱為「狹窄注意力」。優秀的飛行指揮官，必須學會識別自己大腦的侷限性，在起飛前確保自己的生理與心理狀態處於「可飛行」水平。



[無人機事故原因統計圓餅圖。內容：標示出人為錯誤（佔 80%）、機器故障（佔 10%）、天氣原因（佔 10%）。模擬民航局數據製作。]

IMSAFE 檢核表

IMSAFE 是六個英文單字的首字母縮寫，涵蓋了飛行前最重要的六個自我評估面向：

字母	項目	飛行前自我提問
I	Illness（疾病）	我今天身體健康嗎？有發燒、頭痛、感冒等症狀嗎？任何不適都可能影響反應與判斷力。
M	Medication（用藥）	我有服用任何藥物嗎？感冒藥、過敏藥、止痛藥可能造成嗜睡或注意力下降，需特別注意。
S	Stress（壓力）	我今天有強烈的情緒壓力嗎？考試壓力、人際衝突、情緒低落都可能使判斷力下降。
A	Alcohol（酒精）	我在過去 8 小時內有飲酒嗎？酒精會影響反應速度、協調能力與判斷力，飲酒後嚴禁飛行。

字母	項目	飛行前自我提問
F	Fatigue (疲勞)	我昨晚睡眠充足嗎？疲勞使注意力與反應速度大幅下降，是飛行事故的重要原因。
E	Emotion (情緒)	我今天情緒穩定嗎？過於興奮或沮喪都可能導致操作草率或過度保守，影響飛行品質。

IMSAFE 的使用方式

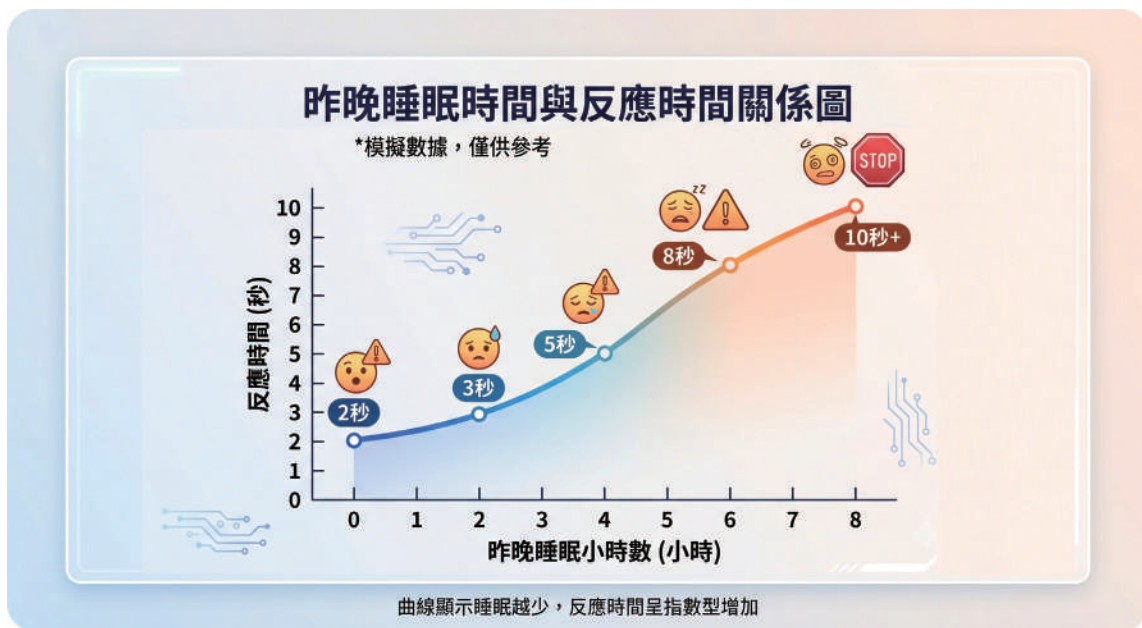
IMSAFE 的使用非常簡單：在每次飛行前，逐項自問這六個問題。若任何一項的答案讓你感到「不確定」或「有疑慮」，正確的決定就是——今天不飛。

這需要勇氣，尤其當你已經計劃好要拍攝某個場景，或是朋友都在等著看你飛。但「繼續飛下去」的衝動，正是航空界稱為「繼續飛行謬誤」的心理陷阱——明知條件不佳，卻因為已投入計劃而不願中止。

黃金準則：「寧可在地面上希望自己在空中，也不要空中希望自己在地面上。」

疲勞的物理機制：反應時間的延遲

疲勞到底如何具體影響飛行？我們來拆解飛行員的「資訊 - 決策 - 動作」循環。當你看見圖傳螢幕上飛機靠近樹枝（資訊），大腦計算距離並決定轉向（決策），最後驅動手指撥動搖桿（動作）。



[反應時間與睡眠時間關係圖。內容：橫軸為昨晚睡眠小時數（0～8小時），縱軸為人在模擬器上看到危險訊號到採取行動的反應時間（秒）。曲線顯示睡眠越少，反應時間呈指數型增加。]

在清醒狀態下，這個循環只需要約 0.2 秒。但當你疲勞時，大腦神經傳導速度變慢，反應時間可能延長到 0.5 秒甚至 1 秒。想像一下，如果你的飛機以 10 m/s 的速度飛行，0.5 秒的反應延遲意味著飛機在你的大腦做出決定前，已經多飛了 5 公尺！這段距離通常就是安全飛行與炸機的分界線。

四 風險評估與指揮官的決策倫理

培養情境覺察能力，就是要求飛手在飛行時擁有「360 度視角」：不僅要看飛機，還要看天空（有無鳥類）、看地面（人群）、看遙控器（電量、訊號）。當檢測到 IMSAFE 狀態不佳或是風險過高時，指揮官的倫理責任是保護公眾安全。「冒險飛行」不是勇敢，而是不負責任。真正的專業飛行員，懂得在風險大於收益時，果斷取消飛行任務。

五 其他重要的人的因素

人的因素	定義	在無人機操作中的表現
情境意識喪失	失去對當前飛行環境的整體掌握	只專注盯螢幕，忘記觀察周圍環境與無人機位置
繼續飛行謬誤	明知條件不佳仍堅持繼續飛行	電量已低於 20% 仍不降落，風速明顯增大仍繼續飛
任務導向偏誤	過度專注任務而忽略安全	為完成拍攝角度而飛入禁區或超高
過度自信	高估自己的技術能力	新手嘗試超出能力範圍的飛行動作導致失控

✧ 6-1 重點精華

1. IMSAFE = Illness（疾病）、Medication（用藥）、Stress（壓力）、Alcohol（酒精）、Fatigue（疲勞）、Emotion（情緒）。
- 六項中任何一項有疑慮，正確決定就是「今天不飛」。
2. 「繼續飛行謬誤」是最危險的心理陷阱——明知條件不佳卻因已投入計劃而不願中止。
3. 情境意識（Situational Awareness）：時刻掌握無人機位置、電量、風況與周圍環境。
4. 航空事故 70% 以上與人的因素有關，機械故障反而是少數。
5. 飛行前 IMSAFE 自我評估，是每次飛行的第一道安全防線。
6. 【狀態檢核安全口訣】

飛航五要素：身心藥睡核，OK 再起飛。

「身體佳、心穩定、未服藥、睡飽飽、檢核好。」

身體佳：身體不適請原地休息。

心穩定：心情不穩（生氣、煩躁）不操作。

未服藥：任何感冒或暈車藥都可能致命。

睡飽飽：睡眠不足，反應慢，別拿炸機測試。

檢核完：務必完成 IMSAFE 六項檢核。

6-2 環境覺察——禁限航區與地圖識別

這一節將教導學生如何像飛行員一樣「讀圖」，明確知道哪裡可以飛、哪裡不能飛，並認識飛行中的潛在電磁干擾源。

📖 學習點 | 看懂你周圍的環境，才能做出正確決策

IMSAFE 評估了「人」的狀態，而「環境覺察（Environmental Awareness）」則評估了「環境」的狀態。一位真正的飛行指揮官，在起飛前不只問自己「我適合飛嗎」，還會問「這個環境適合飛嗎」。

環境覺察包含兩個層面：一是法規層面——我現在所在的空域是否允許飛行（如禁飛區：法律規定嚴禁無人機進入的區域、限飛區：有高度、時間限制的區域。）；二是物理層面——現場的氣象、地形、障礙物條件、電磁干擾源（會影響無人機指南針與訊號）等等的區域是否安全？

