

2025年飛行安全半年刊

FLIGHT SAFETY

BI-ANNUAL MAGAZINE

2025



2026

FLIGHT SAFETY July-December 2025

非賣品

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



飛安基金會董事長林俊良先生偕我國飛安代表出席11月4日至11月6日於葡萄牙里斯本舉辦之第78屆世界飛安高峰會

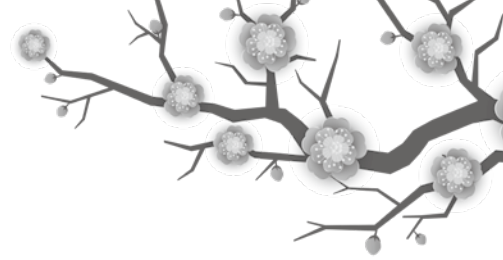


世界飛安基金會於11月5日於世界飛安高峰會中將LAURA TABER BARBOUR Air Safety Award 頒給運安會副主委何慶生以表彰其對飛安的貢獻。

目 錄

Content

2025年7-12月「飛行安全半年刊」



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

航空安全

02 淺談跑道進場端低空風切之形成	林得恩	P.03
03 跨文化視角下的航空管理	許悅玲/楊文忠	P.13
04 航空業內部威脅造成之非法干擾行為	孔垂梅	P.21
Acts of unlawful interference caused by insider threats in the aviation industry		
05 從「人為錯誤」到「系統韌性」	陳妍君/李俊瑤/胡智凱	P.27
IATA 人為因素國際訓練參訓心得	游哲遠/姚雋偉	
06 透過「組員資源管理」與「威脅與疏失管理」	蕭光霽	P.29
進行溝通以改善飛安		
Through CRM and TEM, communication has been key to safety improvements. May 2025, AeroSafety World		
07 人工智慧在無線電通訊之用途	蕭光霽	P.37
AI's Role in Radio Transmissions	Oct 2025, AeroSafety World	P.39

無人機資訊

08 無人機的通訊基礎	萬芃愉	P.41
-------------------	-----	------



編者的話

飛安基金會

財團法人中華民國台灣飛行安全基金會在 2025 年下半年，順利完成了多項訓練課程，包括「人為因素意外事件調查班」、「安全管理系統民航專班」以及「航空保安管理班」。此外，我們也協助軍方辦理作業風險管理教育訓練，共開設 4 個班次，總計 101 位同仁參訓。

近來氣候變遷帶來的影響愈來愈明顯，低空風切情形增加，對跑道進場造成不少挑戰。本期我們特別邀請專家撰寫「淺談跑道進場端低空風切之形成」，帶大家了解這個重要議題。另外，「跨文化視角下的航空管理」從不同世代的特質與價值觀切入，談談在飛安維護上的溝通與合作挑戰；「航空業內部威脅造成非法干擾行為」則以多個案例提醒我們，內部員工也可能成為保安風險，並提出降低風險的建議。「從人為錯誤到系統韌性」整合了本會派員參加 IATA「人為因素」訓練的五位學員心得，提供寶貴的實務觀點。此外，在外國譯文部分，我們精選了兩篇文章：「透過組員資源管理與威脅預疏失管理進行溝通以改善飛安」以及「人工智慧在無線電通訊之用途」，內容實用豐富。

近年無人機的應用愈來愈普及，本期無人機專題以「無人機的通訊基礎」為題，從最基本的資料編碼、訊號接收，到實際點對點通訊的應用發展，帶讀者進一步了解航空通訊的奧秘。

歲末將至，謹祝大家

佳節愉快、馬年順心如意！



淺談跑道進場端低空風切之形成

林 得 恩

國立臺灣大學 氣候天氣災害研究中心 助理研究員

摘 要

低空風切 (Low-Level Wind Shear, LLWS) 為航空氣象中最具挑戰性的現象之一，其特性為在低於地面二千英尺 (約六百公尺) 高度內，風速或風向在短距離內急遽變化。當飛機進場或起飛時遭遇低空風切，常易造成升力不穩、航向偏移或高度喪失，對飛航安全構成嚴重威脅。本研究旨在探討跑道進場端低空風切之形成原因、氣象機制、地形影響及典型案例，並分析目前國際與臺灣機場在風切偵測及預警技術之應用與限制。透過文獻回顧與案例解析方式，綜合氣象學理論與實務觀測結果，對微爆氣流 (Microburst)、海陸風轉換、逆溫層與地形氣流等形成條件進行診斷剖析，並探討各類系統 (LLWS、TDWR、LIDAR) 之運作原理。最後提出未來研究方向與防範策略，俾期提供航空氣象與飛安管理單位參考。

關鍵字

跑道進場端、低空風切、微爆氣流、航空氣象、飛航安全

一、前言

隨著全球航空運輸量的快速增長，飛航安全議題日益受到重視。根據國際民航組織 (ICAO) 統計，氣象因素仍占飛航事故成因的顯著比例，其中低空風切 (Low-Level

Wind Shear, LLWS) 被視為進場與起飛階段最具潛在危險性的氣象現象之一。當飛機在低空進場時，若遭遇風速或風向突變，會造成升力與推力瞬間失衡，導致機體姿態劇變、下降率過大，甚至容易失速墜毀。

在歷史飛安案件上，多起重大航空事故均與風切有關。1985 年美國達拉斯－沃斯堡機場 (Dallas-Fort Worth Airport) 的達美航空 191 號班機事故，即由微爆氣流 (Microburst) 導致，造成 137 人罹難。此事件促使美國聯邦航空總署 (FAA) 及國際民航組織投入大量研究資源，推動低空風切偵測與警報系統之發展。較新的案例是在 2018 年，一架 Embraer 190 在從墨西哥的杜蘭戈機場 (Durango) 起飛後不久，遇到來自微爆氣流的強風切。飛機迅速失速，撞上跑道外停機坪，機身部分解體，所幸機上人員全部生還。事後調查指出，該機場缺乏有效的地面風切預警系統 (當時並沒有 LLWS)，且機組對風切警示的反應相當不足。

臺灣位處亞熱帶季風區，地形複雜，機場多設於山海交錯或盆地地形內，如台北松山機場、高雄國際機場、花蓮機場等，均易受地形導引及海陸風影響而形成局部風切。此外，夏季對流旺盛、雷陣雨頻繁，亦常出現微爆氣流現象，使得低空風切成為臺灣飛



圖1、2018年墨西哥航空從杜蘭戈機場起飛後遭遇微爆氣流的強風切造成飛機失速，撞上跑道外停機坪

航安全之重要挑戰。

本文以「跑道進場端低空風切」為研究主題，從氣象學理論、地形效應與實際案例等層面探討其形成機制。進而分析目前偵測與預警技術之發展，並評估在飛安管理與操作程序上的應用。研究步驟如下：首先，說明低空風切之氣象特性與分類；探討跑道進場端風切形成之物理與地形機制；嘗試分析國際及臺灣地區飛安事件案例；再來，評估現行偵測與防範措施之效能與限制；最後，提出未來研究與技術發展建議。

二、低空風切之理論背景

1、風切的定義與物理意義

「風切」(Wind Shear)係指風場在空間上(無論水平或垂直方向)於短距離內產生劇烈變化的現象。其量化可表示為風速梯度(Velocity Gradient)，即單位距離內風速變化量。通常，風切可分為兩類：一為垂直風切(Vertical Wind Shear)：隨高度變化之風速差。另一則為水平風切(Horizontal Wind Shear)：隨水平距離變化之風速差。

低空風切(LLWS)，特指地表至約600公尺(約2,000英呎)高度範圍內的風速或風向突變。此高度層正是飛機進場與起飛時最關鍵的階段，因此對飛行操作影響特別顯著。當飛機由逆風區進入順風區時，相對氣流速度下降，升力隨之減少，使得機體下沉；反之，若由順風區進入逆風區，則升力瞬間增加，機體上升。若飛行員未及時修正推力或仰角，則可能導致失速或重落地等飛安事故肇生(圖2)。

2、氣象條件與低空風切產生

風切的形成，可歸因於氣團間的動力差異與地形效應。主要成因，包括：

- (1) 對流活動：強烈對流雲中之下沉氣流與降水拖曳效應。
- (2) 鋒面與低壓系統：不同氣團交互產生的輻合區。
- (3)、逆溫層結構：穩定層中風速差異顯著。
- (4) 地形導引：山谷、建築群造成氣流加速或渦旋。
- (5) 海陸風轉換：沿海區日夜間風場改變所引起垂直風切。

在氣象學上，垂直風切與溫度梯度及大氣穩定度密切相關。根據熱力風方程(Thermal Wind Equation)，風速隨高度的變化與等壓面上溫度梯度成正比。當大氣中溫度分布不均，將導致風速隨高度變化劇烈，形成垂直風切。

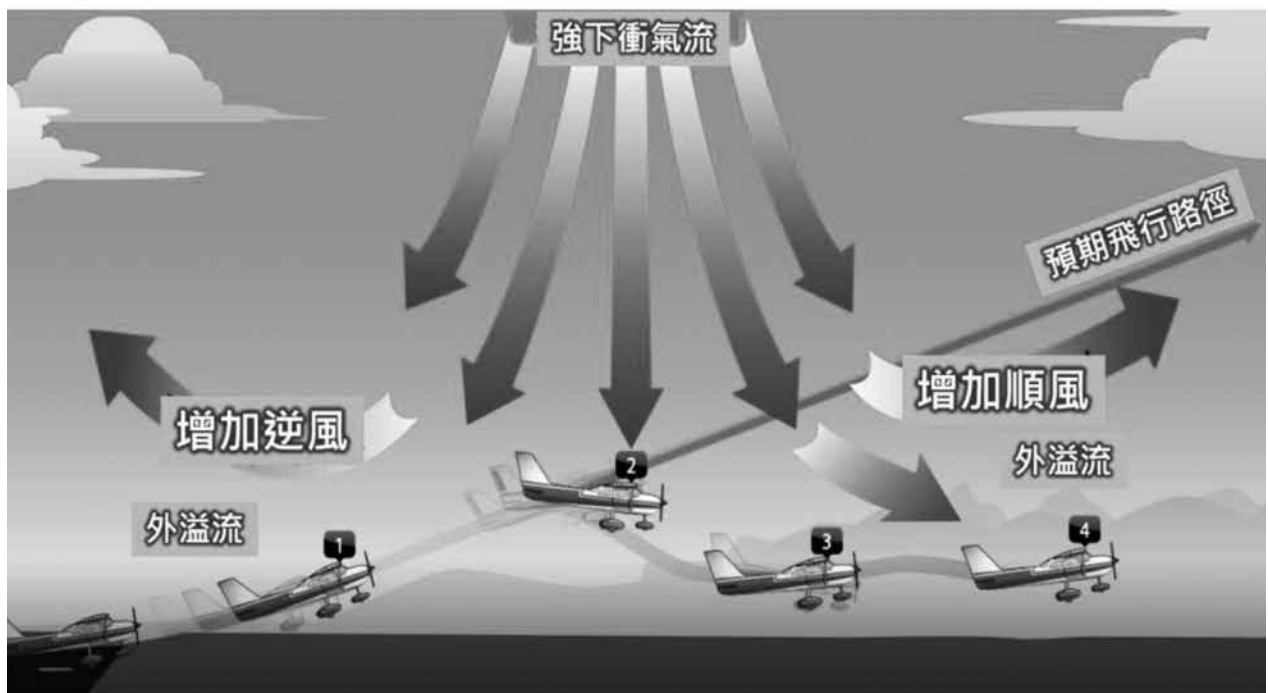


圖2、航機起飛階段，遭遇強下衝氣流，可能肇致的風險（圖片來源：翻製自Aviation Safety）

3、飛行安全影響機制

根據美國聯邦航空管理局（Federal Aviation Administration, FAA）的統計研究，低空風切對飛機進場的主要影響包括：

- （1）升力變化：風速突變導致相對氣流速度改變，致使升力快速增加或減少。
- （2）下沉氣流效應：微爆氣流帶來的強烈下沉氣流，可能使航機難以維持高度。
- （3）姿態不穩：風向劇變導致橫滾或偏航力矩變大，增加操控難度。
- （4）儀表誤判：風速與垂直速度變化，可能造成飛行儀表瞬間讀值異常，肇致飛行儀表誤判。

根據過往案例的統計分析，在航機進場階段，由於飛行高度降低、推力設定小、速度接近失速臨界，對外部擾動極為敏感。若風切發生於跑道進場端，飛行員的反應時間僅數秒，任何遲疑皆可能導致飛安事故的肇生，影響非常深遠且嚴重（交通部民航局，2015）。

4、低空風切之分類

綜合氣象學與飛行操作觀點，又可將低空風切分為下列幾類：

- （1）微爆氣流（Microburst）：指的是當強對流雲中下沉氣流衝擊地面後外擴，造成水平風速突增、強烈下沉氣流，最常在雷陣雨或飆線等劇烈天氣系統發生時伴生。
- （2）鋒面風切（Frontal Wind Shear）：當

冷暖氣團交替，風向劇變，常易造成水平風向改變、溫度驟降，此類低空風切，最常於鋒面通過時發生（林正浩，2022）。

（3）逆溫風切（Inversion Wind Shear）：穩定層內風速差大，高度在 100–300 公尺風速驟變，常於夜間或清晨時段發生（吳，2017）。

（4）地形風切（Topographic Wind Shear）：山谷、建築或地形障碍物導致氣流變形，衍生局部地區的亂流或旋渦，多在盆地、沿山機場等地區發生。

（5）海陸風風切（Sea–Land Breeze Wind Shear）：日夜溫差引起氣流交替，不同方向氣流交匯，產生紊流現象，夏季午後或夜間最易發生。

能形成水平風切。

（2）背風渦旋（Lee Eddy）與滯流區：山脈迎風側氣流經過抬升後，背風側會出現下降氣流與渦旋氣流。若跑道又適位於渦旋區附近，風向將頻繁變化，或是產生滯流現象。

（3）地形上升與下沉氣流：當氣流沿山坡上升（upslope flow）或下沉（downslope flow）時，易與環境風場疊加形成垂直風切，這種風場劇烈變化，尤其在午後熱對流或夜間冷卻時更為顯著。

（4）地表摩擦與建築效應：城市機場周遭的高樓建築群會破壞氣流均勻性，導致湍流增強。由於摩擦力使近地風速降低，與上層自由氣流產生明顯差異，進一步形成局部地區的風切現象。

三、跑道進場端低空風切形成機制

1、地形效應與局地風場變化

機場跑道進場端的低空風切形成，往往與地形特徵密不可分。地形對低層氣流的導引、加速及渦旋產生效果，是造成風速與風向急遽變化的重要因子。通常，在山區或盆地機場，如台北松山機場、花蓮機場及高雄小港機場，周遭地勢高低起伏明顯，地形影響複雜，易會對氣流產生以下幾種效應：

