

2025年飛行安全半年刊
FLIGHT SAFETY
BI-ANNUAL MAGAZINE

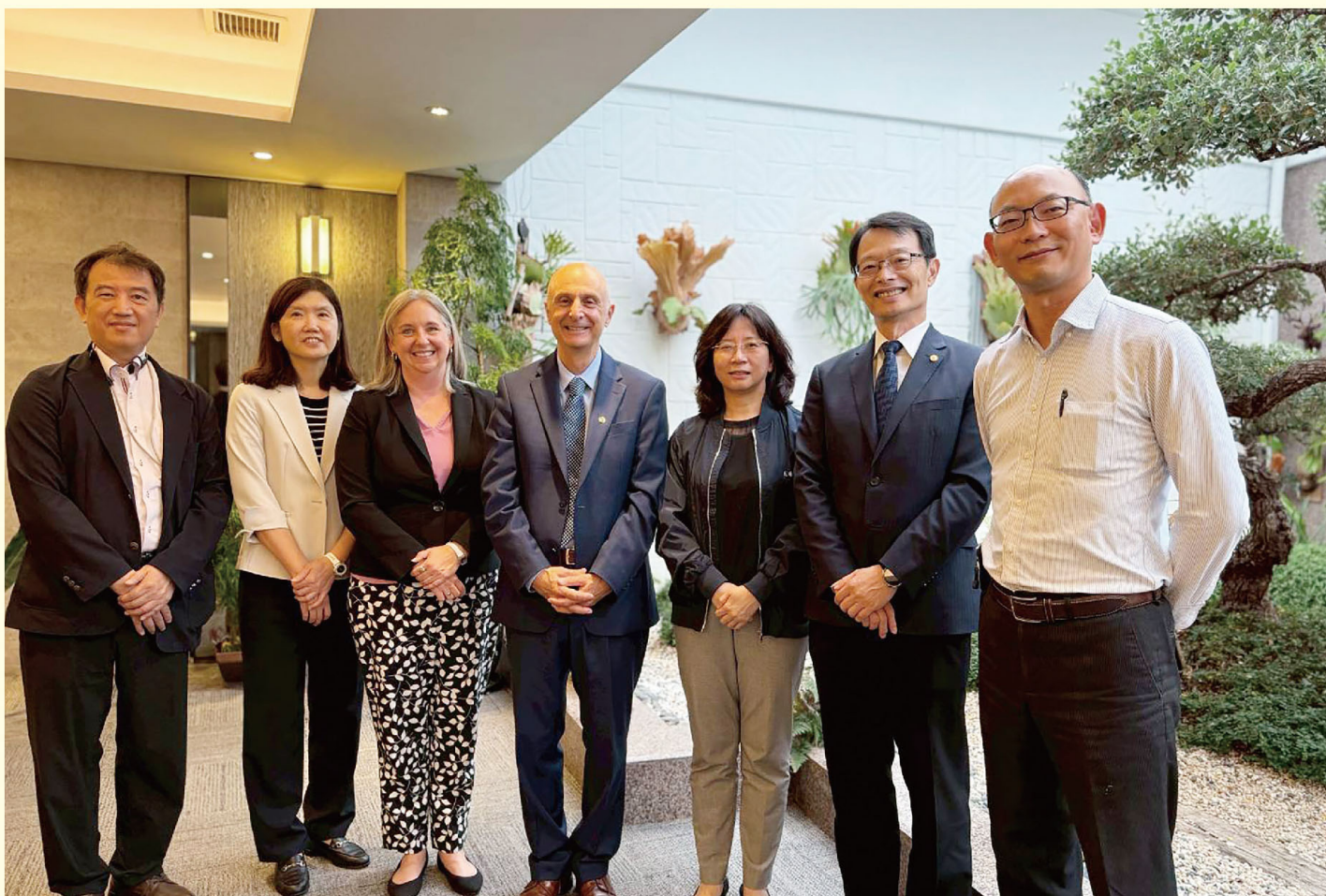
2025



FLIGHT SAFETY January-June 2025

非賣品

Not-for-sale Item, given free by the publisher.



114年7月11日世界飛安基金會總裁兼執行長Hassan Shahidi 博士等一行拜會民航局與本會。



114年3月27日至31日本會協助民航局辦理「114年度交通部民用航空局鳥擊防制研討會」。

目 錄

Content

2025年1~6月飛行安全半年刊

01 編者的話	基金會	P.02
---------------	-----	------

航空安全

02 再談亂流形成與容易發生區域	林得恩	P.03
------------------------	-----	------

03 航空器循環經濟學：永續發展及成長	洪上庭/陳敬霖/楊文忠	P.12
---------------------------	-------------	------

04 以保安管理系統強化航空安全：2024年 IATA SeMS 新加坡訓練課程心得	張裕昇/涂逸榮/沈懷玲	P.28
---	-------------	------

05 2024年飛航安全紀錄退步	蕭光霽	P.30
A Step Back	FSF 5 March 2025	P.32

06 消弭代溝	蕭光霽	P.34
Bridging the Generation Gap	May 2025, AeroSafety World	P.39

07 歐盟航空安全總署發布管理鋰電池風 險之新建議	蕭光霽	P.43
EASA publishes new recommendations on managing risks of lithium batteries	European Union Aviation Safety Agency	P.45

無人機資訊

08 無人機通訊技術解析	海東青	P.48
--------------------	-----	------



編 者 的 話

飛安基金會

2025 年上半年的「飛安半年刊」出版了！本期的內容豐富，「航空安全」將介紹多項最新的安全與環保新知，「無人機資訊」提供無人機的通訊技術與其限制，擴充讀者對無人機態勢感知與通訊能力的認識。

亂流為航機飛行中常見且難以預測之氣象擾動，往往在毫無預警的情況下造成飛航事故與乘員傷害。有鑑於此，繼 2024 年上半年的「劇烈中小尺度對流系統對飛航安全之影響」，本期特別邀請航空氣象專家撰文探討〈再談亂流形成與容易發生區域〉，提醒讀者於飛行途中提高警覺、確保自身安全。

另外，社團法人中華民航飛行員協會三位先進合撰之〈航空器循環經濟學：永續發展及成長〉一文，深入剖析 Aircraft Eco Economy Industry，並探討臺灣於全球航空器回收市場之潛力與策略性發展方向。〈以保安全管理系統強化航空安全〉則為本會派訓赴新加坡 IATA SeMS 訓練班學員撰寫的報告，呈現國際航空保安全管理系統訓練實務啟發與經驗回饋。

外國譯文選粹部分，收錄三篇重要文章，分別為〈飛航安全紀錄退步〉、〈消弭代溝〉與〈歐盟航空安全總署發布管理鋰電池風險之新建議〉，以提供讀者國際飛航安全最新動態與發展趨勢。

上半年會務推展方面，本會已順利完成「航空安全管理班」、「安全管理系統（SMS）普通班」及「機坪／空側安全管理班」等專業課程，並持續將飛安管理理念導入「國軍風險管理班隊」，以期飛航安全的專業知識與實務精神得以延續與深化。✈

再談亂流形成與容易發生區域

林 得 恩

國立臺灣大學 氣候天氣災害研究中心

摘 要

亂流是一種航機在飛行中，經歷的快速且不規則的空氣擾動，常易使航機發生搖晃或瞬間高度改變。它是由大氣中不同層次的風速、風向、氣溫變化所造成。亂流的形成，可以來自多種大氣環境現象，主要可以分為晴空亂流、對流亂流、山岳波亂流、機械亂流及風切變亂流等 5 大類；而亂流最容易發生的區域，對應與大氣結構、地形、氣候系統與飛行高度，至為相關。

科學家指出，因氣候變遷緣故，自 2050 至 2080 年，強烈晴空亂流發生的機率將增加兩倍以上；最嚴重亂流等級可能增幅超過 150%。飛航任務遂行時，透過科技預警、飛行策略與乘客管理等方式，嘗試降低其對飛航安全與舒適度的影響。不管是加入亂流感知平台、機載新一代氣象雷達、AI 即時亂流感測回報或是強化低空風切變預警系統效能等，都是科技應用與研究發展上的重要突破。

一、前言：

亂流（Turbulence），是指大氣中氣流發生快速且呈不規則擾動的現象，常易造成飛機在飛行過程中，產生顛簸、搖晃，甚至突然高度或方向改變，嚴重時，還會因而肇致飛安事件的發生。

爰此，亂流對飛航安全維護的影響不容忽視，尤其是在未預警的情況下，可能對飛行員操作、乘客安全與飛機結構造成不同程度的實質風險。從全球趨勢來看，美國 FAA 就針對因亂流而導致的飛安事故進行統計分析發現，每年超過 50 起與亂流相關的飛航傷害事故，且受傷者多數為空服員。另一方面，約有 3/4 的飛行亂流傷害是發生在巡航階段，且大多在無預警的狀況下。更令人擔心的是，隨著全球暖化與高空氣

流擾動的增加，尤其是晴空亂流（Clear Air Turbulence, CAT）預估將在未來數十年內，強度將會更加顯著。

根據事件統計，亂流對飛航安全之具體影響，最常見的類型就是造成乘客與機組人員受傷，多數案例為乘客未繫安全帶，被甩出座位或撞擊艙內設備；其中，空服員在服務途中，更容易受傷，2017 年，美國聯航 UA-1031 在飛行中，遇到中度亂流，航機嚴重顛簸、搖晃，造成 5 名乘客與 3 名空服員受傷。另一方面，由於持續或劇烈亂流會使機體承受不規則的上下、左右壓力，也易造成飛機結構壓力增大，雖然現代飛機設計都有一定的結構耐壓裕度，但頻繁或極端亂流仍可能導致零件鬆脫、儀表錯亂；而在老舊機型或高飛時，特別在穿越積雨雲（Cumulonimbus, Cb）階段，受損狀況將會

更為敏感。飛行員在遭遇亂流當中，嘗試維持穩定飛行、姿態控制需額外負荷。嚴重亂流甚至會造成自動駕駛解除，需人工接管。減速、防止過度操控與機體結構損傷是飛行員當下的優先任務，這也會嚴重影響飛行員操作與導航。在此同時，為了避開亂流區域，飛行員可能改變高度或航道；除了會增加燃油消耗，甚至航班延誤之外，也易導致飛行距離變長、耗油增加，有時還可能需要緊急備降或等待空域放行，肇致班機誤點，尤其在颱風季或是跨洋航線影響更大。至於，航機在起降過程，如遭遇到低空風切變（Low level wind shear）、機場附近的機械亂流或熱對流亂流時，有可能導致改變飛機升力，並造成偏離航道或重落地（hard landing），嚴重影響到起飛與降落安全；特別是在山區機場（例如：香港赤臘角、尼泊爾加德滿都）最為顯著。本文後續將分別就亂流形成的原因、種類與可能發生的區域，氣候變遷與亂流，以及有效的因應策略建議，進行探討說明；藉此，掌握可能肇生亂流的環境特性與影響程度，俾利確保飛航安全。

二、亂流形成的原因與種類：

亂流是一種航機在飛行中，經歷的快速且不規則的空氣擾動，常易使航機發生搖晃或瞬間高度改變。它是由大氣中不同層次的風速、風向、氣溫變化所造成。亂流的形成原因，不是只有一種固定型態，它可以來自多種大氣環境現象，主要可以分為以下幾類：

1. 晴空亂流（Clear Air Turbulence，CAT）：

多發生在高空、無雲區，尤其在對流層頂附近（約9-12公里高）。肇生的原因，來自高層噴射氣流周圍風速急劇變化，

所產生風切變的現象，最常見的情境，就是飛機進入噴射氣流邊緣時，上下氣流速度差造成剪切，產生亂流。也有可能是因為環境溫度梯度劇烈，空氣層間的密度與溫度差異大，產生的浮力與氣流不穩定。它的特點就是無前兆、難預測，是飛行安全的隱形殺手。

2. 對流亂流（Convective turbulence）：常常會發生在暖季的午後或熱帶區，因太陽輻射增溫，熱空氣上升所造成強對流，或雷雨胞內部水氣凝結釋放潛熱時，導致垂直氣流急遽的變化，常易造成飛機不穩定飛行狀態，這類亂流與積雲發展程度密切相關，發生最為頻繁的區域，就在於積雨雲內部或周邊。它的特點就是當飛機飛進入積雨雲或附近後，就會遇到劇烈的對流亂流，甚至造成機體損傷。這種亂流形式，飛行員通常都可透過氣象情資而事前掌握，必須盡全力避免的。

3. 山岳波亂流（Mountain Wave Turbulence）：

當空氣越過山脈時形成波動，在風的下風側常易產生湍流。此類亂流，常發生於風速大、山地起伏大的地區（例如：阿爾卑斯山、中央山脈、洛磯山脈）。形成的條件，環境大氣是屬穩定氣團影響，流場以中等以上風速（通常，風速在15 kTs以上）存在，空氣流動方向需與山脈大致垂直的角度，以及地形高差明顯等。山岳波亂流是地形性亂流中破壞力最強的一種，特別是其高度延伸與難預測性，對航空安全構成重大挑戰。

4. 機械亂流（Mechanical

Turbulence)：

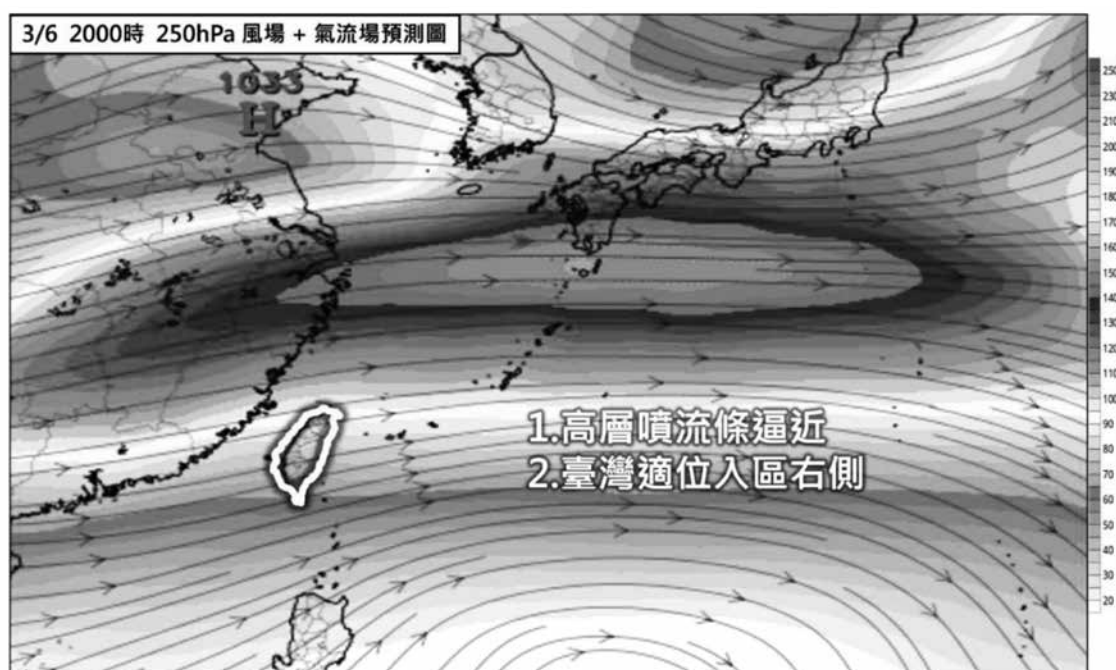
地形（例如：建築物或山丘）阻擋風流，產生渦流與亂流，迎風面氣流被強迫抬升，背風面則易形成湍流；風愈強、地形愈陡、障礙物愈大，亂流也就愈劇烈。常見於起飛或降落階段，尤其在機場附近。肇因是環境風場在接近地表時，被地形或人造結構（如山丘、建築物、樹林等）干擾並產生紊流的現象，最常發生在低空（1,000 公尺以下），尤其是航機起降階段，是一種地形性亂流。

5. 風切變（Wind Shear）相關亂流：

由於短距離內風速或風向急劇改變所引起的氣流擾動，是航空中最危險且最難應對的亂流之一，特別容易影響起飛與降落階段。再細分低空風切變及高空風切變 2 類，低空風切變發生的高度，自地面至 2,000 英尺以下，可能肇因來自雷雨胞（Microburst）、冷暖氣團交界鋒

面以及地形阻擋與城市建築渦流，此時，若飛機在落地時遇下沉氣流，加上逆風轉順風，飛機就會突然失去升力，導致重落地或墜機。另一類，高空風切變多見於噴射氣流邊緣、高空亂流區，常易導致飛機在高空巡航中，無法提前觀察到亂流的發生，機體可能瞬間晃動或飛航高度改變。

綜上，飛行過程對於亂流的掌握與迴避，回饋至飛航安全的維護，至為重要。而在不同的飛行階段，常見的亂流類型也有不同。在起飛或降落階段，機械亂流、低空風切亂流最易發生，在山地或建築物附近也會常見；在巡航中階段，晴空亂流及對流亂流最易發生，而晴空亂流最常在高空噴流條邊緣發生（如：圖 1）；在穿雲或接近積雨雲階段，積雨雲內部的對流亂流旺盛，並常會伴隨著強烈上下氣流、閃電或冰雹等共伴，都要特別小心。



資料來源：EC-AIFS

圖1 晴空亂流最常在高空噴流條邊緣發生，是我飛行安全維護的隱形殺手

三、亂流可能發生的區域：

亂流最容易發生的區域，對應與大氣結構、地形、氣候系統與飛行高度，至為相關。以下是全球與台灣常見的亂流多發區域統計與分類。

1. 全球容易發生亂流的區域：流的區域： 流的區域：

a. 噴射氣流區 (Jet Streams)

高空晴空亂流多發帶，高度約 9,000–13,000 公尺，一般多在對流層頂附近）。通常會以中緯度地區最為明顯，例如：北太平洋、北大西洋上空，主要的環境特徵就是風速變化劇烈，容易產生晴空亂流。根據過去統計，如東京飛