這一節，我們將深化學到的 Drone Map 知識，進一步學習如何在現場進行環境識別，建立「360 度環境覺察」的飛行習慣。

🔍 知識面 | 飛行前的完整環境評估

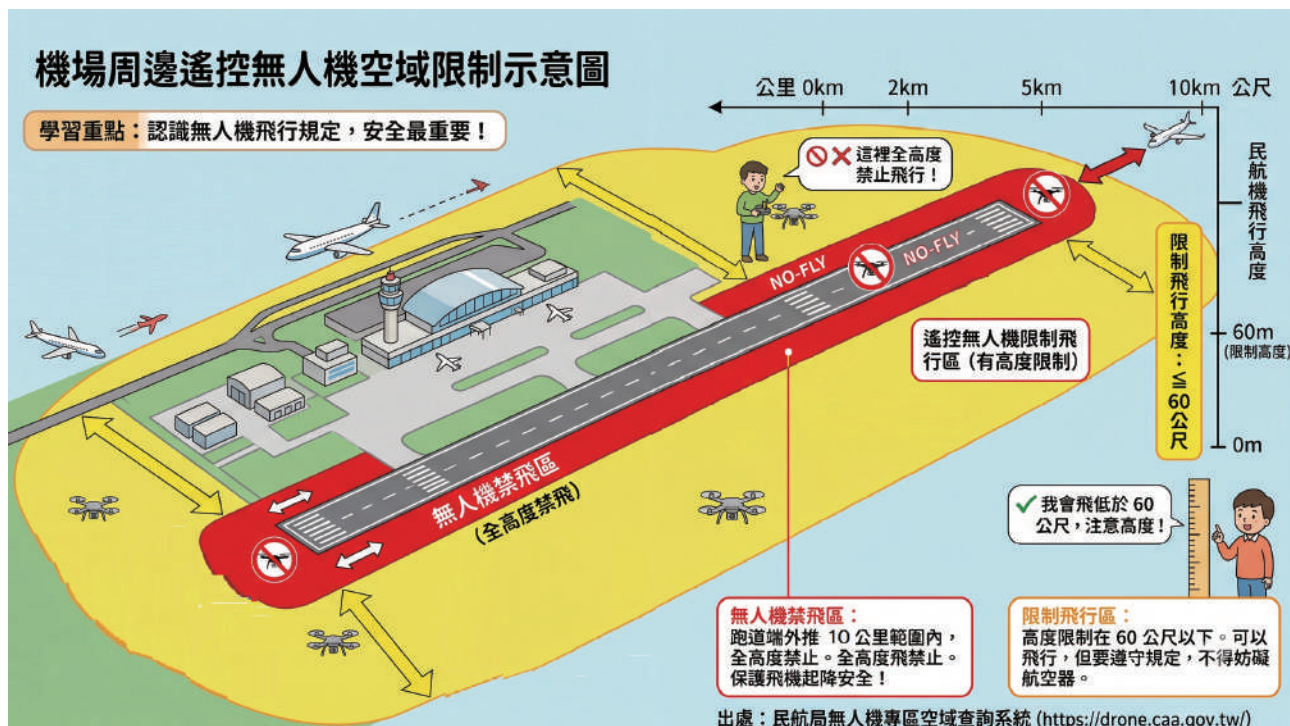
一 空域管理：為什麼天空需要交警？

在馬路上，我們知道有禁行機車道或行人徒步區。天空中同樣存在看不見的交通規則。這並非為了限制飛手的樂趣，而是基於物理學上的能量守恆與大眾安全。無人機本身雖然輕巧，但若在高速移動下碰撞，其產生的動能（ $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ）驚人。

禁飛區（No-Fly Zone）的劃定主要基於以下邏輯：

1. **飛機引擎風險**：客機引擎在吸入鳥類時已極度危險，若吸入硬度極高的無人機鋰電池或馬達，可能導致引擎葉片斷裂，瞬間失去動力。

2. **雷達干擾**：機場依靠高精度雷達指引飛機起降。無人機的無線電訊號可能會在雷達螢幕上產生「鬼影」，干擾飛航管制員的判斷。
3. **安全與保密**：核電廠、總統府等軍事或政治要地，為防止恐怖攻擊或機密洩漏，劃定為永久禁飛區。



[機場周邊禁飛空域示意圖（包含水平距離與垂直高度）。內容：展示機場跑道中心線延伸的航道區（禁飛）、周邊的限制飛行區（有高度限制，如不能高於 60 公尺）。出處：民航局無人機專區空域查詢系統。]

UTM 地圖識讀術：飛行員的讀圖能力

作為飛行指揮官，起飛前必須查看專業地圖。這不是單純看 App 上的紅圈，而是需要識別圖資背後的風險。

- **數據層級分析**：當前臺灣的 UTM 系統將空域分為不同級別。紅色為絕對禁止，黃色為需要申請。國中生需要明白，「沒有紅圈不代表可以隨意飛高」。臺灣民航法規定，無人機最高高度限制為 120 公尺（約 40 層樓高），即使在合法空域，超過此高度也屬違法。
- **風險比對**：優秀的飛手會進行「地圖比對」。打開地圖，識別學校操場旁是否有鐵路（磁場強大）、操場上方是否有直升機航道（高度限制），這是從「操作者」轉向「指揮官」的關鍵步驟。



[App 上的無人機地圖介面。內容：標示出飛手目前位置、禁飛區紅圈、高度限制數字。]

三 實際案例案例：英國蓋特威克機場事件

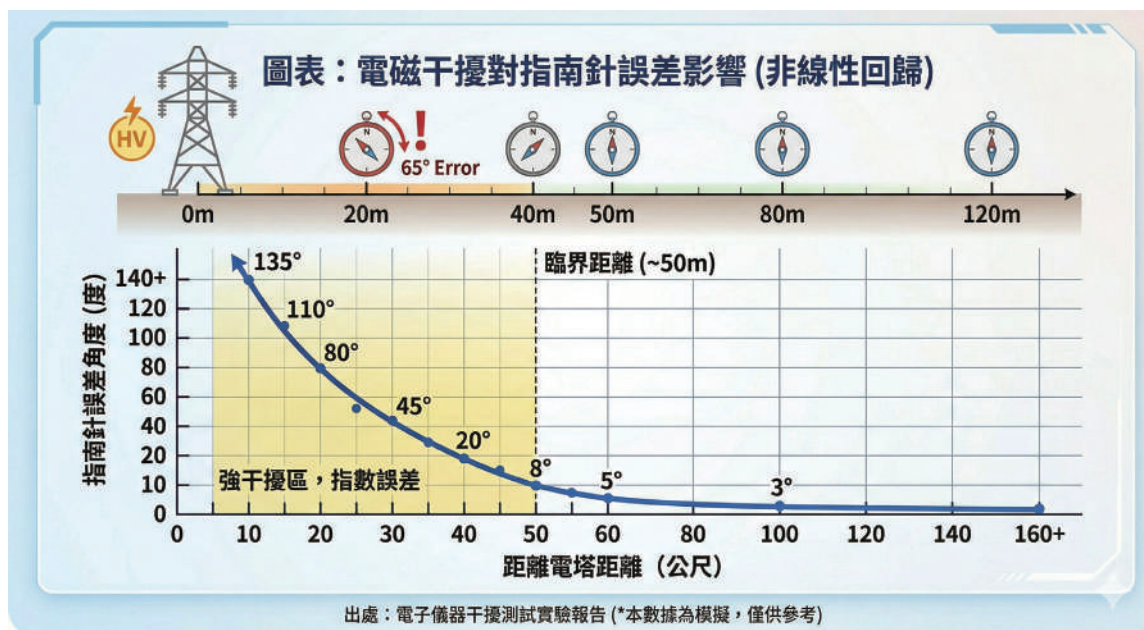
案例說明：2018 年聖誕節期間，英國蓋特威克機場（Gatwick Airport）因多次發現無人機闖入，迫使機場連續關閉 33 小時，影響超過 14 萬名旅客，經濟損失高達數千萬英鎊。這起事件顯示了非法飛行不僅違法，更會對社會運作造成巨大衝擊。

案例分析：這顯示了禁飛區的物理阻擋能力有時會失效（如駭客改寫飛機韌體）。這也強調了 UTM 系統的必要性。如果無人機都安裝了「電子圍籬」系統，自動在禁飛區邊緣停下，事故就不會發生。

四 電磁與物理隱形殺手

地圖上沒有標註的隱形殺手往往更致命：

1. 高壓電場（EMI）：磁場會干擾無人機的指南針。實際案例中，有飛手在 10 萬伏特高壓電塔下飛行，無人機因指南針判定方向錯誤，直接高速飛離操場撞擊民宅。
2. 物理反射（Multi-path）：在金屬密集處（如大樓、金屬橋樑），GPS 訊號會發生反射，導致飛機位置判定誤差高達 10 公尺以上。



[電磁干擾對指南針影響數據圖。內容：橫軸為距離電塔距離（公尺），縱軸為指南針誤差角度（度）。曲線顯示距離小於 50 公尺時誤差呈指數型上升。]

五 空域環境評估——五步驟飛行前確認

1. 【查地圖】開啟 Drone Map (drone.caa.gov.tw) 確認飛行地點空域狀態（紅／橘／綠）。
2. 【查天氣】查詢中央氣象署或專業飛行天氣 App，確認風速、降雨機率、能見度、對流狀況。
3. 【查時間】確認飛行時間在日出後至日落前，避免夜航違規。
4. 【查周邊】現場觀察半徑 300 公尺內的建築、電線、樹木、人群聚集點、道路等障礙物。
5. 【查機體】確認無人機電池電量充足、螺旋槳無損傷、各部件鎖緊、相機雲台正常。

六 現場地圖識別——從空拍地圖看懂飛行環境

除了 Drone Map 的空域查詢，飛行者也應學會從衛星地圖（如 Google Maps）判讀飛行環境中的潛在危險：

地圖上的標誌	代表的環境特徵	飛行注意事項
密集建築群（灰色區塊）	高樓密集，機械亂流風險高	注意背風側亂流，保持與建築安全距離
綠色大片區域	公園、樹林或山地	確認是否為國家公園（需申請），注意樹冠亂流
藍色區域（水域）	河流、湖泊、海域	水面對流較弱，但注意墜水後打撈困難
道路與橋梁	交通幹道、橋梁結構	注意車輛與行人，橋附近有文氏效應（風速加快）
機場圖示或跑道標示	機場或直升機停機坪	立即查詢管制範圍，通常為禁飛或限航區

七 360 度環境覺察的現場執行

抵達飛行地點後，在開箱起飛前，建議進行「360 度環境掃視」：

- ① 向上看：確認飛行高度範圍內無電線、纜索、低空飛行物（直升機、輕型飛機）。
- ② 向周圍看：確認半徑 30 公尺內無人群聚集，有足夠的緊急降落空間。
- ③ 向遠處看：判斷主要風向，確認順風 / 逆風 / 側風的飛行路徑規劃。
- ④ 向地面看：確認起飛點地面平坦穩固，無鬆軟沙地或不平整面（可能導致側翻）。

✈ 6-2 重點精華

1. 飛行前五步驟：查地圖→查天氣→查時間→查周邊→查機體，缺一不可。
2. Drone Map 確認空域 + 中央氣象署確認天氣 = 完整的飛行前資訊確認。
3. 現場 360 度環境掃視：向上（電線 / 飛機）、向周圍（人群 / 降落點）、向遠（風向）、向地面（起飛點）。
4. 從衛星地圖識別危險：密集建築（亂流）、橋梁（峽谷效應）、機場圖示（禁限航）。
5. 環境覺察是持續性的——飛行中也需定期掃視環境，而非只在起飛前確認一次。
6. 「看起來沒問題」不等於「真的沒問題」——環境評估需要系統化步驟，不能憑感覺。
7. 【環境覺察安全口訣】「起飛前、查地圖；禁飛區、莫闖入；高壓電、要遠離；人潮處、不飛行。」