（1）通道加速效應（Channeling Effect）：當氣流通過山谷或城市建築間的狹窄區域時，受限於地形收縮效應，風速會隨之加快。若此氣流在進場端與外部氣流交會，管效應開始發酵，就可

2、對流與微爆氣流（Microburst）

微爆氣流，常常是造成跑道進場端低空風切的最危險型態之一。強對流雲中的下沉氣流常易形成微爆氣流，在雷暴雲（Cumulonimbus）當中，降水粒子因重力下落並拖曳周圍空氣，同時蒸發冷卻作用使空氣密度增加，進而加速下沉。另一方面，下沉氣流觸及地面之後，沿水平方向高速外擴，形成類似氣流爆散的現象。外擴風速可強達 30–50 節（約 15–25 m/s），典型微爆氣流可分為三個區域：包含前緣逆風區（Headwind Zone）、中央下沉區（Downdraft Core）以及後方順風區（Tailwind Zone）；航機進場若橫越此氣流結構，將先遇逆風升



圖3、發生在機場上空的微爆氣流示意圖（圖片來源：微基百科）

力增加，再遭遇下沉區高度喪失，最後進入順風區升力急降，若未及修正推力，將易造成重落或墜毀等飛安事件（陳與林，2013）。

3、海陸風轉換與夜間風切

沿海機場常受海陸風日夜轉換影響。白天因陸地升溫快於海洋，形成海風（Sea Breeze），由海向陸；夜間則反向為陸風（Land Breeze）。若轉換時段恰值飛機進場，將出現風向在短時間內由南轉北（或反之）的現象。以高雄國際機場為例，該場南北向跑道（09/27）受西南海風及東北陸風交替影響。夏季午後海風增強，夜間陸風出現交替期間，地表層常出現逆溫現象，使低層風場轉向明顯。此時於 100 公尺高度範圍內，風向可能由 240° 轉至 060° ，形成劇烈水平風切。

此外，夜間地表冷卻形成逆溫層，使摩擦層上方風速較大，也容易產生垂直風切。若進場飛行穿越逆溫層，會感受到短暫的升力或下沉變化，輕微則飛機顛簸，嚴重更易肇致航機失速，甚至衍生飛安事件。

4、氣團交匯與鋒面活動

在鋒面通過或氣團輻合區附近，風場結構不穩，也容易出現低層風切（交通部民航局，2015）。例如：冷鋒前緣的強收斂帶，常伴隨突發性陣風。由於溫度與密度差異，冷空氣楔入暖空氣下方，形成斜升運動，使得近地面風場劇烈變化。

在臺灣北部冬季常見的華南雲雨帶或東北季風鋒面系統，常於夜間或清晨通過松山及桃園機場。當地面北風與上層西南風交會時，在 500 公尺以內可出現 $30^{\circ} - 60^{\circ}$ 的風向改變與 10m/s 的風速差，造成顯著風切層。

5、局部對流與地表效應

局地性熱對流、地表濕度差異及降水蒸發均可引起微尺度風切現象。特別是在午後雷陣雨消散階段，下沉氣流帶動冷空氣外擴，常造成短時但劇烈的低空風切。

在都市熱島效應明顯的地區，如台北盆地，地表溫度分布不均，使熱對流活動不對稱，進一步強化風速梯度。此外，若地表濕度差大（如河濱與都市區之對比），將造成熱力不均與局地渦流，增加進場端風切發生率（林等，2010）。

四、典型案例分析

1、國際案例一：1985 年達美航空 191 號事故 (Dallas-Fort Worth, DFW)

1985 年 8 月 2 日，達美航空 (Delta Air Lines) 191 號班機 (L-1011 型客機) 於美國達拉斯－沃斯堡機場 (DFW) 進場時，因遭遇強烈微爆氣流而失事。該事件經過，該地當時有強烈雷暴活動，機組在進場過程中，進入一個降水區。雷達顯示前方有高反射率核心，但未顯示明確的風切警告。飛機在距地面約 800 英尺時，突遭逆風後順風轉換，升力驟減，最終撞擊地面，該飛安事件共造成 137 人罹難。事故當時之多普勒雷達 (Doppler Radar) 事後分析顯示，下沉氣流中心速率達 25m/s，水平外擴風速超過 20m/s。垂直剖面顯示典型微爆氣流三區結構。

此事故，提醒在航機起降階段，環境低空風切影響飛安維護甚鉅，需要特別警惕小心。另一方面，該事件也促成 FAA 推動「低

空風切警示系統」(Low-Level Wind Shear Alert System, LLWAS) 升級，以及機載風切警報器 (Predictive Wind Shear Warning System) 的強制安裝。DFW 亦成為全球第一座全面部署 TDWR (Terminal Doppler Weather Radar) 的機場。

2、國內案例二：松山機場微爆氣流事件 (2001 年 6 月 22 日)

2001 年 6 月 22 日下午，台北地區因受對流雲系靠近影響，松山機場出現短時強降雨與雷暴現象。當日下午 15 時 40 分至 16 時 10 分間，LLWAS 系統曾多次發出風切警報。在跑道 10 端與 28 端之風速分別記錄為 6 m/s (東風) 與 17 m/s (西南風)，水平風速差超過 11 m/s，並伴隨雷達回波 45 dBZ 強降水核心。中央氣象局與民航局事後分析判定為「微爆氣流」事件。多架班機進場拉升復飛 (Go-Around)，航班延誤達 40 分鐘。未發生事故，但該事件也促使松山機場更新 LLWAS 為第三代系統，並進一步加強雷達回波監控，防杜因可能肇生的中、小尺度之微爆氣流，以及進一步影響飛航安全。

3、案例比較與歸納

從上述案例可歸納出以下結論，微爆氣流類型在飛安維護為最具破壞性，影響時間雖短，但強度較大；地形型與逆溫型風切雖強度較弱，卻因頻繁發生，而需長期監測；國際重大事故多由強對流誘發，促使技術發展與法規改善。臺灣案例則顯示地形與氣候特性，使得低空風切更具局地化特徵，需結合地方氣象觀測與即時資料分析監控，進一步掌握並降低可能肇生的飛航風險。

五、低空風切之偵測與預警技術

1、地面偵測系統

(1) 低空風切警示系統 (Low-Level Wind Shear Alert System, LLWAS)：

LLWAS 是最早用於機場區域之風切監測系統。其原理為在跑道周圍佈設多組地面風向風速儀（通常 6–12 組），透過中央處理單元比對各測站風場差異，計算風速變化梯度，當超過設定閾值（如：7 m/s）即觸發警報。主要優點為反應迅速、維護簡便，能即時提供跑道端風切警訊。至於，缺點部分，僅能監測地面層（<100 m），對中高層氣流結構無法掌握。

(2) 終端多普勒天氣雷達 (Terminal Doppler Weather Radar, TDWR)：

TDWR 為針對機場範圍設計的高解析多普勒雷達，波長約 5 cm，可偵測降水粒子移動速率，藉由都卜勒頻移 (Doppler Shift) 分析氣流徑向速度場。功能特性為可即時偵測半徑 60 km 內之風場結構，也能識別微爆氣流、陣風鋒 (Gust Front) 等現象 (圖 4)；分辨率高 (角解析度 0.5° 、距離解析度 150 m)。但有其限制，降水遮蔽與地物反射會影響資料品質；且雷達回波需藉氣象員判讀，並非全自動警報。

(3) 雷射測風雷達 (Light Detection and Ranging, LIDAR)：

LIDAR 透過發射雷射光束並接收氣膠散射回波，計算徑向速度，可精準描繪近地氣流結構。特別適用於晴空



圖 4、高解析多普勒雷達，能識別微爆氣流、陣風鋒 (Gust Front) 等現象

風切 (Clear-Air Wind Shear, CAWS) 偵測。主要優點為能在無降水情況下測得氣流變化；加上，資料解析度高，可解析至 30–50 公尺層。但是，缺點則為成本高，且在強降水或低能見度下效能下降。臺灣桃園國際機場與香港赤鱗角機場均配置 LIDAR 以輔助 TDWR，可提前約 1–3 分鐘預測風切；可以再參考使用與運用的。

2、機載偵測系統

(1) 被動式系統 (Reactive System)：

被動系統依靠機載感測裝置即時測得空速、垂直速度與姿態變化，透過演算法判斷是否出現風切跡象。當檢測到與預期值不符（如空速下降超過 15 節）時，發出「WINDSHEAR」聲警告。其侷限在於：只有當飛機進入風切區後才能警示，屬於反應性警報，無法預先避開。

（2）主動式系統（Predictive System）：

主動系統利用機載氣象雷達之多普勒功能，分析前方氣流運動，若偵測到徑向速度劇烈變化（如： ± 15 節/300 m），則預警飛行員。現代客機（如：A320、B777）皆具備此功能。優點為可提前約 5–30 秒警示，爭取反應時間；限制則為偵測範圍約 3–5 km，且受降雨、地形遮蔽影響。

3、數值模式與資料同化

隨著氣象模式發展，低空風切的預報逐漸由即時觀測擴展至短期預測。WRF 模式（Weather Research and Forecasting Model）現已可模擬地形與對流引發之風場細節。而資料同化（Data Assimilation）技術結合雷達、LIDAR 與氣象觀測，使模式初始場更貼近實際情況。目前部分大型機場（如：日本成田、香港國際機場）已採「Nowcasting + LIDAR」系統，可提前 10–15 分鐘預測及評估微爆氣流可能發生的機率。

六、飛安防範與操作策略

1、飛航員訓練與操作程序

為降低低空風切風險，國際民航組織（ICAO）與各國民航局規範飛行員需接受風切識別與應對訓練，包括模擬機（Full-Flight Simulator, FFS）課程。操作要領：發現警報時立即反應，若自動系統發出“WINDSHEAR GO-AROUND”指令應即刻採取逃逸程序。操作推力拉至最大（TOGA），全推力維持升力，避免速度喪失。另一方面，維持姿態與抬頭角（Pitch Attitude），通常抬頭 15° – 20° ，避免過度

上仰導致失速。也要避免改變構型，在穿越風切區前不收襟翼、不收起落架，藉以保持升力穩定。保持橫向穩定不是非常重要的，減少側風修正，俾防姿態不穩，並快速通過。

2、管制與氣象支援措施

塔台與氣象單位的協調對風切應對至關重要。即時通報制度（Wind Shear Alert Dissemination），倍極關鍵，當 LLWAS 或 TDWR 偵測到低空風切時，塔台應即刻以「Wind shear Alert」方式通報所有機師，並更新 ATIS（自動終端資訊系統）。另一方面，立即進行進場順序的調整，在強對流期間，應延後進場或暫停起降，以避免多架飛機同時受影響。

氣象預報人員亦應加強氣象監控與雷達疊圖判讀，將 TDWR、LIDAR 及氣象衛星雲圖整合於同一顯示介面，協助管制員辨識高風險的風切區域。

3、地面作業與設施管理

低空風切不僅影響飛行，也關係到地面安全。當機場建設之初，就應考量環境氣流導引，避免航道附近設高層建築。機場氣象站須定期校正風速儀與數據傳輸系統，並同步考慮夜間逆溫易發區也應增設垂直探空設備，以利監測與守視。

4、事故調查與回饋機制

各國民航機構皆建立「風切事件報告系統」（Wind Shear Incident Report System, WSIRS）。尤其是，執行完畢的飛行員可回報遭遇時之高度、空速、姿態變化等。資料

回饋至氣象與安全單位，用於模式校正與警報系統評估。

臺灣自 2005 年起建立「飛航氣象事件通報機制」，由中央氣象署與民航局共同診斷並研究分析，每年發布「低空風切統計報告」，藉以改善警報精度與頻度，適時回饋於相同（近）航線的任務航機參考運用。

七、未來研究與技術發展方向

1、高解析觀測與人工智慧應用

近年人工智慧（AI）與機器學習（Machine Learning, ML）被引入氣象預報。透過大量雷達與 LIDAR 資料訓練，可建立風切自動辨識模型（例如：Random Forest 或 CNN）。香港天文台也已利用深度學習模型預測微爆氣流，預報準確率提升 20%。

同時，遙控無人機系統（UAS）亦可用於低層氣流觀測，補足傳統探空資料不足的問題。未來若能結合 UAS、LIDAR 與地面觀測，將有助於建立三維風場即時監控系統。

2、氣候變遷下的新挑戰

隨著氣候暖化，對流活動頻率與強度增加，極端天氣事件將更常見。研究顯示熱帶及亞熱帶地區的對流系統將會更為劇烈，微爆氣流的發生概率可能也會跟著上升。臺灣夏季對流雲密集，未來需加強即時天氣預報（Nowcasting）與提高氣象模式解析度，藉此掌握更加即時與精準的氣象資訊。

3、多系統融合預警平台

目前風切偵測多分散於各單位，未能即時整合。未來方向應包括：資料融合（Data Fusion）：結合 LLWAS、TDWR、LIDAR 與衛星觀測；統一警報格式（Standardized Alert Message），以 ICAO 規範建立統一風切警報級別；建立跨單位資訊共享，使得塔台、航空公司與氣象單位都能即時取得相同風場資訊。

八、結論

跑道進場端低空風切，乃飛航安全中極具挑戰性的氣象現象，其形成機制涉及對流動力、地形導引、逆溫結構與海陸風轉換等多重因素。微爆氣流為其中最具威脅的類型，常在強對流或雷陣雨條件下產生。地形與局地氣候影響顯著，盆地與沿海機場的風切特性深具地域性。夜間逆溫與海陸風交替，為亞熱帶地區常見的風切來源。

微爆氣流需精細監測，採雷達與 LIDAR 為主要偵測手段。國際事故推動技術革新，如 DFW 事件促成 TDWR 普及。飛行員的教育與程序遵循，落實飛安維護的決心，是避免肇生事故的關鍵防線。

未來研究應著重於高解析度觀測整合、人工智慧預測與區域模式改良，藉以強化預警能力。氣象與航管單位需持續合作，建立即時通報與決策支援平台，使「預測—警示—應變」形成完整的飛安防護網，俾利確保飛安。

參考文獻：

1. 中央氣象署，2020：臺灣地區低空風切觀

- 測與分析，氣象年報，第 68 期。
2. 交通部民用航空局，2015：《飛航氣象作業手冊》，交通部，臺北。
 3. 吳俊成，2017：高雄機場夜間逆溫風切之觀測研究，中華民航學刊，32(1)，45-62。
 4. 林正浩，2022：臺灣沿海機場海陸風風切特性分析，氣象科技通訊，16(3)，87-103。
 5. 林得恩，2022：劇烈降雨系統對高山陣地之風險評估，氣象預報與分析，250，1-15。
 6. 林得恩，2022：全球氣候變遷下的飛航安全維護，財團法人中華民國台灣飛行安全基金會，飛行安全半年月刊，3-16。
 7. 林得恩、林裕豐，2010：劇烈對流系統對飛航安全之影響 --- 以 2008 年梅雨鋒面伴隨中尺度渦漩個案為例，第 5 屆海峽兩岸航空氣象與飛行安全研討會，台北，台灣，158-169。
 8. 林得恩、張培臣、張明仁、梁江山、王仕均、簡國恩，2010：影響臺北松山機場飛安氣象因子之統計分析，氣象預報與分析，205，1-18。
 9. 陳建宏、林文斌，2013：松山機場微下擊暴流事件之雷達分析，大氣科學，41(2)，123-145。
 10. Fujita, T. T.,1985：The Downburst: Microburst and Macrobust." SMRP Research Paper 210, University of Chicago.
 11. Hong Kong Observatory,2018：Application of LIDAR in Detection of Microbursts at Hong Kong International Airport. HKO Technical Note, No. 107.
 12. ICAO,2019：Manual on Low-Level Wind Shear (Doc 9817). Montreal: International Civil Aviation Organization.
 13. Whiting, B. F. & Knox, J. A.,2018：Advances in Wind Shear Detection Technologies. Journal of Atmospheric Science and Aviation Meteorology, 25(4), 201-224.