洛杉磯，或北京飛紐約的班機，常途經此區，亂流發生頻率較高。

b. 熱帶地區對流旺盛帶（赤道區）

在此區域，由於太陽輻射加熱非常有效率，常見午後對流雲發展旺盛，尤其是積雨雲（如：圖 2）。對流降雨熱區，例如印尼群島、東南亞、亞馬遜盆地、中非等地；一旦飛機飛行進入對流雲區，常易遭遇到強烈上、下氣流與雷暴亂流，影響都會非常嚴重。

c. 山區風障區 (Mountain Wave Turbulence)

當空氣越過山脈時產生「山岳波」，在下風側形成強亂流。典型發生的區域，

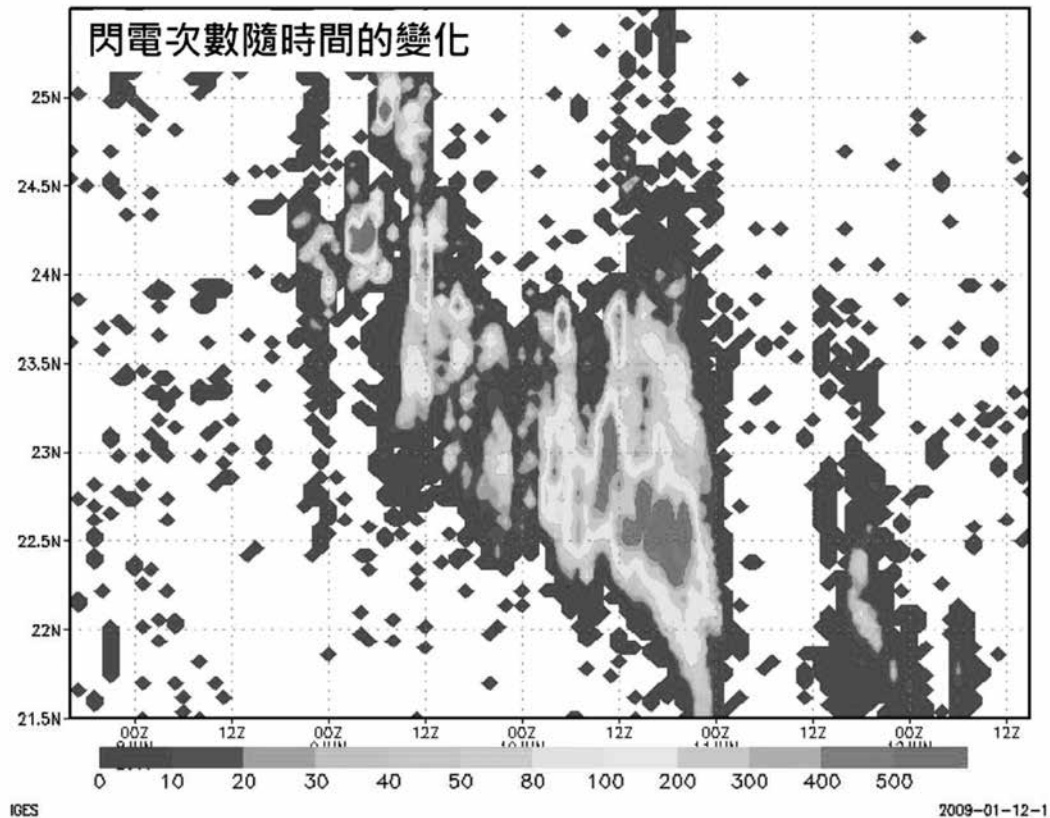


圖2 午後對流雲發展旺盛，尤其是在積雨雲內，除垂直運動旺盛外，也常伴隨雷電及強陣風發生，對流亂流相當顯著

包含洛磯山脈（美國 / 加拿大）、阿爾卑斯山（歐洲）、喜馬拉雅山區、安地斯山脈（南美）等地。

d. 副熱帶高壓邊緣區

通常會在大氣穩定與不穩定的交界處，當下的風切相當顯著。最易發生的區域，例如在中國南方、印度洋北緣及菲律賓週邊等區域。

2. 台灣常見亂流多發區：

若以季節來界分的話，通常在夏季，由於太陽輻射加熱，熱力對流發展，尤其在午後，臺灣中部及花東縱谷就常有地形亂流或對流亂流產生；高雄到琉球的航線，也會因積雨雲頻繁，常有對流亂流出現。到了秋冬季節，由於太平洋高壓東退加上北抬，常在臺灣東部外海的空域上，會有晴空亂流發生。至於冬季，因北風入侵時，與中央山脈地形產生風切與渦流，航機嘗試要進入台北盆地時，也常會遇到低空機械亂流或山岳波亂流的機會。

3. 常見亂流熱點航線：

根據長期統計資料顯示，有些亂流熱點航線，肇生機率偏高，需特別注意小心。

- a. 東京到洛杉磯航線，常易遭遇噴射氣流或晴空亂流
- b. 新加坡飛往香港航線，積雨雲亂流及對流亂流偏多
- c. 台北到香港航線，因穿越副熱帶高壓邊緣，局部對流亂流常易遭遇
- d. 台北到曼谷航線，積雨雲亂流及對流亂流偏多
- e. 溫哥華飛往紐約航線，常易遭遇山岳波亂流

四、氣候變遷與亂流：

氣候變遷正逐漸改變全球大氣結構，其中有一項被科學界廣泛關注的可能趨勢，就是大氣中的亂流事件將因氣候變遷，而變得更頻繁、更劇烈。

英國 University of Reading 模擬研究指出，自 2050 至 2080 年，強烈晴空亂流發生的機率將增加兩倍以上。最嚴重亂流等級（Severe turbulence）可能增幅超過 150%。其中，北美與北大西洋航線影響將會最為顯著，如：紐約到倫敦或是東京到洛杉磯等跨洋的航線。IATA 的技術報告同時也提到，航空亂流已成為最常見的非致命飛安事故來源，每年受傷人數也正在增加當中。因氣候變遷而引發的亂流趨勢，將增加航班延誤、燃油消耗與維修成本。

氣候變遷加劇，導致亂流發生的頻率增加，這已成為影響飛航安全的重要關鍵之一；那麼，氣候變遷是如何導致亂流增加？這跟全球暖化使對流層加熱加快，但平流層（更上層的大氣）變冷，如此一來，也使得對流層頂的溫度梯度增強，環境大氣更加不穩定，並導致高層噴射氣流風速增加，進而擾動或亂流也因此加劇。更強或更不穩定的噴射氣流，也常易肇致產生更多、更強的晴空亂流。另一方面，由於全球暖化，使得溫差變化加劇（如：圖 3），也會使得垂直與水平風速差異變大，增加飛行中的風切變亂流風險，這種情況，特別是在中高緯度地區發生頻率最高。當然，全球暖化導致環境的水氣含量增加，將提供給積雨雲、雷暴或熱對流雲系更為豐沛的能量補給及有利的發展環境，對流系統發展將趨更加旺盛、更高且更猛烈。而這些對流系統更加容易產生劇烈

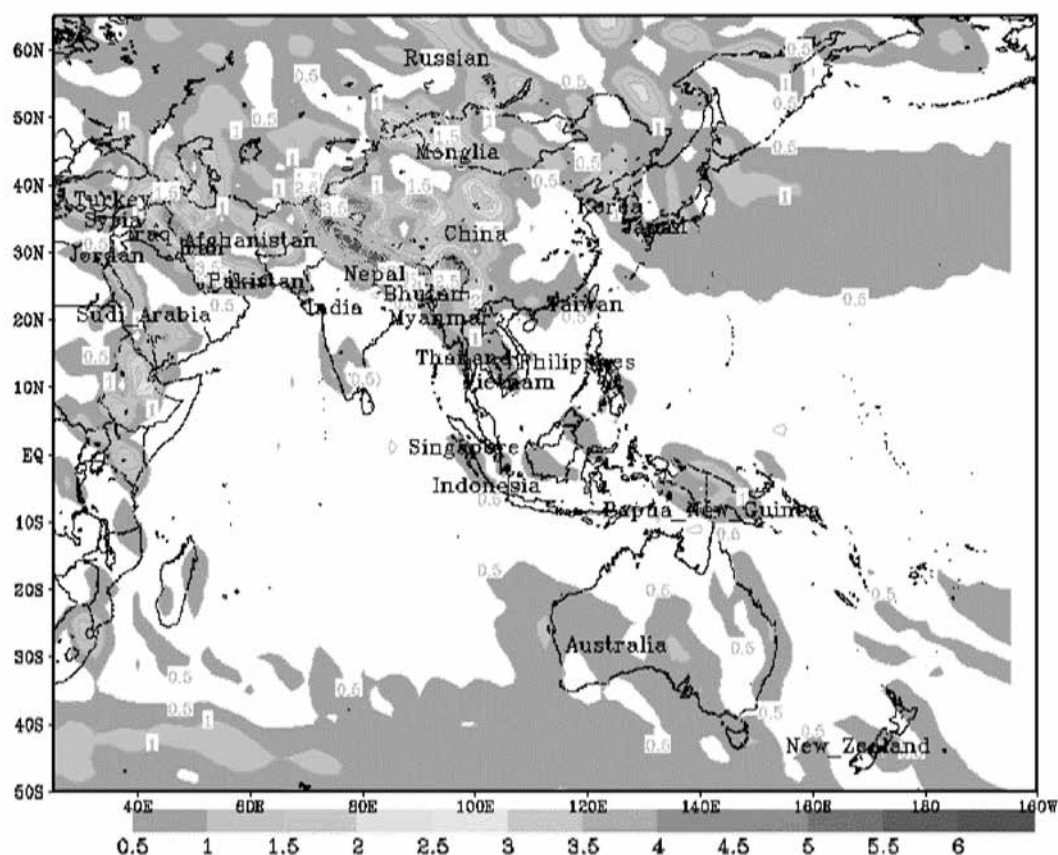


圖3 午後對流雲發展旺盛，尤其是在積雨雲內，除垂直運動旺盛外，也常伴隨雷電及強陣風發生，對流亂流相當顯著

上下氣流，進一步形成強烈亂流。綜上，未來在氣候變遷日益加劇下，對於飛航安全維護所面臨可能的挑戰，將會更加嚴峻；對於飛航大氣環境量場的診斷、預報與運用，勢必也要更加警慎與嚴謹。

五、因應策略建議：

飛航任務遂行時，亂流雖然無法完全避免，甚至有些時候是無法事先預知或警戒；但，可以透過科技預警、飛行策略與乘客管理等方式，嘗試降低其對飛航安全與舒適度的影響或干擾。以下是從航空公司、機師與乘客三方面整理出來的因應策略建議：

1. 機師與航空公司層級的因應措施：

在飛行計劃階段，使用航空氣象資料，諸如：SIGMET、AIRMET（航空氣象警報系統，標示亂流區塊所在）、TAF、METAR（顯示積雨雲分布、風向風速、雷雨動態情資）等，注意低空風速與陣風變化，預先掌握亂流可能肇生區域，規劃避開亂流路徑。利用「晴空亂流預測圖（CAT charts）」，分析高空噴射氣流區域，瞭解高空亂流最有可能出現的位置。透過高解析度的衛星與雷達資料整合，隨時更新並接收最新的氣象圖，洞悉如積雨雲、風切變警示等危險訊號，盡最大可能來避開強亂流區域。另一方面，也應避免強側風或迎風著陸時的低速飛行。

在飛行中調整高度與航向方面，若遭遇亂流，飛行員可根據實況，立即向航空

管制請求「改變飛行高度或航向」。減速至「亂流穿越速度（Turbulence Penetration Speed）」，藉以減輕機體壓力。另一方面，必須落實完成飛航員回報亂流（PIREP）系統作業，當飛行員遇到亂流後，會向航空管制單位提交實際觀察報告。回報內容包含亂流程度、高度、時間，足可提供其它班機參考避開。

2. 機艙管理與乘客安全措施：

若預期即將進入亂流區，機長需提前廣播通知乘客與組員做好準備。全艙繫上安全帶，機長下達「請坐下，並繫好安全帶」指令，並強調可能長時間搖晃，提醒乘客即使在平穩期間，也應繫上安全帶。

同時，停止供餐服務，收起推車。空服員平時的應對訓練，將落在緊急狀況下的機艙管理上，包含亂流發生時，如何保護自身、安撫乘客與緊急應變程序。若遭遇亂流前，來不及處理飲水車或咖啡壺，也應儘速檢查並固定裝置。若有乘客受傷或感到不適，空服員亦需評估是否需要醫療協助或急救裝備。

3. 乘客自身的應對建議：

亂流對於機上人員的影響，可依不同程度來加以說明。輕度亂流，座位稍微搖晃，乘客略感不適。中度亂流，飲料濺出，未繫安全帶者，可能受傷。至於重度亂流，飛機短時間、劇烈變化，可能造成人員拋飛或傷害。

爰此，建議旅客全程繫好安全帶，即使指示燈關閉，非必要時，也建議仍然繫著，以防突發亂流。避免站立或上廁所，特別是在巡航階段，遇到亂流預警之際。收妥個人物品，包括筆電、飲料、熱湯等，以免甩飛造成個人或他人的傷害。當航機有可能遭遇

亂流之際，遵從廣播指示，聽從空服員提醒，配合緊急指示操作。

4. 科技與研究發展（未來因應方向）：

長榮航空與國際航空運輸協會於 2025 年，共同簽署合作協議，長榮航空正式成為「亂流感知平台 (Turbulence Aware platform)」的成員。在 2024 年參與這個平台計劃的航空公司共產出 5,180 萬份亂流報告，遠較 2023 年大幅增加 35%，對如何降低亂流所帶來的損害很有幫助。長榮航空在加入『亂流感知平台』後，將有助於飛行員和調派人員掌握與分析即時的數據資料，進一步強化全球機組員和調派人員的能力，藉以提高飛航安全、燃油效率和旅客舒適度。透過每家航空公司所回報的數據，就能為機組員和調派人員提供更清晰的畫面資料，讓平台在降低亂流影響的層面更加有利，規劃選擇適當飛航路徑，以避讓亂流風險較高的區域，保障旅客與航機的安全。

就增進觀遙測作業效能來看，新一代氣象雷達可進行掃描遠距積雨雲結構與垂直風切的分佈，透過機載雷達的監測掃描，已逐步具備亂流預警、風切變識別與數據共享的能力，大幅增強了機組人員對突發亂流的即時反應力。經由即時顯示 5 至 10 秒的掃描資料，內建亂流預警、風切變指標、自動標示強對流區，並可即時傳送給航空公司與氣象單位做共享整合。

人工智慧 (Artificial Intelligence, AI)，在亂流預測與感測資料共享的應用上，已逐漸趨於成熟，也正快速改變傳統的航空氣象監測模式。AI 不只可以提升預測精度，更能透過感測器網絡與多機資料共享，主動預警潛在亂流事件，降低飛行風險。因此，

在部署更精密的亂流預測模型，包含 AI 預測與亂流感測共享或 AI 即時亂流感測回報，都是未來精進服務的主流規劃。

LLWAS (Low-Level Wind Shear Alert System，低空風切變預警系統) 是一套部署於機場跑道周圍的氣象監測與預警系統，專門用來偵測機場低空區域的風切變 (wind shear) 現象，藉以保障飛機起降安全。透過每隔幾秒自動讀取跑道周邊風速與風向資料，計算任兩站之間，是否有超過門檻的風速 / 風向變化，當系統偵測到可疑風切變時，即發出警報訊息至塔台，塔台可立即通知機組或暫停航機起降作業，確保飛航安全。若 LLWAS 監測顯示有低空風切變亂流時，飛行員應積極配合、遵守指示。

另一方面，在機場選址與設計階段，工程師與航空氣象專家都會特別考量當地地形與風場特性，藉以降低亂流與風切變 (尤其是低空風切變) 對飛行安全的威脅。因此，機場規劃，宜避開山谷、丘陵背風面；機場跑道與主要風向也應合理對應，避免強側風肇生。

六、結論與建議：

亂流對飛航安全維護的影響不容忽視，尤其是在未預警的情況下，可能對飛行員操作、乘客安全與飛機結構造成不同程度的實質風險。在無預警亂流的增加，乘客與機組人員受傷事件上升，憑添飛航風險；為了避開亂流，被迫改變航線，增加燃油、延誤、造成機體損耗，增加航空營運成本；跨洋航線可能需繞行高風險區域，導致飛行時間更長，肇致航班時間不穩；某些節能航路若隱含亂流增強，航空公司將被迫改道，形成綠

色飛行受限。

亂流是一種航機在飛行中，經歷的快速且不規則的空氣擾動，常易使航機發生搖晃或瞬間高度改變。它是由大氣中不同層次的風速、風向、氣溫變化所造成。亂流的形成，可以來自多種大氣環境現象，主要可以分為晴空亂流、對流亂流、山岳波亂流、機械亂流及風切變亂流等 5 大類。在起飛或降落階段，機械亂流、低空風切亂流最易發生，在山地或建築物附近也會常見；在巡航中階段，晴空亂流及對流亂流最易發生，而晴空亂流最常在高空噴流條邊緣發生；在穿雲或接近積雨雲階段，積雨雲內部的對流亂流旺盛，並常會伴隨著強烈上下氣流、閃電或冰雹等共伴，都要特別小心。

亂流最容易發生的區域，對應與大氣結構、地形、氣候系統與飛行高度，至為相關。就全球容易發生亂流的區域，分別為噴射氣流區、熱帶地區對流旺盛帶、山區風障區及副熱帶高壓邊緣區等區域。就台灣常見亂流多發區，若以季節來界分的話，通常在夏季午後，臺灣中部及花東縱谷就常有地形亂流或對流亂流產生；高雄到琉球的航線，也會因積雨雲頻繁，常有對流亂流出現。到了秋冬季節，由於太平洋高壓東退加上北抬，常在臺灣東部外海的空域上，會有晴空亂流發生。至於冬季，航機嘗試要進入台北盆地時，也常會遇到低空機械亂流或山岳波亂流的機會。

氣候變遷正逐漸改變全球大氣結構，其中有一項被科學界廣泛關注的可能趨勢，就是大氣中的亂流事件將因氣候變遷，而變得更頻繁、更劇烈。科學家提出，自 2050 至 2080 年，強烈晴空亂流發生的機率將增

