

2024年飛行安全半年刊 **FLIGHT SAFETY**

BI-ANNUAL MAGAZINE

2024



FLIGHT SAFETY January-June 2024

非賣品

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



113年3月11-15日航空安全管理班



113年4月14-18日SMS普通班

目 錄

Content

2024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 劇烈中小尺度對流系統對飛航安全之影響	林得恩	P.03
03 2023年飛航安全報告書	邁德	P.16
2023 Safety Report	Flight Safety Foundation March 2024	P.31
04 第76屆世界飛安高峰會與會記錄摘要	游惠宇	P.50

無人機資訊

05 從頑童到紳士－eVTOL航空器技術特點與 發展現況	孟廣運、徐智原	P.67
---------------------------------------	---------	------



編者的話

飛安基金會

雷雨、地面強風（風速 34 浬 / 小時以上）、颱風是臺灣每年 5 月至 9 月經常發生的不良天候，本期出刊之際正逢台灣進入盛夏時節，因此特別邀請航空氣象專家林得恩博士撰寫「劇烈中小尺度對流系統對飛航安全之影響」一文，提醒讀者天氣這個不容小覷的飛安因素。另外，民航局標準組游惠宇教官撰寫的「第 76 屆世界飛安高峰會與會記錄摘要」一文，則分享會議期間所蒐集到的最新飛安資訊，所提供的與會心得與建議內容極為豐富，值得一讀。

會員投稿中另有一篇譯作「2023 年飛航安全報告書」，利用世界飛安基金會「航空安全網路」(Aviation Safety Network, ASN) 的資料庫數據，對過去一年的國際飛安情勢作完整的盤點；無人機資訊方面則有「從頑童到紳士-eVTOL 航空器技術特點與發展現況」1 篇，對 eVTOL 航空器的前世今生作深入淺出的介紹，希望能帶給讀者更多的技術資訊。

上半年的會務推動中，除了整合會員團體的專業師資群，完成了「航空安全管理班」、「安全管理系統 (SMS) 普通班」、IATA「疲勞風險管理訓練」等課程，也持續將飛行安全的理念與作法，擴散至「國軍風險管理班隊」中，使飛安管理的專業及使命，能繼續傳承下去。✈

劇烈中小尺度對流系統對 飛航安全之影響

林 得 恩

國立臺灣大學 氣候天氣災害研究中心

摘 要

劇烈對流系統所伴隨的天氣現象（如亂流、閃電、雷暴、強陣風和風切變等）是飛行中最危險的潛在環境因素之一。然而，我們對於這些現象發生的環境條件特徵與對流結構特性的理解仍然有限，這使得在預報診斷及守視掌握上面臨嚴峻的挑戰。劇烈對流系統對飛行安全構成重大威脅，深入研究其環境條件特徵與對流結構特性，並提升預報和監測技術，是提高飛航安全的關鍵手段。

尤其是中小尺度的對流天氣系統，由於其時空解析度的不足，加上延時發展劇烈，常是肇致飛安維護守視的監測重點。本文透過對 2008 年 6 月 4-5 日梅雨鋒面伴隨中尺度對流系統 (MCS) 及中尺度渦旋 (MCV) 的綜觀環境特徵分析，揭示了劇烈對流性降水的生成與誘發機制。研究結果強調了潛熱釋放在對流發展中的關鍵作用，並指出需要進一步提升數值模式對臺灣南部地區降水的預測能力。這些發現對提升飛航安全作業中的預報和應變能力，具有重要的實質意義。

初步結果顯示，研究個案期間，臺灣附近及南海地區受到梅雨滯留鋒面影響，低層風場呈現一顯著風場切變存在的環境，期間鋒面有一中尺度渦旋生成於臺灣海峽海部，此渦旋環流中心的第一、四象限伴隨較劇烈之中尺度對流系統發展，該對流系統於 6 月 5 日移入臺灣南部地區，並造成當日南部沿海地區日累積降雨量高達 229 毫米現象。分析顯示此中尺度渦旋南面有一低層噴流存在，持續將南海一帶之暖、濕空氣帶入至氣旋南側及東南側，該區為一強輻合區，同時，高層之輻散明顯增強，配合中高層的槽線系統移入，中低層的位渦 (PV) 增強，提供對流系統更利發展的條件，是個案中中尺度對流系統發展的重要激發機制。再由水氣收支診斷顯示，水平方向的水氣通量輻合為供應個案系統發展的主要水氣來源。

關鍵字

梅雨鋒面、中尺度對流系統 (MCS)、中尺度渦旋 (MCV)

一、前言：

隨著航空技術的進步，飛航安全標準也在不斷提升。然而，大氣環境中的劇烈對流天氣現象仍然對飛行構成了重大威脅。通過提升氣象預測技術、加強實時監測和深入分析劇烈天氣的發生條件和誘發機制，我們

可以更好地面對這些挑戰，藉此確保飛行安全。瞭解劇烈天氣發生的潛在環境和因子，對於飛行員、航空公司和氣象服務部門來說，都是確保飛航安全的重要一環。其中，劇烈對流所伴隨之亂流、閃電、雷暴、強陣風或風切等天氣現象，更是飛行中最危險的潛在因素。

在臺灣地區，每年五、六月春末夏初時，為冬季東北季風與夏季西南季風的轉換期，是為「梅雨季」。此時，副熱帶太平洋高壓與大陸移動性高壓提供有利鋒生的運動變形場，形成自日本向西南延伸經臺灣至華南附近的鋒面（林，2019；林，2007），稱為「梅雨鋒面」。根據氣候統計，每波梅雨鋒面通常影響臺灣的時間為 1.58 天左右，它和中緯度鋒面的不同點在於水平溫度梯度很小，但是濕度、相當位溫水平梯度很大，而且低對流層存在明顯的風切線。梅雨鋒面是一個綜觀尺度的現象，但造成豪大雨的主要天氣系統，卻常常是伴隨鋒面上的中尺度對流系統（Mesoscale Convective System, MCS）。在此時期，伴隨梅雨鋒面的組織性中尺度對流系統經常在華南地區生成之後循著鋒面東移，並導致所經地區的豪大雨發生，造成嚴重災害（Chen，1992；林，2010）。Fang(1985)指出，伴隨梅雨鋒面或鋒面低壓之有組織且生命期持久的中尺度對流系統是造成豪大雨及暴洪發生的最主要原因。中尺度對流系統內部氣流結構（前側上升氣流與後方下沉氣流）較一般積雲對流胞持續更長的生命期、有組織性的線狀發展排列特徵，且常發現有中尺度渦旋（Mesoscale Convective Vortex, MCV）伴隨於中尺度對流系統中，並造成環境不穩定度大幅提高，對我飛安維護造成嚴重的挑戰。