跨文化視角下的航空管理： 世代差異對安全溝通與協作的挑戰

許悅玲
開南大學空運管理系

楊文忠
中華民國民航飛行員協會

摘要

航空業以其高度的專業化、規範化及全球移動性，內建了多層次的文化複雜性。除了國籍、組織、專業與安全文化外，近年來「世代文化」的交替與共存已成為影響飛行安全溝通與團隊協作的核心挑戰。本研究旨在探討戰後嬰兒潮世代（Baby Boomers）、X 世代、Y 世代（Millennials）和 Z 世代（Gen Z）在價值觀、溝通風格、學習習慣及科技依賴度上的差異，並分析這些差異如何在駕駛艙內造成溝通摩擦、權威衝突、自動化依賴與手動技能之間的爭論，進而提升飛安風險。尤其特別關注作為「數位原住民」的 Z 世代進入駕駛艙後，其核心特徵與航空業「標準化、程序化」要求之間的張力。最後，本研究提出一套整合性的跨世代管理與安全強化策略，包括：強化組員資源管理（CRM）的世代差異元素、推行雙向導師制（Mentor/Reverse-Mentor）、結合數位化的混合式訓練設計，以及建立平衡紀律與創新的開放組織文化。研究核心訊息強調：「跨世代合作是航空安全的新基石」，唯有透過理解、調適與轉化這些世代差異，航空公司才能有效應對未來的人才結構重塑與安全挑戰。

一、前言

航空運輸業是全球公認的高度複雜系統，其運營不僅受到嚴格的技術規範約束，更深受多重文化因素的影響。在「跨文化視角」下，航空管理所面對的挑戰遠超出國籍與地域的差異，它涉及組織文化、安全文化、專業文化、乃至於新近凸顯的「世代文化」。特別是在北美航空業預計將面臨大規模的機組人員更替，Part 121 飛行員在未來十五年內可能流失近 50% 的背景下，「大換血」不僅是數量上的補充，更是文化上的重塑。世代文化的交替，尤其是「數位原住民」Z 世代開始大規模進入駕駛艙，為傳統上強調紀律、層級與經驗的航空體系帶來了前所未有的挑戰。

世代差異並非全新的議題，但在航空這種高風險、低容錯的環境中，其對安全溝通與協作的影響被放大到極致。當駕駛艙內同時存在著戰後嬰兒潮（Baby Boomers）、X 世代、Y 世代（千禧世代）以及 Z 世代的飛行員時，他們之間在價值觀、溝通偏好、對技術的態度以及對權威的認知上的根本差異，可能導致團隊摩擦、誤解、決策延誤，最終削弱團隊效能並增加飛行安全風險。

本研究以跨文化管理理論為框架，深入剖析航空業內存在的跨世代文化差異及其對安全管理的影響。目的在於：

- 一、界定並區分不同世代（Baby Boomers、Gen X、Gen Y、Gen Z）在航空專業場域中的核心特質、價值觀、學習特徵與行為偏好。
- 二、識別並闡述跨世代差異在安全溝通、技術依賴、決策制定、學習習慣與工作價值觀上的核心挑戰。
- 三、針對 Z 世代進入駕駛艙所帶來的具體挑戰，提出涵蓋訓練設計、職涯管理、組織文化與人機協作（Human-AI Teaming）的策略性建議，以確保跨世代合作成為航空安全的新基石。

二、航空業的多元文化與世代交替

一、航空業的多層次文化結構

文化是指人類共同活動創造出的所有產物，包括生活型態、風俗習慣、典章制度等，由「可觀察的文化」（如物質、社群、精神文化），以及存在於人們潛意識中、用來整合與避免衝突的「不可觀察的文化」所組成。航空業的文化是高度交織的「多層次文化」體系，包括國籍文化、組織文化、安全文化、專業文化（如飛行員、空服員、機務、航管等）、性別文化，以及本研究聚焦的「世代文化」。這些文化層次相互影響，形成複雜的交互作用，例如組織文化會深刻影響其安全文化的構築。在國際航班的機組中，這些文化因素的交織作用更加明顯。近年來，世代文化的交替與共存，已成為影響機組成員互動的最新且必須關注的議題。

二、世代的核心特徵與差異分析

世代群體的形成是受到其成長過程中經歷的社會環境、經濟和技術事件影響的結果，這些經歷形塑了他們的工作價值觀和學習偏好。駕駛艙的跨世代特性，意謂著機組成員可能來自四個主要世代：戰後嬰兒潮世代（Baby Boomers, 1946–1964）、X 世代（Gen X, 1965–1980）、Y 世代（Millennials, 1981–1996）和 Z 世代（Gen Z, 1997–2012）。這四個世代在工作價值觀、溝通風格、學習習慣與對技術的態度上呈現顯著差異：

1. 戰後嬰兒潮世代 (Baby Boomers, BB) (1946–1964)：

他們的核心特徵是樂觀、競爭性強，將工作保障和職涯發展列為優先事項，通常對雇主忠誠。他們傾向於傳統的等級制度和紀律。在飛行技能上，BB 世代通常擁有更豐富的真實世界經驗和扎實的手動飛行技能。他們偏好面對面或電話溝通，喜歡講師主導或課堂式訓練，訓練材料應經過仔細研究、以事實為基礎並具備邏輯性。

2. X 世代 (Generation X, Gen X) (1965–1980)：

X 世代的核心特徵是獨立、足智多謀、懷疑論者。他們是追求工作與生活平衡的先驅，重視彈性和自主權。他們傾向於使用電子郵件和簡訊 / 訊息溝通。

3. Y 世代 (Millennials, Gen Y) (1981–1996)：

Y 世代亦稱千禧世代，屬於數位移民，核心特質是科技通、協作和社會意識強。他們尋求有意義的工作、靈活性和立即回饋，是多工處理者。在學習上，他們是視覺學習者，偏好點播式數位學習和多媒體演示。

4. Z 世代 (Generation Z, Gen Z) (1997–2012)：

Z 世代是真正的數位原住民，自幼在智慧型手機、社交媒體和 AI 的環境中長大。他們的核心特質是重視個性和多元性，期望包容性、使命驅動的工作和快速的職涯發展。他們的大腦習慣於複雜的視覺圖像，期望職場提供尖端科技和工具。

不同世代之構成與特徵彙整如表 1 與表 2 所示。此外，緊接著 Z 世代之後為 Alpha/ α 世代 (Generation Alpha, Gen Alpha)，出生於 2013–2024 之間，父母多為 Y 世代，為

首個完全出生於 21 世紀的世代。預估最快於 2031 年，駕駛艙即將迎來 Alpha 世代。

三、跨世代差異對安全溝通與協作的核心挑戰

世代差異的本質在於資深世代 (Baby Boomers、Gen X) 的成長環境強調「忠於雇主」、「層級式管理」與「經驗積累」，而新世代 (Gen Y、Gen Z) 則強調「自由彈性」、「合作導向」與「實時回饋」。這種根本差異在對安全至關重要的駕駛艙內產生顯著衝突。跨世代差異在駕駛艙環境中集中

表 1 不同世代之構成與特徵 -1

世代	主要特徵	主要價值觀	溝通偏好
戰後嬰兒潮 (Baby Boomers) (1946–1964)	<ul style="list-style-type: none">● 忠於雇主● 習慣威權結構與階層式管理● 工作保障與職涯晉升為主要抱負	紀律、層級、經驗、忠誠度	面對面、電話、書面檔 (直接的口頭指令)
X 世代 (Gen X) (1965–1980)	<ul style="list-style-type: none">● 獨立、務實和多疑的性格● 「工作與生活平衡」的先驅● 重視自主性和彈性，而非單純的職涯晉升	成果導向，獨立、自主	Email、簡訊 (簡潔、高效的溝通)
Y 世代 (Gen Y / Millennials) (1981–1996)	<ul style="list-style-type: none">● 「數位移民」，在網際網路繁榮的環境中成長● 天生具備技術熟練和協作導向特質● 追求自由、彈性	協作導向、工作 - 生活平衡、回饋、個人成長	習慣數位工具，如實時通訊、短電子郵件、社群媒體
Z 世代 (Gen Z) (1997–2012)	<ul style="list-style-type: none">● 「數位原住民」，自幼就在智慧手機、社群媒體與人工智能的環境中長大● 要求即時回饋與高度彈性● 對心理健康、多元包容和環境永續等社會議題高度關注，並希望其雇主能展現出	目的導向、心理健康、多樣性、透明度	短影音、行動化 APP，數位溝通是常態

表 2 不同世代之構成與特徵 -2

世代	學習特徵	對技術的態度	挑戰
戰後嬰兒潮 (Baby Boomers) (1946–1964)	<ul style="list-style-type: none">● 重視內容嚴謹、邏輯清晰● 偏好講課式教學	視科技為輔助工具，可能抗拒新技術	對科技適應較慢；抗拒數位化工具
X 世代 (Gen X) (1965–1980)	<ul style="list-style-type: none">● 想知道「為什麼要學」，期待實務應用● 偏好 FAQ、Do & Don't	較易適應數位化，但對手動技能仍有重視	質疑權威；需要明確理由與實用性
Y 世代 (Gen Y / Millennials) (1981–1996)	<ul style="list-style-type: none">● 注意力短、偏好視覺化● 天好多媒體簡報、影片、超連結學習	高度接受與熟悉技術，認為是提高效率的工具	不喜歡階層式管理；注意力短
Z 世代 (Gen Z) (1997–2012)	<ul style="list-style-type: none">● 追求即時滿足● 喜好多元化的學習與溝通方式，熟悉多元媒材，文字 / 圖像 / 符號 / 影片媒體等● 注重真實經驗與互動，而非僅學習理論	「數位原生」，對技術極為自信，尋求 AI 與資料輔助	注力不足；忠誠度可能較低

體現為以下五大核心挑戰，可能直接威脅到機組的安全協作效率，分述如下：

1. 溝通風格的差異：指令 vs. 討論

資深機長（多為 Baby Boomers/Gen X）習慣於直白、權威、面對面的溝通風格，傾向於發布直接的口頭指令。而新世代副駕駛（多為 Gen Y/Gen Z）則偏好數位化、互動合作的模式，傾向於在決策前進行討論。當高壓情境下，資深機長可能發出簡潔指令，但新世代飛行員可能期待或試圖尋求更全面的背景資訊或雙向確認。這種「指令 vs. 討論」的偏好差異，輕則造成溝通摩擦、誤解，重則導致資訊傳遞延誤或決策分歧，尤其在緊急情況下，對操作流程的順暢性構成重大風險。

2. 權威 vs. 協作：決策速度與團隊參與的矛盾

航空管理傳統上賦予機長絕對權威，這是基於經驗、職責與訓練的體制設計。然而，新世代（Gen Z 尤其）不喜歡「上對下」的命令式管理，更偏好合作決策的模式。雖然組員資源管理（CRM）強調團隊合作與開放溝通，但世代對「機長權威」的認知差異，可能導致：

- (1) 新世代的遲疑：在應對資深機長的指令時，因不適應單向命令模式而產生心理壓力，影響溝通的開放性。
- (2) 決策的權衡：在需要迅速決策的關鍵時刻，如果新世代副駕駛過度傾向於「團隊參與」，可能導致決策速度被拖延。平衡決策速度與團隊參與成為安全管理上的難題。

3. 自動化依賴 vs. 手動技能：技術斷層的風險

資深世代重視手動飛行經驗，對新技術可能抱持抗拒態度，視其為輔助工具。相反地，Z 世代作為「數位原生」，信任自動化、數位熟練，且對技術極為自信。這種差異導致了技術斷層的風險。

- (1) 資深機長的過度干預：在自動化系統正常運作時，資深機長可能過度依賴手動技能與經驗進行干預。
- (2) 新世代的技能退化：新世代飛行員雖能快速適應新系統，但也可能因科技依賴性強而忽視傳統技能（如基礎導航、手動駕駛能力），一旦自動化系統失效，其應對能力可能不足。這導致了「自動化依賴 vs. 傳統技能」的爭論，對飛行安全構成潛在威脅。

4. 不同的工作價值觀：對安全文化承諾的不一致

資深世代（Baby Boomers/Gen X）的價值觀傾向於忠誠、穩定、長工時，將工作視為主要的生活重心。新世代（Gen Z）則將心理健康、永續發展、多元化置於職涯考慮的前列，忠誠度較低，傾向於尋求更快的職涯發展機會。

當新世代要求高度彈性和工作 - 生活平衡時，可能與航空業對紀律和長工時的要求產生摩擦。這可能導致機組成員對組織安全文化和程序遵守的承諾不一致，例如在對疲勞、報告制度、或非必要飛行等問題上持有不同的看法，進一步提升飛行安全風險。

5. 學習習慣的衝突：訓練效率的阻礙

資深世代習慣於傳統課堂教學與教官指導方式，偏好內容嚴謹、邏輯清晰的課程。

新世代則偏好交互式、遊戲化、數位化的學習，強調實時滿足和真實經驗與互動。單一的培訓模式難以同時滿足所有世代的需求，使得訓練的吸收效率降低。資深教官可能難以理解新世代對 VR/AR 仿真、短模組多媒體教材的學習需求，而新世代飛行員則可能難以適應傳統的講授式教學，從而影響訓練成效。