加兩倍以上；最嚴重亂流等級可能增幅超過150%。全球暖化使對流層加熱加快，但平流層變冷，使得對流層頂的溫度梯度增強，環境大氣更加不穩定，並導致高層噴射氣流風速增加，進而擾動或亂流也因此加劇。更強或更不穩定的噴射氣流，也常易肇致產生更多、更強的晴空亂流。另一方面，由於全球暖化，使得溫差變化加劇，也會使得垂直與水平風速差異變大，增加飛行中的風切變亂流風險，這種情況，特別是在中高緯度地區發生頻率最高。

飛航任務遂行時，透過科技預警、飛行策略與乘客管理等方式，嘗試降低其對飛航安全與舒適度的影響或干擾。就機師與航空公司層級的因應措施方面，善用航空氣象資料，諸如：SIGMET、AIRMET、TAF、METAR等，注意低空風速與陣風變化，規劃避開亂流路徑。利用「晴空亂流預測圖」，分析高空噴射氣流區域，瞭解高空亂流最有可能出現的位置。透過高解析度的衛星與雷達資料整合，洞悉如積雨雲、風切變警示等危險訊號，盡最大可能來避開強亂流區域。落實完成飛航員回報亂流系統作業，提供其它班機參考避開。就機艙管理與乘客安全措施方面，若預期即將進入亂流區，機長需提前廣播通知乘客與組員做好準備，也應繫上安全帶。就乘客自身的應對建議方面，建議旅客全程繫好安全帶。避免站立或上廁所，特別是在巡航階段，遇到亂流預警之際。當航機有可能遭遇亂流之際，遵從廣播指示，聽從空服員提醒，配合緊急指示操作。

至於，科技與研究發展方面，航空業者加入『亂流感知平台』後，將有助於飛行員和調派人員掌握與分析即時的數據資料，進一步強化全球機組員和調派人員的能力，

讓平台在降低亂流影響的層面更加有利，規劃選擇適當飛航路徑，以避讓亂流風險較高的區域，保障旅客與航機的安全。就增進觀遙測作業效能來看，新一代氣象雷達可進行掃描遠距積雨雲結構與垂直風切的分佈，透過機載雷達的監測掃描，已逐步具備亂流預警、風切變識別與數據共享的能力，大幅增強了機組人員對突發亂流的即時反應力。人工智慧，在亂流預測與感測資料共享的應用上，已逐漸趨於成熟，也正快速改變傳統的航空氣象監測模式。低空風切變預警系統是一套部署於機場跑道周圍的氣象監測與預警系統，專門用來偵測機場低空區域的風切變現象，藉以保障飛機起降安全。✈

參考文獻：

- 林得恩，2003：影響飛行安全的氣象要素，空軍學術月刊，555，70－77。
- 林得恩，2004：積冰與亂流－飛航安全的隱形殺手，空軍學術月刊，570，76-82。
- 林得恩，2006：氣候異變對飛航安全的影響，飛航天氣，6，15-26。
- Kim, J., Chun, H. Y., & Kim, Y., 2009：An Observational Study of Mountain Wave-Induced Clear-Air Turbulence over South Korea. Applied Meteorology and Climatology, 48(9), 1913-1926.
- Sharman, R. D., & Lane, T. P., 2016：Aviation Turbulence: Processes, Detection, and Mitigation. Cambridge University Press.

航空器循環經濟學： 永續發展及成長

洪上庭，陳敬霖，楊文忠
中華民國民航飛行員協會

摘 要

隨著全球航空業的快速發展以及環保意識的提升，退役航空器的回收與處置已成為永續航空產業的關鍵議題。本研究以航空器循環經濟學（Aircraft Eco-Economy Industry）為核心，提出「退役航空器處置策略」（Aircraft Disposal and Recycle, D&R），並分析國際成功案例例如空中巴士 PAMELA 計畫及航空器機隊回收協會（AFRA）的實踐經驗。透過拆解、材料回收及再利用等方法，不僅可最大化退役航空器的剩餘價值，亦能有效降低對環境的負面影響。本文特別聚焦於台灣的產業優勢，探討其在全球航空器回收市場的潛力與發展策略，旨在為航空業的永續發展提供建設性建議。

本文使用之圖片僅為評論或研究目的，屬於合理使用範疇（Fair Use）。原作版權歸屬於原作者，無意侵犯其合法權益。如有任何疑問，請聯繫中華民國民航飛行員協會。

1. 緒論

1.1. 研究背景

航空業近年之普及徹底改變了交通運輸方式，卻也不可避免地對環境造成了影響。隨著環保意識的抬頭，越來越多研究在嘗試降低航空業對於環境的衝擊，如永續航空燃油之研發。而另一方面，根據國外研究統計，自商用航空業發展以來，至今已有超過 8,500 架航空器退役，且預計於未來二十年內，更有約 12,000 至 20,000 架之航空器將達到退役年限（End of Life, EoL）。隨著航空業飛快發展，眾人焦點也逐漸轉移到再生利用及

永續發展。當前，退役航空器管理效率低下，時常導致資源浪費與更多的環境破壞。本研究強調需要向循環經濟模式轉型，重點關注資源回收、廢棄物減量，以及在航空器生命周期末端推行環保政策之建議。

1.2. 新冠肺炎疫情凸顯之問題與商機

疫情期間，國際航班銳減，各航空公司暫時封存之飛機停滿了世界各地之機場，諸多機場甚至不得不關閉部分滑行道作為臨時停機位來滿足封存之需求。專營北美及亞洲轉機之航空公司也為了節省支出，從強調縮短地面中轉時間，轉為費盡心思安排飛機

停放及封存。基於市場需求及運營成本的考量，相當高比例之航空器面臨被拆解回收的選擇，然而在折舊導致之帳面虧損及緊張的現金流等因素之財務壓力驅使下，大多數達到退役年限之航空器，皆未能成功回收其殘餘價值，反而是被匆忙報廢、棄置荒漠，以便維持公司的財務健康。

1.3. 研究動機

航空器循環經濟學（Aircraft Eco-Economy Industry）這一概念，由中華民國民航飛行員協會之產業與技術發展委員會研討後提出，旨在應對國際上環保意識提升與航空公司盈利導向的背景下，提供既經濟又環保的方式，來評估如何處置及回收航空器，即退役飛機處置策略（Aircraft Disposal and Recycle, D&R）。此概念強調通過再利用、材料回收和熱能回收等方法，不僅能降

低對環境的影響，亦能最大限度地發揮退役飛機之剩餘價值。此領域在國際上與學術界仍處於起步階段，未來有望成為航空業永續發展的重要方向。

1.4. 研究目的與範圍

- 評估國際計畫如 AFRA 與 PAMELA
本研究旨在探討全球推行的退役航空器管理計畫，包括國際民航組織與航空器機隊回收協會（AFRA）與 PAMELA 專案的架構與成效，分析其對提升資源利用效率及環境保護的貢獻。
- 分析現有退役航空器管理方式
系統性地剖析當前退役航空器管理的現況，包括其操作流程、挑戰與不足之處，並檢視現有做法對環境



圖1 疫情期間被封存之航空器佔據滑行道

（來源：BBC 中文網，《肺炎疫情與「飛機墳場」：航空業不景氣造就沙漠奇景》
<https://www.bbc.com/zhongwen/trad/business-53635963>）

與經濟的影響。

- 探索航空業的循環經濟模式
深入研究循環經濟模式在航空業的應用潛力，特別是在退役航空器資源回收及再利用上的具體策略，藉此尋求平衡環保與經濟效益的最佳方案。
- 建立永續航空器生命周期管理的全面框架以現有管理經驗與研究為基礎，提出一套適用於航空器全生命周期管理的綜合性框架，涵蓋設計、運營、退役及再生利用的關鍵策略。

本論文聚焦於退役航空器管理的經濟與環境影響，檢視全球性的創新技術與實踐應用，旨在為政策制定者、產業領導者與環境倡導者提供具體建議，推動航空業朝向永續

發展的方向邁進。

2. 航空器循環經濟學

退役航空器之回收與處置相關概念最早由波音公司於 2005 年提出，並於隔年開始實施報退役航空器先進管理流程（Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft, PAMELA），旨在應對未來可能的大量航空器報廢以及生態影響問題，專注於航空器之拆解、零組件回收、材料分類與分離以及其最終處理。該流程不僅示範性地將報廢航空器對環境之影響大幅降低，並且最大化其殘餘價值，展示了高效且永續地處理產品壽命結束之模式（End-of-Life Solutions, EoLS），持續朝向將上述過程標準化之目標邁進。此一模式不久後獲得歐洲政府的大力支持，逐漸推廣到歐洲各國家中。



圖2 航空器之處置示意圖

（來源：The Future of Aviation Sustainability: Commercial Aircraft Disassembly, Dismantling, and Recycling Industry.
www.linkedin.com/pulse/future-aviation-sustainability-commercial）



圖3 回收過程之拆解示意圖

(來源：The Market for Commercial Aircraft Disassembly, Dismantling and Recycling.
<https://global-recycling.info/archives/5849>)

2.1. 退役航空器處置策略

(Aircraft Disposal and Recycle, D&R)

本文退役航空器處置策略涵蓋兩種不同的方向，分別為「處置 (Disposal)」與「回收 (Recycle)」，這兩者在航空器生命週期中扮演不同角色，並常因定義不夠明確而被混淆。

2.1.1. 處置 (Disposal)：

處置指的是將航空器拆解 (Disassemble) 後，並針對保留完整性且具二手市場價值之部件，進行檢修、再利用，之後重新投放市場中。例如，航電設備、發動機零件或機艙內可重複使用的部件，經過檢修認證後可作為二手零件售出，延續其使用壽命。這一過程強調的是「維持部件功能性」，使其再次投入使用。

2.1.2. 回收 (Recycle)：

回收更多地涉及航空器的拆毀 (Dismantling)，針對已無法繼續使用之

部件，進行材料的分離與再加工。含有可再生利用之材料（如鋁合金、鈦金屬等）將被收集，經過熔化、提純和重製，轉化為原生金屬材料，並根據重量進行售賣或再投入其他製造流程。這一過程側重「材料的再生利用」，降低資源浪費並減少環境負擔。

上述處置回收過程不免地會產生相對應之成本，而非是僅依靠分類材料便可回收 (Salvage) 航空器之殘餘價值。此過程仍會涉及諸多不同行業之分工與合作，如金屬熔化處理公司、皮革收集及再加工公司等，抑或是負責修復部件、進行適航認證、以及後續轉售二手市場之航空器維修工廠。後續的章節將更詳細地討論這些過程，說明將退役飛機一步步轉化為可處置回收之最終產品的方法與途徑。

處置回收之過程越詳細、越有組織，航空器則更有機會可以有較高的回收比例。根據一間參與空中巴士飛機回收計劃的修護公司 Tarmac Aerosave 之報告，此類回收方式能夠回收航空器總重量之比例高達 92%、

引擎部件總重量之比例更達驚人的 99%。以 Airbus 320 航空器系列為例，其機體結構主要由鋁及鋁鎂合金（72%）、鋼（9%）和鈦（6%）組成，此部分金屬在航空器退役後均可回收，經專業渠道處理後熔制成再生金屬，用於製造非航空應用之新零組件；複合材料和其他材料則可用於熱能回收或按照當地法規進行處置。

上述報告中可清楚了解到，若處置回收過程成熟、透過專業分工以有效地控制成本，航空器相當可觀的一部分可被回收再利用，其潛在之收益是相當可觀，更甚，在重視環保的地區如歐盟等地，通過此處置回收過程甚至可將獲得之碳權再加以變賣。

2.2. 退役航空器處置過程 (D&R Process)

2.2.1. 步驟一：存放退役航空器

無論航空器是決定報廢或經由處置過程回收價值，第一步驟皆為尋找一適合存放航空器之場所，常見的選擇如南加州物流機場附近之沙漠地區，當地乾燥的天氣特性有助於防止航空器零部件之腐蝕，且相較機場停機坪停放費用更為便宜。

2.2.2. 步驟二：是否轉售航空器之決策

比較航空器直接轉售可獲得之利益及經由處置可回收之成本後，公司將決議是否轉售。如決定直接將轉售飛機，則過程到此結束；如果不轉售而選擇透過處置流程，則進入步驟三。

2.2.3. 步驟三：拆解 (Disassembling) 與拆卸 (Dismantling)

拆解是指將航空器分解並保持零部件的完整性以便再利用或出售；拆卸更是指將金屬切割和粉碎，以便進一步運輸至金屬回收公司進行熔化回收。對於一般航空公司來說，維修領域可以應對拆解過程，而拆卸則需要交由專業公司來處理，比如金屬回收公司、大型器具報廢處理公司。

2.2.4. 步驟四：零組件管理與材料管理

拆解所獲得之產物進入零組件管理，拆卸之產物則是進入材料管理，兩者之概念可以區分為兩組，一組為零組件（儀器、引擎部件等），另一組則是材料（如金屬、塑料、皮革等）。零組件管理包括對零部件的分類、整新；材料管理則包括次級材料回收、熔化等過程。

2.2.5. 步驟五：廢棄物處理

材料管理和零組件管理之步驟結束後，殘餘無法再利用或回收之物品，將進行最後的分類，區分方式為判斷其是否可以焚燒，如果可以焚燒，此類物品將被運用於熱能發電，也被稱為熱能回收；其餘無法焚燒之物品將被送往填埋場，做為廢棄物掩埋處理。

2.2.6. 步驟六：回收所有退役產品的價值

從上述五個步驟中，我們會發現航空器的轉售或再利用，包括零件、原材料和熱能，皆為各個流程末端的產出項目。航空公司可以進行一系列的經濟評估，選擇一種能夠回收退役航空器之最大價值的方法。值得注意的是，D&R 過程也需要一定的成本，這些成本的消耗也是評估是否進行 D&R 之決策的重要元素。

2.3. 處置經濟效益評估

前述提到之過程旨在完整地說明 D&R

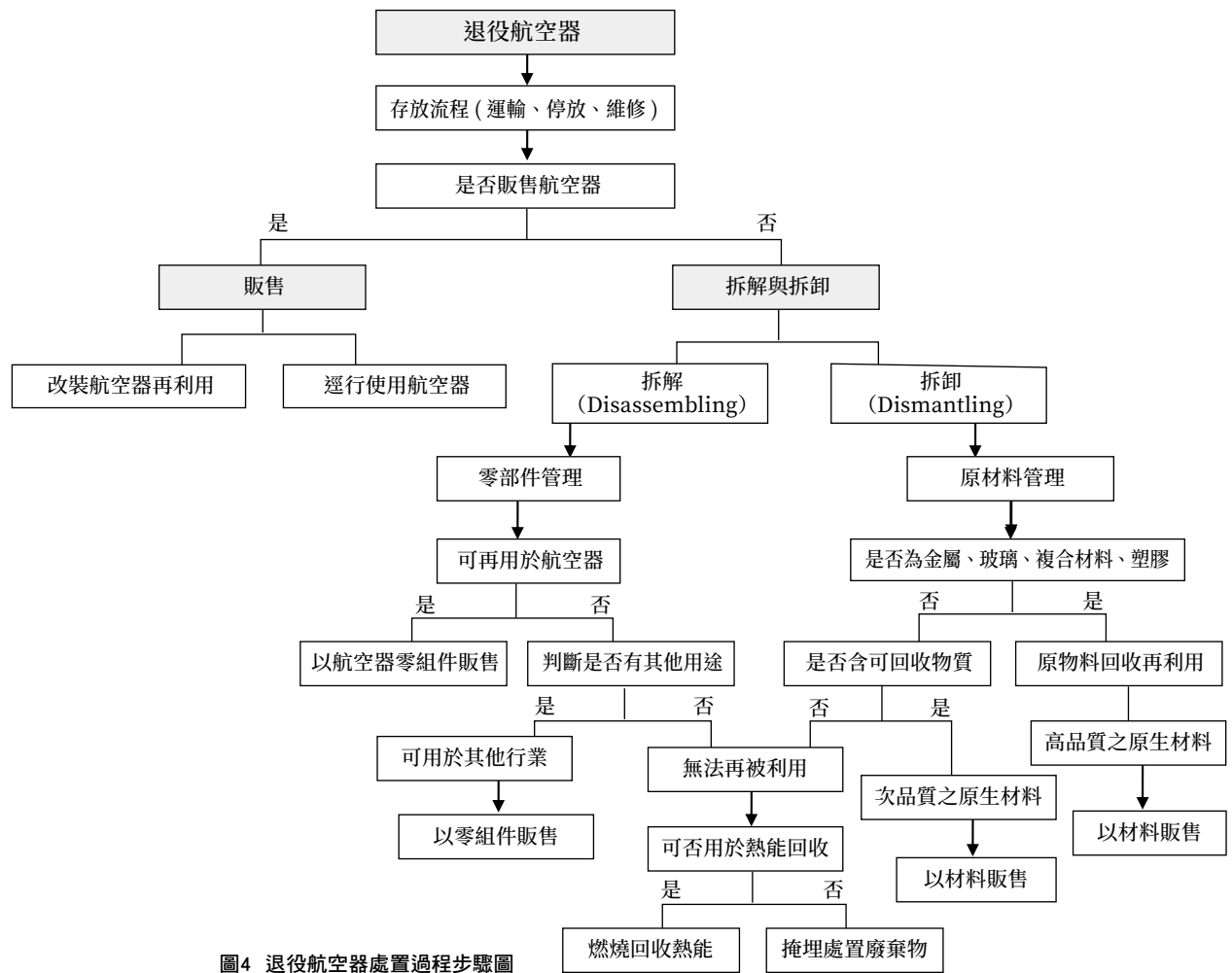


圖4 退役航空器處置過程步驟圖

過程中成本如何產生，以及 D&R 產品及細項之說明。本章節將詳述由國外研究機構設計出之經濟效益指標，並逐一介紹計算經濟指標時所需之元素，以協助航空公司及相關機構作出處置退役航空器之決策，而此處置之經濟效益評估即為本航空器循環經濟學中最為精華之部分。

2.3.1 退役航空器處置成本 ($C_{D\&R}$)