根據過往觀遙測經驗顯示，中尺度渦旋是中尺度對流系統中的重要現象，具有顯著的氣象特徵和潛在的飛航安全威脅。中尺度渦旋通常伴隨著強烈的對流活動，這些活動可能會對飛機的操作和乘客的安全構成重大威脅。中尺度渦旋常易生成於大型對流系統的後部，並且在系統衰減或移動過程中形成。它們的直徑通常為幾十到數百公里。渦

旋結構內部的環流可以持續數小時到數天，並且往往伴隨著顯著的降水和風場變化。而中尺度渦旋能夠顯著影響局地的天氣條件，包括降水模式、風場分布和溫度變化；加上，渦旋的環流能夠持續供應暖溼空氣，進而促使對流活動的持續和加強。

2008 年 6 月 4 日至 5 日期間，梅雨鋒面滯留於臺灣地區，其所伴隨之中尺度對流系統亦觀測到中尺度渦旋伴隨其中，該有組織之對流胞由海面移入臺灣南部地區，並造成豪大雨之劇烈天氣。本文將透過資料進行診斷分析，探討當時大氣綜觀環境所呈現的特徵現象。使用資料為美國國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction / Department of Energy, NCEP/DOE) Reanalysis 經緯度網格再分析場資料。該資料水平經緯度網格解析度為 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ ，垂直有 26 層，每日有四筆（分別為 0000、0600、1200 及 1800 UTC）；藉由氣象量場的診斷分析，分析臺灣南部地區劇烈對流之降水過程與誘發機制，藉以提供飛航作業面臨劇烈天氣變化時之預先因應及防範作為。

二、綜觀環境概述：

圖 1 顯示的海平面氣壓及風場分佈圖，揭示了 2008 年 6 月 4 日至 5 日期間，臺灣附近的大氣狀況。這段時間內，臺灣地區受到一滯留鋒的影響，鋒面由日本南方海面向西南延伸，經臺灣地區一直延伸至大陸華南沿海一帶。滯留鋒為一條延伸的低壓帶，其位置從日本南方海面開始，向西南方向延伸，經過臺灣並到達華南沿海。在此區域內存在較強的氣象動力和熱力對比，是劇烈天氣現象的潛在觸發區。從 6 月 5 日 0000

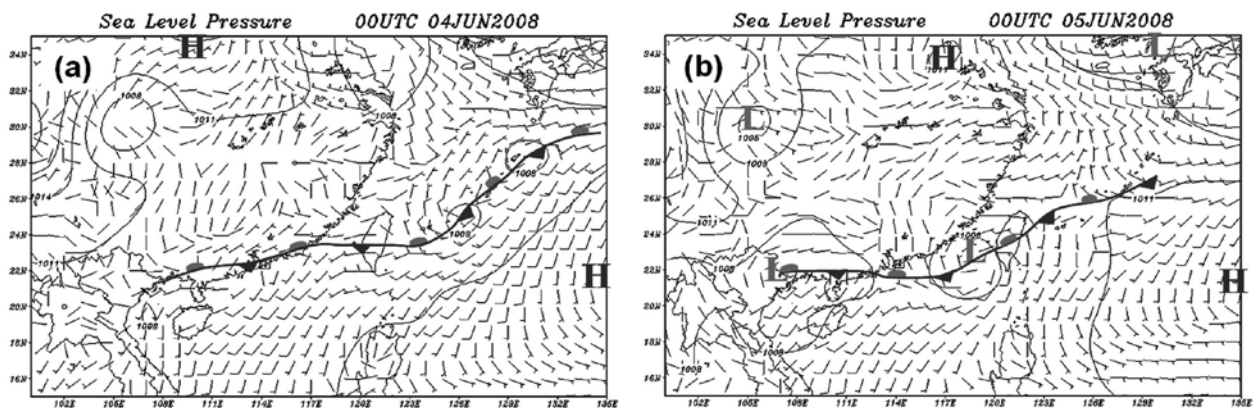


圖1 2008年6月(a) 4日及 (b) 5日0000 UTC海平面氣壓（實線，間距為3hPa）及1000 hPa的風場（全、半桿風標分別表示5、 2.5ms^{-1} ）。

UTC 的氣壓場分析顯示，鋒面帶上形成了一個中尺度低壓區，位置在臺灣海峽南部地區。這個中尺度低壓區是滯留鋒面與局地大氣條件共同作用的結果。中尺度低壓區的生成通常伴隨著顯著的風場變化和對流活動的加強。低層大氣中的風速和風向隨著鋒面和低壓區的影響發生顯著變化。在中尺度低壓區附近，可以觀察到強烈的輻合區域，這有助於促進對流系統的發展和維持。渦旋環流的存在使得風場呈現旋轉特徵，尤其在低壓區的南側和東南側，形成強烈的對流輻合區。

再從紅外線衛星雲圖觀測（圖2）資料顯示，6月4日1700 UTC，海峽南部地區開始有對流雲系形成，對流雲系隨時間逐漸增強，並朝臺灣地區接近。6月4日2100 UTC，此對流系統前緣已移至臺灣南部沿海，中尺度對流系統組織發展完整，並呈東北-西南條狀分佈。6月4日2200 UTC，組織性對流前緣雲系已移入臺灣南部地區，雲系持續發展。到了6月5日0000 UTC，對流雲系達到最強，持續移入臺灣地區。可見光衛星雲圖觀測（圖3，6月5日0000 UTC至0900 UTC）也顯示，每三小時連續