四、應對Z世代入艙的策略與管理

有鑑於上述的世代差異，以及 Z 世代即將大幅進入駕駛艙的挑戰，建議航空公司可在訓練、職涯管理、組織文化和安全協作上進行全面性的策略調整。

1. 訓練設計的轉型：擁抱數位化與情境式教學

為滿足 Z 世代追求實時滿足和偏好多元媒材的學習特徵，訓練設計必須轉型：

- (1) 混合式培訓（Blended Learning）：將傳統課程與電子學習（e-learning）、VR/AR 模擬結合，提供短模組、多媒體教材，以滿足不同世代的學習偏好。
- (2) 情境式與互動性教學：強調互動性與情境式教學，例如在模擬機中導入真實的跨世代互動情境，取代傳統的單向講授。
- (3) 平衡科技與基本技能：在訓練中必須特別強調平衡「科技依賴」與「基本技能」的訓練，通過設計刻意的手動飛行模擬來避免「自動化依賴」的風險。

2. 職涯管理與人才留任：建立意義感與使命感

由於 Z 世代忠誠度較低且關注心理健康，航空公司必須在職涯管理上採取更具彈性的策略：

- (1) 提供彈性與透明度：必須提供更多彈性排班和清楚的升遷路徑。Z 世代注重透明度，清晰、可預期的職涯藍圖有助於建立信任。
- (2) 建立「意義感」與「使命感」：Z 世代關注社會議題（如環境永續），航空公司應將自身塑造成一個能夠透過技術創新與全球合作，來實現環境永續與社會責任的平台。將飛行工作與更大的社會使命連結，以留住 Z 世代。

3. 組織文化與溝通模式的革新

傳統的「機長絕對權威」文化必須進化，以適應新世代對合作的偏好：

- (1) 推動開放透明的溝通文化：鼓勵跨世代對話，避免代溝影響機組合作。推動「上對下」命令模式向「平等參與」協作模式轉變。
- (2) 強化 CRM 導入「世代差異」元素：在 CRM 訓練中，應納入「世代差異」的模組，專門訓練飛行員積極聆聽、結構化對話的技巧，並模擬情境中的世代互動，以降低溝通摩擦。
- (3) 推行雙向導師制：
 - 正向導師制：資深教官傳授經驗與手動技能，幫助新世代理解傳統飛行哲學。
 - 反向導師制：新世代飛行員向資深機長分享最新的數位技術、AI 應用、以及新的溝通工具，實現互補優勢、雙向學習，以縮小技術鴻溝並提升彼此尊重。

4. 未來趨勢：人機協作 (Human-AI Teaming)

未來的飛行員角色將發生根本性轉變，從「操作者」轉變為「系統管理者」。Z 世代與即將進入駕駛艙的 Alpha 世代 (Gen

Alpha, 2013-2024) 將是首批在「人機協作」環境下成長的飛行員。AI 將成為飛行員的「數字副駕駛」，負責處理數據分析、監控、異常偵測。而人類飛行員將更像任務指揮官，專注於判斷、道德決策、臨場應變，以及監督 AI、自動駕駛與複合系統。這種轉變要求新世代飛行員具備數據素養、AI 理解力、跨系統思維等新技能，而資深世代也必須接受 AI 輔助決策的模式。

五、 結論與建議

世代差異是航空業當前最重要且複雜的跨文化挑戰之一。本研究透過對 Baby Boomers、Gen X、Gen Y 與 Gen Z 核心特徵的梳理，分析世代差異在溝通風格（指令 vs. 討論）、權威認知（權威 vs. 協作）、技術依賴（自動化 vs. 手動）、工作價值觀與學習習慣五個面向上，對航空安全構成實質性的潛在風險。尤其 Z 世代作為「數位原生」與傳統航空業「標準化、紀律性」之間的張力，是當前安全管理重點。

綜整上述分析，本研究提出以下具體政策建議，以強化跨世代合作，並提升航空安全：

1. 全面升級 CRM 訓練：在現有 CRM 體系中強制性導入「世代差異」模組，重點訓練機組成員識別和調適不同世代的溝通習慣與決策偏好。
2. 建立雙向知識傳承機制：在組織內正式推行「反向導師制」，使新世代能主動傳授技術知識，同時確保資深世代的經驗與手動技能得以透過正向導師制傳承，達到知識的雙向流通與彼此尊重。
3. 創新飛行訓練模式：實施混合式 (Blended) 與遊戲化 (Gamified) 培訓，

運用 VR/AR 模擬等數位化工具，提供短模組課程，以符合新世代的學習風格，同時強化對手動技能和基本程序（如基礎導航）的考核。

4. 文化領導力轉型：推動領導者從「命令與控制」轉向「教練與協作」模式，建立一個多元包容、開放透明的安全文化，以平衡傳統紀律與新世代的創新精神。
5. 職涯規劃與企業使命掛鉤：提供透明的晉升路徑和彈性排班，並將企業文化與新世代關注的環境永續、社會責任等價值觀相結合，以增強 Z 世代的組織忠誠度與使命感。

世代差異不等同於風險，而是挑戰與機會的結合。隨著未來五年戰後嬰兒潮世代將完全退出，由 X、Y、Z 世代接棒，Alpha 世代隨後進入，航空公司必須理解、調適、並轉化這些差異，將其視為提升組織彈性與創新的契機。「跨世代合作是航空安全的新基石」，通過系統性的管理與文化轉型，航空業能夠將世代差異轉化為安全、高效運營的競爭優勢。✈️

參考文獻

- Aviation International News (2025), Managing Generational Differences in the Business Aviation Workforce. <https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2025-04-17/managing-generational-differences-business-aviation>
- Birdsong, J., & Reesman, K. (2022). Analysis of the Emerging Pilot Workforce. National Training Aircraft Symposium (NTAS).
- Dimock, M. (2019). Defining Generations:

Where Millennials end and Generation Z begins. Pew Research Center.

- Eckleberry-Hunt, J., & Tucciarone, J. (2011). The challenges and opportunities of teaching “generation y.” *Journal of Graduate Medical Education*, 3(4), 458–461. <https://doi-org.spot.lib.auburn.edu/10.4300/JGME-03-04-15>
- Felder, R. M., & Soloman, B. A. Learning styles and strategies. <https://engr.ncsu.edu/wp-content/uploads/drive/1WPAfj3j5o5OuJMiHorJlv6fON1C8kCN/styles.pdf>
- Fussell, S. G., & Thomas, R. (2021). Interactive Modules for Flight Training: A Review. *Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*, 30(2). <https://doi.org/10.15394/jaaer.2021.1901>
- Generational Differences Pose a Challenge for Flight Departments. (2010). National Business Aviation Association. <https://nbaa.org/flight-department-administration/personnel/generational-differences-pose-a-challenge-for-flight-departments/>
- Harris, D. (2011). Human performance on the flight deck. Ashgate.
- Hoffman, J. (2025). How the Next Generation of Pilots Will Be More Than Just Human. Medium. <https://medium.com/in-her-orbit/how-the-next-generation-of-pilots-will-be-more-than-just-human-4bb35cc719f7>

- Kanske, C. A., & Brewster, L. (2001). The learning styles of college aviation students. *Collegiate Aviation Review International*, 19(1), 62–70.
- Kearns, S. K. (2010). *E-Learning in Aviation*. Routledge.
- Niemczyk, M., & Ulrich, J. W. (2009). Workplace preferences of millennials in the aviation industry. *International Journal of Applied Aviation Studies*, 9(2), 207–219.
- Prensky, M. (2001). Digital Natives, Digital Immigrants Part 1. *On the Horizon*, 9(5), 1–6. <https://doi.org/10.1108/10748120110424816>
- Reesman, K. (2022). *Training the Emerging Pilot Workforce: Does Generation and Gender Influence Curriculum Development?* [Doctoral dissertation, Auburn University].
- Rodrigues, R. B. (2025). *Bridging the Generation Gap*. Flight Safety Foundation
- Scheck, M. (2012). Training and Management of Pilots across Generations. *International Journal of Business and Social Science*, 3(3), 1–10.
- Shatto, B., & Erwin, K. (2016). Moving on From Millennials: Preparing for Generation Z. *Journal of Continuing Education in Nursing*, 47(6), 253–254. <https://doi-org.spot.lib.auburn.edu/10.3928/00220124-20160518-05>
- Urlick, M. (2016). Adapting training to meet the preferred learning styles of different generations. *International Journal of Training and Development*, 21(1), 53–59.
- Weigel, S. (2019). Mixing Old and Young Pilots Is Causing Issues on the Flight Deck. *Flying Magazine*.
- Williams, C. J., Matt, J. J., & O' Reilly, F. L. (2014). Generational perspective of higher education online student learning styles. *Journal of Education and Learning*, 3(2), 33–51.

航空業內部威脅造成之非法干擾行為

Acts of unlawful interference caused by insider threats in the aviation industry

中華航空 孔垂梅

航空從業人員所產生之內部威脅一直都是航空保安最難事先預防的威脅，自 2015 年 Germanwings 4U 9525 航班，副機師因憂鬱症，於巴塞隆納飛往杜賽爾道夫航程中，蓄意將航機撞向阿爾卑斯山致全體機組員及旅客遇難案發生之後，航空業便開始更加關注內部威脅造成之航空保安風險，惟相關案例仍持續發生。內部威脅牽涉到內部人員的動機、機會和能力，ICAO 定義內部人員是指在航空業服務的全職或兼職員工，工作職責使其能夠具備進入保安管制區域、接觸危安、危險物品或機敏資訊的特權或知識；另 ICAO Doc.8973 指出，如果內部人員能夠有更多機會觸及航空保安最後一道防線，則脆弱點遭突破之可能性更大，後果可能更具破壞性且更嚴重。

重要案例回顧

回顧歷史，4U 9525 並非單一個案，1982 年日本航空 JL350 機長疑似患有精神分裂症，出現幻覺及幻聽，下降過程中，於空中啟動反推力裝置，最終航機墜毀於東京灣中，造成 24 名乘客遇難。

1987 年 PS1771，一名心懷不滿的他航員工離職後未繳回機場通行證且因當地規定員工進入機場管制區無須通過安檢，後該員工持手槍登機槍殺飛航組員及身為該航班旅客之前主管，致航機墜毀。

1994 年聯邦快遞 705 號航班被一名原安排於該航班執勤之 Flight Engineer 攜帶槍械劫持，肇因為劫機者之前謊報海軍飛行資歷，可能會遭聯邦快遞解雇。

1995 年基什航空 707 號班機原定飛往伊朗基什島，遭一位客艙組員持槍劫持，要求飛往歐洲，後航機轉降以色列，客艙組員投降。

1997 年勝安航空 MI185 號班機，機長當時正經歷工作及財務困難，於航程中趁副機師離開駕駛艙時，疑似蓄意於印尼巨港將航機墜毀。

2004 年西伯利亞航空 1047 號航班，兩名攜帶有爆裂物之女性自殺炸彈客賄賂了負責辦理報到和登機的西伯利亞航空公司人



Metrojet EI 9268航機殘骸，照片來源Flight Safety Foundation

員，該兩位旅客未通過安檢即登機，成功於航程中引爆爆裂物，致航機墜毀。

2013 年莫三比克航空 470 號班機 機長因家庭因素，於航程中趁副機師離開駕駛艙時，多次蓄意改變航機高度，最終致航機墜

毀。
2014 年衣索比亞航空 ET 702 號航班原定飛往羅馬，副機師因擔心遭衣索比亞迫害，於航程中藉機長離開駕駛艙之際，自行劫機轉降至日內瓦尋求政治庇護。



Aircraft picture taken after landing

2015 年 Metrojet EI 9268 航班於起飛不久後爆炸墜毀，後經俄羅斯調查認定該航班遭受恐怖攻擊，主因為在飛行過程中，一個威力相當於 1.5 公斤 TNT 的爆裂物被引爆，且該物品疑似由機場工作人員協助運送上機。

2016 年達洛航空 D3 159 號航班起飛約 15 分鐘後發生爆炸，肇因於摩加迪休機場工作人員將裝有爆裂物的筆記型電腦交給該航班一位旅客，爆炸後該旅客墜落地面死亡，航機則安全回航摩加迪休機場。

2016 年土耳其伊斯坦堡機場遭受自殺炸彈客攻擊，曾在機場有過工作經驗之 ISIS 恐怖份子於機場大廳持槍射擊民眾並引爆爆裂物，共造成 44 人遇難，其中包括至少來自 10 個國籍之旅客及機場工作人員。

同年，比利時布魯賽爾機場再次發生曾在機場有過工作經驗之 ISIS 恐怖份子於機場大廳持槍射擊民眾並引爆爆裂物，造成 16 人遇難。

此外，蓄意從事非法干擾行為之內部員工還可能為恐怖分子提供有關該組織或關鍵基礎設施的信息，例如機場設施圖、安檢程序、保安管制哨、航空保安脆弱點等，這些信息將可能有助恐怖分子發動襲擊。恐怖分子不只可能利用航空業內部人員，也有可能會試圖成為內部人員，例如，2007 年，一名紐約 JFK 機場員工因參與策劃針對機場下方燃油管路的恐怖攻擊而遭判刑。2010 年，某 T 姓員工錄取為達美航空行李搬運人員，其曾有意圖向塔利班提供敏感資訊。2011 年，英航資訊部門 R 姓員工成為蓋達組織阿拉伯半島分支「阿拉伯半島基地組織」成員並向該組織提供可配合自殺式攻擊的信息，但



D3 159 航機明顯由內向外之爆炸痕跡，證明爆裂物位於客艙內
照片來源 Ministry of Transport and Civil Aviation of Federal Republic of Somalia

由於他未獲錄取轉任客艙組員職位而未能得逞。被捕前，R 姓員工還試圖招募更多同胞擔任英航行李搬運人員和保全人員，擬以更大規模的人力共同策劃攻擊。

原因分析

恐怖份子會用最少的成本造成最大量的生命損失或經濟損失以博取國際媒體關注，加強航空保安措施迄今仍無法 100% 降低航空業成為其攻擊的目標。內部人員憑藉對文件程序的合法接觸以及對組織內部運作地了解，有更多機會並且更容易突破脆弱點。因此，內部人員有可能比外部攻擊者造成更大的破壞，更甚，內部人員也更容易掩飾自己破壞的蹤跡並在不被發現的情況下實施非法干擾行為。雖傳統威脅劫機、爆裂物恐嚇、