首先是評估退役航空器處置成本，即

$$C_{D\&R} = \sum_k C_{D\&R,k} = C_{D\&R,storing} + C_{D\&R,disassembly\&dismantling} + C_{D\&R,component_management} + C_{D\&R,material_management} + C_{D\&R,reuse} + C_{D\&R,alternative_reuse} + C_{D\&R,energy_recovery} + C_{D\&R,land_filling} + C_{D\&R,recycling_lq} + C_{D\&R,recycling_hq} + C_{D\&R,resale}$$

公式 1 評估退役航空器處置成本

D&R 過程之成本。如前章節所述，在航空器被拆解成較小元件（含零部件及原材料等退役產品）之前，需要經過多個步驟處理進行，具體而言，共有十個步驟會產生成本，此類步驟包括存放、拆卸與拆毀、零部件管理、材料管理、再利用、替代再利用、熱能回收、填埋、低質量回收、高質量回收、轉售（如公式 1）。

$$C_{D\&R,k} = \sum_j C_{D\&R,k,j} = C_{D\&R,k,labour} + C_{D\&R,k,material} + C_{D\&R,k,energy} + C_{D\&R,k,facility} \\ + C_{D\&R,k,tooling\&equipment} + C_{D\&R,k,miscellaneous}$$

公式 2 各步驟之元素細項

上述中每個步驟可再細分為六個元素，這些元素於每個步驟中獨立發生，分別為勞動（labour）、材料（material）、能源（energy）、設施（facility）、工具與設備（tool&equipment）、雜項成本（miscellaneous）。參考下面的公式，可以看到 $C_{D\&R,k}$ 為將此十項各自所擁有之六元素成本加總，即為總成本 $C_{D\&R}$ 。

2.3.2 退役航空器所剩餘之價值 ($V_{residual}$)

其次是評估退役航空器所剩餘之價值，即航空器之殘存現值。當涉及「現值」時，應當一併考慮折舊率及通膨率來做計算，以適當地反映航空器當下之價值，而後再做出財務決策。下列公式（公式 3）先對航空器之價格（ P_{AC} ）進行通膨調整，反映到當前財政年度（ FY ）之價值，再扣除因折舊所造成之價值損耗（ $C_{depreciation}$ ），最終得到航空器在當前財政年度之殘存價值（ $V_{residual}$ ），即可用於財務決策，如再利用或報廢之判斷。

P_{AC} 為航空器購入之價格；

$(1+I)^{FY-FY_0}$ 為考慮自購買年至評估年之通膨影響，將航空器價格進行通膨調整；

FY 為財政年度（Fiscal Year），標示某一年度，其中 FY_0 為該航空器購買之財政年度；

$$V_{residual} = P_{AC}(1+I)^{FY-FY_0} - C_{depreciation} = \frac{P_{AC}}{n_{depreciation}} \left((1+I)^{FY-FY_0} n_{depreciation} - (1+I)^{n_{depreciation}} (FY-FY_0) \right)$$

公式 3 航空器殘值評估

I 為通膨率；

$C_{depreciation}$ 因折舊造成之價值損耗；

$n_{depreciation}$ 為航空器總折舊年數，亦為預估使用壽命。

2.3.3 回收處置後之價值 ($V_{residual}$)

之後則需要評估回收處置後之價值，由於 $V_{salvage}$ 是經 D&R 過程後之價值，而在計算經濟指標時（公式 4），此價值包含著未來值（FV: Future Value），因此必須使用給定的回報率（ r ）來反向計算 $V_{salvage}$ ，即反映未來值之現在價值（PV: Present Value）（公式 5），從而使此項目適用於現值的方程（任何項目皆必須推算為現值，才可代入同一方程式以提供參考並作出決策）。

$$PV = \frac{FV}{(1+r)^n}$$

公式 4 反映未來值之現在價值轉換方式

$$V_{residual} = \frac{V_{salvage}}{(1+r_{D\&R})^{n_{D\&R}}}$$

$$V_{salvage} = V_{residual}(1+r_{D\&R})^{n_{D\&R}}$$

公式 5 反映未來之航空器殘值與回收處置價值

$$V_{salvage} = V_{component_reuse} + V_{component_alter_reuse} + V_{energy_rcv} + V_{material_hq} + V_{material_lq} + V_{resale}$$

公式 6 各細項總和即為總產出價值

$V_{salvage}$ 由六個項目之組合價值，包括：組件再利用（ $V_{component_reuse}$ ）、組件替代再利用（ $V_{component_alter_reuse}$ ）、能源回收（ V_{energy_rcv} ）、高質量材料（ $V_{material_hq}$ ）、低質量材料（ $V_{material_lq}$ ）、飛機轉售（ V_{resale} ），下方公式顯示了如何將 $V_{salvage}$ 計算為現值。

2.3.4 循環經濟指標 $I_{D\&R}$

將總產出價值（ $V_{salvage}$ ）、航空器殘值（ $V_{residual}$ ）和總處置成本（ $C_{D\&R}$ ）結合於同一方程式中，形成下方公式中之經濟指標 $I_{D\&R}$ 。簡而言之，如處置後總產出價值減去飛機殘值超過總處置費用（ $I_{D\&R} > 1$ ），即意味著處置航空器是具有經濟價值地；反之如 $I_{D\&R} < 1$ ，則意味著處置航空器並不具備經濟價值。

$$I_{D\&R} = \frac{V_{salvage} - V_{residual}}{C_{D\&R}}$$

公式 7 循環經濟指標可迅速判斷是否有回收價值

3. 國際處置回收產業現況與發展

儘管航空器回收計畫在國際間逐步展開，但其進展明顯落後於汽車回收行業。汽車回收與處置市場已發展成熟，擁有龐大的二手市場、零部件市場以及廢棄汽車回收處理廠等完善的產業結構。這些特點，包括覆蓋範圍廣泛及相對較低的入行門檻，使得汽車回收產業得以迅速成長（如圖 4）。相比之下，航空器之處置與回收業務面臨更多的



圖 4 汽車拆解專業機台十分鐘內即可完成一整部車的拆解過程，且會針對特殊零件進行分類。

（來源：兩岸三地中古車市場剖析（4-3）

<https://www.carnews.com/nocategorized/216491>）

挑戰。首先，航空器造價高昂，能負擔其金額之買家僅限於航空公司及少數私人企業，不僅一手市場狹小，二手市場更是寥寥無幾。此外，二手航空器的認證過程十分繁瑣且嚴格，也進一步限制了其回收市場的發展空間。

以歐洲為例，該地區的報廢車輛回收及其殘值處理行業已經非常完善，並受到嚴格且完善的經濟規範與環保法規監管。而即便航空器之處置回收產業仍處於起步階段，但不難預期歐洲對航空器之處置與回收產業同樣會給予與汽車產業相似的嚴格法規和高標準要求。

3.1. 空中巴士 PAMELA 計畫

PAMELA 計畫（Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft）是一項專門針對退役航空器處理之創新計畫，致力於為航空業帶來更加可持續、經濟且環保的

解決方案。每年約有 700 至 800 架航空器退役，傳統之處理方式效率低下，回收率僅約 50%，大部分廢棄物最終被填埋，對環境造成極大負面衝擊。本計劃旨在通過創新技術和標準化流程，實現飛機部件和材料的最大化回收，並推動航空業之循環經濟。

PAMELA 計劃於 2005 年首次啟動，試點設施位於法國。其核心目標是提升航空器全生命周期之環保處理能力，從設計階段即考量後續拆解與回收之便利性。該計劃採用了模組化拆解技術和數位化追蹤系統，不僅能快速識別和分離可回收材料，還可確保所有回收部件之來源與流向透明，避免非法廢棄物之問題。

PAMELA 在試點中拆解了一架舊型 A300 飛機，成功回收了 85% 之材料，包括鋁、鈦、鋼以及複合材料。其中，金屬部件經過處理後重新投入航空製造業，而航電設備與引擎等高價值零件則進行重新認證，約佔飛機總價值之 30%。這些零件之二次銷售創造了顯著的經濟效益。一架平均重量約 100 噸之航空器回收後，僅由鋁和鈦等高價值金屬即可產生約 20 至 30 萬歐元收入，而經認證之零件則可帶來超過 50 萬歐元之總收益。除了前述之經濟效益，本計劃還透過高效利用航空器殘值，為航空公司節省大量處理成本，更顯著減少資源浪費，推動了航空業循環經濟。

此計劃專注於環保處理技術，成功將廢物填埋率降低至 5% 以下。對於退役飛機中約 1 至 2 噸之燃油殘渣和液壓油，經由專業之去污染技術，確保有害物質被完全清除和妥善處理。而複合材料和塑膠部件，雖然有著較高之技術挑戰，仍透過開發多項創新

處理方法來提升回收效率。其中最核心之創新技術為模組化拆解技術以及數位化追蹤系統，此類技術不僅提升了回收效率，更確保了所有部件之來源與流向透明。據空中巴士統計，該計劃每年可減少約 50,000 公噸之碳排放，並顯著降低對天然資源的依賴。相較於傳統廢棄處理方式相比，此計畫降低了 70% 的廢物填埋率，更將航空產業之整體回收率提升至全新的水平。

此計劃之成功為航空器生命周期管理奠定了成功的基礎，也為航空業未來之退役處理樹立了標杆。其模式和數據對於有意商業化航空器回收產業之企業提供了寶貴的參考，尤為在資源再利用和供應鏈整合方面具有重要之啟發意義。對於台灣等地區探索航空器回收商業化之業者，本計劃提供了有效之藍圖，可在此基礎上進行本地化創新，推動產業可持續發展，不僅實現了退役航空器資源之高效回收，更創造了經濟與環境雙贏之局面，為全球航空業的未來發展指明了一個方向。

3.2. 航空器機隊回收協會

波音公司與多家航空及回收公司於 2006 年共同成立了航空器機隊回收協會（Aircraft Fleet Recycling Association, AFRA），該協會是一個專注於航空器回收與可持續管理之全球性非營利組織，致力於推動航空產業之環保標準化及最佳實踐。其初衷是為了應對航空業中退役航空器數量日益增長所帶來之環境挑戰。隨著航空器達到其使用壽命終點，協會提供此類航空器環保、安全且經濟有效之回收方案。

此協會之核心工作包含開發和推廣拆解與回收之行業標準，其「最佳實踐標準」

（Best Management Practices, BMP）在飛機拆解和材料回收領域被視為權威指南。這些標準涵蓋如何安全拆卸飛機、回收高價值材料（如鋁合金和複合材料）、以及如何適當處理有害物質，例如燃油殘留和其他化學物品。此標準認證為企業提供了高水準之操作指引，並有助於提升行業透明度和信譽。

據統計，到 2035 年將有超過 40,000 架航空器達到其使用壽命終點。這些航空器中約 90% 之材料可以被回收和再利用，主要為鋁、複合材料、和一些高價值航空零件，例如發動機和航電設備。除了技術層面之研究與標準制定，該協會也致力於推廣航空業之循環經濟概念。透過與航空公司和回收商之合作，不僅可以減少退役航空器對環境之影響，更可提升材料再利用率和價值鏈效益。例如一架波音 747 飛機經由高效拆解流程和材料分選技術，可回收超過 60 噸之鋁合金，大幅降低初級金屬之開採需求，從而減少碳排放。

在經濟層面上，航空回收業之市場規模不斷擴大，據估計，至 2030 年，全球航空器回收市場之價值將達到 50 億美元。該協會透過促進行業標準化和技術創新，為這一市場提供了重要的推動力。

3.3. 其他計畫

上述國際計畫之成功案例，對全球航空器回收產業發展起到了積極推動作用。然而，受限於航空器本身高技術門檻、產業鏈之特殊性以及市場規模較小等因素，航空器拆解與回收產業目前仍處於起步階段。下方列出部分發展中之相關計畫：

- CIRPASS 計畫：該計畫由歐洲多家航

空業及回收業組織聯合發起，旨在推動航空器生命周期全流程追蹤，並整合回收環節的數位化管理。CIRPASS 還試驗了 AI 技術在航空器拆解中的應用，以提高精準度和效率。

- Boeing's ecoDemonstrator Program：此計畫雖主要聚焦於航材環保製造，但同時關注退役材料的再利用技術研究。例如，ecoDemonstrator 已測試了使用回收碳纖維製造新部件的技術，並計畫在未來 5 年內進一步商業化。
- Sustainable Aviation Project (SAP)：該計畫由多家跨國企業及學術機構聯合推動，專注於研發航空器複合材料的高效回收技術，並強調降低拆解過程中的碳排放。SAP 還積極推動與全球供應鏈的合作，以確保回收材料能再次投入製造流程中。
- European Aviation Circular Economy (EACE)：此計畫由歐盟資助，目標是全面提升航空器的回收效率，並推動關鍵零部件的再製。EACE 還開展了多項試點項目，探索綠色能源在回收設施中的應用。
- NASA's Advanced Composite Consortium (ACC)：美國航太總署（NASA）領導的聯盟專注於航空器複合材料的循環利用與創新拆解技術。ACC 研發了多項專利技術，降低了回收過程中對環境的影響，並提升了碳纖維回收的質量。

3.4. 學術方面之研究

目前，學術界對退役航空器回收及永續再利用的研究仍相對有限，導致該領域的發展速度緩慢。然而，隨著全球環保意識的提升，愈來愈多航空公司及國家開始重視並投入資源於退役航空器回收系統（End-of-Life System, EoLS）之建設。一些主要學術研究機構及專案包括：

- 英國 Cranfield University：該校專注於航空與環境之交互研究，其永續航空技術中心（Centre for Sustainable Aviation Technologies）對航空器材料回收技術之研發提供了重要貢獻。
- 美國麻省理工學院（MIT）：其航空與航天部門（Department of Aeronautics and Astronautics）進行了多項關於航空器生命周期與材料循環利用之研究。
- 德國航空航天中心（DLR）：該機構積極研究複合材料之回收技術，並與多家航空公司合作開展退役航空器處置之實驗項目。
- 歐洲航空環保研究聯盟（Clean Sky Joint Undertaking）：該組織聯合了歐盟內多個學術機構及企業，致力於航空器設計、使用與回收的全流程環保優化。

未來，隨著航空器退役數量逐年增加，其衍生的環境挑戰將成為全球性問題。在此背景下，如何有效發展航空器的回收處置技術及建立完善的回收產業鏈，將成為各國亟需面對的課題。儘管台灣航空器回收尚處於

發展初期，但此類經驗與研究皆可為本地產業提供參考，協助建立高效且環保之航空回收產業鏈，並支持企業參與全球航空永續發展之合作網絡。

4. 台灣發展航空器回收產業之潛力

4.1. 曾經的拆船王國：台灣的金屬回收產業

台灣面臨缺乏自然礦產資源的挑戰，而冶煉金屬之過程則因能源成本過高及環保問題而備受挑戰，因此為了滿足長期依賴進口之金屬需求，金屬回收產業在早期台灣成為一項十分繁榮之產業。該產業自民國 40 年代逐漸興起，民國 60 至 80 年之間，台灣在國際造船業界榮獲「拆船王國」之名號（圖 6 為高雄港拆船行業蓬勃發展之盛況）。當時，舊船之拆解和回收為金屬回收業提供了巨大的支持，持續且穩定地供應了十大建設期間建築業所需之鋼材。然而，拆船業在當時被認為是一個高污染產業，受高雄市民強烈地反對，導致政府轉而專注於高科技產業，拆船業也因此漸漸沒落。



圖 6 高雄拆船業是成就十大建設的要角之一

（來源：<https://storystudio.tw/article/gushi/kaohsiung-shipbreaking-industry/>）



圖 7 亞洲航空於台南機場旁之維修機坪從事多項檢修相關服務

(來源：<https://www.chinatimes.com/newspapers/20170817000325-260511?chdtv>)

根據 PAMELA 計畫之展示，現今之 D&R 過程可以達到高度系統化及環保效益，不同於過去使用傳統拆解方法和鋼材管理所造成之巨大污染。台灣具備進行金屬回收業務的條件、環境、技術及經驗，是十分有機會發展出完善的航空器循環經濟學，以環保方式回收退役航空器，不僅能具備與當時「拆船王國」相同之益處，更能改善為人詬病的污染問題。

4.2. 強大的飛機維護能力

台南當地著名的亞洲航空公司（如圖 7），專門從事航空器維護，其業務範圍不僅涵蓋 A/B/C/D 級檢查、適航指令、服務通報、CPCP/SSID、結構損傷修理、機身修改及翻新，更甚該公司還能夠進行多機型的維護工作，包括空中巴士 A320、ATR、波音 737、Dash-8 和 MD80 系列，甚至軍用 C130 和 P3C 航空器也包含在內。由此可見，除了航空公司之外，業界也有公司有能力進行上述提及之零組件管理，且高雄機場及台南機場之停機過夜費用便宜、機場使用率不高、跑道長度足夠，十分適合國際間退役之航空

器來此處進行處置及回收，既環保又較報廢更具經濟性。倘若能將航空器維護能力與金屬回收業務進行高效地結合，台灣具備良好之發展 D&R 產業條件，並成為全球領先的環保先鋒，推動中華民國航飛行員協會所提出之「航空器循環經濟學」理念。

4.3. 符合政府政策方向，由政府支持的潛力

自民國 113 年起，中研院設立了「關鍵議題研究中心」，目前鎖定量子科技和淨零科技兩大領域，根據行政院發布的信息，淨零科技之精髓源自「氣候變遷因應法」，包含五大領域：永續及前瞻能源、低碳、負碳、循環和人文社會科學，旨在減少碳排放及提高資源再利用率，此目標恰好符合航空器回收產業之精神，回收航空器之金屬以減少冶煉需求、降低金屬提煉產業及高碳產業之污染，並提高資源利目率，如有公司遵循航空器循環經濟學之精神、致力於發展此一產業鏈，該企業將更容易獲得各國政府之支持，相較於仍處在發展中且尚未注重環保政策之東南亞國家，將是台灣企業的一大優勢。

5. 退役航空器回收處置產業鏈

5.1. 航空器退役規劃與評估

航空器在使用 15 至 25 年後，會開始考慮退役或轉售，而其中牽涉的因素非常廣泛，但可以簡化為以下兩者為主：

1. 市場需求：市場上對二手零件和發動機之需求
2. 燃油效率較低之老舊機型在高油價時更可能被提前退役。

而航空公司處理退役航空器主要有四種方式：

1. 延長服役或租賃：轉售或轉租給其他航空公司
2. 拆解與回收：將航空器拆解為零件與材料以獲取其殘餘價值
3. 改裝或教育訓練用途：改裝為貨機或進行升級，或用於員工訓練使用
4. 永久停放：作備用機或送往飛機存放場