的可見光衛星雲圖呈現，強對流雲系後方的雲系呈氣旋式分佈，氣旋環流中心清晰可見。雲系厚度較淺，移動方向跟隨強對流雲系之後。氣旋式雲系隨對流雲系減弱後亦隨之減弱。再從雷達回波圖觀測整合雷達回波圖（圖4），可以看到6月4日至5日，位於海峽上的回波呈勾狀分佈。勾狀結構於前緣回波持續進入臺灣南部陸地後逐漸破壞。強降水回波分佈於氣旋環流中心東側（第一、四象限），雲系發展較為厚實，伴隨較強之降水現象。西側降水則明顯偏弱，多為層狀雲系分佈。6月5日0000 UTC時，氣壓場分析顯示，鋒面帶上形成了一個中尺度低壓區，位置在臺灣海峽南部地區。此時，中尺度渦旋環流中心的第一、四象限伴隨較劇烈之中尺度對流系統發展。渦旋南面有一低層噴流存在，持續將南海一帶之暖、濕空氣帶入至氣旋南側及東南側，該區為一輻合區。再者，高層之輻散明顯增強，配合中高層的槽線系統移入，中低層位渦（Potential vorticity, PV）增強，造成對流系統發展。強對流組織移入臺灣南部地區，並造成南部沿海地區日累積降雨量高達229毫米（圖5），強降水回波集中於氣旋環流中心東側的第一、四象限。