起飛前查地圖：養成習慣，像看氣象一樣看空域。

禁飛區莫闖入：違法飛行會面臨高額罰款（最高 150 萬元）。

高壓電要遠離：保持至少 50 公尺距離。

人潮處不飛行：遵守倫理，保護大眾安全。

6-3 自動化危機——當 GPS 與圖傳失效時

這一節將重點教導學生在無人機失去高科技輔助時，如何運用基礎物理與純手工操作技術來拯救無人機，為高中階段的「姿態模式」飛行打下堅實基礎。

📖 學習點 | 科技幫助你，但你不能完全依賴科技

現代消費型無人機擁有強大的自動化功能——GPS 定點懸停、自動返航、智慧跟隨、障礙物感應迴避……這些功能讓飛行變得前所未有地簡單與安全。但有一個危險的副作用：過度依賴自動化，讓操作者忘記了「如果自動化失效，我該怎麼辦？」

GPS 訊號干擾、磁場異常、建築物遮蔽、圖傳訊號中斷——這些情況在現實飛行中並不罕見，而且往往在最不方便的時機發生。當自動化系統突然失效，一個缺乏手動飛行能力的操作者，將瞬間陷入慌亂，大幅提升墜機風險。

這一節，我們將學習 GPS 失效與圖傳中斷的成因、警示訊號，以及遭遇這兩種危機時的正確應對策略。

🔍 知識面 | GPS 失效與圖傳中斷的處理

一 GPS 失效的成因與警示訊號

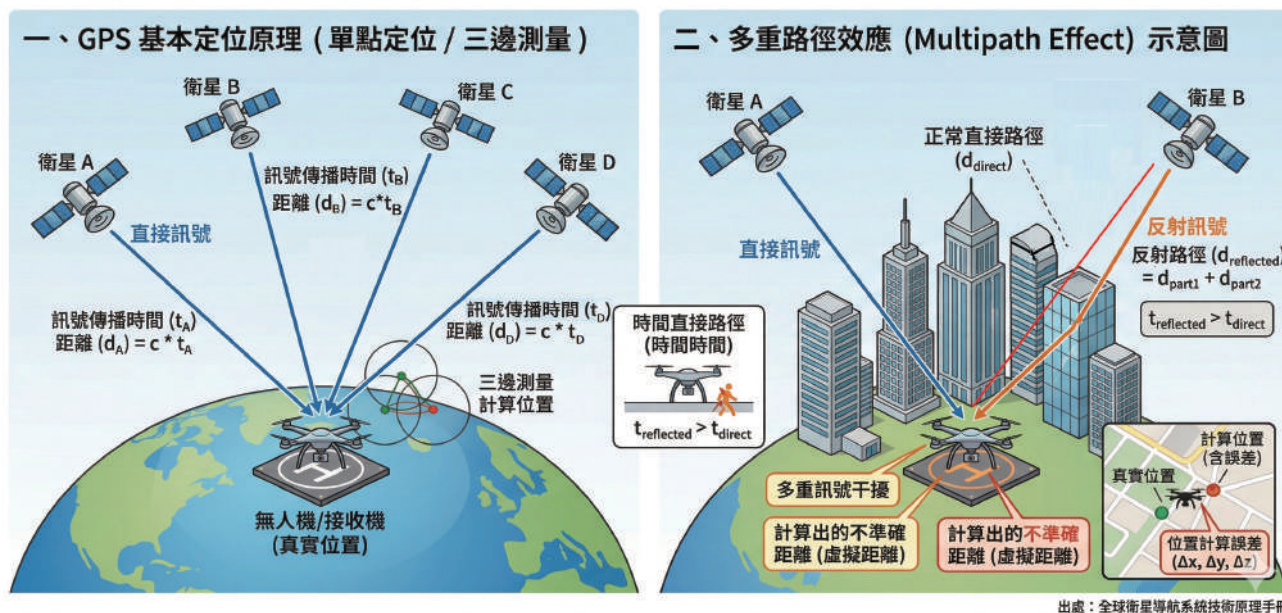
GPS（全球定位系統）是現代無人機自動飛行的核心。飛控板利用 GPS 訊號確認自身位置，實現定點懸停、自動返航等功能。當 GPS 訊號不足或受干擾時，這些功能將失效。現代無人機的穩定感，來自於對衛星定位系統（GPS/GLONASS）的高度依賴。GPS 幫助無人機精確判斷自己在地圖上的「經緯度」。然而，GPS 信號在遇到金屬反射（例如在高樓林立的都市）或是被實體阻擋（例如在茂密的樹林中、峽谷底）時，會發生「多重路徑效應（Multi-path Effect）」，導致無人機不知道自己在哪裡。

GPS 失效成因	說明	常見發生場景
訊號遮蔽	高樓、峽谷、樹冠遮蔽衛星訊號	城市峽谷、森林內部、橋梁下方
磁場干擾	附近強磁場使磁力計（指南針）失準	高壓電線、大型鋼鐵建築、停車場
電子干擾 (GPS Spoofing)	惡意訊號欺騙 GPS 定位	特定敏感區域附近
衛星數量不足	可接收衛星數少於 6 顆	峽谷地形、室內飛行嘗試

GPS 失效的警示訊號：App 顯示「GPS 訊號弱」或「指南針異常」警告；無人機在靜風中仍持續緩慢漂移；解鎖時飛控板拒絕起飛並要求重新校準指南針。

當衛星顆數低於 6 顆時，飛機就會失去位置鎖定能力。這時候，自動化系統會切換為「姿態模式（ATTI）」。這是一個危險的信號，代表飛機不再「定點」，而是像一隻懸浮在空中的氣球，風吹到哪，就漂到哪。

全球衛星導航系統技術原理手冊：GPS 定位原理與多重路徑效應示意圖



[GPS 定位原理與多重路徑效應示意圖。內容：展示衛星訊號被大樓反射後到達無人機，導致位置計算誤差的過程。出處：全球衛星導航系統技術原理手冊。]

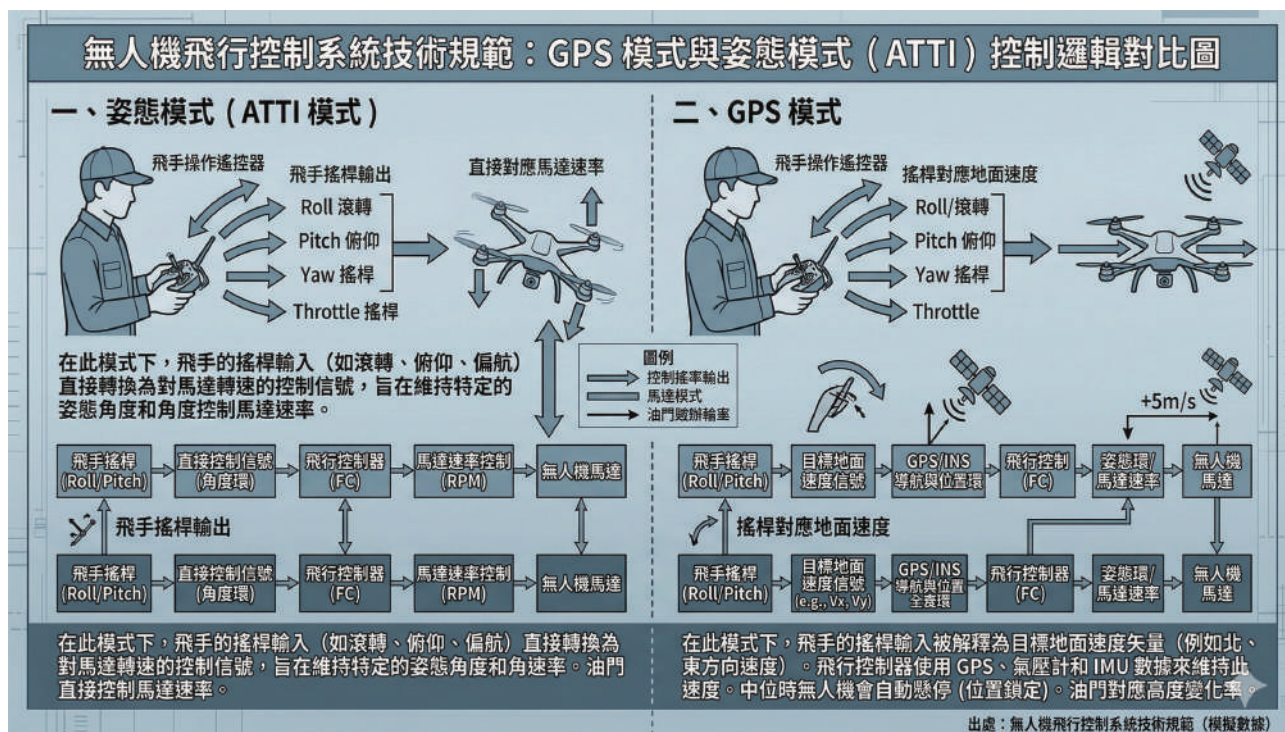
GPS 失效時的應對策略

當飛行中 GPS 訊號失效，無人機通常會自動切換至「姿態模式（ATTI Mode）」——失去 GPS 定位輔助，無人機仍能保持姿態穩定，但不會自動定點，會隨風飄移。此時操作者需要：

1. 保持冷靜——ATTI 模式下無人機仍可正常操控，慌亂才是最大風險。
2. 先上升高度——飛高通常能繞過遮蔽物，恢復圖傳。
3. 無法恢復圖傳，立即降低高度——減少漂移距離，在低空更容易目視控制。
4. 尋找安全降落點——不要勉強返回起飛點，優先在最近的安全空曠地點降落。
5. 手動返航——用搖桿手動操控無人機返回，不依賴自動返航（RTH）功能。
6. 避免在強風中長時間漂移——盡快降落，避免被風吹至視線外，或電力耗盡。

手工技術才是王道：在姿態模式下，飛手必須扮演「飛控電腦」的角色；應放棄螢幕畫面，採取肉眼目視操控為主。

1. **物理平衡**：當飛機被風向右吹時，你需要手動向左打桿去平衡它，而不是等待飛機自己定點。
2. **高度維持**：沒有氣壓計的精確輔助，飛機可能會因為地形亂流自動上升或下降，需要頻繁微調油門平衡高度。
3. **目視為王**：失去 GPS 後，螢幕畫面極可能顯示錯誤的位置（畫面與實景不符）。此時必須「抬頭看飛機」，運用目視導航。



圖傳中斷（失聯）的成因與應對

圖傳（Video Transmission）是將無人機鏡頭影像即時傳回遙控器螢幕的系統。圖傳中斷意味著操作者失去視覺回饋，但不一定等於控制中斷。

情況	正確應對方式
圖傳中斷但遙控仍有訊號	勿慌張，用目視確認無人機方位，手動操控返航或降落
圖傳中斷且遙控訊號微弱	立即啟動 RTH（自動返航），同時移動至開闊地點增強訊號
完全失聯（Failsafe 觸發）	飛控板自動執行 Failsafe 程序（懸停 / 返航 / 降落），操作者移往最後已知位置等待