而這項決定取決於航空公司之相對應能力。如航空公司是否有現金流經濟壓力，能否承受 D&R 過程消耗現金且延遲殘值回收的時間，以及航空公司是否有能力自行拆解飛機等因素，皆會影響航空公司如何處理退役航空器。當面對拆解與回收時，一般有如下三種選擇：

1. 航空公司自行完成 D&R 流程

航空公司自行完成所有 D&R 流程，並獲取飛機的殘餘價值。此方式適合擁有

龐大機隊及強大維護能力的航空公司，如印度 Indigo 航空、阿聯酋航空、亞洲航空及中國境內主要航空公司，此類公司能夠標準化 D&R 方法，降低成本並提高效率。

2. 航空公司將 D&R 流程外包

給 EoLS 公司航空公司將所有 D&R 過程外包給專業 EoLS 公司，支付處置費用給 EoLS 公司，而後續 D&R 所產生的價值仍歸航空公司所有。

3. 航空公司將飛機出售給 EoLS 公司

航空公司將飛機出售給 EoLS 公司，該公司進行 D&R 並獲取所有 D&R 產品價值。這種方式較為適合台灣的航空公司，因機隊規模不夠龐大且飛機型號多樣化，退役飛機數量有限難以發展出標準化流程，因此將 D&R 過程外包給 EoLS 公司會更為合適。

5.2. 拆解及拆卸

為確保符合環境規範，環保處理為首要步驟，包括對燃料殘餘、潤滑油及化學物質的安全處理。此部分通常可由航空器維修廠商或專業拆解廠商提供專業支持，以減少對生態的影響，如國際上之 Aircraft Demolition 及 Air Salvage International 專門提供高效之拆解與拆卸服務，能夠同時保障環保和效率。

而後則是 D&R 過程中最為關鍵之步驟，涉及航空器系統、結構及有害物質之拆解與處理。高價值零件如發動機、航電設備及起落架需要專業設備與技術支持，一般由航空器維修廠商或專業零件供應商提供專業服務。結構拆卸則需依賴高效切割技術和物流

支持，由航空器維修廠商或材料回收公司協作完成。

拆解階段的另一項挑戰是面對多樣化飛機型號之適應能力。拆解機構需要建立靈活之標準化流程，以應對不同結構設計需求，這大大增加了專業設備和技能的要求。此外，拆解後之零部件物流管理也十分重要，物流公司需確保零件安全快速地運輸至相關市場。

5.3. 零組件回收與管理

航空器中約 90% 之零件可回收再利用，尤其如發動機、航電設備及機艙內部設施等高價值部件。發動機經檢測及翻修後，需要經過測試與認證服務，一般由航空器維修廠商及認證機構提供服務，才能以二手零組件之形式重新進入市場。航電設備及其餘航空器特有設備除作為相關機型之備用材料外，則主要透過航空器設備供應商販售給小型航空公司或區域航空公司。機艙內部設施如座椅及廚房設備，則可通過創意改造與設計應用於其他領域，如室內設計。

上述回收流程皆需符合國際標準（如 ATA Spec 300）並經過適當認證，GA Telesis 等企業在全球範圍內提供專業之零部件回收供應鏈服務。而零組件回收之商業模式達一定規模後更可設立集中倉儲與分銷系統，以提高回收效率並降低市場價格波動風險。此外，建立專業零件市場平臺有助於加快交易速度，增強市場透明度。

5.4. 材料回收與管理

航空器結構中之材料（如鋁合金、鈦合金、碳纖維等）具有高度回收價值。鋁和鈦常被用於新世代結構或汽車製造業，此類回

收需要高純度回收技術，相關金屬回收公司於此可發揮關鍵作用。碳纖維回收雖技術挑戰較高，但具有廣泛應用潛力，如製造自行車或運動器材，此部分則可交由新穎材料開發公司負責。如 ELG Carbon Fibre 與波音合作回收廢舊碳纖維，用於製造汽車零件及其他商品，展現了材料回收的創新應用。其他合金材料則可廣泛應用於工業製造領域，此部分需依賴高效分離技術，可由工業材料公司提供支持。

材料回收之成本控制是關鍵之一，回收公司需優化分類流程，並開發高效之機械設備以降低能耗。此外，材料市場之波動性也會對回收策略有一定之衝擊，此類問題需要通過長期之合作供應商來穩定整體需求。

5.5. 其他應用

航空器具有多樣化之創新應用可能性，如改造為餐廳、咖啡館或博物館展品，這部分需要空間設計與創新能力，可與建築設計公司合作來達成。藝術創作也是一可發展領域，如將機翼或部分機身材料改造為藝術裝置，藝術品創作公司則在此領域具有相對的潛力。如 Air Hollywood 利用退役飛機打造電影場景，並為航空迷提供模擬飛行體驗，結合了商業與文化價值。其他應用還包括設立專門的航空主題公園或活動空間，吸引旅遊和商業活動的結合。這類創新應用需要政府和私人投資的協同合作，以最大化經濟效益和社會影響。

此外，退役航空器零部件也可用於教育用途，如員工訓練或學校航太科系教育，此部分可向相關需求公司或學校販售。

5.6. 廢棄物處理

D&R 過程中的廢棄物需妥善處理，以符合環保規範。其中主要分為可燃廢棄物和不可燃廢棄物之處理方式。對於可燃廢棄物，通常採用熱能回收（燃燒）技術，通過高效燃燒設備將廢棄物轉化為熱能，如蒸汽或電力。此過程需要專業的燃燒設備供應商和熱能管理公司參與。

不可燃廢棄物則多採用掩埋方式進行處理，需選擇專用之掩埋場地，確保對周邊環境影響降到最低。掩埋處理需符合當地環保規範，並定期監測其環境狀況，應交由廢棄物管理公司執行。

國際航空組織（如 ICAO）已推動廢棄物處理的標準化，為航空產業的可持續發展提供了指導。廢棄物處理還需要追蹤與報告系統，以確保所有步驟符合環境政策，並提高整體透明度。

5.7. 法規與政策支持

政府與國際組織對航空器回收處置產業之政策支持為成功的關鍵。相關法規的制定可確保整個 D&R 流程符合環境與航空規範，這部分可參考國外已逐漸發展成熟之相關標準制定，如 EASA Part 145 或由 AFRA 所提出之 BMP。而政策激勵包括提供稅收優惠、碳權交易、經濟補貼及技術支持，則可鼓勵企業參與航空器回收。如歐盟之 Flightpath 2050 政策致力於提高航空器材料之回收率，為全球樹立了標桿。

此外，政府可協助促進國際合作，創建跨國資源共享平台，幫助鄰近國家或地區更高效地回收航空資源，這對全球環境及初

創之航空器回收處理產業的穩定具有重要意義。

5.8. 產業商機與建議

整合供應鏈是提升效率之重要方向，從拆解到材料回收之全流程服務需要供應鏈協作平台與技術整合，須有具備相關專業知識之廠商提供支持。而持續不斷地與政府溝通以促進相關法規及政策的制定也是促進此產業快速發展的另一重要策略。本地化需求方面，結合台灣市場特色，與漢翔航空等本地企業合作可打造區域回收中心，這部分則需要在地化技術之支持與產業網絡之建立，若能由如漢翔航空等具備一定維修技術之企業偕同本地航空公司一同推動，將可大大提升本產業之發展可行性。

航空器回收處置產業是一個環保與經濟並行的行業，其發展潛力巨大。台灣可以充分利用其地理位置及技術優勢，在亞洲市場中佔據重要地位。此外，未來技術創新和國際合作將成為推動該行業進一步發展的關鍵，這需要產業各方的共同努力。

6. 結論

本文透過航空器循環經濟學之研究，提出 D&R 處置策略，並借鏡國外成功之案例，期望台灣以其成熟的金屬回收技術和卓越的飛機維護能力，發展其航空器循環經濟，實現台灣在此領域之巨大潛力。透過引入系統化的退役航空器處置與回收流程，台灣有望成為亞洲地區航空器回收市場的領導者。不僅能有效提升資源再利用率，實現經濟與環境的雙贏，更能支持全球 2050 淨零排放目標。為此，需進一步整合本地供應鏈並結合國際合作，共同推動技術創新與政策支持，

使航空器循環經濟成為未來永續發展的重要驅動力。✈️

7. 參考文獻

- Zhao, X., Verhagen, W. J. C., & Curran, R. (2020). Disposal and Recycle Economic Assessment for Aircraft and Engine End of Life Solution Evaluation. *Appl. Sci.* 2020, 10(2), 522; <https://doi.org/10.3390/app10020522>
- Ribeiro, J. S., & Gomes, J. de O. (2015). Proposed framework for End-Of-Life aircraft recycling. In *Proceedings of the 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. Instituto Tecnológico de Aeronautica, São José dos Campos, SP, Brazil.
- Airbus. (2022, November). End of life: Reusing, recycling, rethinking. <https://aircraft.airbus.com/en/newsroom/news/2022-11-end-of-life-reusing-recycling-rethinking>
- Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA). (2021). Best Practices for Aircraft Recycling and Dismantling. <https://afraassociation.org>
- ELG Carbon Fibre Ltd. (2020). Carbon Fibre Recycling Technology: Industrial Applications and Environmental Benefits. ELG Technical Report.
- Boeing. (2018). Sustainability in Aerospace: Innovations in Material Recycling. Boeing Corporate Report.
- 行政院，淨零科技方案（第一期 2023–2026），網址：行政院全球資訊網。
- 黃文星，付建勛，林偉凱，2011. 台灣金屬資源再生技術的現況與展望．台灣金屬資源再生技術的現況與展望．科學發展，457 期，pp. 92–96.
- Hamidreza Zahedia, Christian Masclea, Pierre Baptisteb, 2016. Advanced Airframe Disassembly Alternatives; an attempt to increase the afterlife value. *Procedia CIRP*, 40, 168–173.
- Ellen MacArthur Foundation. (2020). Circular Economy in Aviation: Key Strategies for Sustainability. Ellen MacArthur Reports.
- Scheelhaase, J., Müller, L., Ennen, D., Grimme, W., 2022. Economic and Environmental Aspects of Aircraft Recycling. *Transportation Research Procedia*, 65, 3–12.
- Toward a strategic approach to end-of-life aircraft recycling projects <https://doi.org/10.5539/jms.v3n3p76>

以保安管理系統強化航空安全： 2024 年 IATA SeMS 新加坡 訓練課程心得

長榮航空 張裕昇 助理副課長

中華航空 涂逸蓁 管理師

星宇航空 沈懷玲 資深專員

因應國際威脅日益嚴峻與航空產業運作複雜性增加，航空保安管理系統（SeMS）逐漸成為一套前瞻性、安全導向之航空保安策略架構。本文整理 2024 年 12 月 9 日至 13 日於新加坡舉辦之 IATA SeMS 課程內容與學習心得，探討航空保安管理系統之核心理念、操作實務及其在各民航產業，如航空公司內部推動的挑戰與機會。課程由新加坡資深講師 Andy Koh 授課，透過互動教學及情境模擬，加深學員對於 SeMS 理解，並強調如何將 SeMS 有效整合於組織文化與營運流程中，以建立具前瞻性且完整之航空保安管理系統。

航空保安為全球航空產業營運之根本要素，面對當前日趨多樣且隱蔽之保安威脅，必須由傳統被動因應轉向風險導向與預防為主之策略。IATA 推動之保安管理系統（SeMS）與 ICAO 架構相符，強調以風險為基礎之管理模式，協助航空公司建構系統化與持續改進的保安管理機制。本次參訓主要著重課程學習與觀察進行整理，分析課程設計重點、教學策略與 SeMS 制度實施的反思

與建議。本研究採質性分析方法，資料來源包括 IATA 新加坡訓練中心之課程教材、授課內容、參訓者經驗分享與小組討論內容，從中歸納 SeMS 實施架構、教學策略與操作層面相關之要素。

課程核心模組包括：SeMS 理念與基本要素導論、保安威脅與風險評估、企業承諾與保安文化建立、人為因素與事件回報制度、緊急應變計畫與模擬情境練習、品質管理與 IOSA 對應機制。課程整體設計環環相扣，內容涵蓋從制度架構至實務操作層面，循序漸進地引導學員掌握 SeMS 的全貌。透過豐富的互動討論、各航空代表之經驗交流、實務操作演練與情境模擬，講師不僅協助學員強化對 SeMS 架構的認識，也著重於各項策略如何實際應用於航空公司日常營運流程中。課堂中大量導入真實案例分析，幫助學員將所學知識內化為可落地的實務能力，進一步提升航空保安管理效能。

此外，本課程特別強調團隊合作與跨部門視角。學員被分配至來自不同國家及民

航產業之背景小組，透過團體討論與模擬演練設計 SeMS 管理系統架構，不僅能加深學員對航空保安概念的理解，也訓練解決問題的能力。課堂設計亦納入策略簡報訓練，讓學員模擬向公司高階主管呈報計畫，強化表達與說服技巧。SeMS 架構強調主動預測與預防性思維，整合組織行為、規範遵循與營運效率，協助航空公司提前部署安全管理資源。相較於傳統的被動保安模式，SeMS 更具系統性與前瞻性，能有效結合法規要求與公司治理層級目標。課程闡述人為因素與保安績效間的密切關聯，強調建立自願性回報制度與保安文化作為 SeMS 成功實施的基石。講師指出，一個有效的保安文化不僅需來自管理階層的承諾，更須透過持續溝通與教育讓每一位員工理解自身於保安體系中的角色。

課程中也深入探討 James Reason 安全文化五大支柱於 SeMS 中的應用。課程引入風險計算公式：風險 = 威脅 x 脆弱度 x 後果緩解措施，並結合實作案例協助學員強化應變規劃能力。透過分組演練風險評估流程，學員實際操作資料蒐集、風險矩陣分析與應變策略設計。此一過程使學員更能掌握如何從管理決策層面出發，主動預防、監控及回應潛在風險事件。理論雖健全，但實務推動須仰賴高層承諾、部門協調與組織文化導入。參訓者指出推動過程中常見組織慣性、資源不足與溝通障礙等挑戰。然而透過本課程的跨領域實作，學員學會如何辨識制度瓶頸，並以循序漸進的方式導入 SeMS 觀念。課程所提供的工具與模板，如保安績效指標範例、保安政策聲明框架及風險通報機制流程圖，亦提供學員回國後可直接應用的實務參考。

本次 IATA SeMS 訓練課程成功融合理論與實務，提升航空保安人員風險意識與策略思維能力，對推動企業內部保安管理系統具有實質助益。特別值得肯定的是，講師以其豐富實務經驗與高度互動式的教學方式，提供清晰易懂的架構與深具啟發性的實作指引，讓參訓學員能在短時間內建立對 SeMS 制度的整體理解，進而強化其在所屬單位中的實務推展能力。課程同時促進跨單位人員對航空保安議題之整體認識與合作意識，對整體產業人力資源之發展具有正面助益。建議未來可持續強化跨部門合作機制，並由高層領導持續推動保安文化，以確保 SeMS 制度得以長期、有效地融入營運架構中。✈

參考文獻：

- [1] 國際航空運輸協會（IATA），《SeMS 手冊》第八版，2024 年
- [2] 國際民航組織（ICAO），Annex 17 與 Doc 8973

附註：本文根據 2024 年 12 月赴新加坡參加 IATA SeMS 訓練課程後之總結報告撰寫，內容涵蓋參訓人員之實務心得與學習成果。

2024年飛航安全紀錄退步

IATA 表示，去年失事資料與前一年 2023 年相比，紀錄中的「卓越表現」落後許多。

蕭光霽 譯



Image: Tim Roberts Photography | shutterstock

IATA 於其《2024 年度安全報告》(2024 Annual Safety Report) 中指出，2024 年航空運輸飛機計發生 7 起致命事故，導致 244 名乘客和機組人員喪生，事故率為每百萬架次 1.13 起。此項年度統計總數均高於 2023 年之記錄。

是項報告於今 (2025) 年 2 月下旬發布，

登載資料顯示儘管航空業在多項指標上較 5 年平均水準有所改善，但「與 2023 年之卓越表現相比，卻有所退步」。2023 年紀錄中僅 1 起失事紀錄，造成 72 名相關人員喪生，事故率為每百萬架次發生 1.09 起事件。

協會理事長 Willie Walsh 指出：「航空安全長久以來令人傳頌是就是不斷改進。10

年前，5年平均事故率(2011-2015年)為每45萬6,000架次發生1起事故。而如今，5年平均事故率(2020-2024年)為每81萬架次發生1起事故。如此進步成就，係因我們深知人命關天。」

資料顯示，雖然去(2024)年全年事故率為每百萬架次1.13起，比2023年事故率表現更差，卻優於5年平均值每百萬架次1.25起。去年的7起事故紀錄，不僅超過2023年1起事故，也超過5年平均值每年5起致命事故。

致命風險值係計算單一旅客或機組員「曝露在無生還機會之災難事件」衡量比率，該協會計算2024年的致命風險值為0.06，低於5年平均值0.10，卻是2023年致命風險值0.03的2倍。

依據是項報告，2024年常發事故類型是機尾擦撞(12起)與偏離跑道(10起)。報告中指出2024年並未發生「可控飛行撞地」事故，此類型事件係為過去最為致命的事故之一。

該協會在報告中對於在衝突區域中或鄰近區域作業時之風險增加，表達關切，並指稱2024年中在衝突區域發生兩起事件，導致總數43名(原文有誤)人員喪生。其中38名係於12月25日在哈薩克的1架亞塞拜然航空 Embarer 190 型機墜機事件中喪生，另外5名係於10月21日在蘇丹的1架新路線航運公司(New Way Cargo Airlines)伊留申 Il-76 型機墜機事件中喪生。該協會將此兩次事件列為安全相關案件，而非事故，且未列於本項安全報告資料之中。

但是報告指出，此類型事件與全球導航衛星系統(global navigation satellite system, GNSS)訊號受到干擾事件日益增多，兩者皆為「至受關切之航安事件，需要緊急協調世界各國」。協會資料顯示，干擾全球導航衛星系統訊號事件比率，2024年增加為2023年的175%，而同一期間發生「欺騙訊號」(spoofing，干擾訊號致使全球導航衛星系統用戶誤以為其位置為其他地點)事件比率增加500%。

理事長 Walsh 表示：「不論是蓄意或無意所致，民用航空器皆不應成為軍方行動目標。」各國政府應挺身而出，加強情報共享，並建立更明確的全球協定以阻止如此悲劇發生，維護民用航空安全。✈️

譯自：FSF 網站 2025 年 3 月 5 日新聞

'A Step Back'

Accident data for 2024 falls short of the 'exceptional performance' recorded the previous year, IATA says.