機場攻擊仍存在，但內部威脅將是未來航空保安之防禦重點。

除了政治、宗教、社會、環境等因素，個人經濟狀況不佳也是 ICAO 認為可能造成恐怖主義之成因，恐怖份子若因個人意識形態或接受恐怖組織資助者，亦可能受雇於航空業成為內部威脅。自 9/11 事件以來，具有恐怖主義傾向的內部威脅日趨嚴重，因為該等人員具有航空保安專業知識，知道如何突破脆弱點，故風險極高，各單位合作的情資交換是檢測國內外新威脅的重要步驟，2006 年英美合作破獲之液體炸彈陰謀案明顯看出主動有效的情報收集對於防止非法干擾行為是極為成功的。

國外有學者分析內部威脅的形成因素包括社會、政治、文化、組織、經濟及人為因素。人為因素係指個人生活遭受之壓力，例如近親去世。社會、政治和文化因素通常體現在工作場所，包括工作績效不佳或未獲得晉升機會。甚至內部員工可能遭受恐怖分子之武力或暴力威脅。這些因素，加上脆弱點防護不周全，組織內各層級主管缺乏對航空保安管理系統 (SeMS, Security Management System) 的重視，一線人員航空保安意識不足，再加上內部員工蓄意破壞的意圖或動機，非法干擾行為就因此發生。

另內部人員是否有個人醫療、精神健康問題、財務需求增加、表達對組織、主管、工作不滿、擔心原有職位不保、受到脅迫或勒索，或懷有特殊意識形態，都可能造成內部威脅。

綜上案例，內部威脅造成的大部分非法干擾行為都有其他無辜的旅客或機組員遭受

牽連，其成因包括飛航組員、客艙組員、地勤人員、地勤代理商、機場工作人員等個人政治傾向、宗教信仰、情緒不佳、精神疾病、財務狀況、特殊意識形態等因素，分析後可以看出，僅由航空保安層面加強仍是遠遠不足的。

有解決方案嗎

部份國外研究提出不同的因應措施，但其中最關鍵的要素是必須融入更具人性化的方法，歸納六項建議措施如下：

1. 提升工作保障：

以減輕工作壓力、憂慮和疲勞並降低員工可能受外部賄賂的吸引而成為內部威脅。

2. 增加主動實施不可預測性的保安測試的頻率：

保安測試係指模擬企圖從事非法干擾行為之航空保安措施之隱藏或蓄意試驗，以確保各項航空保安管制措施之確實執行及有效。增加頻率可以對內部威脅產生威懾作用，而且不一定需要額外的資源或經費，惟將使內部人員認知到應時刻保持警覺，隨時可能被抽問或抽查，減少其對從事非法干擾行為之想法，對突發異常狀況也較有心理準備，可以更有效率的因應。

3. 加強員工背景查核及由經驗豐富的醫師進行心理評估：

背景查核及心理評估可視為組織主動性的作為，加強員工背景查核並定期複查可以了解員工的犯罪情況，組織亦應對員工提供足夠的心理支援，正式上任前的心理評估可視為該員是否適合該職位

的綜合評量一部份。

4. 加強推廣保安認知訓練：

訓練得以降低人為疏失之風險，保安認知訓練係航空保安管理系統 (SeMS, Security Management System) 之基礎，亦是推動系統有效運作之關鍵。航空保安管理部門及其他涉及航空保安作業部門均應定期完成專業訓練。其他涉及航空保安作業部門之訓練內容除與業務相關之保安規範外，亦應納入保安認知，非法干擾行為案例研討及關鍵網路保安系統，使一線人員認知到每一環節發生非法干擾行為之可能性及嚴重程度。

5. 組織內部關係和諧和公正保安文化：

兩項都是至關重要的管理理念，鼓勵一線人員遇到任何可能違規、不一致或異常狀況時主動提報，可以減少員工對公司產生負面心態或不信任感，同時減少員工和主管間的敵意或缺乏同理心。

6. 持續鼓勵自我提報：

在現今航空保安管理系統 (SeMS, Security Management System) 架構下，各組織內都建立了發生或發現保安異常事件時通報機制，甚至可選擇匿名報告，公開獎勵良好的保安意識及行為，培養員工的主動性，通常能夠有效地在威脅演變成災難性後果之前就將其暴露出來。

瞬息萬變的環境中，需要跨領域、跨國合作的整合應對，落實人員管理，只有不斷的精進，航空保安程序持續修正，相關科技設備亦應與時俱進。IATA 認為至 2040 年，內部威脅將成為航空保安的主流威脅之一，以上案例顯示出內部威脅的不同指標和預警，現職人員和退休人員均有可能成為突破口，且每一個案件均有可能造成致命性的非法干擾行為。組織必須要提供更好地預測和識別異常內部人員的方式，得以產生主動式保安措施，而非僅被動回應。

航空業無法避免要面臨突如其來之威脅及其後續不利之影響，恐怖份子和其他潛在的破壞者可能會利用混亂和不穩定的情勢對航空保安造成威脅，而組織運行的每一環節皆有可能成為脆弱點，故組織應將被動式之航空保安風險管理策略發展為主動式甚至預測式；另航空保安管理部門及其他涉及航空保安作業部門亦應主動規劃專業訓練，擴大保安查核、檢查、測試、演練之情境範圍並預先主動提出有效之航空保安加強措施，加強保安文化之推廣，使所有同仁願意主動回報異常情況，建立「全員保安」之責任機制，建立更全面更有效的航空保安防護網，減少發生非法干擾行為之可能性，確保旅客、機組員與航機之保安。✈

參考資料

- Bamaung D., Mcilhatton D., Macdonald M., Beattie R., (2016). "The Enemy Within? The Connection between Insider Threat and Terrorism."
- BEA, (2016). "Final Report Accident on 24 March 2015 at Prads-Haute-Bléone (Alpes-

結論

9/11 事件後航空業認知到同一套程序無法適用各個保安環節 (One does not fit for all)，傳統的背景調查和心理評估無法完全杜絕內部威脅。航空保安長期處於無法預測且

de-Haute-Provence, France) to the Airbus A320-211 registered D-AIPX operated by Germanwings.”

Flight Safety Foundation (2025).

<https://asn.flightsafety.org/database/events/code/SE>

International Civil Aviation Organization (2022). Doc. 8973 Aviation Security Manual. Thirteen Edition. Montreal, Canada: ICAO.

Kelly L., (2021). “Threats to Civilian Aviation Since 1975.”

Ministry of Transport and Civil Aviation of Federal Republic of Somalia, (2016). “Aircraft Accident Investigation Branch Final Report.”

Nori H., (2020). “A Review of Hijack Events by Airline Employees; with a Particular Reference to Pilot Suicide Using an Aircraft (PSUA) - An Analysis of the Triggering Factors and Current Mitigation.”

Loffi, Jon M. & Wallac, Ryan J. (2014). “The Unmitigated Insider Threat to Aviation (Part 1): a Qualitative Analysis of Risks.” Journal of Transportation Security.

Greitzer FL., Noonan CF., Kangas LJ., Dalton AC., (2010). “Identifying at-Risk Employees: A Behavioral Model for Predicting Potential Insider Threats.” U.S. Department of Energy.”

Krull K., (2016). “The Threat Among Us.” U.S. Department of Energy.

Palmer V., (2025). “Systematic literature review on insider threat: Is the Australian aviation industry complacent or just not understanding insider threat?” Journal of the Air Transport Research Society.

Zeballos M., Fumagalli C.S., Ghelf S.M., Schwaninge A. (2023). “Why and how unpredictability is implemented in aviation security— A first qualitative study.” Heliyon.

孔垂梅 (2023)。《由地緣衝突淺析航空保安風險管理》。台北：國立台灣大學。

從「人為錯誤」到「系統韌性」 IATA 人為因素國際訓練參訓心得

飛航服務總臺飛航管制員 陳妍君

星宇航空客艙安全督導 李俊瑤

華信航空航務部業務員 胡智凱

國家運輸安全調查委員會副調查官 游哲遠

中華航空企安室資深管理師 姚雋偉

在航空領域，「安全」常被視為理所當然，但在一次又一次的事件調查中，我們更加確信——安全從來不是偶然，而是無數專業人員日復一日堅持標準、持續改進的結果。今年，由飛行安全基金會承辦、國際航空運輸協會（IATA）講師授課的人為因素國際訓練課程，學員來自飛航管制、航務、客艙安全、事故調查與企業安全管理等不同專業領域的學員一同深入探討人為因素與安全管理。課程透過理論、案例、討論與模擬，讓我們重新思考錯誤的本質與組織安全文化的重要性。

在人為因素的傳統觀點中，人為錯誤常被視為事故發生的直接原因，也是調查時最容易被指向的「責任來源」。然而課程中提出的觀點顛覆了這種習慣性思維：錯誤並不是事故的根本原因，而是系統中存在缺口的訊號。講師引用 Reason 的「瑞士起司模型」說明，即使組織設計了多層防護線——程序、訓練、設備、監督與文化——每一層都可能因制度漏洞或環境變化而產生孔洞，而事故往往發生在這些孔洞不幸排成一線的瞬間。

換言之，錯誤不等於疏失，更不應被視為可歸咎於個人的結果，而是誘使我們檢視制度設計、組織文化與工作條件的契機。

課程進一步介紹 SHELL 模型，協助我們以「以人為核心」的思維分析人與制度、設備、環境與同事間的互動。透過這個模型，我們學會以更開放的角度檢視作業現場：如果人無法遵循流程，是流程不合理嗎？如果設備操作複雜，是介面設計不符合認知模式嗎？課程提醒我們，制度應為人設計，而不是要求人去勉強適應制度。在航空這樣高度標準化的產業裡，看似「小小調整」往往能降低風險並提升效率。

在情境意識與決策制定的課程中，我們透過案例探討壓力、資訊不足、突發狀況與時間限制下的決策品質。講師引用 Endsley 的情境意識模型，強調情境意識不只是知道發生什麼事，更是理解資訊與推估未來可能發展的能力。研究顯示，超過七成的操作錯誤源自情境意識喪失，而非能力不足。課程讓我們理解：良好的情境意識並非天賦，而

是建立在持續的監控、交叉檢查與團隊溝通之上。

疲勞與壓力管理也是課程的重點之一。課堂上聽到的一句話令人印象深刻：「連續清醒 17 至 19 小時，其認知狀態相當於酒測值 0.05%。」航空工作者常在跨日、夜間與高度專注的任務中運作，疲勞管理不是個人選擇，而是組織責任。透過 Fatigue Risk Management System (FRMS)，我們學習如何將疲勞視為風險進行管理，而不是用意志力硬撐過去。在零容錯的產業中，疲勞與壓力是看不見、卻最危險的風險來源。

課堂中有關於 SOP 與檢查表的討論，強調依程序按部就班並非只是背誦文字，而是深入理解標準作業流程存在的價值。SOP 並不是為了限制，而是為了確保每次執行都維持品質與一致性；檢查表也不是提醒「不熟練」，而是安全操作的支撐。講師提醒：「真正的專業不是記得所有步驟，而是在最緊張的時刻，還能遵循標準。」

課程最後介紹 TEM (Threat and Error Management)，強調威脅與錯誤無法完全避免，關鍵在於辨識與管理。我們學會以 TEM 的思維看待日常作業：威脅從不是問題本身，而是提醒我們提高警覺；錯誤不是要避免，而是要早點發現與恢復。TEM 的價值在於，它承認錯誤存在，卻給予人修正錯誤的能力。

這五天的訓練重新塑造了學員看待安全與錯誤的方式。安全不再只是程序與設備的堆疊，而是人與系統之間的動態平衡；錯誤不再是需要被掩蓋的東西，而是推動改善的開始。真正的安全文化，是每一位從業人員

都願意說出問題，而不是隱藏問題。正如講師所說：「錯誤是資訊，不是罪。」航空的複雜性與風險永遠存在，但當我們願意學習與分享，錯誤將不再是終點，而會成為系統進步的起點。✈

透過「組員資源管理」與 「威脅與疏失管理」進行 溝通以改善飛安

蕭光霈 譯



美國作家暨飛行員 Ernest K. Gann 曾就所謂之航空業黃金時代（從 1930 年代末期到 1950 年代）經歷下筆為文。在他筆下世界中，機長如同一國之尊，鮮少受到質疑。Gann 於其回憶錄《命運是獵人》(Fate is the Hunter) 中，描述彼擔任副機長時之角色，他寫道：「我被要求依指令操作起落架與襟翼，以及記錄日誌與飛行計畫，且不可開口說話。」

然而黃金時代並非那般燦爛。單就美國而言，在 1959 年每 100 萬班次起飛就發生 40 起致命事故。時至今日，致命事故率與當時相比已是微不足道；根據多方計算，此數字與零相去不遠。

在美國世界飛安基金會與其他組織倡導下，對駕駛艙動態與溝通方面進行改進，為

改善事故率做出貢獻。副駕駛，即副機長，不再被要求必須保持沉默。機長現在被要求必須鼓勵組員提供意見，俾做出更佳決策，避免與減少失誤。應運而生的「組員資源管理」(Crew Resource Management, CRM)，其定義為：為確保操作安全、減少錯誤、避免壓力並提高效率，飛航組員對於全般可用資源之有效運用。

美國 NASA 於 1979 年主辦的一場研討會中協助建立 CRM 的概念。這場名為「駕駛艙資源管理」(Resource Management on the Flightdeck) 的研討會，召開動機係源自於 NASA 針對航空運輸事故之研究。會中發布研究指出，肇生事故的人為失誤類型包括不良之人際溝通、決策能力與領導力。

研討案例包括史上最嚴重之航空災難，即 2 架波音 747 型機於 1977 年 3 月 27 日在加那利群島 (Canary Islands) 特內里費 (Tenerife) 機場地面相撞事故。該場事故造成 583 人喪生。

當時 1 架荷蘭皇家航空 (KLM) 747 型機，於日間能見度低情況下開始滑行起飛的同時，另 1 架泛美航空 (Pan American World Airways) 747 型機於同一條跑道逆向滑行。調查發現，荷航機長：

- 未經許可即開始起飛；
- 未聽從塔臺「等待起飛」(stand by for takeoff) 指令；
- 當泛美航空班機組員通報他們仍在跑道上時，彼並未放棄起飛；

- 當飛航工程師詢問泛美 747 型機是否離開跑道時，彼斷然給予肯定答覆。

此次事故以悲劇方式顯現溝通失效時可能肇生之後果。

早期研究將 CRM 概念稱之為「駕駛艙資源管理」(Cockpit Resource Management)。NASA 復於 1986 年舉辦另一次研討會時，已將 CRM 的 C 改為代表 Crew(組員)。相關訓練內容側重於組建團隊、簡報策略、狀況覺知與壓力管理等主題。