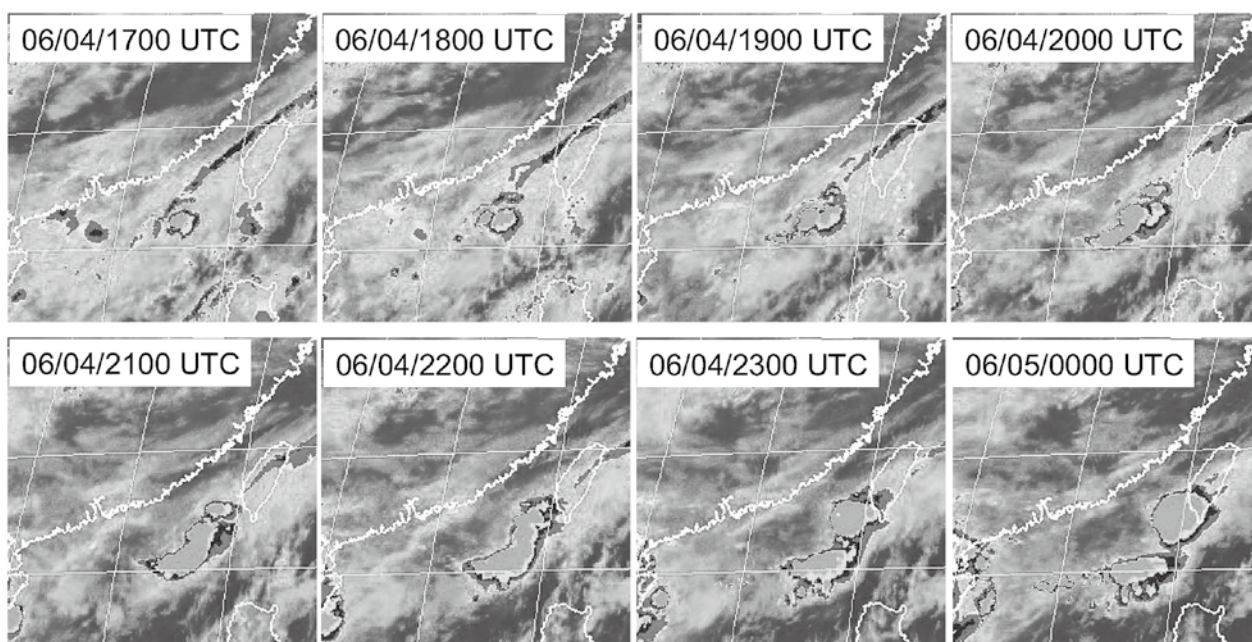


圖2 2008年6月4日1700 UTC至5日0000 UTC每小時連續之紅外線衛星雲圖。

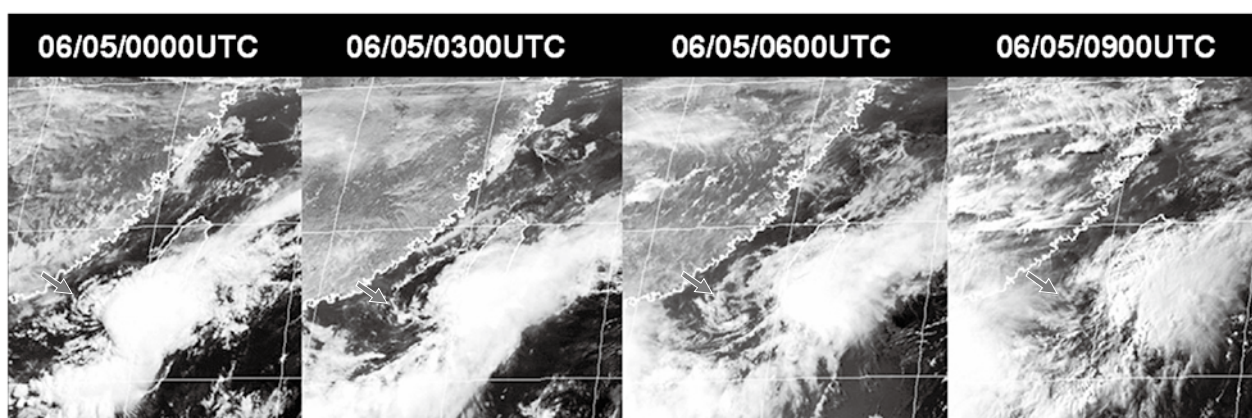


圖3 2008年6月5日0000 UTC至0900 UTC每三小時連續之可見光雲圖(箭頭處為氣旋環流雲系)。

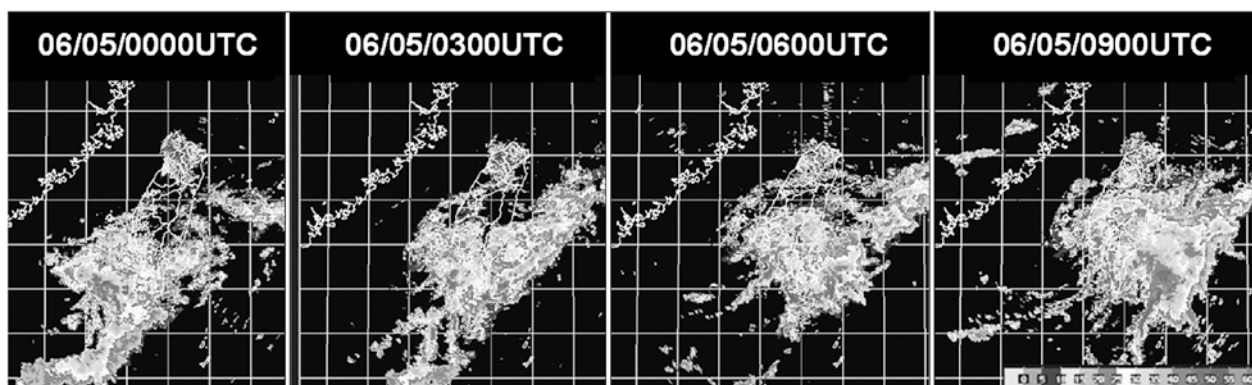


圖4 2008年6月5日0000 UTC至0900 UTC每三小時連續之整合雷達回波圖(dBZ)。

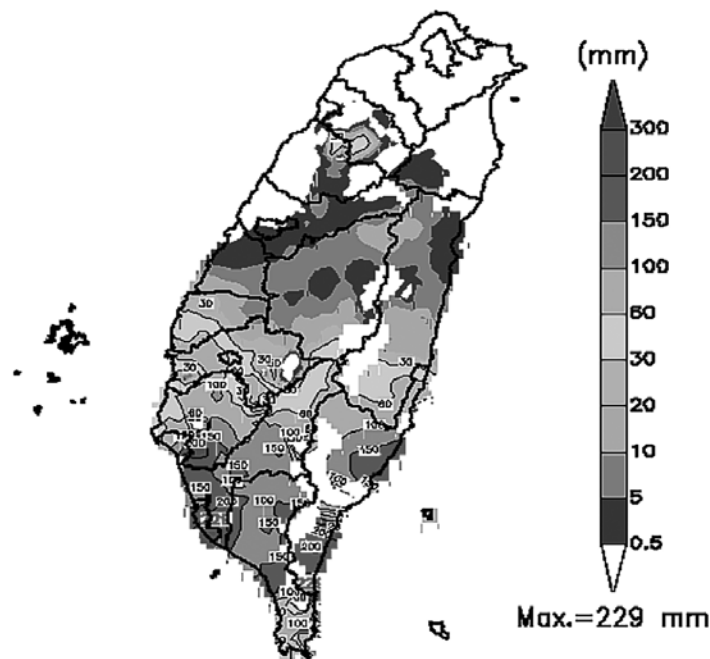


圖5 2008年6月5日臺灣地區日累積雨量分佈圖。

在 6 月 4 日 0000 UTC 低層 925 hPa 及 850 hPa 的分析（圖 6a、b）中，微弱低壓環流位於中國大陸廣東沿海地區，低壓區域具有暖、濕的特徵，顯示有利於對流發展的環境。925 hPa 水氣輻合場顯示該低壓區域具有顯著的水氣輻合，850 hPa 相當位溫場顯示該區域的大氣環境暖溼，有利於對流活動。500 hPa 有短槽伴隨正渦度位於低壓系統上方，有利於低壓系統的加深。300 hPa 槽線雖不明顯，但該區域為微弱的輻散場，支持對流發展。6 月 5 日 0000 UTC 分析中，低層 925 hPa 及 850 hPa 分析，低壓系統東移至臺灣海峽南部，強度略為增強。925 hPa 水氣輻合場顯示低壓環流的東 - 東南側有較強的輻合，且該區域有較強的西南風，風速相對較大。南海地區的暖溼空氣由西南風帶入該輻合區，使得相當位溫明顯增加，進一步有利於對流發展。500 hPa 的短槽伴隨正渦度移入低壓系統上方，增強系統的對流活動。300 hPa 高層輻散場強度增加，垂直方向的偶合條件相當配合，有利於對流系統的

垂直發展。低壓系統的東 - 東南側輻合區域有較強的西南風，帶入暖溼空氣，使得對流活動在此區域顯著增強。高層輻散與中低層的正渦度區域偶合，形成更為有利於對流發展的垂直結構。強降水回波分佈於氣旋環流中心的東側（第一、四象限），該區域雲系發展厚實，伴隨較強降水。西側降水較弱，多為層狀雲系分佈。當組織性對流前緣雲系移入臺灣南部地區，也造成 6 月 5 日南部地區出現高達 229 毫米的日累積降雨量。

綜合上述量場分析顯示，6 月 4 日至 5 日期間適逢一梅雨鋒面滯留於臺灣地區附近，伴隨梅雨鋒面上的中尺度對流系統，朝臺灣海峽南部及臺灣南部地區移入；在此中尺度對流系統生成位置後方（即中尺度對流系統之西南方）之層狀雲系區域內可以清楚觀測及分析出一中尺度渦旋生成，並跟隨中尺度對流系統移動進入臺灣地區。由地面至高層大氣提供對流有利於發展的環境條件，使得中尺度對流系統得以持續發展。