重要觀念：「圖傳中斷」≠「控制中斷」！保持冷靜、目視確認無人機位置是最優先的應對動作。

✈ 6-3 重點精華

1. GPS 失效常見原因：高樓遮蔽、磁場干擾（高壓電線）、衛星數量不足（<6 顆）。
2. GPS 失效警示：App 顯示 GPS 訊號弱、指南針異常、無人機在靜風中持續漂移。
3. GPS 失效→切換 ATTI 模式：無人機仍可控制但會隨風漂移，需手動操控盡速降落。
4. 圖傳中斷≠控制中斷：保持冷靜，用目視確認無人機位置，手動操控返航。
5. 完全失聯觸發 Failsafe：飛控板自動懸停或返航，操作者移往最後已知位置等待。
6. 最佳預防：飛行前確認 GPS 訊號強度（建議 8 顆以上衛星）、遠離大型鋼鐵結構校準指南針。
7. 【失效應變安全口訣】
 「GPS 失效、別慌張；改打 ATTI、肉眼幫；圖傳沒了、快升空；肉眼不見、RTH。」
 改打 ATTI、肉眼幫：失去 GPS，立即抬頭看飛機，手動修正風力漂移。
 圖傳沒了、快升空：畫面卡頓，上升高度通常能恢復訊號。
 肉眼不見、RTH：若飛機超出肉眼目視範圍又斷訊，立即按下自動返航按鈕。

6-4 緊急程序——失控、撞擊與火災應變

這一節將重點教導學生在無人機發生最壞的情況時——即撞擊、鋰電池起火——的處置流程，並納入專業的電池儲存觀念與日常保養知識，確保飛行員能安全、負責任地結束飛行任務。

📖 學習點 | 希望永遠用不上，但必須知道的應變程序

即使做足了飛行前的所有準備，飛行中仍可能發生意料之外的緊急狀況。緊急程序的目的，不是讓你預見所有意外，而是在意外發生的那一瞬間，讓你的反應不是慌亂，而是有序的應變動作。

「知道但不需要用」永遠好過「需要但不知道」。在這一節，我們將學習三種最常見的飛行緊急狀況的應變程序：無人機失控、空中撞擊，以及最危險的 LiPo 電池火災。

這些程序在專業航空界都有標準作業流程（SOP），我們將這些概念調整為適合學生理解與記憶的形式呈現。

知識面 | 三大緊急狀況應變程序

一 無人機失控應變程序

「失控」指無人機不再響應操作者指令，或行為超出預期、無法正常操控的狀態。

步驟	動作	說明
1	大聲警告周圍人員	立即大喊「注意！無人機失控！」讓周圍人員迅速疏散
2	嘗試切換飛行模式	若為 GPS 模式，切換至 ATTI 模式；若 ATTI 可控，手動降落
3	啟動自動返航（RTH）	若無法手動控制，按下 RTH 鍵，讓飛控板嘗試自動返航
4	緊急停機（Motor Cut）	若無人機正在墜向人群，立即啟動緊急停機（視機型），讓螺旋槳停轉，將傷害降至最低
5	事後記錄與通報	記錄失控發生的時間、地點、原因，如造成損害須依法通報並負責

二 空中撞擊應變程序

空中撞擊可能發生在無人機與其他無人機、障礙物（建築、電線、樹木）或罕見情況下與有人航空器之間。

撞擊類型	應變重點
與障礙物（電線／樹木） 輕微碰觸	立即降低高度，勿強行脫困（可能加重纏繞），嘗試緩慢後退
嚴重撞擊後墜落	確認墜落地點安全後，戴手套靠近（螺旋槳可能仍在旋轉），立即斷電
墜入水域	如電池仍連接，入水後嚴禁徒手撈取（觸電風險），使用絕緣工具或等待電池放電
與有人航空器碰撞 （極罕見）	立即撥打 119/110，通報航空事故，保留飛行記錄備查，配合主管機關調查

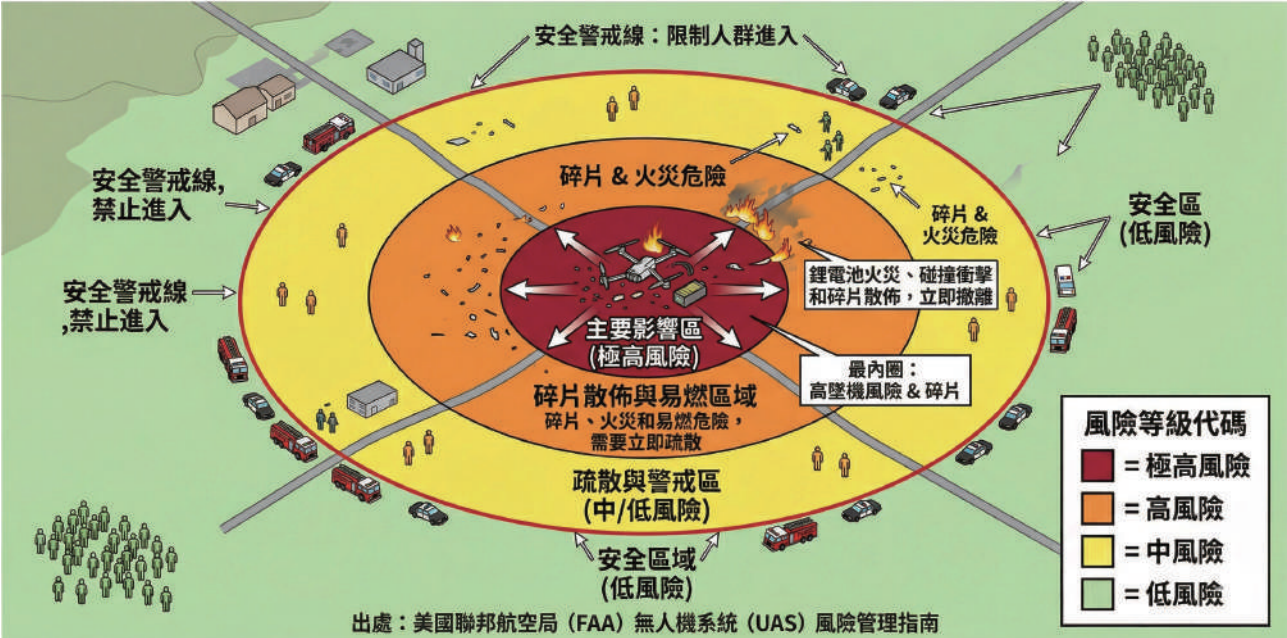
三 炸機現場：飛行指揮官的 3S 原則

無人機飛行員最不願面對的時刻就是炸機。當飛機失控墜落，冷靜的判斷能減少損失並避免傷害公眾。應遵循 3S 原則：

- 1. Stop（停止）：**停止操作遙控器，切斷馬達動力，防止螺旋槳繼續轉動造成二次傷害（傷人或割壞機身）。
- 2. Set（置放）：**確認飛機的具體位置，若墜落在有人區域，立即大聲警告四周人員遠離。

3. **Secure（安全）**：檢查是否有冒煙起火風險。若無起火風險，將飛機小心收回，並記錄墜落地點的座標。

墜機風險區域示意圖：安全警戒線與人群風險等級



[無人機墜機風險區域示意圖。內容：展示墜機後安全警戒線範圍，以及對人群的潛在風險等級。出處：美國聯邦航空局（FAA）風險管理指南。]

四 LiPo 電池火災應變程序

LiPo 電池火災是所有無人機緊急狀況中最危險的一種。一旦發生熱失控（Thermal Runaway），LiPo 電池會在數秒內從冒煙升溫至激烈燃燒，並噴出有毒氣體，且難以用一般滅火器撲滅。

步驟	動作	說明
1	立即疏散	離開電池至少 10 公尺，通知周圍人員撤離，嚴禁圍觀
2	勿嘗試徒手滅火	LiPo 火災溫度極高，且噴出有毒氣體（氟化氫等），徒手或一般水滅火無效甚至有害
3	沙土覆蓋（若安全可及）	若有備用沙桶，可從遠距離傾倒覆蓋，隔絕氧氣輔助壓制燃燒
4	撥打 119	立即通報消防局，說明是鋰電池火災，讓專業人員處理
5	確認完全熄滅後再靠近	LiPo 電池有「復燃」風險，熄滅後仍需持續觀察至少 30 分鐘再靠近

⚠️ LiPo 電池火災嚴禁用水撲滅！水接觸鋰金屬可能引發劇烈化學反應，使火勢加劇！

五 鋰電池熱失控事故案例

- **案例說明：**2020 年臺灣某場校園航拍活動，飛手操作的無人機在下降時意外撞擊籃球架支柱，無人機墜落到操場柏油路上。飛手未執行 Stop 原則，在飛機墜落後仍試圖推動搖桿，導致馬達在被限制轉動的情況下過載，電流瞬間激增，引發電池瞬間熱失控，現場冒出強烈白煙並伴隨火焰。
- **案例分析：**此案例顯示了鋰電池起火稱為「熱失控（Thermal Runaway）」。鋰聚合物電池（LiPo）內部隔離膜破損後，鋰離子直接與電解液反應，產生劇烈高溫。它不依靠外界氧氣即可燃燒，普通泡沫滅火器通常無效。
- **處理細節：**炸機後若發現電池冒白煙或噴火，應立即疏散人群。若情況允許，使用乾粉滅火器或砂土覆蓋以阻斷熱量傳播，並持續觀測至少 30 分鐘，防止復燃。絕對不要將起火的電池丟入水中，因為鋰與水反應會釋放氫氣，可能引發爆炸。炸機後的受損電池應放入防火袋，並送到專業資源回收點。

✧ 6-4 重點精華

1. 無人機失控第一步：大聲警告周圍人員疏散，人員安全優先於機體保全。
2. 失控應對順序：警告疏散→切換飛行模式→啟動 RTH→緊急停機（僅在墜向人群時）。
3. 撞擊墜落靠近前：戴手套、先斷電，注意可能仍旋轉的螺旋槳造成傷害。
4. 無人機墜入水域：切勿徒手撈取（觸電風險），使用絕緣工具或等電池放電後再處理。
5. LiPo 電池火災：立即疏散→勿用水滅火→撥打 119→沙土覆蓋（若安全）→持續觀察 30 分鐘。
6. ⚠ LiPo 火災嚴禁用水！水接觸鋰金屬可能引發劇烈反應，使火勢加劇！
7. 【緊急應變安全口訣】