FSF Editorial Staff | March 5, 2025

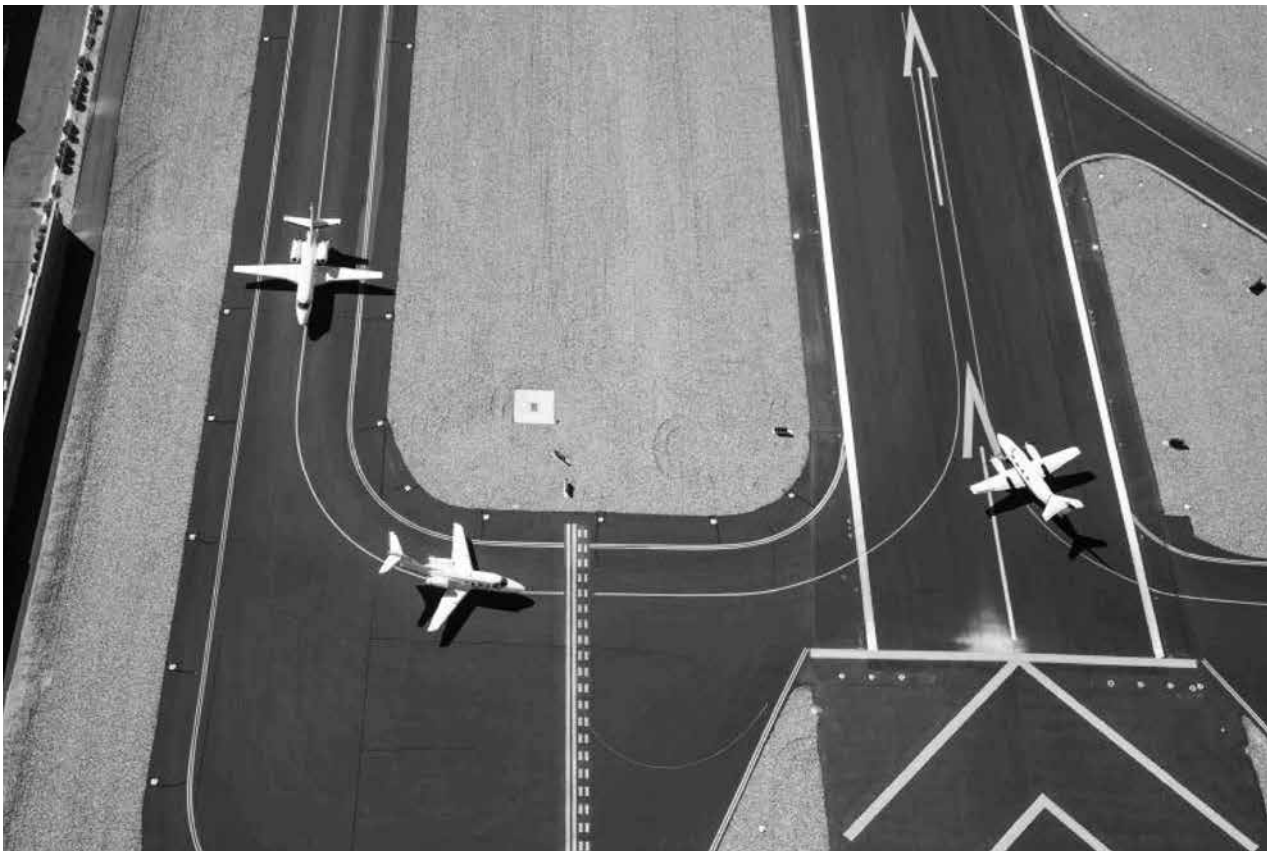


Image: Tim Roberts Photography | shutterstock

Air transport aircraft were involved in seven fatal accidents that killed 244 passengers and crew in 2024 and that translated into an accident rate of 1.13 accidents per million flights — yearly totals that were higher than those recorded in 2023, the International Air Transport Association (IATA) said in its *2024 Annual Safety Report*.

The report, issued in late February, included data showing that the industry recorded improvements over the five-year average for several parameters but "took a step back from an exceptional performance in 2023." In 2023, one fatal accident was recorded with 72 associated fatalities, and the accident rate was 1.09 per IATA Director

General Willie Walsh added that "the long-term story of aviation safety is one of continuous improvement. A decade ago, the five-year average (2011-2015) was one accident for every 456,000 flights. Today, the five-year average (2020-2024) is one accident for every 810,000 flights. That improvement is because we know that every fatality is one too many."

Data showed that although last year's all-accident rate of 1.13 per million flights was worse than the rate for 2023, it was better than the five-year average of 1.25 per million flights. The seven fatal accidents recorded last year exceeded not only the single accident in 2023 but also the five-year average of five fatal accidents per year.

IATA calculated the fatality risk—a measure of a passenger's or crewmember's "exposure to a catastrophic event with no survivors"—at 0.06 in 2024, below the five-year average of 0.10 but double 2023's 0.03.

According to the report, the most frequent types of accidents in 2024 were tail strikes (12) and runway excursions (10). The report noted that there were no controlled flight into terrain accidents — one of the greatest killers in the past — in 2024.

In the report, IATA noted its concern about the increasing risks of operating in and near conflict zones, and said that two events in conflict zones in 2024 resulted in a total of 42 fatalities. The number includes 38 people

killed when an Azerbaijan Airlines Embraer 190 crashed Dec. 25 in Kazakhstan and five killed Oct. 21 when a New Way Cargo Airlines Ilyushin 11-76 crashed in Sudan. IATA classified both events as security-related events, not accidents, and neither was included in data presented in the *Safety Report*.

Nevertheless, the report noted that such events, along with an increasing number of occurrences involving interference with global navigation satellite system (GNSS) signals, are "a top concern for aviation safety requiring urgent global coordination." IATA data show that the rate of interference with GNSS signals increased 175 percent from 2023 to 2024, and "spoofing" events (in which interference fools GNSS users into thinking they are in another location) increased 500 percent.

"No civil aircraft should ever be a target -deliberate or accidental -of military operations," Walsh said. Governments must step up, enhance intelligence-sharing, and establish clearer global protocols to prevent such tragedies and safeguard civilian aviation." 

消弭代溝

積極主動之衝突管理，有助於解決資深商務航空機師與年輕同僚間的歧異，並建立協力合作更佳之座艙環境。

蕭光霈 譯



Image: Atosan | shutterstock

商務航空的工作環境相當獨特，有編制小、關係緊密的機組員要長時間一起工作。彼此可建立良好友誼，但世代衝突亦恐擴大。

鑑於嬰兒潮世代（通常指 1946 年至 1964 年出生者）、X 世代（1965 年至 1980 年出生）、千禧世代（1981 年至 1996 年出生）

以及 Z 世代（1997 年至 2012 年出生）等人士，皆會在座艙中執勤，溝通風格、工作倫理、領導期望以及對科技抱持態度，皆會形成座艙工作之實際挑戰。除機組員資源管理（crew resource management, CRM）外，瞭解世代差異亦可減低衝突風險、協助團隊合作，並確保安全作業。

每個世代機師所處社會、經濟與科技環境各有不同，使他們對於工作與彼此專業互動之態度構成不同程度之影響。一般來說，嬰兒潮世代人士的多年經驗，往往形成組織紀律與層級架構之來源，可能期待決策過程要能層層節制。他們傾向循傳統方式溝通，喜歡直截了當地討論問題或下達命令，而非拐彎抹角。對於在經濟和科技變革時期進入職場之 X 世代機師而言，在團隊中仍能維持獨立自主係屬常態，而且其思想相當務實。千禧世代通常對於數位世界感到自在，傾向於協同合作，且會坦然接受回饋意見；因此，將他們安插於特定層級架構中，應更有挑戰性。Z 世代中多是航空業最新成員，亦是最精通科技的人士；通常，他們希望擁有無縫接軌之數位整合過程。

◎ 溝通代溝

論及溝通風格時，代溝的間隙更大。嬰兒潮世代與部分 X 世代專業人士可能像資深機師一般有直截了當與高高在上的態度，會下達清楚、結構分明的指示，而 Z 世代與千禧世代的機師會運用數位領域的工具，以協助他們更加有效進行溝通。如此世代歧異的情況，恐會導致座艙內的意見摩擦。

在工作團隊內來往互動，亦涉及工作倫理上之差異。通常在航空業中的年長世代謹守固有紀律，注重經驗與資歷，而年輕機師則更重視工作與生活間之平衡與效率。

然而，他們對科技的看法不同，是最鮮明之對比。對於最易於適應數位化座艙的嬰兒潮世代和 X 世代機師，在座艙工作體驗得心應手。而出生於自動化時代的千禧世代和 Z 世代的機師，對科技更具信心，亦更能接

受科技在飛機作業上之應用。然而，他們這類型的差異，恐會導致依賴自動化與手動操作技能熟練度之間的衝突。

◎ 領導風格之轉變

航空業必須經歷之世代變革，就是將傳統指揮鏈上以機長為座艙內擁有絕對權威的階級領導，轉變為更加協同合作的決策模式。儘管某些資深機師對於放棄權力管控有所排拒，但千禧世代和 Z 世代機師傾向接受此一嶄新協作模式，此種模式注重團隊合作與包容，鼓勵全體機組員參與決策。

此外，支持者表示，有協作風氣之環境，可讓團隊透過多元觀點協助提高安全與作業效率。因此，機組員資源管理策略應考量傳統與現代領導風格，協助各世代平順整合於商務航空業之中。

◎ 潛在摩擦

儘管世代間有著緊張與衝突，商務航空業經常將不同世代的機師搭配執勤，這些搭檔在多年執勤期間常多次合作。彼此互動可形成堅實關係，有時正是因為有這種作風上的差異，進而建構此一關係。

而於此情況下，經驗豐富之資深機師可能認為年輕機師經驗不足、沒有紀律、處事方式不同，並且態度不夠投入。反之，年輕機師可能感受挫折，並誤認為他們資深機師想法過時，且不願接受新科技。彼此不同看法會形成產生衝突之危險溫床，恐威脅團隊和飛航安全。

這是世代衝突的一種形態，有個案研究

顯示，世代衝突會以溝通障礙和其他意見分歧形式呈現。例如，資深機師可能不願採納新趨勢與科技，而年輕機師則覺得個人意見不受重視。而這些衝突正凸顯團隊合作之必要性，並顯示應以有效之機組員資源管理策略解決代溝。

機組員資源管理係透過提供溝通管道、建立團隊與決策作為，以減少世代衝突之良方。依據機組員資源管理策略，代溝可以填補，共同責任、相互尊重以及飛航作業上採行最佳實踐等方面之想法可以共享。機組員資源管理的關鍵部分之一是溝通訓練，教導機師們主動傾聽他人，並以正確的口吻進行語意精確且具建設性之交流。在溝通方式上，不同世代的機師對於口頭指示、使用數位工具與群組對話，展現明顯不同偏好。機組員資源管理訓練應透過強調架構清楚之溝通方法和適應能力，以改善座艙內之溝通和應變彈性。

運用決策模型與解決衝突框架作法，可增進座艙內協同一致、培養客觀思維、提倡多元意見，進而做出明智決策。此類模型提供有架構的途徑，以解決基於領導風格、工作倫理與電腦使用習慣上世代差異所引起之衝突。當前述之框架作法納入商務航空業的機組員資源管理中，在該業界中的飛航機組員環境就更能凝聚向心。

此外，適應能力、情商和團隊合作等項目，亦可列入持續性模擬機複訓與實際作業中培養。由於這能讓不同世代的機師發展於團隊中能夠有效執勤所需之人際技能，如此作法確保各世代的機師皆能學會如何協同合作。商務航空營運商可透過擬定協同飛航環境之計畫，將機組員資源管理原則融入日常

飛航作業中，從而提高整體安全與效率。

◎ 科技與自動化影響

航空業已受科技與自動化所轉變，此亦改變不同世代機師間之互動關係。千禧世代和 Z 世代機師生活於數位時代，更適應於自動化與最新航空電子設備。他們樂意採納新技術，例如玻璃座艙、數位飛航管理系統、自動決策支援工具、複合材料旋翼葉片、複合材料翼型、可卸式 (fly-away) 燃油系統以及其他無數嶄新技術產品。另一方面，通常是嬰兒潮世代與年紀較大的 X 世代之資深機師，傾向更重視手動飛行技能與較早期之導航技術，而且，某些機師，尤其是數十年來駕駛同一機型，使用相同機上系統與相同作業風格之機師，對自動化感到不悅。

商務航空業已遭遇出自前述不同觀點之作業上挑戰。資深機師認為，年輕機師可能因為過度依賴自動化，導致其手動飛行技術退化。相比之下，資深機師恐需比預期更長的時間來接受技術先進之概念，而如此會導致座艙內的關係緊張與效率不彰的情況，尤其當年輕機師將其年長同事視為是在排拒新技術時，情況更糟。前述雙方之間的差距，凸顯同時熟稔自動化與熟練手動飛行技能的必要性。

此差距必須予以填補，所以訓練計畫可採用雙重焦點之作法。手動飛行技能之訓練方式，應確保機師能在無自動化之情況下，仍能熟練飛行。且在訓練課程中，應向學員講授自動化之正、負面效果。

場景式 (scenario-based，或譯為想定式) 之訓練作法，能為此舉提供關鍵輔助，以

要求機師同時發揮手動飛行技能與自動化操作，處理現實世界中之飛行場景。此種訓練能讓不同世代的機師理解彼此。

◎ 最佳實踐

幾項有助於減低世代摩擦的策略如次：

- 導師計畫：資深機師將其知識傳授給年輕機師；同時，年輕機師也能讓資深機師關注新興科技。導師計畫可填補經驗上的落差，並在飛航組員間維持良好實踐作法和技術整備。
- 標準作業程序：遵守標準作業程序有助於消除決策過程中的世代偏見。架構分明之作業方式，能確保程序清晰明瞭且更加一致，從而避免誤解。
- 人因訓練：人因訓練可用於檢視座艙中人員互動時之心理與人際層面，以促進團隊合作、減少摩擦。是項訓練鼓勵在世代、職務、溝通風格以及接納科技程度不同的機師之間相互理解，並增進其協同工作能力。

商務航空業中的世代衝突不僅是社會問題，亦影響飛航安全、效率與作業和諧。透過積極的衝突管理作法解決是類衝突，對於建立一個維持飛航安全和機組員滿意度之協作式跨世代工作環境，將大有助益。✈

◎ 作者簡介

Raul Bonadia Rodrigues 是在巴西與美國取得執照之民航機機師，擁有航空科學學士與航空安全與持續適航之碩士學位。彼取得「國際六標準差認證協會」

(International Association for Six Sigma Certification) 頒授之「六標準差綠帶」(Six Sigma Green Belt) 證書，在巴西國家標準局 (Brazilian National Standard Organization) 擔任風險暨品質管理技術委員會之評審，曾代表巴西出席「國際標準組織」(International Organization for Standardization) 相關活動。

Bridging the Generation Gap

Raul Bonadia Rodrigues

Proactive conflict management can help resolve differences between older business aviation pilots and their younger colleagues and establish a more collaborative cockpit.



Image: Atosan I shutterstock

Business aviation exists in a unique environment, with small, close crews, many of whom work together for long periods of time. This can make for great friendships but also amplify generational conflicts.

Communication styles, work ethics,

leadership expectations, and attitudes toward technology pose real challenges in the working cockpit, given the presence of Baby Boomers (generally considered those born between 1946 and 1964), Generation Xers (1965–1980), Millennials (1981–1996), and members of Generation Z (1997–2012).

Knowledge of their generational differences, in addition to crew resource management (CRM) strategies, can mitigate the risk of conflict, aid teamwork, and ensure safe operations.

Different social, economic, and technological environments of each generation of pilots have had different effects on attitudes toward work and professional interactions. Generally, Baby Boomers, whose many years of experience are often a source of discipline and hierarchical structuring, may be among those who crave the structured decision-making process. They tend to communicate using traditional methods and prefer to discuss issues or give orders directly rather than use other means. For Generation X pilots, who began their careers during times of change, both in the economy and in technology, being independent yet a team player is the norm, and they think pragmatically. Millennials, typically comfortable in the digital world, tend to be collaborative and open to feedback; therefore, fitting them into specific hierarchical structures might be more challenging. Generation Z includes the newest entrants into the profession and the most technologically adept; generally, they want seamless digital integration processes.

Communications Gap

The generation gap is enormous when it comes to communication styles. Baby Boomers and some Generation X

professionals may like senior pilots to be direct and authoritative, giving clear, structured instructions while Generation Z and Millennial pilots utilize tools in the digital field to help them communicate more efficiently. Such generational divergence can lead to friction in the cockpit.

Team dynamics also involve differences in work ethic. Generally, older generations stick to old ways of discipline in aviation, focusing on experience and seniority, while younger pilots place more emphasis on work-life balance and efficiency.

The most striking contrast, however, is their different approaches to technology. The flight deck experience favors those Baby Boomers and Generation X pilots who have adapted most easily to a digital flight deck. Pilots who are Millennials and members of Gen Z, born in the age of automation, are more confident with technology and more accepting of its use in aircraft operations. However, their differences can give rise to a conflict between automation reliance and skills with manual proficiency.

The Shift in Leadership Styles

The generational change that the aviation industry has had to make has been the change from hierarchical leadership, with a traditional chain of command and the captain as the absolute authority in the cockpit, to a more collaborative decision-making model.