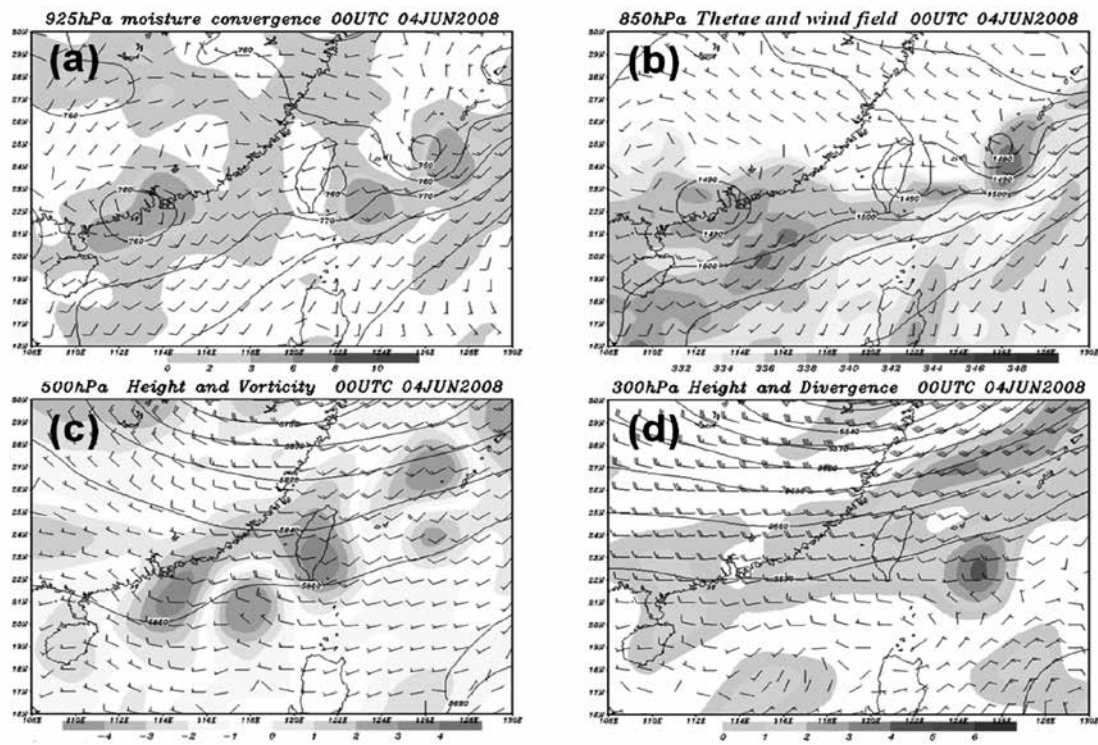


圖6 6月4日0000 UTC之(a)925 hPa水氣輻合場(陰影部份, 單位 $10^{-4} g kg^{-1} s^{-1}$)、風場及高度場, (b) 850 hPa相當位溫(陰影部份, 單位K)、風場及高度場, (c) 500 hPa渦度(陰影部份, 單位 $10^{-5} s^{-1}$)、風場及高度場, (d)300 hPa輻散場(陰影部份, 單位 $10^{-5} g s^{-1}$)、風場及高度場。(風場單位為 ms^{-1} ; 高度場單位為gpm)。