「炸機先 Stop、確認安全；電池冒煙、快撤離人群；不飛長存、存儲電壓；日常保養、清潔檢查。」

炸機先 Stop：墜落第一時間停轉馬達。

電池冒煙、快撤離人群：鋰電池起火危險性極高。

不飛長存、存儲電壓：保持 50% 電量，保護電池壽命。

日常保養、清潔檢查：每次飛行後檢查機身結構。

理論與安全知識已全數就緒，最後讓我們真正起飛應用，
進入逐夢踏實的階段！

第 7 章 飛行應用

飛行任務導向的應用

導言 | 無人機改變世界的方式

讓我們從真實應用場域出發，看見無人機如何滲透日常生活、改變產業運作、推進科學研究、守護生命安全，乃至重塑現代戰爭的面貌。

無論是利用**熱像儀**在山區進行搜救，或是以無人機建立**事故現場 3D 地圖**來加速道路疏通，甚至用於監控**違法排污**，無人機已化身為全能的**空中助手**，正深刻改變我們的生活，本章主要介紹透過結合不同的酬載、感測器、演算法與通訊技術，使無人機產生多元的應用，便利我們的生活。



7-1 影像捕捉與空間測繪——從洞察到形塑

📖 學習點 | 無人機，讓每個人都能擁有上帝視角

透過高解析度相機、多光譜感測器與人工智慧影像分析技術，無人機不僅能進行拍攝與紀錄，還能執行環境監測、目標辨識、自動避障與資料分析等任務。

無人機測繪結合「攝影測量（Photogrammetry）」與光達 LiDAR 技術，能在數小時內完成人工需要數週才能完成的測量工作，精確度從傳統的公尺級提升至公分級。

🔍 知識面 | 從空拍到建模，智慧看世界

一 主要技術

1. **影像捕捉技術**：利用相機與穩定裝置取得高品質影像。
2. **多光譜影像（NDVI）技術**：（Normalized Difference Vegetation Index）是一種利用多光譜遙測（multispectral sensing）來監測植物生長狀況的方法，常用於農業、森林監測與環境研究分析植被與環境狀態。
3. **光達 LiDAR（Light Detection and Ranging）技術**：是一種利用雷射光進行測距與掃描的技術。它透過發射雷射光束，接收反射訊號，計算光線往返時間，精準測量距離，進而建立高解析度的三維（3D）空間資料。
4. **人工智慧辨識（AI Vision）**：自動辨識物體與目標追蹤。
5. **空間測繪**：是利用各種測量技術與設備，對地表或空間中的物體進行**位置、距離、高度與形狀的精確量測**，並建立成**地圖或 3D 模型**的技術。
6. **攝影測量（Photogrammetry）**：是利用**照片影像**來測量物體的形狀、大小與位置的技術。透過多張不同角度的影像進行計算與分析，可重建**三維（3D）模型**，並製作精確地圖。
7. **數位地形模型（DTM, Digital Terrain Model）**：是用數位方式表示地表真實地形高低起伏的模型。它只包含地面高程資料，會排除建築物、樹木等地表上的物體。
8. **地理資訊系統（GIS, Geographic Information System）**：是一種用來蒐集、儲存、管理、分析與呈現地理空間資料的電腦系統。它能將地圖與各種數據結合，幫助我們進行空間分析與決策。

主要應用

應用領域	主要技術設備	應用說明
航空攝影與媒體製作	高解析度相機、穩定雲台	用於電影拍攝、活動紀錄、觀光宣傳與新聞報導
產業與交通與基礎設施巡檢	高倍率相機、多光譜相機	應用於建築物、橋梁、電塔與工地進度檢查
農業監測	多光譜影像	分析作物生長狀況與病蟲害情形
救災與安全監測	熱影像相機、即時影像傳輸 LiDAR、影像建模技術	用於火災、地震、洪水等災害現場支援、地震、土石流後的地貌重建與損害評估
都市規畫與交通管理	高解析度影像、GIS 系統、即時影像系統、智慧辨識技術	提供城市發展規劃與土地使用分析資料 協助交通監測與大型活動人流管理
軍事與安全應用	夜視相機、遠距離攝影系統 戰場地形建模、空中偵察影像	用於戰場偵察、邊境監控與安全巡查，建立戰場數位地圖，支援戰術規劃與偵察
科學研究	多光譜影像、影像建模技術	應用於生態研究、地形建模與環境變化觀測
工程建設	攝影測量相機、3D 建模軟體	建立施工現場數位模型，監控工程進度與土方量測
農業管理	多光譜影像、數位地圖	建立農田模型，分析作物生長與灌溉需求



7-1 重點精華

1. 無人機結合高解析影像技術，提升空中拍攝與資料蒐集效率。
2. 視覺感測與 AI 分析，可進行自動辨識與智慧判讀。
3. 強化都市管理與科學研究的精準觀測能力。
4. LiDAR 最大優勢：主動式雷射，可穿透植被測量真實地面，不受光線限制。

7-2 物資運送與負載——迅速送達，智慧運輸

學習點 | 無人機正在改寫產業的運作方式

臺灣農業面臨人口老化、耕作效率偏低的挑戰；電商物流面臨最後一哩路的配送成本困境。無人機在這兩個截然不同的產業中，正以相似的邏輯提供解方——以「空中直達」取代「地面繞路」，以「精準覆蓋」取代「全面噴灑」，用科技效率解決人力不足與成本高昂的難題。

知識面 | 讓物資更快到達，讓任務更有效率

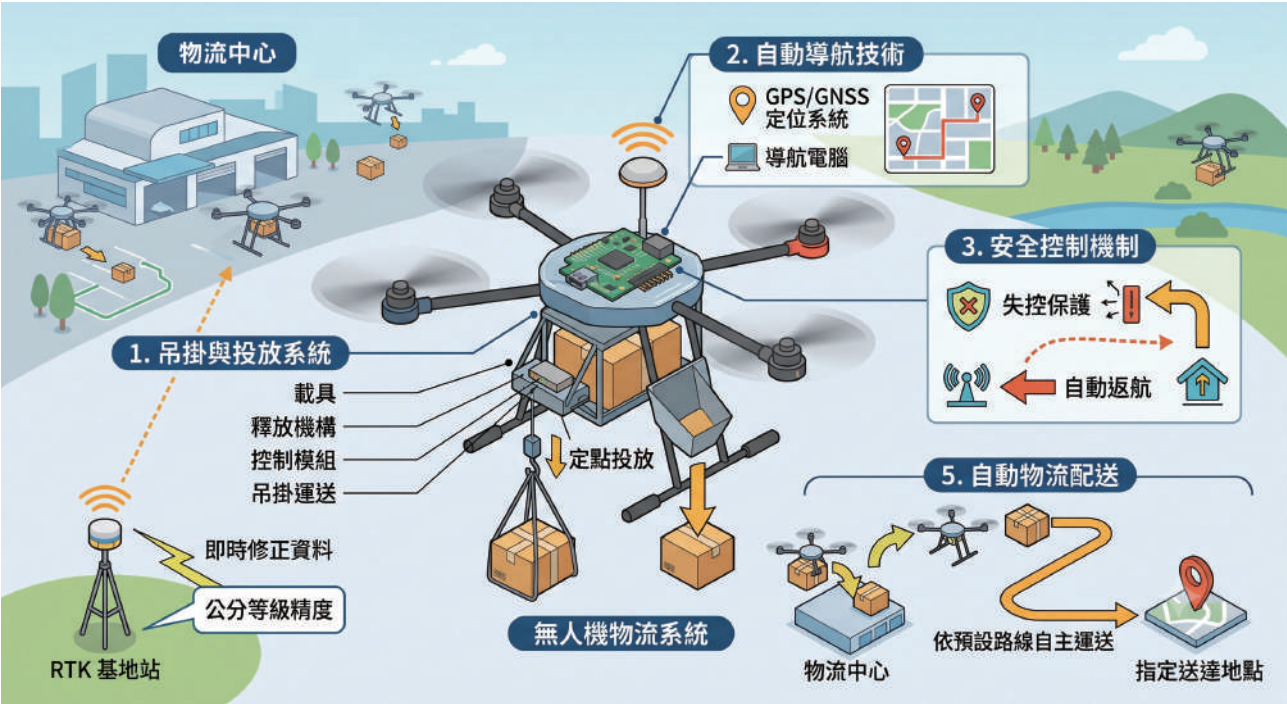
一 負載與續航力

1. 負載能力：是指無人機除了自身重量外，最多能承載的額外重量。這些重量可能包括相機、感測器、投放裝置或其他設備。影響運送距離與飛行時間。
2. 飛行續航力：是指無人機在一次充電或加油後，能持續飛行的時間。它是評估無人機性能的重要指標之一。

二 主要技術

1. **吊掛與投放系統**：是指安裝在無人機上的**載重裝置**，可將物資透過「吊掛運送」或「定點投放」方式送達指定地點。此系統通常包含**載具**、**釋放機構**與**控制模組**。
2. **自動導航技術**：結合 GPS 或 GNSS 定位系統，確保運送路徑準確。
3. **安全控制機制**：包含失控保護（Fail-safe）、自動返航（Return-to-Home）功能。
4. **RTK 精準定位**：RTK（Real-Time Kinematic）即時修正的衛星定位技術，透過地面基準站與移動接收器間的同步觀測，運用載波相位差分技術消除大氣折射等誤差，使定位精準度提升至公分等級。
5. **自動物流配送（Autonomous Delivery）**：結合導航系統與自動飛行，適用於交通壅塞的都會區或偏遠地區，能直線飛行、不受地形限制，大幅縮短配送時間，可依預設路線自主運送。

6. 無人機交通管理（UTM, Unmanned Aircraft System Traffic Management）：專為低空空域運行設計，是一套自動化、數位化的空域管理系統。它不依賴傳統航管員指揮，而是透過雲端資料交換，協調各架無人機的飛行路線、提供即時動態與防撞預警，確保無人機物流及作業安全。



應用

應用領域	負載方式或設備	應用說明
救災與緊急醫療	投放裝置、貨物艙	運送藥品、血液、急救包至災區或偏遠地區
偏遠地區補給	自動降落系統	將生活用品或補給品送達交通不便地區
商業物流	智慧配送模組	提升電商與城市物流配送效率
農業應用	噴灑系統、肥料投放裝置	用於農藥噴灑、種子播撒與肥料施放
工程與產業	工具運輸艙	將小型設備或零件送至高空或施工現場
軍事補給	運輸模組	提供彈藥、醫療與補給物資運送