時至 1990 年代，CRM 訓練經過演進，更能反映駕駛艙的實際環境。航空公司開始在飛機自動化進程中，納入具有 CRM 概念的模組。此舉促成發展記憶輔助 (memory aids)，在使用自動化功能時，以協助避免發生錯誤。其中一個 (記憶輔助) 用例是 CAMI，即確認 (confirm)、啟動 (activate)、監控 (monitor)、介入 (intervene)，解釋如下：

- **確認**機組員想要使用之功能；
- **啟動**是項功能；
- **監控**飛機效能；
- 如果自動化功能未達機組員預期效果，則予**介入**。

相關訓練亦開始關注人為因素，例如疲勞與恐會肇生事故的危險態度。

前述危險態度包括：

- 反權威—別告訴我該怎麼做。

- 衝動—天氣條件差強人意，但讓我們試試。
- 有恃無恐—以此方法（或進場程序），我從未出過問題。
- 逞強—規則是讓普通飛行員用的，我比普通飛行員優秀。
- 聽天由命—這有何用？

相關更加深入的策進作為，促使美國 FAA 核定一項有關航空公司訓練之重大變革，即實施「高階資格檢定計畫」(Advanced Qualification Program, AQP)。AQP 訓練中包括將 CRM 概念應用在「航線導向飛行訓練」(Line-Oriented Flight Training, LOFT) 模擬機課程中。LOFT 訓練課程中會讓機長與副機長執行 1 次從出發地到目的地之一般航線飛行。訓練過程中，他們會遭遇各種問題，從小問題如變更跑道，到重大問題如發動機故障或火警。對於大多數問題，只要航班安全完成任務，就無所謂正解或錯解。對於飛行員之評等，不僅考核他們如何操縱飛機，亦考核他們如何溝通與思考選擇方案。

透過不斷演進的 CRM 研究，人們瞭解人為錯誤無法徹底清除。從而催生 TEM 概念，亦即倘若無法清除錯誤，那要如何將其降而最低、減輕，並加以控管？TEM 源自於美德州大學「人為因素研究專案」(Human Factors Research Project) 中所進行之「線上安全稽核 (Line Operational Safety Audits, LOSA)。德州大學於 1990 年代與達美航空 (Delta Air Lines) 與大陸航空 (Continental Airlines) 合作進行駕駛艙第三席位觀察 (jump-seat observations) 工作。由訓練有素的

觀察員對失誤之起源、機組員對失誤之反應以及最終結果採記分類。

此項研究工作催生具有 3 項要件之 TEM 框架模型，要件如下：

- **威脅**—一線上工作人員無法管控之事件或失誤。威脅包括許多項目，諸如天氣、機件故障、空中交通壅塞，以及擾亂秩序的乘客。
- **疏失**—一線上工作人員採取之舉動或毫無作為，導致偏離既定或預期結果之情況。
- **不理想狀態**—一係指在非刻意狀況下，使得安全範圍減低之情形。此類狀況從程度輕微之錯誤，如轉入錯誤滑行道；大到可能造成災難之狀況，如侵入跑道。

以 TEM 為導向之訓練中，飛行員在模擬機課程結束後的任務歸詢中，會被要求找出過程中遭遇之威脅，如何處理威脅，以及結果為何。此外，航空公司開始採用先思威脅 (threat-forward) 之任務提示，來預先思考潛在問題。舉例而言，在進場提示中，機長與副機長不再採取舊有背誦進場圖表資料的陋習，而是討論預期威脅，如：「我們目的地目前有低空風切之警告。讓我們複習脫離風切程序。」或如在起飛提示中：「此次會採低能見度起飛。若你看到我偏離中線，請喊『中線』。」

出現先思威脅類型之提示，係源自於 2013 年 8 月 14 日 1 架空中巴士 A300-600 貨機於進場美國阿拉巴馬州 Birmingham-Shuttlesworth 國際機場時墜毀之事故。該場

事故造成機上僅有 2 名組員，即機長與副機長罹難，飛機亦徹底損毀。1 美國 NTSB 針對該場事故之報告指出，由於組員於其預劃進場要項改變時，並未進行重新提示 (re-brief)，他們「使自身陷入不安全狀況，因為他們對如何進場的預期情況不同」。

在 2017 年，世界飛安基金會 AeroSafety World 雜誌一篇文章指出，當時的任務提示已淪為「單向傳達、打勾過場」(one-sided, box-checking，譯注：意指徒具形式，敷衍了事) 之過程，Birmingham-Shuttlesworth 機場事故即為一例。該文倡導要採行一種更講究協同合作之任務提示概念。

為利於進行此類協作性質的任務提示，航空公司開始運用任務提示輔助工具。這些輔具可以用卡片或標語牌，將潛在威脅進行分類，例如哪些屬於個人問題、天氣、機械故障，以及其他項目。這些輔具可用以鼓勵機長與副機長進行對話，內容譬如：「你有看到其他威脅嗎？我有無漏掉什麼？」理想情況下，刻不容緩的危險當是機組員首要考量，他們才能準備更加充分以應處這些危險。

從 Gann 之職業生涯結束後數十年間，航空業界更加瞭解駕駛艙內的溝通能夠提高飛安。Gann 將其作品《命運是獵人》獻予「曾經展翅的老同行們……惜已折翼」。他在那份同行名單長達 5 頁後，結尾寫道：「他們沒我這般好運。」從他們的遭遇中汲取教訓，至今仍在造福搭乘飛機之普羅大眾。

作者：Thomas W. Young 是航空公司退休機長，曾在西維吉尼亞州空軍國民兵擔任飛航工程師教官，並在飛行員與飛航工程師

職務上取得近 12,000 小時飛行時數。✈

附註：

1. 針對此次事故可能肇因，NTSB 指稱：「飛航組員持續不穩定操作進場，並在進場過程中未能監控飛機高度，導致飛機無意間下降至最低進場高度以下，並隨後撞擊地面。」諸多肇因之一係為「顯然當儀表未及時顯示垂直剖面 (vertical profile) 時，機長未能將其意圖告訴副駕駛」。

譯自世界飛安基金會 Aero Safety World

2025 年 5 月 14 日刊載

Through CRM and TEM, communication has been key to safety improvements.

Thomas W. Young | May 14, 2025



American author and aviator Ernest K. Gann wrote of his experiences in what some call the golden age of the airlines — the late 1930s to the 1950s. He chronicled a world where captains were kings and rarely questioned. In Gann's memoir *Fate is the Hunter*, he described his role as a copilot: "I was expected to operate the landing gear and flaps on command, keep the log, the flight plan, and my mouth shut."

But the golden age was not so golden. In

1959, in the United States alone, there were 40 fatal accidents per 1 million aircraft departures. Today, the fatal accident rate is a fraction of that; according to most calculations, it hovers not far above zero.

Improvements in cockpit dynamics and communication, championed by Flight Safety Foundation and other organizations, contributed to that improvement. Copilots, or first officers, are no longer expected to keep silent. Captains

are expected to encourage crew input to make better decisions and prevent and mitigate errors. Crew resource management (CRM) can be defined as the effective use of all available resources for flight crew personnel to ensure safe operations, reducing error, avoiding stress, and increasing efficiency.

A 1979 workshop sponsored by the U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA) helped establish the CRM concept. The workshop, titled Resource Management on the Flightdeck, stemmed from NASA research on air transport accidents. Research presented at the event pointed out the types of human error that lead to accidents, including poor interpersonal communication, decision-making, and leadership.

Examples included the worst aviation disaster of all time, the March 27, 1977, collision of two Boeing 747s on the ground at Tenerife in the Canary Islands. The accident killed 583 people.

A KLM 747 began a takeoff roll in low daylight visibility at the same time a Pan American World Airways 747 backtracked on the same runway. The investigation found that the KLM captain:

- Took off without clearance;
- Did not obey the “stand by for takeoff” instruction from the tower;
- Did not reject the takeoff when the crew of the Pan Am aircraft reported they were still

on the runway; and,

- Replied emphatically in the affirmative when the flight engineer asked if the Pan Am 747 had cleared the runway.

The accident demonstrated in tragic terms what can happen when communication breaks down.

Early research referred to the CRM concept as cockpit resource management. By the time NASA held another workshop in 1986, the name had been changed to crew resource management. Training focused on topics such as team building, briefing strategies, situational awareness, and stress management.

By the 1990s, CRM training had evolved to better reflect the flight deck environment. Airlines began to include modules on CRM concepts in aircraft automation. This led to memory aids that help prevent mistakes in automation use. An example is CAMI, which stands for confirm, activate, monitor, intervene:

- Confirm the function the crew wants to use;
- Activate that function;
- Monitor aircraft performance; and,
- Intervene if the automation does not do what the crew intended.

Training also began to look at human factors such as fatigue, and hazardous attitudes that can lead to accidents.

Those attitudes include:

- Anti-authority — Don't tell me what to do.
- Impulsivity — The weather is marginal, but let's just try it.
- Invulnerability — I never have a problem with this approach.
- Macho — The rules are for average pilots, and I'm better than average.
- Resignation — What's the use?

Further refinements led to the U.S. Federal Aviation Administration (FAA) approving a major change in airline training, the advanced qualification program (AQP). AQP training includes CRM concepts put to use in a line-oriented flight training (LOFT) simulator session. The "LOFT ride" takes a captain and first officer on a normal line flight from departure to destination. Along the way, they encounter problems ranging from minor issues such as a runway change to major issues such as an engine failure or fire. For most of these problems, there is no right or wrong answer as long as the flight terminates safely. The pilots are graded not only on how they flew the aircraft but also on how they communicated and considered options.

Evolving CRM research brought an acknowledgement that human error cannot be eliminated entirely. This led to the threat and error management concept (TEM): If we cannot eliminate error, then how do we minimize,

mitigate, and manage it? The origin of TEM can be traced to line operational safety audits (LOSA) conducted by the University of Texas Human Factors Research Project (UT). During the 1990s, UT conducted jump-seat observations with Delta Air Lines and Continental Airlines. Trained observers categorized the origin of errors and the response to them, along with the result.

This research led to a TEM framework model with three main components:

- Threats – events or errors beyond the control of line personnel. Threats can include a wide variety of things such as weather, malfunctions, air traffic congestion, and disruptive passengers.
- Errors – actions or inactions by line personnel that lead to deviations from intentions or expectations.
- Undesired states – conditions in which an unintended situation results in a reduced safety margin. These conditions can range from relatively minor mistakes such as turning onto the wrong taxiway, to potentially disastrous situations such as a runway incursion.

During TEM-oriented training, pilots are debriefed after simulator sessions and asked to identify the threats they faced, how they handled the threats, and the result. In addition, airlines have begun using threat-forward briefings to stay ahead of potential problems. For example, during approach briefings, instead of a rote

recitation of data on an approach chart, a captain and first officer discuss anticipated threats: “There are low-level wind shear advisories for our destination. Let’s review the wind shear escape procedure.” Or for a departure briefing: “This is a low-visibility takeoff. Call out ‘center line’ if you see me drifting off it.”


This type of threat-forward briefing came about in the aftermath of the Aug. 14, 2013, crash of an Airbus A300-600 freighter during an approach to Birmingham-Shuttlesworth International Airport in Alabama, U.S. The crash killed the captain and first officer — the only people in the airplane — and destroyed the airplane.¹ The U.S. National Transportation Safety Board (NTSB) report on the accident said that because the crew did not re-brief when elements of their planned approach changed, they “placed themselves in an unsafe situation because they had different expectations of how the approach would be flown.”

In 2017, an AeroSafety World article noted that the Birmingham accident was an example of how briefings had become a “one-sided, box-checking” event. The article advocated a more collaborative briefing concept.

To facilitate such collaborative briefings, airlines have begun using briefing aids. These are cards or placards that organize potential threats into categories, such as personal issues, weather, mechanical problems, and others. The aids encourage conversations between captains and first officers, such as “What other threats do you see? Did I miss anything?” Ideally, the most

imminent hazards become top of mind for the crew, and they become better prepared to handle those hazards.

In the decades since Ernest K. Gann’s career, the aviation community has learned much about how communication on the flight deck can enhance safety. Gann dedicated *Fate is the Hunter* to “old comrades with wings ... forever folded.” His list of those comrades runs for five pages and concludes, “Their fortune was not so good as mine.” Lessons learned from such fortunes continue to benefit the flying public today.

Thomas W. Young is a retired airline captain and a former instructor flight engineer with the West Virginia Air National Guard. Young has logged nearly 12,000 hours of pilot and flight engineer time. 

Note

1. *The NTSB said the probable cause of the accident was “the flight crew’s continuation of an unstabilized approach and their failure to monitor the aircraft’s altitude during the approach, which led to an inadvertent descent below the minimum approach altitude and subsequently into terrain.” Among the contributing factors was “the captain’s failure to communicate his intentions to the first officer once it became apparent the vertical profile was not captured.”*

人工智慧在無線電通訊之用途

研究人員指出，其發展之系統能消除溝通誤解
與訊號傳輸微弱之問題。

蕭光霽 譯



Embry-Riddle 航空大學研究人員 Andrew Schneider (圖右)與劉建華(音譯，圖中)正與首席飛航主管 Chris Deputy 商議中
(來源: Embry Riddle/Melanie Stawicki Azam)。

依據 Embry-Riddle 航空大學 (ERAU) 研究員所言，人工智慧可用於協助飛行員與空管管制員更佳理解無線電傳輸訊息，過去這類傳輸訊息可能因駕駛艙內噪音、傳輸訊號微弱或對航空術語之誤解，而變得語焉不詳。

研究團隊指出其發展之系統使用人工智

慧以聽寫航空無線電通訊，並進行翻譯以易於理解。

Embry-Riddle 航空大學語音暨語言人工智慧實驗室 (Speech and Language AI Lab) 主任、助理教授 Andrew Schneider 表示，儘管航空業其他領域上已有自動化與技術進步，而這些年來，無線電通訊領域大體上仍在原

地踏步。

校方指稱：「此新系統使用自動語音識別技術，將無線電語音傳輸轉換為文字。其所用之自然語言處理技術，將術語標準化、語音數字與呼號格式化，並清除贅語與已標註之潛在錯誤，將這些文字進行解譯與修辭。」

對飛行員與管制員通訊進行大規模分析，將用於識別過去難以研究之語音模式、術語錯誤與安全隱憂。

Schneider 表示：「我們於此發現有得以實現另一次 (技術) 躍進的機會，協助管制員與飛行員之無線電通訊更加安全。」

校方補述，此系統還可向飛航學員提供即時回饋，協助其飛行教官找出溝通問題。

該校電機暨電腦工程學副教授劉建華 (音譯) 具有機器學習背景，彼指出與 Schneider 合作的該項研究，可提高通訊效率並減少錯誤。

彼等研究始於 2023 年，係從蒐集美國 12 座機場無線電通訊展開。

校方指稱：「相關語音資料輸入自動語音辨識工具……以建立聽寫文字稿。」

身為語言學家的 Schneider 補述，現成的 (語音辨識) 模型之平均錯字率為 80%，此亦清楚表明建立航空專用工具之必要性。劉建華研發出一種替代模型，可將錯字率降至 15% 以下。

Schneider 指出：「航空英語並非使用標準之會話語法。」「它是一種經過濃縮、高度特有之術語，並透過充滿雜訊之無線電中傳達，其間語詞會截成隻字片語，並充滿專業行話。」

波音航空暨航太安全中心 (Boeing Center for Aviation and Aerospace Safety) 副主任 Kristy Kiernan 表示，此新系統提供必要之工具，以取用質、量比例相同的資料。

她指稱：「大型語言模型能啟用全新資料來源，讓我們用以改善 (飛航) 安全。」



譯自世界飛安基金會 2025 年 10 月號刊物

AI's Role in Radio Transmissions

Researchers say their system can eliminate misinterpretation and overcome weak transmissions.