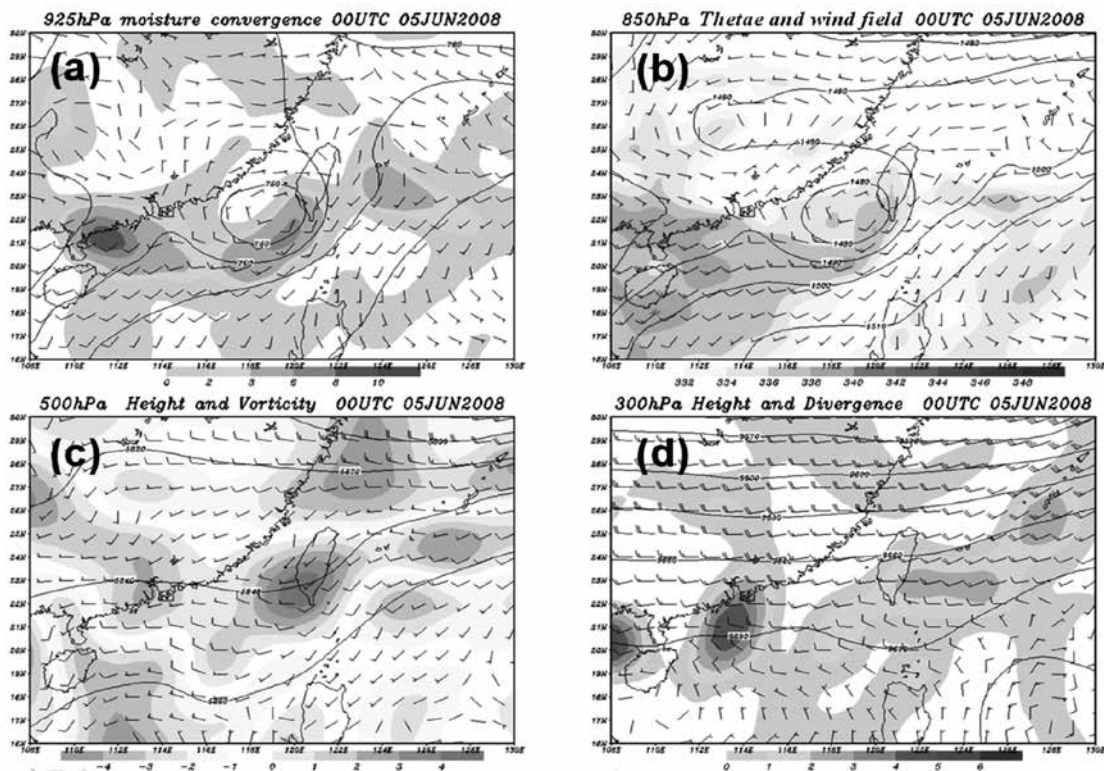


圖7 同圖5, 但為6月5日0000 UTC時各層量場分佈情況。

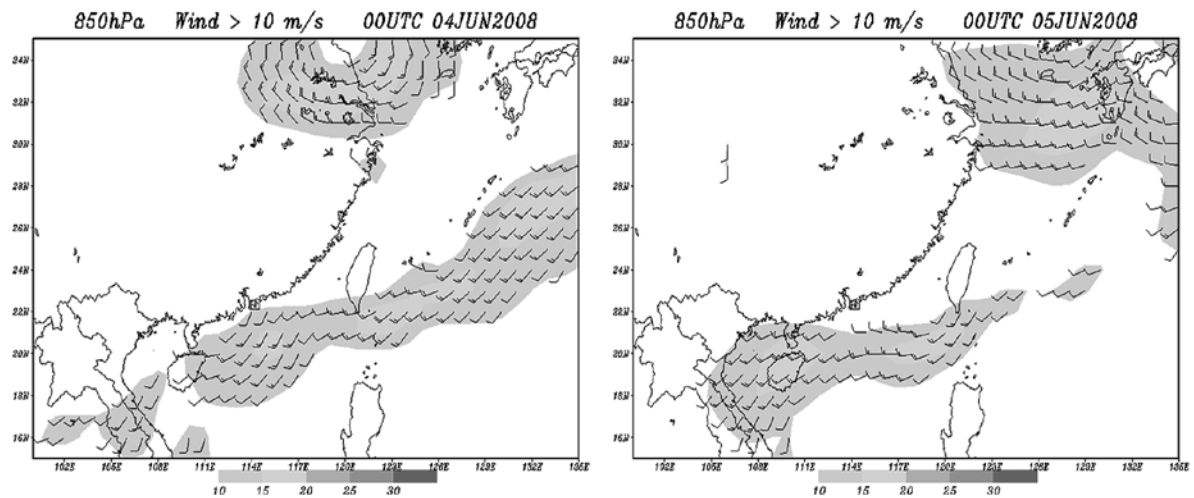


圖8 6月4及5日0000 UTC之850 hPa風速大於10 區域分佈。

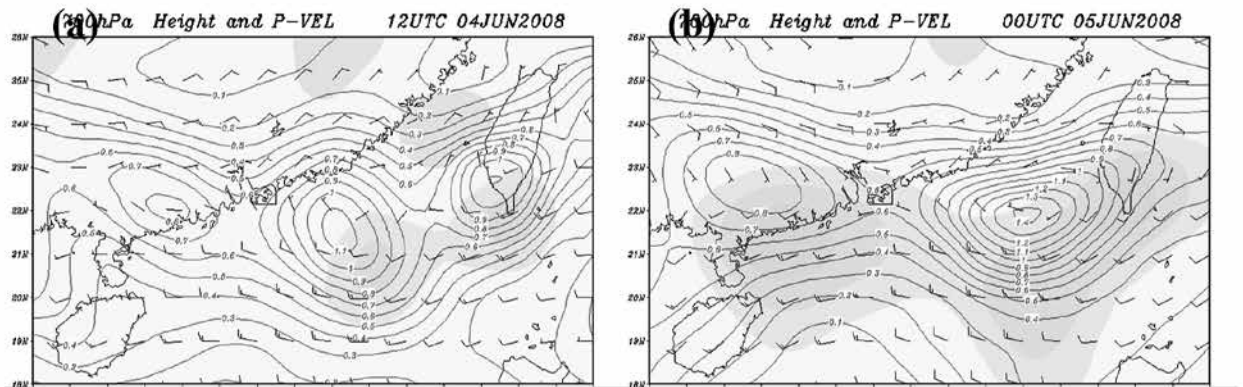


圖9 2008年6月(a) 4日1200 UTC及(b) 5日0000 UTC之700 hPa風場 (ms^{-1})、位渦(等值線, 間距為1PVu; $1PVu = 10^{-6} Kkg^{-1}m^2s^{-1}$)及垂直速度(陰影區, 間距為 $0.2 Pa s^{-1}$)分佈。

三、分析結果與討論：

(一)、中尺度對流系統生成與發展機制：

梅雨季豪雨發生時，在低層之梅雨鋒面南側經常伴隨有低層噴流(LLJ)出現。低層噴流在梅雨季豪雨發生中扮演著至關重要的角色。過去的研究，強調了低層噴流對於提供有利天氣系統發展環境及促進中尺度對流系統生成的作用。Chen (1982) 和林 (1999) 認為，低層噴流提供有利於天氣系統發展的條件，尤其在潛在不穩定的大氣環境中，對於中尺度對流系統的生成有舉升機制的的作用。Akiyama (1975) 指出，梅雨鋒面上的豪

雨發生時，其南側的低層噴流進入鋒面區，造成水平水氣通量的強烈輻合。Chen et al. (1994) 和 Jou and Deng (1992) 分析了在臺灣和大陸華南地區，低層噴流作為暖濕空氣的輸送帶，對豪雨發生的重要性。在本個案中（2008年6月4-5日），低層噴流的分佈及其對中尺度對流系統的生成和豪雨的影響，從850 hPa低層噴流分佈（圖8）顯示，6月4日及5日0000 UTC均顯示有一噴流條自臺灣東南部外海向西南延伸，經過臺灣南部及其外海地區至南海一帶。圖9，700 hPa風場、位渦場及垂直速度場分佈，4日1200 UTC時，位於海峽南部地區已有中尺度渦

旋存在。5 日 0000 UTC 時，該渦旋明顯增強，位渦值增加，渦旋南側的西南風速增強（即低層噴流增強），局部風場輻合增強。此時，上升運動分佈範圍及強度增強，垂直速度最大值位於渦旋中心的東南象限。再從區域平均渦度及垂直速度時間 - 高度剖面分析（圖 10）顯示，最大渦度出現時間為 5 日 0000 UTC，發生於 850 hPa 高度，正渦度向上伸展至 400 hPa。最大垂直速度發生在 4 日 0600 UTC，顯示強對流區先移入該區，對流出現在最大渦度移動方向的前緣。亦即當低層噴流進入鋒面區，造成強烈的水平水氣通量輻合，為對流發展提供充足的水汽和舉升機制，個案降雨過程中，並伴隨著雷電、亂流、強垂直運動及近低對流層能見度下滑的現象，對於當時飛安環境造成相當嚴重程度的影響與干擾。中尺度渦旋環流的增強和垂直運動的分佈，進一步再促使對流系統的生成和發展。

此外，在 2008 年 6 月 4 日到 5 日，臺灣地區受到了顯著的天氣系統影響，特別是中尺度對流系統的發展。以下是對此期間的海平面氣壓及風速的分析，並結合東沙 (46810) 探空資料，探討該期間的天氣特徵。從海平面氣壓及風速時間序列（圖 11）來看，6 月 4 日 0000 UTC 開始，臺灣上游區域（東經 116-120 度；北緯 20-23 度）的氣壓快速下降。到 6 月 5 日 0600 UTC 時，氣壓降至最低點，總下降約 3 hPa。隨後，氣壓快速回升。1000 hPa 的風速變化與氣壓變化呈負相關。風速於 6 月 4 日 0000 UTC 開始增強，至 6 月 5 日 0600 UTC 達到最大值，約 8.5 m/s，之後風速逐漸減弱。這些觀測結果說明，在中尺度對流系統發展至最強期間（6 月 4 日 0000 UTC 至 6 月 5 日 0600 UTC），海平面氣壓降至最低，風速達到最

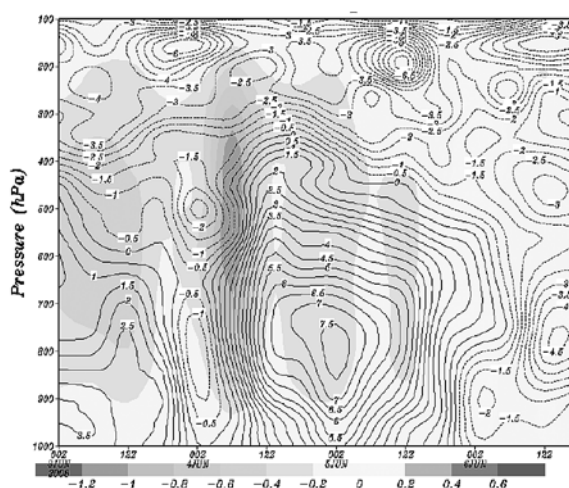


圖 10 2008 年 6 月 3 日 0000 UTC 至 6 日 1800 UTC 逐時位於臺灣上游區域平均(東經 116-120 度；北緯 20-23 度)相對渦度(等值線，單位為 $10^{-5} s^{-1}$)及垂直速度(色階，單位為 $Pa s^{-1}$)之時間-高度分佈。