7-2 重點精華

1. 無人機提升物資運送速度與效率。
2. 可運送醫療與緊急救援物資。
3. 支援偏遠地區與災害現場補給。
4. 強化商業物流與城市配送服務。
5. 應用於農業噴灑與精準施作。
6. 軍事領域提供前線補給與支援。

7-3 環境感測與數據擷取——傾聽環境的聲音

學習點 | 從大自然蒐集數據，守護地球環境

無人機逐漸成為環境監測與科學研究的重要工具。傳統的環境調查方式通常需要大量人力與時間，且在地形複雜或具有危險性的區域，例如高山、森林、海洋或災害現場，調查工作往往十分困難。無人機具有機動性高、可快速部署、操作成本較低，透過搭載不同類型的感測器，無人機可以在短時間內蒐集大量且精確的環境數據。這些資料可用於氣候研究、生態保育、污染監測與自然資源管理等領域，幫助研究人員更有效地收集數據，分析環境變化，並作為制定政策的重要依據。

知識面 | 用數據看見環境，用科技守護未來

知識面說明

1. **感測器 (Sensor)**：安裝在無人機上各種感測器，用來**感測環境資訊或飛行狀態**，如溫溼度感測器、空氣品質感測器、風速感測器等，飛控系統即時獲得資訊，幫助無人機穩定飛行與完成任務，這些感測到的數據，也傳輸至地面遙控站進行分析。
2. **熱影像技術**：利用「熱感應攝影機」偵測物體發出的**紅外線熱能**，將溫度差異轉換成影像顯示。畫面通常以不同顏色表示溫度高低。應用於救災與安全監測。
3. **即時資料傳輸**：透過通訊系統將數據回傳地面進行分析。



應用領域	主要感測設備	應用說明
空氣品質監測	PM2.5 感測器、氣體感測器	監測城市與工業區空氣品質變化
氣象觀測	溫度、濕度、氣壓感測器	協助氣候研究與天氣資料分析
水質監測	水質感測器、光譜儀	分析河川、湖泊與海洋水質
災害監測	熱影像技術、即時傳輸系統	用於火災、洪水與地震後環境評估
軍事應用	遠距感測設備、影像分析系統	用於偵察監控與戰場情資蒐集

✧ 7-3 重點精華

1. 無人機可快速蒐集空氣、氣象與環境數據。
2. 搭載多光譜與熱影像設備進行精準監測。
3. 強化森林、生態與水質調查效率。
4. 支援災害現場即時環境評估與分析。

7-4 通訊中繼與群體協作——建構空中網路，實現群體合作

無人機不僅能單機執行任務，也能透過通訊中繼與群控協作技術，形成多機協同運作的智慧系統。在偏遠地區或災害現場，無人機可作為空中通訊中繼站，延伸訊號覆蓋範圍；在大型任務中，多架無人機則可透過群控系統分工合作，提高效率與任務成功率，展現無人機在資訊傳輸與團隊協作上的重要價值。

📖 學習點 | 從單機運作到群體協同

隨著無人機技術與通訊科技的快速發展，無人機不僅能執行單一任務，還能透過通訊中繼與群控協作技術，形成智慧化的空中系統。當多架無人機彼此連結並協同運作時，可以擴大訊號傳輸範圍、提升任務效率，並在大型任務或複雜環境中發揮更大的功能。

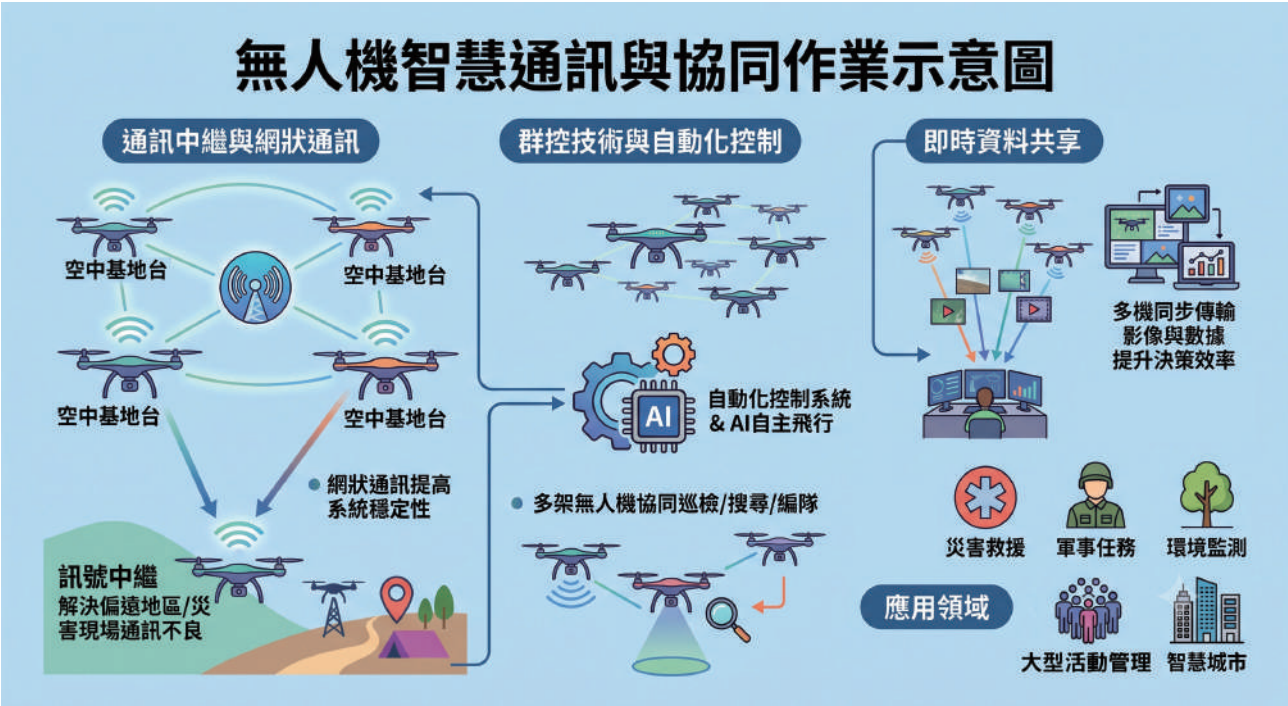
在通訊中繼方面，無人機可作為空中的訊號中繼站，協助傳遞無線電、網路或影像訊號，使地面人員在偏遠地區或災害現場仍能保持通訊。另一方面，透過群控協作技術，多架無人機可以同時執行任務，例如同步巡檢、分區搜尋或空中編隊，並透過資料共享與即時通訊來完成複雜任務。

這些技術廣泛應用於災害救援、軍事任務、環境監測、大型活動管理與智慧城市等領域，展現無人機在未來空中通訊與協同作業的重要價值。

知識面 | 智慧通訊與協同作業

知識面說明

- 網狀通訊（Mesh Network）：無人機彼此連接形成自組網路，提高穩定性。
- 通訊中繼（Relay Communication）：利用無人機作為「空中基地台」，在不同地點之間轉送通訊訊號，擴大訊號覆蓋範圍，解決地面通訊不良或中斷的問題。
- 群控技術（Swarm Control）：多架無人機透過演算法協同完成任務。
- 即時資料共享：多機同步傳輸影像與數據，提升決策效率。
- 自動化控制系統：透過程式與 AI 實現自主飛行與任務分配。



應用領域

應用領域	技術方式	應用說明
災害通訊中繼、偏遠地區網路支援	空中基地台系統、無線電中繼、5G 模組	在地震或偏遠地區建立臨時通訊網路、提升山區、海上或離島通訊品質
搜救任務	群控飛行系統	多架無人機協同擴大搜尋範圍
無人機群飛表演	RTK 精準定位 + 多機時間同步排程	上千架無人機組成動態圖案，成為節慶不可或缺的燈光秀
產業巡檢	多機資料共享	用於大型廠區或電網巡查
科學研究	網狀通訊（Mesh）系統	蒐集環境或氣象資料
軍事應用	加密通訊、戰術群控	用於戰場通訊維持與任務協作



無人機群飛表演

✧ 7-4 重點精華

1. 無人機可作為通訊中繼，延伸訊號覆蓋範圍。
2. 群控技術使多機協同完成任務。
3. 結合網狀通訊強化資料傳輸穩定性。

科技應用，一個共同的核心問題

生活娛樂 • 產業升級 • 地理測繪 • 都市管理 • 科學研究 • 急難救助 • 軍事國防

無論是哪個場域，無人機的價值，最終取決於使用它的人所懷抱的目的與責任感。

—— 第 7 章結束 請翻至第 8 章飛行實務：專題實作與成果發表 ——

第 8 章 飛行實務

專題實作與成果發表

導言

前 7 章奠定了你的知識基礎——飛行原理、機械結構、氣象判讀、法規遵守、飛行安全到任務應用。第 8 章，是整套課程的最終實踐舞台。

本章以「專題實作」為核心，帶領同學走完一個完整的無人機任務週期：從法規確認、任務設計、硬體改裝、自動執行，到最終的成果展示與溝通表達。五個專題環環相扣，既可各自獨立執行，也可組合為一個完整的學期末大型專案。

在這一章，你的角色不再只是學習者，而是設計者、工程師、飛行員，與溝通者——四種角色的完整整合。



8-1 專題一 天空的法律——臺灣無人機法規概覽

學習點

本專題聚焦於臺灣無人機飛行法規的四大核心面向：

1. 民航局無人機法規：了解臺灣《遙控無人機管理規則》的核心內容與立法精神。
2. 註冊與考照：哪些無人機必須向民航局完成機體登錄？何種情況需取得操作資格證？
3. 空域分類與識讀：區分紅區（禁飛）、黃／橘區（限飛申請）與綠區（可飛）的意義與查詢方式。
4. 違法處罰：理解違法飛行所面對的行政罰鍰與刑事責任，強化守法動機。

知識面

一 無人機是「航空器」，不是「玩具」

許多人認為無人機只是會飛的遙控車，但在法律上，它被明確定義為「航空器」。在空域中，無人機與載人飛機遵循同樣的空中交通秩序。法規的核心目的有兩個：保護地面人員的人身安全，以及維護整體飛行空域的安全。