FSF Editorial Staff | October 7, 2025



Image: Embry Riddle/Melanie Stawicki Azam
Embry-Riddle Aeronautical University researchers Andrew Schneider, right, and Jianhua Liu, center, confer with lead flight supervisor Chris Deputy.

Artificial intelligence (AI) can be used to help pilots and air traffic controllers better understand radio transmissions that in the past have been obscured by cockpit noise, weak transmissions, or misinterpretations of aviation phraseology, according to researchers at Embry-Riddle Aeronautical University (ERAU).

The research team says their system uses AI to transcribe aviation radio communications

and translate them for easier understanding.

Andrew Schneider, an assistant professor who directs the ERAU Speech and Language AI Lab, said that, while other aspects of aviation have been subject to automation and technical advancements, radio communication has remained largely unchanged over the years.

The new system “uses automatic speech

recognition to convert spoken radio transmissions into text,” the university said. “Natural language processing interprets and refines that text by standardizing terminology, formatting spoken numbers and call signs, removing filler words, and flagging potential errors.”

Large-scale analysis of pilot-controller communications will be used to identify patterns of speech, errors in phraseology, and safety concerns that historically have been difficult to study.

“We see an opportunity here for another leap forward to help controllers and pilots have safer radio communication,” Schneider said.

The system also could provide immediate feedback to student pilots and help their flight instructors identify communication problems, the university added.

Jianhua Liu, associate professor of electrical and computer engineering, who has a background in machine learning and is working with Schneider, said the research can improve communications efficiency and reduce errors.

Their research began in 2023 with the collection of radio communication recordings from 12 U.S. airports.

“The audio was fed into automatic speech recognition tools ... to create transcriptions,” ERAU said.

Schneider, a linguist, added that off-the-shelf

models averaged an 80 percent word error rate, making clear the need for aviation-specific tools. Liu developed an alternative that reduced the word error rate to less than 15 percent.

“Aviation English isn’t standard conversational grammar,” Schneider said. “It’s a condensed, highly specific phraseology spoken over a noisy radio where words get clipped and specialized jargon abounds.”

Kristy Kiernan, associate director of the Boeing Center for Aviation and Aerospace Safety, said the new system provides tools needed to use qualitative data on the same scale as numerical data.

“Large language models can open up whole new data sources that we can leverage to improve safety,” she said. ✈️

無人機的通訊基礎

萬 芃 愉

一、前言 從資料到波形的旅程

我們每天使用的各種電子產品中——電話或手機語音連絡、Wi-Fi 傳輸、藍牙音樂播放——背後都有一個看不見但極其重要的過程，那就是數位或類比的資料藉由一連串變換進行傳輸與交換，簡稱為「通訊」。不同電子產品應用的技術各異，創造出林林總總、複雜又難以理解的專有名詞。為了簡化起見，可以使用「開放式系統互連」OSI（Open System Interconnection）的通訊架構，將通訊所需的功能歸納為 7 個階層，第一層為最底層，然後依續層層堆疊上去，下層功能可以提供上層使用。當然，OSI 模型並不是一種刻板的規定，像是 Internet 網際網路因為是處理地球上任意二台電腦間的資料交

換，通常使用另一種叫 TCP/IP 模型的四層網路架構。

無人機主要利用射頻技術，採行點對點的通訊方式，通訊的起點就發生在把資料轉換成為波形，相當於 OSI 的第一層「實體層」與第二層「資料鏈結層」；只要這二層的邊界定義清楚，並不需要其他階層的協助，點對點間的資料傳輸就可以完成。

「實體層」是整個傳輸過程的最底層。它扮演的角色就像是「郵差」，負責把資料從甲地傳送到乙地。郵務人員不討論資料內容的意義（那是收信人和發信人關心的事），它只在乎：「我要怎麼才把 0 與 1 傳過去？」（信封格式為何）、「是用電線、光纖，還

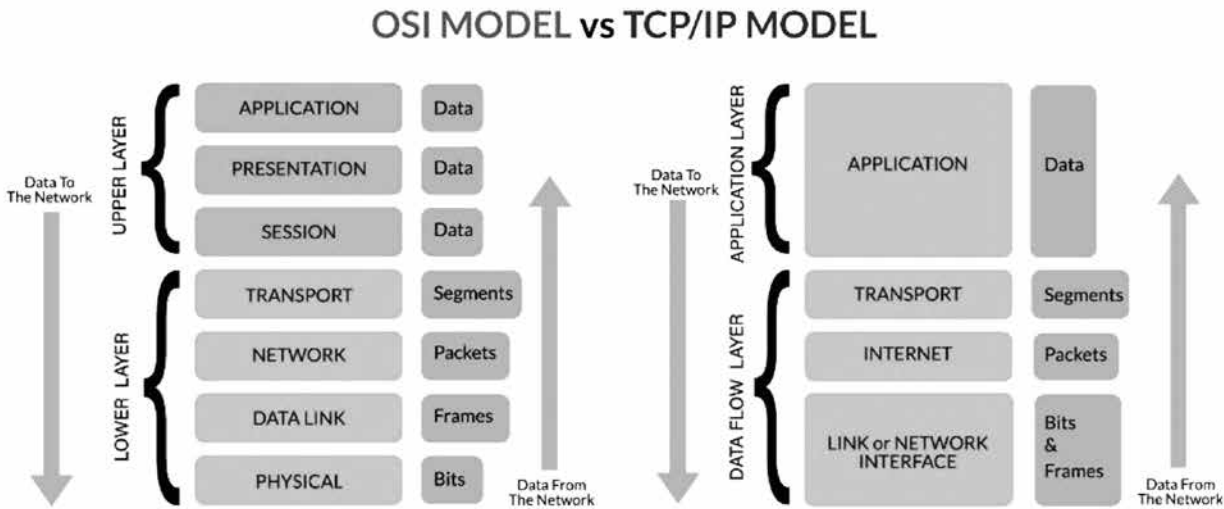


圖1. OSI 模型與 TCP/IP 模型之比較

是用無線電波？」（平信、限時掛號還是航空郵件）。「資料鏈結層」則位於實體層之上，負責確保資料在相鄰節點之間能正確且有序地傳輸。如果說實體層像是郵差運送信件，那麼資料鏈結層就像是郵局或收發室，它不僅負責收發信件，還要確認收件人是否確實收到、信件是否完整無誤。

本文利用 OSI 模型，說明如何透過這二層的相關技術，將資料轉換成形形色色的波形，再經由傳輸媒介構成無人機與地面控制站的通訊功能。

二、從資料到訊號：電腦語言的第一步

最原始的資料是文字、圖片、聲音或影像。類比的世界中，資料是以連續的「電壓」、「電流」或「電磁波」等物理量存在，而在數位的世界中，資料則被固定的「編碼法」表達為 0 和 1 的數字。例如：

- 英文「A」利用 ASCII 碼表達為 01000001；
- 中文裏「飛」利用 Unicode 表達為另一組更長的二進位數字；
- 雷達方位角或敵我識別器電碼撥定值利用稱為格雷碼的二進位編碼；
- 聲音有利用 MP3 進行壓縮與編碼；
- 影像利用 H.264 / H.265 進行壓縮與編碼。

這些 0 與 1 的編碼排列，是資訊表達的基本形式。在 OSI 的七層架構中，這種編碼其實屬於比較貼近程式的應用處理，屬於第六層呈現層（或表現層），僅次於第七層應用層。電腦之間要傳遞資料，就是想方設法把這些成串的位元（bit）送出去。

問題來了：傳輸媒介如電纜或空氣並沒有電腦般的架構，也並不認識 0 和 1。介質只能感測「電壓」、「電流」或「電磁波」的變化，所以就利用「電壓高 = 1，電壓低 = 0」、「亮 = 1，暗 = 0」或利用載波的頻率、振幅、相位的變化與組合來表示 0 與 1。這些物理量在傳輸過程中常常會因為外界干擾，而把 0 變作 1 或 1 降為 0，為了避免出錯，傳輸前還必須藉由更高等的編碼，將資料來表達為「訊號」，讓資料在傳輸過程中保有一定的正確性。

三、線路編碼：讓資料在傳輸中保持正確

把資料轉換成電訊號或無線電波傳送時，傳輸過程中難免會受線路上的雜訊干擾，例如電磁干擾、雜訊、衰減、串音，甚至是電纜或無線路徑上的反射，這些因素都可能讓原本的 0 和 1 被誤判成相反的值，導致接收端解讀錯誤。為了確保資料內容能被正確傳送，可以在傳送前加上「檢查碼」（Checksum）或「糾錯碼」（ECC, Error Correction Code），讓接收端能檢查、偵測、甚至修正錯誤，確保資料的完整與正確。

這個過程就像「寄信」前，先在信封上寫清楚寄件人、收件人（結構化的資料格式），內文再附上「對照表」或「驗證碼」來防止內容被竄改，若信件途中遺失或破損，郵局或收發室（通訊協定）還會自動要求寄件人重新寄送。

3.1 錯誤檢測（Error Detection）

錯誤檢測的目的，是讓接收端知道「資料有沒有錯」，但不一定能直接修復。常見的方法包括：

- 奇偶位 (Parity Bit)：每一組資料會再加上一個位元，使整體中「1」的數量為偶數或奇數。若接收端發現不符，代表中途有錯。優點：簡單快速；缺點：只能偵測到單一位元錯誤。
- 校驗和 (Checksum)：發送端把所有資料位元加總後取反碼作為「校驗碼」。接收端重算一次，比對結果即可發現資料有無異常。優點是偵錯率高；缺點是無法自動修正資料。
- 循環冗餘檢查 (CRC, Cyclic Redundancy Check)：將資料視為一個多項式，透過模二除法產生「餘數」作為檢查碼。接收端同樣計算一次，若餘數不符，就代表有錯。優點是對連續錯誤偵測能力極強；缺點是只能發現錯誤，仍然無法自行修正。電腦外部硬碟傳輸資料時使用這種檢查方式。

3.2 錯誤更正 (Error Correction)

錯誤更正 (ECC, Error Correction Code) 則更進一步，不僅「偵測錯誤」，還要「自動修正」。這種方法會在資料中加入額外的「冗餘位元」，讓接收端能判斷哪一個位元被破壞，並自動還原原始內容。常見技術如下：

- 漢明碼 (Hamming Code)：古典 ECC 技術。它在每幾個資料位元中穿插檢查位元，形成特定數學關係。當有一個位元錯誤時，系統能直接推算出是哪一位元錯誤並自動修復。應用於電腦內部記憶體與早期的通訊系統；
- 里德-所羅門碼 (Reed-Solomon Code)：數位通訊技術的中流砥柱。它能修正「連續錯誤」或「整段遺失」的資料，廣泛應用於 CD、DVD、數位電視、影像傳輸

等。聆聽有刮痕的 CD 碟時仍能順暢播放，就是靠 R-S Code 自動補足缺失的資料；

- 卷積碼 (Convolutional Code)：Turbo Code、LDPC 等卷積碼屬於進階的錯誤編碼技術，可提供極佳的更正效果。在無線通訊 (例如 Wi-Fi、LTE、5G) 中，訊號環境極不穩定，幾乎所有的無線標準都採用這類編碼技術來保持訊號的可靠性。在雜訊比極高的環境中，這種技術也能保持高傳輸速率與低錯誤率。

3.3 自動重傳要求協定 (ARQ, Automatic Repeat reQuest)

即使有再強的錯誤更正能力，也不可能達到「零錯誤」。因此在許多網路通訊協定中，若接收端偵測到錯誤、或資料遺失，就會「要求發送端重新傳送」，這就是自動重傳要求 (ARQ)；它並不直接修復資料，而是靠「回報與重傳」來保證整體正確，在 OSI 網路模型中，ARQ 由第二層資料鏈結層來控制。常見類型包括：

- 停止 - 等待 ARQ (Stop-and-Wait ARQ)：發送端每送一個資料封包，就等待接收端回覆「ACK (收到)」或「NAK (錯誤)」。若超時沒收到回覆，則重新發送。優點是簡單可靠；缺點則是效率不高，僅能適用於低速通訊；
- 連續 ARQ (Go-Back-N ARQ)：發送端可以連續發送多筆資料，但若接收端發現某一筆錯誤，則要求從該點之後全部重傳。優點是可以提升傳輸速率；缺點是重傳成本較高；
- 選擇重傳 ARQ (Selective Repeat ARQ)：最先進的方式。只要求重傳錯誤的那幾個資料包，其他正確的就保留。效率高、可靠度強，但系統設計相對複雜。

這些機制常與前述的 錯誤檢測（CRC）搭配使用：CRC 負責「發現錯誤」，ARQ 負責「補救錯誤」，兩者結合讓資料在各種惡劣環境中依然正確無誤。

線路編碼可以把這整個過程想像成「三層防護」：這三層機制相輔相成，組成了現代通訊中不可或缺的「可靠傳輸架構」。舉例來說：

- 在 Wi-Fi 或 5G 中，會同時使用 LDPC 編碼 + CRC 檢查 + ARQ 重傳；
- 在硬碟或記憶體中，依靠 ECC 編碼 來即時修復位元錯誤。

值得注意的是，在 網際網路 TCP/IP 機制 中，也有個叫 Checksum + ACK/NACK 的重傳機制，以確保每個封包能正確從網路端送達到另一個網路端，但這是屬於終端對終端的 TCP「傳輸層」管理機制，而不是由負則直接點對點的 OSI 第二層「網路鏈結層」達成的。