大，這說明中尺度對流系統的發展與低氣壓和強風速密切相關。再從東沙 (46810) 探空分析（圖 12）來看，研究個案期間，低層相對濕度偏高，表示大氣中含有大量水汽，這為對流系統的發展提供了有利的條件。探空資料顯示顯著的西南氣流，這種氣流有助於將南海地區的暖濕空氣輸送至臺灣地區。探空中的舉升凝結高度 (LCL) 為 985 hPa，表明對流開始舉升的高度較低，有利於對流的

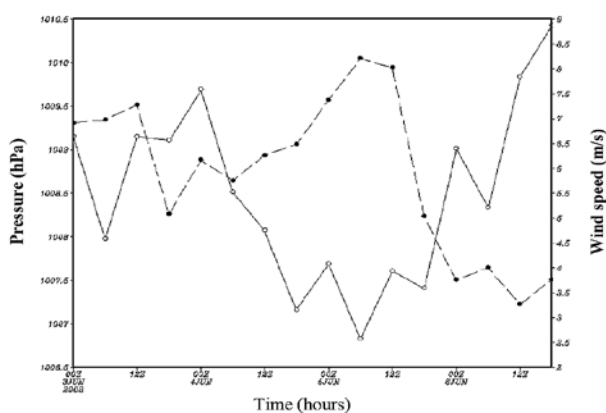


圖 11 2008 年 6 月 3 日 0000 UTC 至 6 日 1800 UTC 逐時位於臺灣上游區域平均(東經 116-120 度；北緯 20-23 度)海平面氣壓(實線，單位為 hPa)及 1000 hPa 風速(虛線，單位為 ms^{-1})時間序列。

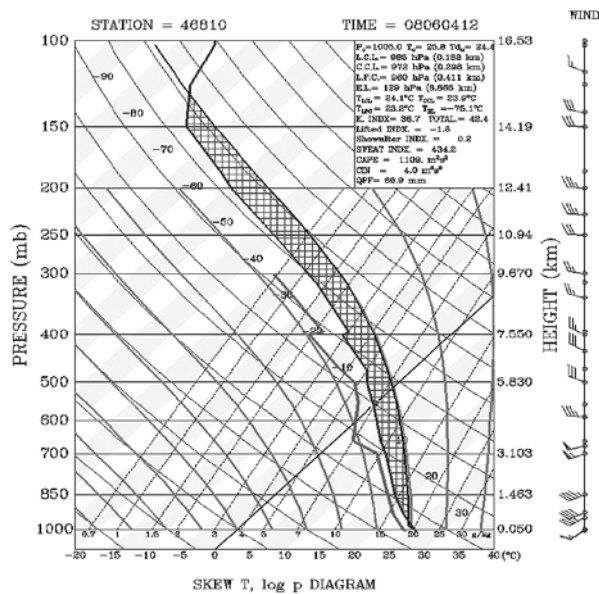


圖12 2008年6月4日1200 UTC東沙(46810)探空測站斜溫圖。

生成和發展（林，1999）。增強的低層噴流，持續將南海地區的暖濕空氣帶入輻合區內，導致相當位溫增加和位溫梯度增大，促使大氣環境變得不穩定。噴流強度增加，局部風場輻合增強，導致上升運動分佈範圍和強度均增加，這進一步促進了對流系統的發展。強對流雲系隨著時間逐漸增強，並朝台灣地區接近。4日1700 UTC到5日0000 UTC之間，中尺度對流系統達到最強並持續移入台灣地區（圖2）。5日0000 UTC到0900 UTC，強對流系統的後方雲系呈氣旋式分佈，中尺度渦旋環流中心清晰可見，隨著對流雲系移入台灣地區並減弱（圖3）。

綜上，個案中低層噴流在梅雨鋒面南側經常出現，為中尺度對流系統的發展提供了關鍵的水氣傳輸和輻合條件。低層噴流的增強導致低層水氣的輸送和輻合加強，與高層的輻散配合，使得對流系統得以持續發展。而同時，相當位溫梯度的增加和大氣環境的不穩定性，加上渦度的增強，形成更為有利於中尺度對流系統發展的環境。

（二）、水氣收支分析：

Qian et al.(2004)發現造成長江流域豪雨的水汽來源主要是透過低層噴流來進行傳送；另一方面，在鋒面上的對流潛熱釋放過程，額外增加了大尺度低層噴流的中心風速，也增加了水氣的傳送，這種正回饋過程使得鋒面上的降水得以維持。而Wang(2004)利用雙都卜勒雷達觀測資料，也驗證中低層大氣持續豐沛的水汽傳輸是造成梅雨季連續降雨的必要條件。由於6月4日至5日期間，鋒面帶上之低壓系統的運動，由大陸沿海移出過程有增強之趨勢，因此我們將透過計算臺灣海峽區域平均(116-120°E；20-23°N)之水氣收支來探討水氣對於中尺度對流系統

發展的貢獻。由水氣方程(1)計算6月5日0000 UTC時之結果(圖14)顯示，水氣增加的來源主要是由700 hPa以下之中、低層的水平水氣通量輻合作用項(紅線)的貢獻，其最大值由1000 hPa向上遞減，垂直水氣通量輻合(綠線)與水平水氣通量輻合兩者呈現反相位之貢獻，而剩餘項作用(藍線)則幾乎都是扮演負貢獻的角色。

$$\frac{\partial q}{\partial t} = - \underbrace{\frac{\partial uq}{\partial x}}_{(A)} - \underbrace{\frac{\partial vq}{\partial y}}_{(B)} - \underbrace{\frac{\partial \omega q}{\partial p}}_{(C)} + \underbrace{\frac{S}{\rho}}_{(D)} \dots\dots\dots (1)$$

其中， q 為比濕， u 、 v 分別為 x 與 y 方向之水平風分量， ω 則為垂直速度， S 為非絕熱參數， ρ 為密度。式中(A)項為局部水氣改變量，(B)項為水平水氣通量輻合，(C)項為垂直水氣通量輻合及(D)為剩餘項。