在臺灣，《民用航空法》對無人機的管理採取「重機具高規範、輕機具低規範」的分級邏輯——越重、越危險的機體，面對越嚴格的管理要求。這套分級制度讓入門飛行者有合理的參與空間，也確保高風險飛行受到充分規範。

二 法規的核心：註冊制度與操作證制度

臺灣無人機法規的兩大核心工具，是「機體登錄（註冊）」與「操作資格證（考照）」。

兩者共同建立起責任追溯體系。

重量等級	典型機種	是否須登錄	操作資格要求
250g 以下	迷你空拍機	✘ 免登錄	免考照，但須遵守所有飛行規範
250g – 2kg	消費型空拍機 （如 DJI Mini 3）	✔ 須登錄	個人休閒：完成基礎訓練課程即可 商業用途：須取得操作資格證
2kg – 25kg	商業攝影機農業噴 灑機	✔ 須登錄	✔ 須取得輕型操作資格證（筆試 + 術科）
25kg 以上	工業／農業大型機	✔ 須登錄 + 型式認證	✔ 須取得中型或專業操作資格證

國中生特別注意：未滿 18 歲的同學通常無法申請專業操作資格證，因此在課外應只操作 2 公斤以下且在合規空域的無人機。學校課程中的飛行活動，由機構統一申請教育用途許可，屬合法教育範疇。

三 誰說這裡不能飛？空域識讀術

飛行員必須具備讀懂「空域地圖」的能力。民航局提供的「空域查詢系統」（Drone Map，網址：drone.caa.gov.tw）以顏色標示空域狀態，是每次飛行前的必查工具。

顏色標示	代表意義	飛行規範
● 紅區（限航區）	絕對禁飛區	機場管制區、軍事基地、核電廠、總統府等。絕對禁止進入，違者罰鍰 6 萬至 30 萬元，情節嚴重可面臨刑事責任
● 黃區（高度限制）	可飛但有高度管制	通常限制在 60 公尺甚至更低，需嚴格遵守高度上限
● 綠區（可飛行）	一般可飛行空域	全台最高高度上限 120 公尺（約 40 層樓），仍須遵守五要五不要原則
● 灰區（申請可飛行）	需申請才可飛行	機場緩衝區、國家公園等。提出申請並取得許可後，在核准條件下飛行

高度上限為何是 120 公尺？這是為了避免與低空飛行的直升機、小型飛機形成衝突風險。直升機緊急救援時可能在極低高度飛行，120 公尺的緩衝高度是保護雙方安全的關鍵設計。

四 違法飛行的代價

違法飛行不再只是口頭警告，而是面對實質的行政罰鍰，嚴重者甚至觸犯刑法。

違規行為	罰則（行政）	加重情節
未登錄逕行飛行	罰鍰 6,000 ～ 30,000 元	情節重大可廢止操作許可
違法進入禁飛區	罰鍰 60,000 ～ 300,000 元	可能觸犯《民航法》刑事責任
超高飛行（>120m）	罰鍰 6,000 ～ 30,000 元	造成航空事故可面臨公共危險罪
違法夜間飛行	罰鍰 6,000 ～ 30,000 元	造成財損需負民事賠償責任
造成飛機緊急轉降	依刑法公共危險罪論處	最高可判處有期徒刑

✈️【法律常識】重點口訣

「機超 250 務必去登錄；空域查地圖紅區莫進入；高度 120 飛高罰款重；遵守法律規飛行才放心。」

- 機超 250、務必去登錄：貼上標籤，確認機主身分，落實責任歸屬。
- 空域查地圖、紅區莫進入：每次起飛前查 Drone Map，確保在合規空域飛行。
- 高度 120、飛高罰款重：牢記高度限制，勿挑戰低空航空器的飛行空間。
- 遵守法律規、飛行才放心：法規是保護所有人的安全防線，守法是飛行公民的基本義務。

8-2 專題二 任務設計與需求分析

本專題旨在培養學生將生活中的實際問題，轉化為無人機飛行任務指標（KPI）的能力，是問題導向學習（PBL）的核心步驟。

學習點

1. 問題導向學習（PBL，Problem-Based Learning）：從發現問題到提出解決方案的系統性思考方法。
2. 需求分析：在任務設計前，明確釐清任務目的、技術限制條件與必要的飛行指標。
3. 飛行任務指標（KPI，Key Performance Indicators）：將抽象目標轉化為可量化、可驗證的飛行數據。

知識面

一 從問題到任務：飛行員的思考邏輯

無人機是解決問題的工具，而不是為了飛而飛。一個成熟的飛行員在設計專題時，首先思考的是「我要解決什麼問題？」而不是「我能裝什麼感測器？」這個思維順序的顛倒，正是新手與專業飛行員之間最大的差距。

以「農作物監測專題」為例，示範 PBL 思維如何引導任務設計：

PBL 步驟	農作物監測案例
1. 定義問題	學校校田的作物生長不良，但不知道哪個區塊缺水、哪裡有蟲害
2. 蒐集資料	無人機能做什麼？多光譜相機可拍攝植被健康度（NDVI 指數）
3. 提出方案	設計「校田 NDVI 空中監測任務」，定期拍攝分析作物健康分布圖
4. 執行與評估	比對前後 NDVI 數據，驗證介入措施（補水、施肥）是否有效

二 需求分析：飛行前必須釐清的四個 W

在設計任務前，必須系統性地釐清限制條件，就像蓋房子前必須先測量土地一樣。以下是「需求分析四個 W」框架：

面向	關鍵問題	分析要點
任務目標 What	要做什麼？	是投遞物資、監測環境、製作地圖，還是空拍紀錄？目標不同，所需機型與感測器截然不同

面向	關鍵問題	分析要點
飛行環境 Where	在哪裡飛？	開闊操場（GPS 穩定）、樹林間（訊號遮蔽）、市區（可能為限飛區）——環境決定技術難度
酬載能力 Weight	能帶多重？	這是最重要的技術限制：機體馬達推力 - 無人機自重 = 最大酬載。超重必然墜機
距離與時間 When/Range	要飛多遠多久？	電池需支撐「去程 + 執行任務 + 返程 + 20% 安全餘量」，須在任務規劃時精確計算

轉化為飛行指標：KPI 的設定

要讓任務可以被客觀評估，必須將目標轉化為「可量化」的指標（KPI）。以「受困物資投遞專題」為例：

KPI 指標	設定數值	物理邏輯說明
投擲精確度	落點誤差 ≤ 2 公尺	超過 2 公尺代表感測器定位或投擲機構設計需改進
酬載重量	負擔 ≥ 300 公克	依照選定機型的最大酬載計算，需有 20% 的安全餘裕
飛行速度	200 公尺距離 ≤ 60 秒	速度越快，電量消耗越高，需平衡效率與續航
電量安全餘量	任務完成後剩 $\geq 20\%$	電量低於 20% 時飛控特性改變，強制返航
馬達溫度	飛行後四顆馬達溫差 $\leq 5^{\circ}\text{C}$	溫差過大代表重心偏移，需立即調整

設定 KPI 時需注意物理限制的相互影響——酬載越重，飛行時間呈非線性縮短（接近指數型衰減）；速度越快，電量消耗越高。優秀的飛手會根據馬達推重比（Thrust-to-Weight Ratio, TWR）來設定現實可行的 KPI，而不是拍腦袋決定。

✧【任務設計】重點口訣

「問題為導向，目標要明確；限制要釐清，指標定數據；安全是前提，實作檢驗真。」

- 問題為導向、目標要明確：清楚你要解決什麼問題，才知道需要什麼工具。
- 限制要釐清、指標定數據：了解飛機能力邊界，訂出可測量的 KPI，讓成果有據可查。
- 安全是前提、實作檢驗真：任何任務在安全確認前不得執行；所有理論都需要實作驗證。

8-3 專題三 硬體改裝與酬載測試

本節是本章技術含量最高的一節，深入探討無人機在增加掛載物後，如何透過「重心平衡理論」維持飛行穩定，並建立系統性的改裝測試流程。

學習點

1. 重心與平衡理論：理解機身重心（Center of Gravity, CG）對四軸飛行器穩定性的物理影響。
2. 酬載結構設計：認識感測器掛載架、物資投擲機構的設計原則（輕量化與牢固性）。
3. 負載下的動力學：理解馬達推力、機體重量與飛行穩定性之間的相互關係。
4. 系統性測試流程：學習從地面靜態測試到空中動態驗證的完整改裝驗收程序。

知識面

一 重心位置：無人機飛行的靈魂

對於四軸飛行器，重心位置（Center of Gravity, CG）是飛行穩定的物理基礎。四軸飛行器靠四個馬達的推力差控制姿態——如果重心與四個馬達的幾何中心不重合，飛控板為了維持水平姿態，必須讓某幾個馬達輸出極大功率，而另幾個輸出較少。

重心偏移會導致兩個嚴重後果：

問題	物理機制	外在表現
飛行穩定性下降	飛控板持續高頻補償重心偏移，PID響應變慢	懸停時像喝醉酒般晃動，對搖桿指令反應遲鈍
馬達過載燒毀	偏重側馬達持續高轉速，電流超過額定值	飛行後偏重側馬達明顯較熱，嚴重時馬達燒毀或飛控死機

- **改裝原則：**即使掛載一個輕微的感測器，也必須確保它的安裝位置不偏移重心中心。若不幸偏移，需在對側安裝相等重量的配重塊（Counterweight）來修正。

二 改裝理論與結構設計原則

進行硬體改裝（加裝感測器、相機、投擲架）時，必須同時兼顧「輕量化」與「牢固性」兩個看似矛盾的設計原則：

改裝類型	設計重點	材料推薦
感測器掛載架	必須固定在機身主框架上（非脆弱機臂），支架需抗震以避免感測器讀取錯誤	碳纖維板（輕且剛性強）或 3D 列印 PLA（可快速客製化形狀）

改裝類型	設計重點	材料推薦
相機雲台支架	需安裝防震橡皮（Damper Ball）減少馬達振動傳遞到相機，影響畫質	碳纖維管搭配矽膠防震球
物資投擲機構	投擲架需設計得距離螺旋槳足夠遠，防止投擲物與螺旋槳碰撞	使用伺服馬達（Servo）控制掛勾，輕量合金或強化塑膠結構
掛載方式建議	優先採用「吊掛式」（酬載位於機身下方），利用重力使酬載自然垂直，比機身上方安裝更穩固	快拆扣接設計方便更換酬載