Despite some resistance by senior pilots against the relinquishing of authority control, Millennials and members of Generation Z tend to prefer this new collaborative model, with teamwork and inclusivity and a culture that enables all crewmembers' input into decision-making.

Moreover, supporters say that a collaborative environment can help to enhance safety and operational efficiency through a plurality of viewpoints. As a result, a CRM management strategy should consider traditional and modern leadership styles to assist in smooth generational integration in business aviation.

Potential Friction

Business aviation often pairs pilots of different generations, and those pairs often work together many times over many years, despite the generational tensions and conflicts. Their interactions can result in strong relationships that sometimes result from differences in work styles.

In this situation, experienced senior pilots may perceive young pilots as inexperienced, without discipline, taking different approaches to doing things, and not being committed enough. In turn, younger pilots might be frustrated and misunderstand their older colleagues as outdated and not willing to accept new technologies. Such perceptions of each other constitute a dangerous breeding ground for conflict that may threaten team and

flight safety.

This is a form of generational conflict, and case studies show how generational conflict shows up in the form of communication breakdown and other disagreements. For instance, the senior pilot may not be willing to adopt new trends and technology, whereas the young one feels that his or her input is not considered important. These conflicts highlight the need for teamwork and show that closing the generational gap should be addressed with an effective CRM strategy.

CRM is a good way to decrease generational conflict by providing communication channels, team-building, and decision-making. In CRM strategy, generational gaps are bridged, and ideas are shared about joint responsibilities, mutual respect, and employing best practices in flight operations. One of the key parts of CRM is communication training, which teaches pilots to listen actively and speak correctly to others to offer precise and constructive dialogue. Different generations of pilots demonstrate distinct preferences between verbal directions and using digital tools and group talks in their communication methods. Training in CRM should improve communication and flexibility in cockpits through its emphasis on structured communication methods and adaptability.

Decision-making models and conflict resolution frameworks further enhance cockpit synergy, objectifying thinking, promoting diversity of opinion, and making wise

decisions. The models provide structured avenues for resolving the conflicts that arise from generational variances in leadership style, work ethic, and computer usage. When these frameworks are added into CRM training for business aviation, there will be a more cohesive flight crew environment within the sector.

Also, adaptation, emotional intelligence, and teamwork can be included in continuous recurrent simulator training and in real-world operations. Since it enables pilots across generations to develop the interpersonal skills essential to perform effectively in a team, such practice ensures that pilots from all generations learn how to work together. Business aviation operators can embed CRM principles into daily flight operations through a plan for a collaborative flight environment that improves overall safety and efficiency.

Influence of Technology and Automation

Aviation has been transformed by technology and automation, which have altered the dynamics between pilots of different generations. Millennial and Generation Z pilots have lived in the digital age and are more comfortable with automation and the latest in avionics. They voluntarily adopt new technologies such as the glass cockpit, digital flight management system, automated decision support tools, composite rotor blades, composite airfoils, fly-away fuel systems, and many others. On the

other hand, senior pilots, more often than not Baby Boomers and older Generation X aviators, tend to assign more weight to manual flying skills and older navigation techniques, and, some — especially those who have flown the same aircraft model for decades, with the same onboard systems and in the same operational style — have taken umbrage with automation.

The business aviation industry has operational challenges that can come from these varying perspectives. Older pilots believe younger pilots may be allowing the degradation of their manual flying techniques because of their reliance on automation. In contrast, senior pilots may take longer than expected to embrace technologically advanced concepts, resulting tension and inefficiencies in the cockpit, especially when younger pilots see their senior colleagues as resistant to new technologies. The gap between the two highlights the necessity for learning with both automation proficiency and manual flying skills.

This gap must be bridged so training programs can use a dual-focused approach. Manual flying skills should be trained in a way that ensures that pilots remain proficient in flying without automation. Training sessions should teach students about both positive and negative automation aspects. Scenario-based training methods deliver critical support to this approach, which requires pilots to use both manual flight skills and automation for handling real-world flight scenarios. Training

allows different generations of pilots to build understanding with each other through this method.

Best Practices

Several strategies can help reduce friction between the generations, including the following:

- *Mentorship programs:* Senior pilots transfer their knowledge to younger pilots, and at the same time, younger pilots can bring emerging technologies to the attention of the senior. Mentorship programs bridge the experience gap and keep up good practices and technological readiness within flight crews.
- *Standard operating procedures (SOPs):* Compliance with SOPs can help eliminate the generation bias in decision-making. A structured way to operate makes for clear and more consistent procedures that prevent miscommunications.
- *Human Factors Training:* Training in human factors examines psychological and interpersonal aspects of cockpit interaction and can support teamwork and reduce friction. This training encourages mutual understanding of pilots of different generations, positions, communication styles, and degrees of inclusion of technology and enhances their ability to work together.

Generational conflict in business aviation is not just social but also influences safety, efficiency, and operational harmony. Resolving these conflicts with proactive conflict management can go a long way toward establishing a collaborative, cross-generational work environment that supports flight safety and crew satisfaction.

Raul Bonadia Rodrigues is an airline transport pilot licensed in Brazil and the United States. He holds a bachelor's degree in aeronautical science and a postgraduate specialization in aviation safety and continuing airworthiness. He is a Six Sigma Green Belt certified by the International Association for Six Sigma Certification and a member evaluator on the technical committees for risk management and quality management at the Brazilian National Standards Organization, representing Brazil in International Organization for Standardization activities. ✈️

歐盟航空安全總署發布管理 鋰電池風險之新建議

鋰電池對航空旅行安全構成之風險

蕭光霽 譯

歐盟航空安全總署新近發布《安全資訊公告》(Safety Information Bulletin, SIB)，強調鋰電池對航空旅行安全構成之風險。發布該公告之目的，係為因應旅客搭乘民航機時攜帶之鋰電池所涉飛安事件件數增加。該公告綜整並更新其他已過期撤銷與鋰電池相關之《安全資訊公告》。

《安全資訊公告》係向航空業界發布以凸顯某項特定之新發生或演變中的安全問題，此次發布對象主要是航空公司與其他航空器業者。該公告呼籲各航空公司與旅客加強溝通，讓其瞭解鋰電池在航程中相關限制以及降低風險的正確行為。公告中亦提醒航空公司與機場工作人員有責任接受相關風險培訓，並向旅客正確傳達危險物品的限制。

歐盟航空安全總署飛航標準處處長 *Jesper Rasmussen* 說：「以鋰電池為電源的智慧型手機、電腦，現在已成為我們每日生活不可或缺的一部分，我們瞭解現在每位旅客搭機時會攜帶 4 至 5 件相關物品。航空公司與其地勤人員必須確定旅客瞭解如何以負責態度攜帶這些物品搭機。其中包括提醒旅客審慎思考，切勿將這些物品放在託運行李中，而是要隨身攜帶，如此方可予以監管，

發生情況時才得以處置。

以鋰電池供電之便攜式電子設備 (portable electronic device, PED) 包含許多日常可見用品，從手機到筆記型電腦，從工具 (如電鑽) 到無人機。某些便攜式電子設備，如滑板車、平衡車與某些類型之無人機，配備目前法規不允許攜帶之大功率鋰電池。行動電源並未歸類為便攜式電子設備，而是屬於備用電池，必須遵守適用之限制規定。

鋰電池於以下情況會構成安全風險，例如，如果鋰電池故障、機械結構斷裂、短路，或者曝露熱源下。其內含物質會產生不受控制之反應，而非我們預期的電池會逐漸釋放化學能量，轉化為電流形式輸出。鋰電池會過熱，起火，並且散放有毒煙霧。

電子煙與行動電源被視為特別危險。兩者皆與備用電池一般，禁止放進託運行李；且嚴禁為電子煙充電。有鑒於兩者構成之風險，在飛航過程中，亦不可對行動電源充電或用行動電源對其他物品充電。一般而言，電量較低的電池，風險較低；所以在機上攜帶相關物品，其電量處於較低狀態為宜，抵達目的地後再充飽電量。

此份《安全資訊公告》旨在透過強調與旅客溝通前述資訊之重要性，以提高旅客對於便攜式電子設備、電子菸、行動電源和其他型態之鋰電池構成風險的警覺。公告中格外強調，應對地勤人員和機組員實施全方面鋰電池風險之培訓，包括如何在處理航程中過熱電池，以確保遏阻任何火災，並減輕安全威脅。

◎ 與旅客溝通之重點

此份《安全資訊公告》強調以下須與旅客溝通之重點：

- 電子煙與行動電源應個人隨身攜帶，以便隨時監管。如無法隨身攜帶，則須放入手提行李，並以下述備用電池之相同方式予以保護。
- 便攜式電子設備應僅能透過機上電源系統充電，並應由持有旅客全程監控。航程中不應使用行動電源為便攜式電子設備充電。
- 航程中不使用便攜式電子設備時應予保護，避免損壞與意外啟動。
- 每具便攜式電子設備之瓦時 (watt-hour, Wh) 限制為 100 瓦時，惟有取得航空業者許可，方得放寬至 160 瓦時。(與旅客) 溝通時，內容應包括常用設備之範例。
- 包括行動電源與電子煙在內的備用電池放入手提行李時，應予保護以防止短路 (例如，將其放入原始包裝內，或用膠帶封住接頭端子，放入塑膠袋或盒子裡)。

另也應避免意外啟動，且在行李中儘量使其遠離其他任何電池與潛在易燃物 (如香水)。雖然禁止為電子煙充電，但未禁止使用或為行動電源充電，但強烈不建議為之。

- 航空業者和地勤服務業者亦應讓旅客瞭解便攜式電子設備因短路、損壞或卡在座椅可動零附件中所構成之風險。

如須瞭解是份《安全資訊公告》詳細內容，請循網路檢索 EASA Safety Publications Tool。✈

譯自：歐盟航空安全總署 (European Union Aviation Safety Agency) 2025 年 5 月 28 日新聞稿

EASA publishes new recommendations on managing risks of lithium batteries

Janet Northcote
Head of Communication
European Union Aviation Safety Agency

The risk to safe air travel can pose by lithium batteries.

COLOGNE, May 28, 2025 — The European Union Aviation Safety Agency (EASA) published a new [Safety Information Bulletin \(SIB\)](#) highlighting the risks to safe air travel which can posed by lithium batteries. The SIB was issued in response to an increased number of safety events involving lithium batteries carried by passengers on board commercial passenger aircraft. This SIB compiles and updates relevant information from other SIBs on lithium batteries, which have been withdrawn.

An SIB can be addressed to the airline industry, in this case primarily airlines and other aircraft operators, and highlights a specific new or evolving safety issue. This SIB calls on airlines to extend and reinforce their existing communication to passengers on the restrictions related to lithium battery transport and appeals for the correct behaviours to

mitigate the risks. It also reminds of the mandate to train airline and airport staff on the associated risks and to properly communicate dangerous good restrictions to the passengers.

“Smart phones and computers powered by lithium batteries are now an inherent part of our daily lives, and we know that each passenger now takes four to five such items with them on a flight,” said Jesper Rasmussen, Flight Standards Director at EASA. “Airlines and their ground staff need to make sure passengers know how to travel with these items responsibly. This includes prompting them to think carefully about not packing the devices in their check-in baggage but carrying them on board instead, so that they can be monitored and dealt with if something happens.”

Portable electronic devices (PEDs) powered by lithium batteries include a wide range of everyday items, from mobile phones to laptops, and tools (e.g. drill) to drones. Some PEDs, for example scooters, hoverboards, and certain types of drones, are equipped with powerful lithium batteries that are not allowed under the current regulations. Power banks are not classified as PEDs but as spare batteries, and must follow the restrictions that apply to them.

Lithium batteries present a safety risk if, for example, they malfunction, there is a mechanical rupture, a short circuit, or they are exposed to heat. The substances contained in the battery then react in an uncontrolled way, rather than gradually releasing their chemical energy in form of current, which is the expected behaviour of a battery. Lithium batteries can overheat, catch fire, and/or release toxic smoke.

E-cigarettes and power banks are seen as particularly dangerous. They are both forbidden in checked-in luggage, same as spare batteries. Charging e-cigarettes is strictly forbidden. Due to the risk that they pose, power banks should also not be charged or used to charge other items during the flight. In general, batteries with a lower charge pose a lower risk, so it is preferable to carry such items on board at a lower state of charge, and fully charge them again on arrival.

The SIB intends to create passenger

awareness on the risks posed by PEDs, e-cigarettes, power banks, and other lithium batteries by highlighting the importance of communicating this information to the passengers. It further draws special attention to training ground staff and cabin crews on all aspects of lithium battery risks, including dealing with an overheating battery in-flight, to ensure containment of any fire and mitigate the safety threats.

Key points for passenger communication

The SIB emphasises the following crucial points for communicating to passengers:

- E-cigarettes and power banks should be carried where they can be monitored (on the person). If not possible, they must be in carry-on baggage and protected in the same way as described below for spare batteries.
- PEDs should only be charged through the on-board power supply systems and should be monitored at all times by the passenger. Power banks should not be used to charge PEDs during the flight.
- When not in use during the flight, PEDs should be protected against damage and unintentional activation.
- The limitation in watt-hours (Wh) for each PED is 100 Wh and, only with the operator's approval, 160 Wh. The

communication should include examples of commonly used devices.

- Spare batteries, including power banks, and e-cigarettes, when packed in carry-on baggage, should be protected from short circuit (e.g. by carrying them in their original packaging, taping their terminals, and putting them inside a plastic bag or box). They should also be protected from unintentional activation as well as stowed as far as possible within the bag from any other battery and/or potentially flammable item (e.g. perfume). Whereas charging e-cigarettes is forbidden, using or charging power banks is not forbidden but strongly discouraged.

- Aircraft operators and ground handling service providers should also make passengers aware of the risks caused by PEDs being short-circuited, damaged or caught in the movable part(s) of a seat.

To access the SIB in full detail, visit the [EASA Safety Publications Tool](#). 

無人機通訊技術解析

海東青

一、前言

遙控無人機系統（UAS, Unmanned Aircraft System）近十年來的發展可謂高歌猛進，在民用、商業及軍事領域被廣泛應用，空拍照測、農噴植保、環境監控、物流配送到軍事上的偵察、打擊、通訊中繼、電子干擾等無役不與。其中，地面控制站作為無人機最主要的人機交互介面，可由地面上傳控制指令至機載電腦，亦同時接收無人機回傳的狀態（Telemetry 遙測）與感測器資訊（Video 影像），是無人機的靈魂之窗。不同任務的活動範圍和類型，地面控制站使用的通訊技術與工作頻譜也大相逕庭：小型無人機透過操作人員的目視，利用手持遙控器實現 2-10 公里最基本的飛行控制（Remote Control 遙控）；中型無人機地面控制站則有較為完整的通訊系統、功率較強的發射機與能精確追瞄的高增益指向天線，將任務範圍擴展至 50 公里至 150 公里左右；大型無人機機頭突起的氣泡結構內安裝了一套碟型衛星天線，配合地面控制站的大型衛星通訊設備，可以在地球的任何一個角落，操作 1 萬公里以外的無人機。

一套穩定、高效率的通訊架構，是無人機系統成功的基石，這一切的核心驅動力量，來自於通訊技術的發展。無論是操作

飛手與無人機之間的連結，還是無人機內部元件的訊號交換，通訊技術都無所不在。本文將針對無人機外部通訊與機載內部元件間相互通訊的架構與使用的通訊協定做一次完整解析，與國內航空從業人員分享另一種與 VHF/UHF 無線電及 ARINC 標準截然不同的通訊概念。



圖1 小型無人機的手持遙控器

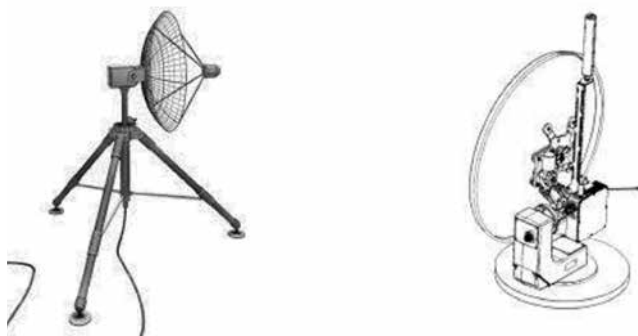


圖2 中型無人機地面控制站的指向天線(50 公里/150 公里)



圖3 大型無人機地面控制站的衛星通訊設備



圖4 大型無人機機頭裝置的碟形衛星天線

二、無人機整體通訊架構

無人機通訊可分為「地面與機載端之間」的外部通訊，以及「飛控系統與各內部模組之間」的元件連線二種。這二種通訊共同架構了無人機操作與數據運作的核心，對任務的穩定具有關鍵性影響。

1. 地面 ↔ 無人機之間的外部通訊

無人機外部通訊依其用途可分為「遙控鏈路」、「遙測鏈路」與「影像鏈路」三種，其目的分別為指令傳送與遙控，數據傳送與即時畫面回傳。如手持遙控器 無人機（RC 遙控鏈路）傳送操控指令與雲台控制指令；地面控制站 無人機（Telemetry 遙測鏈路）傳送位置座標與無人機姿態、電池與馬達工作情況等關鍵數據；地面控制站 無人機（Video 影像鏈路）傳送類比或數位格式的影像畫面。

2. 機載內部系統元件間相互通訊

雖然不同構造的無人機其機載系統的硬體規格有顯著的差別，但無人機基本上由機體（架）、動力（電池或燃料）與電子調速器（ESC，電調或電變）及馬達、飛控系統、導航系統等所組成。各組件間需要透過通訊

相互協調，才能成為一個穩定的飛行平台。飛控系統會利用不同的通訊協定與 GNSS、IMU、氣壓計、光流、LiDAR、雲台等元件相互溝通，以執行各項功能，而飛控系統與 ESC、伺服馬達間則利用 PWM 等格式傳送工作指令，進行精密的動力控制。