四、 從比特到串流：資料變成可傳送的連續訊號

經過線路編碼後，一連串的 0 和 1 排成「串流」（Serial Stream）等等近一步的加工。在此階段，訊號仍然停留在設備內部或有限場域內利用電線或光纖等實體媒界進行交換，也稱為「基頻（Baseband）」傳輸，傳送的内容是完成編碼且尚未被調變的原始電壓、電流或相位等物理量，並執行兩個端點握手後的流量協調，稱為流量控制 (Flow Control)。

常見的基頻傳輸技術包括：

- 串列傳輸（Serial Transmission）：資料

一個位元一個位元傳出，例如 USB 埠、UART 埠、RS-232 埠；

- 並列傳輸（Parallel Transmission）：同時用多條線傳多個位元，如早期電腦連接印表機使用的 PRNT 埠。線越多越容易彼此干擾，多線並存也造成重量與成本的增加，基頻傳輸多改採用高速的串列傳輸，而捨棄了並列傳輸的作法。

五、 類比資料轉為與數位訊號的取樣編碼

電腦資料經過編碼後本質上就是 0 或 1 的離散式資料，但大自然產生的資料（或稱為信號）大多以類比型式存在。類比資料可以使用類比調變轉化為類比訊號傳輸，或經過編碼轉化為離散型式，再作誤碼控制與調變後傳輸。如果要透過數位方式傳送一段類比的聲音或影像，就必須先「取樣」與「量化」：取樣是把聲音波形每隔固定時間量測一次（取樣率）。量化是把每次取樣得到的振幅轉成二進位數字（量化位元）。例如 CD 唱片的音樂採用 44.1kHz 的取樣率與 16 位元量化，也就是每秒取樣 44100 次，每次用 16 個位元記錄聲音高度。

常見的類比轉數位取樣編碼方法包括「PAM」、「PCM」、「DM」等：

- PAM（Pulse Amplitude Modulation）：脈衝振幅調變，用不同高度的脈衝表示不同的訊號值；
- PCM（Pulse Code Modulation）：最標準的數位化方式，先取樣、再用二進位碼表示振幅。電話語音、音訊壓縮都從這裡開始；
- DM（Delta Modulation）：只記錄「變化方向」，可以大幅減少資料量。

取樣編碼的目的，是把連續的類比訊號轉成一串可以用數位方式傳送的字碼，例如將聲音數位化，因為使用的是一連串規律的脈波信號作基準，所以有一個名詞叫脈波調變（Pulse Modulation）。脈波調變雖然被稱為「調變」，但原則上並不用來調制訊號進行遠距傳輸。通訊通道上使用的「數位調變」指的是結合連續波與數位訊號的 ASK（Amplitude Shift Keying，振幅鍵移調變）、FSK（Frequency Shift Keying，頻率鍵移調變）、PSK（Phase Shift Keying，相位鍵移調變）與 QAM（Quadrature Amplitude Modulation，正交振幅調變）等技術。

六、 連續波調變：讓訊號能遠距離傳送

資料編成訊號後，因為基頻的頻率有限，造成訊號傳輸速度與距離的瓶頸。因此，我們需要「調變（Modulation）」技術，把訊號疊加到某個連續性的「載波（Carrier）」上，讓訊號能傳輸到遠處。連續波調變（Continuous Wave Modulation）的原理，就

是讓載波的某個特性（振幅、頻率、相位）依據訊號的變化而變動，分為類比與數位兩種。類比的連續波調變有 AM（振幅調變）、FM（頻率調變）、PM（相位調變）等三種方式，數位的連續波調變則有對應的 ASK、FSK、PSK 及結合振幅與相位的 QAM 等四種方式，共計七種如下表。無論數位調變或類比調變，載波一定都是以類比的連續波型式存在。

七、 展頻技術（Spread Spectrum）：使訊號更穩、更難被干擾

「線路編碼」針對資料進行數學運算處理後，可以解決來自內部的干擾因素；至於外部的環境干擾，就要靠另一種稱為「展頻」的抗干擾技術，展頻後訊號可以被更分散在連續波調變的頻譜中，除了抗干擾也可以降低通訊內容被截獲的機率，故最早用於軍事通訊，再逐漸擴散至民用裝置，目前在無人機應用上已有很成熟的產品。例如遙控器大廠 Futaba 就有好幾種採用不同 SS 技術的專業遙控器，從而避免了傳統航空模型在同一

表一：常見類比與數位調變

調變名稱	改變的特性	常見用途
AM	載波振幅	AM 廣播、TV(影像)
FM	載波頻率	FM 廣播、遙控器、TV(聲音)
PM	載波相位	數位通訊
ASK（Amplitude Shift Keying）	數位版 AM	無線滑鼠
FSK（Frequency Shift Keying）	數位版 FM	藍牙、對講機
PSK（Phase Shift Keying）	數位版 PM	普通 Wi-Fi、4G、5G
QAM（Quadrature Amplitude Modulation）	結合振幅與相位變化	ADSL、Wi-Fi 6

表二、多工通訊技術

方式	原理	應用
FDMA（Frequency Division Multiple Access）	每個使用者分配不同頻道	APMS 類比式行動電話
TDMA（Time Division Multiple Access）	依時間切割，每人輪流發送	2G 行動通訊
CDMA（Code Division Multiple Access）	不同使用者的資料以不同密碼運算發送	3G 行動通訊
OFDMA（Orthogonal Frequency Division Multiple Access）	基於 OFDM 技術把頻率切成很多子頻道，互不干擾	4G 行動通訊
SDMA（Space Division Multiple Access）	用不同天線方向分離訊號	5G 行動通訊

場所使用時，航模間控制訊號相互干擾的問題。展頻通常分為「跳頻展頻（FHSS）」與「直序展頻（DSSS）」兩種方式。

- 跳頻展頻 FHSS（Frequency Hopping Spread Spectrum）
就像講話時不停換頻道——訊號在多個頻率之間依事先律定的順序快速跳躍，避免被干擾或竊聽。藍牙使用 FHSS 技術；
- 直序展頻 DSSS（Direct Sequence Spread Spectrum）
把經過二進制 PSK 或四相 PSK 調變後的訊號，再用一組更長的「擴展碼」表示，讓訊號能分散到更寬的頻帶中，即使有部分雜訊也能還原原始資料。Wi-Fi（802.11b）和 CDMA 手機使用這種技術。

八、 多工技術：讓多人同時使用同一頻道

如果只有一個人能用一個頻道，那無線網路有限的資源就會顯得很擁擠。於是發明了「多工（Multiplexing）」技術，讓多個使

用者能幾乎同時地使用相同的頻寬，最具代表性的就是行動通訊裝置。表二依行動通訊的發展順序，列出其所運用的多工技術：

這些技術讓現代網路能同時支援上千、上萬人同時上網，而不互相干擾。無人機的影像傳輸使用一種更先進的編碼式 (Coded) 的 OFDM 多工技術，將影像數據分由多個低速率的子通道，透過正交的載波傳輸，並加入糾錯碼以抵抗衰落和干擾，具有低延遲、長距離、高畫質等優點。

九、 從有線到無線：傳輸媒介的演進

- 實體層的傳輸媒介有有線和無線兩種傳輸方式：
- 有線（Wired）：電話線、光纖、同軸線；
 - 無線（Wireless）：利用電磁波在空間中傳輸。

物理上，有線與無線傳輸的挑戰大不同，過去無線傳輸曾取代過大部分的有線傳輸，近幾年因光纖通訊的發展及抗干擾的需

求，連天空中飛行的無人機都出現了有線傳輸的版本！有線傳輸也並不只限於基頻訊號，在許多場合也可以傳輸射頻訊號，如短波收發機至天線間的同軸線以及微波雷達使用的波導等。

表三、有線與無線通訊的傳輸媒介比

項目	有線通訊	無線通訊
傳輸距離	長，受限於線材阻抗	較短，受干擾影響
頻寬	可控且穩定	頻寬有限且共享
噪聲干擾	可遮蔽	需抗雜訊技術
成本	拉線成本高	設備成本高

應用上常常把有線與無線兩者相結合，例如以有線方式讓光纖到家（FTTH）後，再利用無線的 Wi-Fi 建構家庭網路環境；或是在某些戰術環境下，無人機地面控制站間先相互用光纖連接，再使用同一套收發機與天線，發射無線信號以多工方式進行同時多機導控。

十、通訊技術應用流程

前面介紹的實體層與資料鏈結層的通訊，看似抽象其實相關案例在我們日常生活中隨處可見。每當我們傳送照片、觀看影片、遙控無人機時，這些編碼、調變、展頻與多工等技術就默默在背後運作。OSI 模型中「實體層」與「資料鏈結層」相互結合，就可以完成無人機與地面控制站間的「點對點」通訊作業，其流程歸納如下：

1. 資料形成：電腦將人類語言（文字、圖片、聲音）轉成數位位元；
2. 線路編碼與錯誤與流量控制：加入糾錯、檢查與流量控制的機制；
3. 取樣與數位化：若是類比訊號（如聲音），先轉成數位形式；
4. 連續波調變：把訊號調變到載波上，變成可傳送的電磁型態；

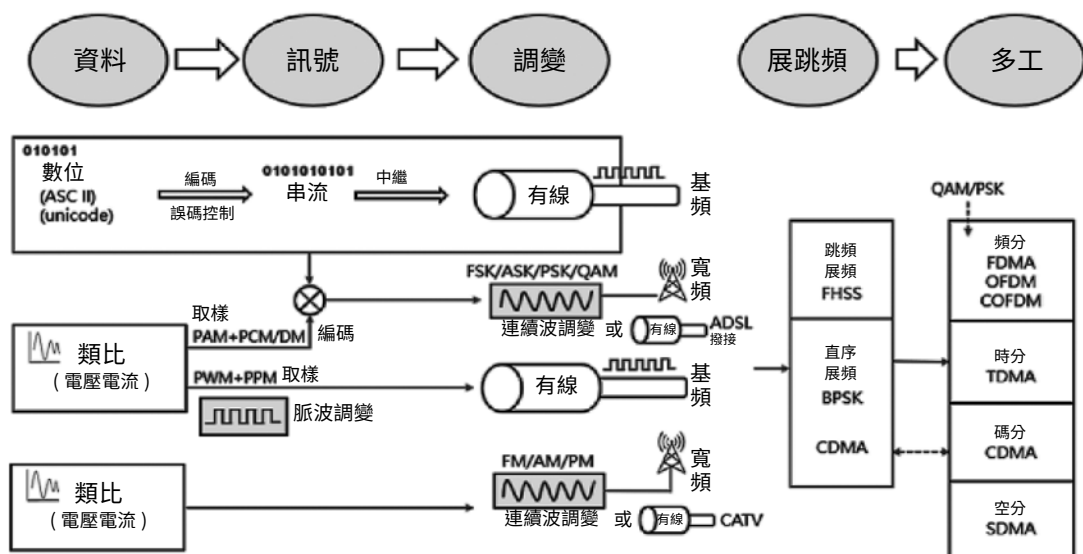


圖2. 通訊技術流程圖

5. 展頻與多工：分配頻道、時間、代碼或空間，可抗干擾或多人共用；
6. 傳輸媒介：透過有線或無線的物理通道送出資料；
7. 接收端解調與還原：將 6.-1. 反向操作，取回原始資料。

十一、結語：從資料框的連結到智慧化的通訊

從最初的「資料 → 訊號 → 波形」到「展頻、多工與智慧化調變」，通訊的每一層技術都是為了讓資訊在物理世界中得以穩定、安全且高效率地傳遞。對無人機而言，這套通訊機制更是任務執行的核心基礎。

隨著人工智慧與高速運算技術的演進，傳統的實體層與資料鏈結層不再只是單純的訊號傳輸介面，而逐漸演化為智慧化、自我調整的通訊平台。一些較具發展潛力的先進技術如下：

- 自適應調變與編碼（Adaptive Modulation and Coding, AMC）：系統能依據即時的訊號品質與通道條件，自動切換調變模式（例如由 QPSK 轉為 64QAM）或編碼方式，在干擾嚴重時可維持傳輸穩定，在環境良好時亦可提升速率。目前規劃應用在 6G 行動通訊；
- 無線光通訊技術：一種利用可見光、紅外線等光訊號在自由空間（空氣、真空等）中傳輸的技術，主要優勢在於極高的頻寬和傳輸速度，例如利用可見光傳輸數據的 Li-Fi 技術，以及用於衛星通信或數據中心等的高速傳輸技術；

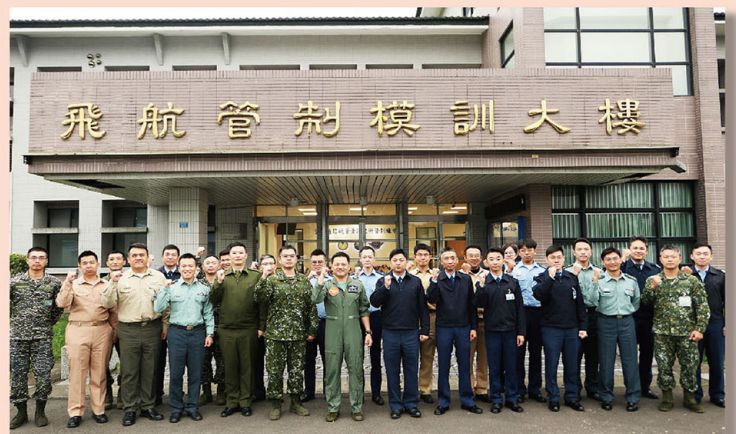
- 智慧化干擾消除與頻譜管理：結合 AI 與機器學習，動態辨識干擾源，調整頻道分配與功率控制，確保鏈路穩定與通訊安全；
- 實體層加密：傳統加密技術都是在資料內容或信道安全上對數據進行處理以防止竄改或偽冒，從實體層著手則是讓不相干的人根本「聽不到」訊號的傳輸。

這些林林總總的技術使「實體層」與「資料鏈結層」不再只是「資料的搬運工」，而成為具有感知（Sensing）與調適（Adaptation）能力的智慧通訊基礎。從實體層到資料鏈結層的完整流程，是現代無人機點對點通訊運作的「神經網路」或「血脈」，理解這一套機制，不僅可理解無人機的通訊基礎，更可以明白整個陸空通訊系統，是如何以看不見的方式連結與運轉。





114年10月13日至10月16日舉辦安全管理系統(SMS)民航專班



114年本會辦理「國軍風險管理教育訓練」合計2班8梯次，訓練重點以「安全管理系統(Safety Management System, SMS)」為教學理論基礎，實施各梯次課程講授，精進部隊整體運作安全維護與意外事件之預防，強化國軍部隊整體戰力。



2025年航空保安研討會於11月28日假民航局國際會議廳舉行，由交通部民航局、中華航空事業發展基金會、飛安基金會與中華航空公司共同舉辦。



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