三 酬載測試：從實驗室到真實飛行的四階段驗證

改裝完成後，嚴禁直接進行飛行測試。必須按照以下四個階段依序完成，確認所有指標正常後，才可進入下一階段：

階段	測試項目	執行方式	合格標準
1	地面重心靜態測試	將無人機置於平衡棒（或手指尖）上，觀察是否傾斜	四方向平衡，傾斜角度 $<5^{\circ}$
2	地面震動測試	開啟馬達至懸停轉速（保持地面束縛），觀察掛載支架震動	感測器支架無明顯肉眼可見震動
3	空中懸停測試（1公尺）	首次起飛在離地約 1 公尺處懸停，觀察姿態穩定性	無持續向固定方向漂移；飛控能穩定維持懸停
4	馬達溫度測試	飛行 2 分鐘後降落，立即觸摸四顆馬達外殼	四顆馬達溫度差異 $<5^{\circ}\text{C}$ （溫差過大 = 重心偏移）

✈️【硬體改裝安全】重點口訣

「改裝要輕量結構需牢固；重心放中間晃動要避免；改後必測試安全穩第一。」

- 改裝要輕量、結構需牢固：輕巧但不脆弱，選材與設計決定飛行安全。
- 重心放中間、晃動要避免：重心偏移是炸機（墜毀）的最常見成因之一。
- 改後必測試、安全穩第一：依序完成四階段驗證，未通過前嚴禁正式飛行。

8-4 專題四 編隊飛行與自動執行

本節將引導學生從「手動操控」過渡到「自動飛行」的思維轉換，並深入探討航點規劃邏輯、自動執行的安全協定，以及多機協作的編隊飛行技術。

學習點

1. 航點規劃邏輯（Waypoint Planning）：理解 GPS 座標與飛行高度如何轉化為自動飛行路徑。
2. 自動執行流程（Autonomous Execution）：學習預飛檢查（Pre-flight Check）與異常自動中斷機制。
3. 編隊飛行安全（Formation Safety）：掌握航跡規劃中的衝突預防、高低分層與時間同步技術。

知識面

一 航點規劃：在地圖上寫程式

自動執行（Autonomous Execution）的基礎是「航點規劃（Waypoint Planning）」。
飛手不再即時操控搖桿，而是利用地面站軟體（Ground Control Station, GCS）在地圖上預先標記一系列 GPS 點（Waypoint），由飛控板自動執行。

每個航點需設定以下參數，這些參數共同定義了無人機的完整飛行行為：

參數	設定內容	規劃注意事項
高度 （Altitude）	飛機在該航點的絕對或相對高度	從高到低的航點需預先計算下降率，避免過於陡峭衝撞地面
速度 （Speed）	點與點之間的飛行速度 （m/s）	速度越快越省時，但電量消耗更高；需平衡效率與續航
停留時間 （Hover Time）	飛機在該點懸停的秒數	拍照或感測任務需設定足夠停留時間，確保感測品質
相機角度 （Gimbal Pitch）	拍攝時雲台俯仰角度	-90° 為完全向下（正射影像）；-45° 為斜拍，兩者用途不同

二 自動執行的安全流程

自動飛行看似輕鬆，但對安全的要求遠高於手動操作——一旦任務啟動，飛機在遠離訊號干擾前難以即時人工干預。每次自動任務前，必須完成以下安全檢查：

安全檢查項目	標準與說明
GPS 衛星數量	通常需 ≥ 12 顆才可啟動自動任務（衛星越多，定位精度越高）
電池電量	電量需足以完成「全程任務 + 20% 安全返航餘量」；否則任務中途可能強制返航
電子圍籬範圍	確認電子圍籬（Geofence）設定正確，防止飛機自動飛出安全範圍
安全返航高度（RTH Altitude）	最重要步驟：設定為航線中最高點再加 10 公尺，以避開障礙物（高樓、樹木）
失控保護（Failsafe）設定	訊號斷線時的行為：懸停 / 返航 / 降落——需依飛行地點特性選擇合適選項
即時監控準備	自動執行中，飛手須隨時準備切換手動模式（拇指放在姿態模式開關上）

三 多機協作與編隊飛行邏輯

編隊飛行（Formation Flight）的核心在於「時間」與「空間」的精確同步。多機飛行的安全協定包含三個關鍵要素：

安全要素	技術方法	參數建議
衝突預防 Conflict Prevention	採用「高低分層法」確保航線不重疊；A 機飛 60 公尺、B 機飛 80 公尺	各機層高差 ≥ 10 公尺（含 GPS 誤差緩衝）
時間同步 Time Synchronization	使用 NTP（網路時間協議）同步兩台遙控器或地面站電腦的時間，確保同時起飛	時間同步誤差 < 0.5 秒
安全間距 Safety Buffer	考慮 GPS 定位誤差（通常 2 ~ 5 公尺），兩架飛機物理距離需超過誤差 2 倍以上	最小安全間距 ≥ 10 公尺

🔗【自動執行安全】重點口訣

「航點規劃細檢查預飛確認不可少；返航高度設定好即時監控手準備；編隊安全分層飛時間間距要留夠。」

- 航點規劃細檢查、預飛確認不可少：任務規劃要仔細，電量、GPS、圍籬逐項確認。
- 返航高度設定好、即時監控手準備：RTH 高度要夠高；手動開關隨時可按，是自動飛行的最後防線。
- 編隊安全分層飛、時間間距要留夠：多機飛行不冒進，安全間距是底線，表演效果不能凌駕安全。

8-5 專題五 策展與溝通——成果發表技術

本節教導學生將飛行數據與片段影像，轉化為具說服力的成果報告，完成從「工程師」到「溝通者」的角色轉換。

學習點

1. 數據可視化（Data Visualization）：將飛行日誌中的數據（電量、速度、高度、馬達電流）轉化為折線圖或柱狀圖，讓數據開口說話。
2. 影像敘事（Video Storytelling）：將片段飛行畫面剪輯為具「問題 - 行動 - 結果」邏輯結構的說服性影片。
3. 口頭溝通與展示技巧（Communication & Presentation）：在 5 分鐘內高效呈現專題的核心價值、數據證據與遭遇限制。

知識面

一 數據會說話：從飛行日誌到視覺化圖表

無人機飛行日誌（Flight Log）記錄了豐富的飛行數據，但原始數字只有工程師看得懂。成果發表的核心在於「用證據說話」——若你宣稱「我們的任務成功了」，必須用可視化的數據圖表證明，而非口頭陳述。

日誌數據類型	視覺化方式	可證明的任務目標
電量消耗時序	電量 – 時間折線圖	任務電量規劃是否合理？投擲時功率是否如預期激增？
飛行軌跡與高度	用 GCS 匯出 KML → Google Earth 顯示 3D 航跡	飛行路徑是否按航點執行？高度是否在規範內？
投擲精確度	連續五次落點誤差柱狀圖	誤差是否穩定？是否達到 KPI（ ≤ 2 公尺）？
馬達電流與溫度	四顆馬達電流折線圖對比	重心是否平衡？某顆馬達是否持續過載？

二 影像敘事：剪輯一個好故事

觀眾喜歡聽故事，而不喜歡看沒有剪輯的漫長錄影。影像敘事（Video Storytelling）的黃金結構是「問題—行動—結果」，在 60 至 120 秒內完整呈現專題的核心價值：

影片段落	時間建議	內容重點
開場：引人入勝 (The Hook)	0 ~ 15 秒	展示問題情境（受困的物資、骯髒的農田、需要巡檢的設施），製造情緒共鳴
中段：執行過程 (The Action)	15 ~ 45 秒	簡潔剪輯硬體改裝、航點規劃、起飛瞬間；使用縮時（Time-lapse）展示長距離飛行
結尾：成果展示 (The Result)	45 ~ 60 秒	清晰展示任務完成畫面，配合數據圖表總結；用具體數字說明任務成功
附記：反思與倫理 (Ethics & Limits)	選擇性加入	誠實說明遭遇風險、遵守法規的方式，以及任務的改進空間——展現成熟的工程思維

三 策展與口頭溝通：高效呈現

口頭報告不是讀 PPT，而是與評審進行有結構的互動。以「問題—解決方案—數據證明—反思」的四段式結構呈現，能讓評審在短時間內清楚理解你的專題價值：

1. 問題陳述（30 秒）：清楚說明你要解決什麼問題，以及為何值得解決。
 2. 解決方案（60 秒）：說明你的任務設計邏輯——選擇這個機型、這個感測器、這個飛行路徑的理由。
 3. 數據證明（90 秒）：用可視化圖表呈現 KPI 達成狀況，一張圖配一句話總結（如「這張圖顯示，我們的改裝讓投擲精確度從誤差 3 公尺提升到 0.8 公尺」）。
 4. 反思與展望（30 秒）：誠實說明任務中遇到的技術或安全挑戰，以及下一步的改進方向。
- **互動示範加分技巧**：若條件允許，現場展示改裝後的硬體支架，甚至在安全許可下進行低空懸停示範，其說服力遠超過任何 PPT 投影片。

🔗【成果發表】重點口訣

「數據做成圖，證據要確實；影片說故事，邏輯不能失；報告重點明，倫理要點出。」

- 數據做成圖、證據要確實：用折線圖、柱狀圖取代枯燥數字；圖表是最有說服力的證據。
- 影片說故事、邏輯不能失：60 秒影片要有問題、行動、結果三段結構，邏輯清晰打動評審。
- 報告重點明、倫理要點出：誠實面對專題的技術限制與倫理反思，展現成熟的工程與公民思維。

臺北市無人機教育進階教材－適用國中

第 8 章是你從學習者到實踐者的最終考驗——
你已不只是一個會操控無人機的人，
更是一個懂得設計任務、分析數據、負責任溝通的工程思維者。

—— 臺北市無人機教育中心 ——

臺北市無人機教育進階教材（適用國中）

出版機關：臺北市政府教育局

召 集 人：湯志民

副召集人：鄧進權、陳秉熙、陳美保

諮詢委員：徐新逸、顏榮泉

總 編 輯：蔡麟傑

執行編輯：鍾采珍、張名宜、楊鎧同

編輯委員：林詠忠、高俊卿、陳柏宏、陳衍霖、陳泓曄、
游真銘、黃郁凱、黃文鴻（依姓氏筆劃排列）

承辦單位：臺北市無人機教育中心（臺北市立木柵高級工業職業學校）

出版日期：中華民國 115 年 8 月