三、無人機外部通訊技術分類

構成無人機與地面端連結的核心外部通訊鏈路，包括遙控鏈路、遙測鏈路以及影像鏈路等三種，其工作頻段、技術特性與常見的系統或產品說明如下。

1. 遙控鏈路

遙控鏈路（Remote Control Link）是無人機系統中負責即時傳輸飛手控制指令至飛控系統的通訊鏈路。它是無人機飛行最基本的控制方式，也是整體安全性與操作體驗的關鍵。主要傳輸內容包括了飛行控制指令如：油門（Throttle）、俯仰（Pitch）、滾轉（Roll）、偏航（Yaw），飛行模式切換（如手動、自動、返回），任務觸發信號（如拍照、投放、標記），有些系統具備雙向通訊，

還可回傳訊號強度（RSSI）、機載裝備的工作狀態等屬於遙測鏈路的資訊。遙控鏈路常以 LoRa、FHSS 等方式進行傳輸。

以 FHSS 技術為核心的商用 RC 系統（如 Futaba、FrSky 系列），適用於高速、低延遲需求的穿越機賽事操作；而 LoRa 型低速長距方案（如 ELRS、TBS Crossfire 系列）則應用於長航時無人機任務，如農噴、測繪與邊境巡邏等場景。鏈路的選擇取決於操作距離、數據量與抗干擾強度。而隨著無人機技術發展，原本涇渭分明的 RC 和 Telemetry 二種鏈路，甚至第三種 Video 鏈路，也可以整合在同一套由開發者自行定義的通訊協定裏。

- 頻段：2.4GHz（短距高頻）或 915MHz（遠距穿透力強，目前受到通訊傳播法規限制，國內並未對民間開放）
- 傳輸技術：FHSS（跳頻展頻）、LoRa（低功率遠距）
- 代表系統或產品：Futaba、TBS Crossfire (CRSF)、ELRS、DJI RC 等
- 特點：較高頻寬需求與較低延遲，傳送如油門、偏航、俯仰、滾轉等控制通道的指令

2. 遙測鏈路

遙測鏈路（Telemetry Link）是無人機系統中最重要的雙向資訊回傳通道之一，目的在於讓地面操作人員或系統能夠即時掌握無人機的飛行狀況與系統運作參數，並在需要時下達飛行任務或修改設定。此鏈路用於雙向傳送飛行數據（如 GNSS 座標、電池電壓、

飛行模式、飛行姿態等），飛控系統可透過這種鏈路將數據回傳至地面控制站進行飛行狀態顯示與任務監控等應用。MAVLink 是最常被使用的一種遙測鏈路通信協定。

- 頻段：2.4GHz 為主（433MHz/915MHz 受到通訊傳播法規限制，國內並未對民間開放）
- 協定：MAVLink（開源通訊協定）
- 用途：傳送電壓、姿態、高度、GNSS 位置等關鍵資訊
- 形式：通常由飛控電腦以串列通訊埠（UART）結合通訊收發模組

3. 影像鏈路

影像鏈路（Video Link）提供即時影像回傳功能，特別對於 FPV、監控與搜救應用至關重要。無人機的影像鏈路主要用來回傳即時視覺資訊，讓地面操作員或自動化系統能以第一人稱視角（First Person View, FPV），操作飛行路線進行即時監控與資料判讀（如救災巡檢的影像或大地測量時的定位校準），協助雲台定位、拍照取景，亦可作為自主導航或 AI 辨識的輸入來源。其傳輸模式可分為類比與數位兩種。

- 類比系統：Fat Shark、Rush Tank 等延遲較低、穿透力中等、易受干擾
- 數位系統：DJI O3/O4、Walksnail、HDZero 等

使用 DJI 公司獨特的 Occusync 或一般常用的 OFDM 編碼技術與 H.264/H.265 影像

壓縮技術，解析度高達 1080p@60fps，延遲約為 30ms

四、外部通信協定技術解析

由前述分析可知，無人機外部通訊所依賴的主要通訊技術與協定，包括開源的 MAVLink、長距離低速率通訊 LoRa，以及支援高解析度即時串流的數位影像技術等三種，在不同任務情境中各有其優勢與限制。另外，4G 與 5G 甚至 B5G 等行動網路與電信基礎設施，也可以用來作為無人機的通訊工具。

1. MAVLink 協定

目前最廣泛使用的無人機開源通訊協定，由 ArduPilot 和 PX4 支援。其特性：輕量化、結構簡單，可支援高達 255 架無人機的群飛控制（實務上受限於頻 而很難作到）。多數的開源軟體地面控制站如 Mission Planner、QGround Control 等都內建 MAVLink 作為主要通訊協定，工作頻率使用 2.4GHz 為主。

2. LoRa 通訊技術（TBS，ELRS）

Long Range 無線模組在遙測與遙控應用上非常實用，也是小型無人機手持式遙控器的首選，其傳輸距離可達數公里，惟數據傳輸率較低，但工作穩定、省電。工作頻率可使用 915MHz 或 2.4GHz。

3. 數位影像串流技術

目前較為應用者都是採用數位傳輸的方案，如 DJI OcuSync、WalkSnail、HDZero 等，影像使用數位壓縮技術（H.264/H.265）轉為串流格式後，透過 Wi-Fi/OFDM 傳輸，提供低延遲高畫質的第一人稱視角畫面。

工作頻率通常使用 5.8GHz，亦可兼容於 2.4GHz。

4. 行動網路（4G 或 5G）

適用於不受地形障蔽限制的超視距（Beyond Visual Line of Sight, BVLOS）飛行，利用現有電信服務商的 4G/5G 基地台覆蓋廣域範圍、低延遲（4G 約在 20-50ms，5G 約在 1-10ms）等特性對無人機作即時控制。值得注意的是，同一個無人機系統內要並存 2.4GHz/5.8GHz 與 4G/5G 的射頻電路，產品需要經過非常嚴格的射頻共存（RF Coexistence）檢驗與測試，以避免二者發射與接收相互造成干擾，故目前多數無人機僅會單獨選擇其中一種方案。

五、通訊安全與抗干擾

在無人機應用日益多元的今日，無論是軍事、商業還是公共安全任務，通訊鏈路的安全防護都成為設計不可忽視的要素。為防止控制權被非法竊取或影像資料遭到攔截，現代無人機通訊系統採用指令鏈路加密、跳頻與展頻技術、數位簽章等多層級的資安技術來強化通訊安全。

1. 指令鏈路加密

現今多數高階無人機系統在通訊端都採用 AES-128 或 AES-256 位元的對稱式加密標準，來保護地面站與飛行器間的指令或影像傳輸。這種對稱加密技術能有效防止第三方攔截並破解遙控命令，避免無人機遭到惡意控制（Spoofing）或資料遭到攔截與竊聽（Eavesdropping）。

2. 跳頻與展頻技術

為抵抗在擁擠頻段或敵對干擾環境中

的無線電干擾與阻斷攻擊（Jamming），無人機通訊系統普遍導入跳頻（Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS）或展頻（Spread Spectrum）技術。這些方法能在短時間內自動更換傳輸頻率，有效提升連線穩定性與抗干擾能力，特別適用於高風險場合或軍事環境。

3. 身份驗證與數位簽章

為確保僅有授權地面站能對無人機下達指令，部分系統導入了身份驗證機制，例如可透過數位簽章（Digital Signature）驗證指令來源與完整性，不僅可防止偽冒控制端接入，更可在發生攻擊時迅速偵測與隔離異常的連線。但這種非對稱式加密方式對機載端晶片算力、記憶體安全性與金鑰的派發管控

等有較高的要求，也增加了系統的複雜性。

舉例而言，在城市環境中 2.4GHz 頻段使用者眾多，無人機通訊易遭其他 Wi-Fi、藍牙等裝置的干擾，導致操控經常因為不明原因中斷；透過 FHSS 可有效避開干擾的頻點。至於傳輸資訊的對稱式或非對稱式加密則能防止「假信號接管」與「中間人攻擊」，避免無人機被駭客遠端奪取控制，對執行軍事警消或無人機物流運送等任務，具有關鍵的保障能力。

六、無人機內部通訊技術

針對無人機內部架構中各電子模組間的相互通訊方式，茲以經常採用的匯流排標準

感測器模組	功能	常用通訊協定
GNSS 模組	提供位置與時間	UART / I2C / CAN / SPI
氣壓計	偵測氣壓高度	I2C (如 MS5611, BMP280 晶片)
IMU (慣性感測)	加速度、角速度、姿態估算	SPI / I2C (如 MPU6000 晶片)
磁力計 (指南針)	地磁方向判斷	I2C / SPI
光流感測器	定位輔助與速度測估	UART / SPI
ToF / LiDAR	對地高度 / 避障	UART / I2C / CAN
雲台控制模組	攝影機畫面穩定與轉動	PWM / SBUS / UART / CAN
ESC (電子變速器)	馬達的轉速控制	PWM / DShot / FOC

與通訊協定說明其應用時機。以下是常見的飛控系統與周邊感測器及電子調速器動力模組間對應的通訊方式：

無人機內部通訊絕大多數採實體線路傳輸，不同通訊協定有不同的電氣特性、傳輸速率與糾錯機制，幾種主要通訊協定的技術解析如下：

1. UART（通用非同步接收傳輸）

傳輸速率最低大約 100kbps，採用雙向式（TX/RX）傳輸，常見於 GNSS、Telemetry、OSD、光流模組等。

2. I2C（雙線式序列匯流排）

傳輸速率 100kbps ~ 400kbps，適合傳感器（氣壓計、磁力計），但抗干擾能力較弱。

3. SPI（高速同步匯流排）

傳輸速度高於 I2C，通常是 5Mbps，常用於 IMU、陀螺儀等資料更新頻率高的模組。

4. CAN Bus（控制器區域網路）

使用多點通訊、高可靠性、適合複雜與抗干擾需求高的任務，常見於高階飛控與工業級無人機（如使用 UAVCAN 協定）。

5. PWM / DShot / FOC

控制馬達轉速或伺服位置使用（如雲台），PWM 為類比訊號，DShot 為數位信號，後者具回報功能與較佳的抗干擾能力。FOC 則是一種由 ESC 到馬達間的特殊正弦控制脈波，能夠提供更高的馬達效率和更精確的控制。

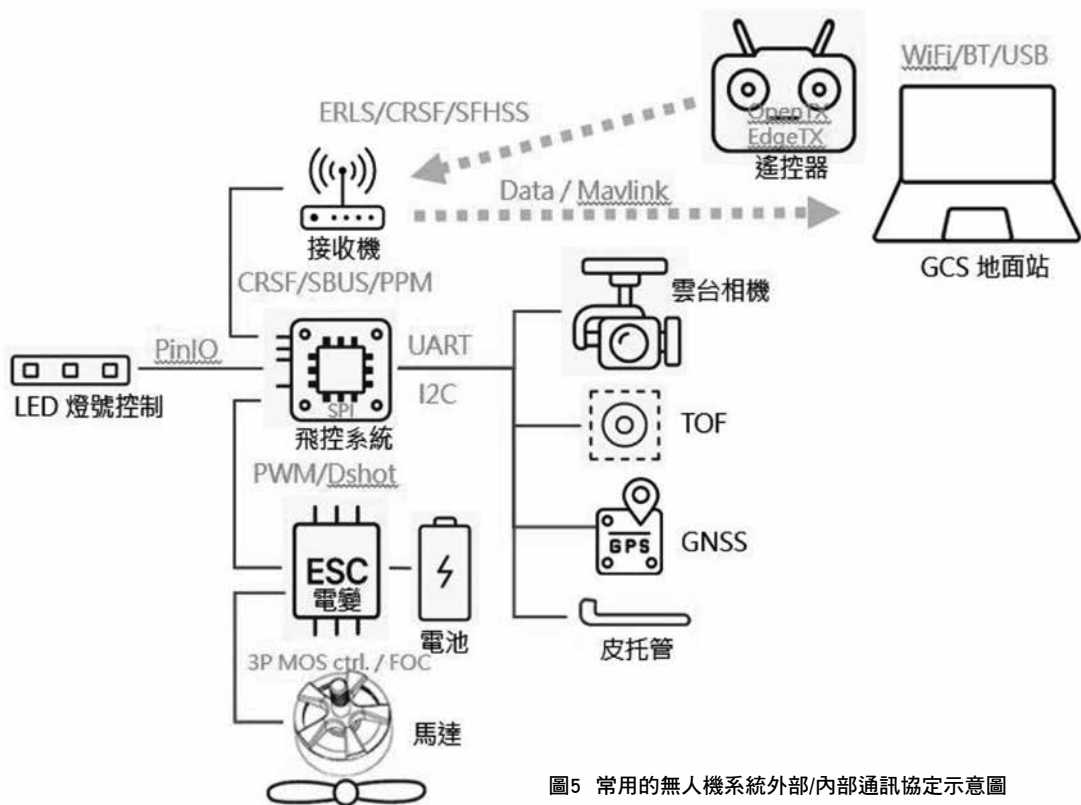


圖5 常用的無人機系統外部/內部通訊協定示意圖

無人機飛控系統在設計時常將需要高速資料更新的模組（如 IMU、LiDAR）配置至 SPI 或 CAN Bus 匯流排，藉此提升資料更新率與抗干擾能力。未來也有可能導入 Ethernet、TSN（時間敏感網路）等概念，以滿足自動導航與 AI 視覺模組對高頻寬通訊的需求。例如新型深度相機（Depth Camera）與邊緣運算模組，需在飛行中即時傳送巨量資料給飛控系統或輔助電腦（Companion Computer），執行影像辨識、目標測算等工作。

七、未來發展趨勢

在技術演進與應用拓展的雙重推動下，無人機通訊技術也正迎來變革性發展。AI 智慧協定、B5G/ 衛星通訊整合與 UAVCAN+ROS2 模組化平台均將對未來無人機系統架構產生深遠的影響。

1. AI 智慧協定的通訊優化應用

AI 可望透過機器學習方式，動態調整無人機在不同任務與環境中的通訊參數，如頻寬使用率、干擾避免策略、封包壓縮與回傳優先權排序等。未來的通訊協定將不再採用固定頻率與靜態規則，而是藉由 AI 自動判斷鏈路品質與資訊流通需求，進行即時調度。對無人機系統而言，這代表更穩定的連線、更低的能耗與更高的任務效率，特別適用於多機協同、群飛控制與高動態環境下的運作。

2. B5G / 衛星通訊整合

B5G（Beyond 5G）與低軌道衛星網路的結合，將使無人機得以突破地面基地台覆蓋限制，實現真正的全球性飛行操作與任務部署。對於物流配送、長距離巡檢或海上

救援等場景而言，透過 B5G 網路與雲端連結，可以執行邊緣運算處理、任務區路徑自適應規劃等功能，甚至結合即時氣象或空域航情進行飛行中避障判斷。這將大幅提升 BVLOS（超視距）操作的可靠性，讓無人機成為一種真正值得信賴的運輸工具。

3. UAVCAN(或 DRONECAN) + ROS2 模組化平台建構

UAVCAN（或 DRONECAN）是一種基於 CAN 匯流排設計的高可靠通訊協定，具備去中心化、自動節點識別與故障隔離能力；ROS2 則為當前機器人應用中最具彈性與模組能力的開發架構。兩者整合後可實現飛行器與地面站、雲端控制平台甚至其他自動化裝置（如 地面上的 UGV 或其他感測節點）間的跨平台協同作業。如此一來，無人機將不再是封閉系統，而是高度可組裝與即插即用的任務平台。這種模組化平台將有助於降低維護成本、加速系統升級與部署的速度，並為農業、工程、測繪、警消勤務或軍事等用途提供客製化介面整合。舉例來說，一架以 ROS2 控制的無人機平台，可以根據任務目標快速更換不同模組，無須改寫程式即可即插即用後上線作業，使無人機成為如同樂高積木般的組裝成品，以降低維護與訓練成本並增加應用彈性。

八、結語

從飛航安全的角度，無人機與有人機在通訊體系上存在本質上的差異。傳統有人機的駕駛員坐在航空器上，能以目視觀察周遭環境，並透過民用 VHF 或軍用 UHF 無線電與航空管制單位建立雙向語音溝通管道，以獲取即時雷達情報、航行資訊與管制指令，這套體系因人位於迴路中，具備高度的互動

性與情境感知能力。

- 相對而言，無人機目前的通訊機制主要侷限於操作人與無人機之間的控制鏈、遙測鏈與影像鏈三種單向鏈路。由於無人機無法直接感知其周遭空域內其他飛行器的存在，操作人也欠缺實時環境資訊，這使得無人機難以進入與有人機共用的空域，須以「隔離空域」方式操作，以保障整體空域安全。
- 不過，隨著高階無人機通訊架構的提升，此一限制正逐步突破。透過高可靠、低延遲的雙向數據鏈，加上先進感測器整合與分析，部分軍用無人機已具備可執行空對空作戰的能力，在地面指揮下精準鎖定高速飛行目標並發射飛彈進行打擊，這種複合感知與高反應操作，對通訊技術的即時性與可靠性要求極高。
- 總體而言，無人機的進化離不開通訊技術的同步發展。不只是遠端控制與資訊回傳的橋樑，更是構築環境感知、任務決策與自主操作的核心命脈。從早期簡易遙控系統，到今日結合 AI、大數據與雲端運算的智慧通訊架構，無人機正朝向更智慧、更協同的應用格局邁進。未來，通訊系統將不只是「飛控連線」的技術要件，更將成為決定飛行安全、任務成敗與產業競爭力的關鍵戰場。無人機技術日益精進，通訊系統已從單一通道控制演化為多鏈路、多協定、融合 AI 與雲端的智慧型架構。穩定、安全且具擴展性的通訊能力，將是無人機未來競爭力的核心之一。在強調飛行自主性與任務複雜性的趨勢下，通訊技術將不僅是傳輸媒介，更是飛行決策與系統整合

的智慧樞紐。

- 最後，對於無人機開發者與操作人員而言，理解相關通訊技術不僅是硬體選擇問題，更關乎任務設計、安全評估與未來升級的彈性。在無人機系統建置初期就考慮通訊架構與協定相容性，將為後續的 AI 整合、5G 升級與跨平台模組打下良好基礎。✈️

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.



114年4月21-24日安全管理系統普通班



114年5月6-8日機坪 / 空側安全管理班



財團法人中華民國台灣

飛行安全基金會

Flight Safety Foundation-Taiwan

台北市郵政 45 - 116 號信箱

www.flightsafety.org.tw