（三）、對我飛航安全的影響：

造研究個案中，伴隨梅雨鋒面上的中尺度對流系統內有中尺度渦旋的生成，而中尺度渦旋對我飛航安全可能造成的影響，包括有：

1. 亂流：渦旋內部和周邊區域的強對流活動會引發強烈的亂流，對飛機的穩定飛行構成威脅。亂流也可能導致飛機顛簸，對乘客和機組人員造成傷害，甚至可能影響飛行員的操控。
2. 風切變：渦旋環流中的風速和風向變化會引發顯著的風切變，尤其是在低層大氣中。這對於起降階段的飛機來說，特別危險。尤其是突然的風切變可能導致飛機失速或偏離航線，增加飛行風險。
3. 降水與能見度：中尺度對流系統所伴隨

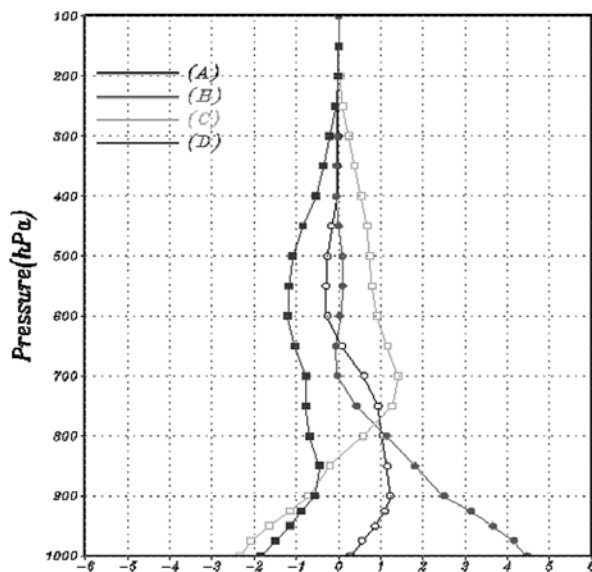


圖14 6月5日0000 UTC於區域(116-120E；20-23N)水氣收支垂直剖面。黑色線為局部水氣改變量、紅色線為水平水氣通量輻合、綠色線為垂直水氣通量輻合及藍色線為剩餘項。(單位為)。

的強降水會顯著降低能見度，對飛行員的視線和導航帶來挑戰。而強降水還可能導致機場跑道積水，影響起降操作的安全性。

4. 閃電和雷暴：中尺度對流系統內部的強對流活動會引發頻繁的閃電和雷暴，對飛航器的電子設備和結構安全構成威脅。雷暴區域的劇烈氣流變化和降水亦可能使飛行更加困難，以及風險增大。

此外，中尺度低壓的形成對於中尺度對流系統的發展起到關鍵作用。低層噴流將南海地區的暖濕空氣輸送到中尺度低壓的南側和東南側，這些區域成為對流活動的主要輻合區。持續的暖濕空氣供應有助於對流的發展和強化。這種暖濕空氣的持續輸送是形成和維持強烈對流系統的重要因素。在中尺度低壓區內，低層大氣的風場輻合明顯增加，使得對流系統得以強化。高層輻散的增強有

助於低層輻合氣流的上升運動，使得整個對流系統更為活躍（林，2024）。中高層槽線系統的影響，以及低層風場的切變，增加了中低層的位渦，這進一步促進了對流系統的發展。中小尺度劇烈對流天氣系統所伴隨的亂流、閃電、雷暴、強陣風或風切等天氣現象，常常是飛行中最危險的潛在因素；而中尺度渦旋生成及其伴隨的劇烈對流活動，對飛航安全構成重大威脅。

在這樣的氣象環境條件下，對飛航安全維護與預警應對，需要提前預測和監測中尺度低壓和滯留鋒面的生成與移動，以便及早發出天氣預警，並調整飛行計劃，避免飛機進入高風險區域。另一方面，對應平時的教育訓練，如何提高飛行員對於滯留鋒面和中尺度低壓區的認識和應對能力，確保他們在遇到劇烈對流和渦旋環流時能夠做出正確的反應。強化地面氣象部門與空中交通管制部門的協作，實時分享氣象數據情資，確保飛行安全，也是刻不容緩的重要功課。透過深入瞭解這些中小尺度的氣象特徵和機制，可以大大提升飛航安全應對劇烈天氣的能力，減少潛在的飛航安全風險。

四、結論：

飛行起降機場或飛航路線上所伴隨之劇烈對流系統，常常是導致我飛行安全維護最嚴重的困擾之一，尤其對其環境條件的特徵與對流結構的特性，至今我們的瞭解仍相當有限，導致在預報診斷及守視掌握上更大的挑戰。根據氣候資料統計顯示，臺灣地區豪大雨發生頻率的季節分佈，除了伴隨颱風外，主要出現在5、6月的梅雨季，特別是5月中旬至6月中旬的連續性降水期間，豪大雨的機率更達高峰。梅雨季華南與臺灣地區

低層多盛行暖濕西南氣流，大氣環境多具潛在不穩度，若有適當的強迫作用，如鋒面或低層噴流等系統提供輻合與舉升機制，即可能激發對流性降水發生（林，2024）。

本文利用美國國家環境預報中心 NCEP/DOE Reanalysis 經緯度網格分析場資料，探討 2008 年 6 月 4 日至 5 日梅雨鋒面伴隨中尺度對流系統及中尺度渦旋對臺灣南部地區造成豪大雨劇烈天氣的綜觀環境特徵。初步綜觀環境分析顯示，臺灣附近及南海地區受到滯留鋒面影響，形成顯著的低層風場切變環境。在此期間，鋒面上於臺灣海峽南部地區生成一中尺度渦旋，其環流中心的第一、四象限伴隨較劇烈的中尺度對流系統發展。該對流系統於 6 月 5 日移入臺灣南部地區，並造成當日南部沿海地區強降水事件。中尺度渦旋的南側存在一低層噴流，該噴流持續將南海一帶的暖、濕空氣輸送至氣旋南側及東南側，該區形成一強輻合區。這一過程與高層輻散的增強、中高層槽線系統的移入相配合，中低層位渦的增強，也更加促進對流系統發展。再由水氣收支診斷顯示，水平方向的水氣通量輻合是供應該系統發展的主要水氣來源。低層暖濕大氣通過輻合區進入，配合垂直方向的高層輻散，形成有利的對流發展環境。

經由上述氣象量場的診斷分析，讓我們瞭解梅雨季局部地區劇烈中小尺度對流天氣系統發生的環境特徵與誘發機制。尤其是在飛行過程中（或飛行前），面臨這些劇烈的中小尺度天氣系統變化時，能夠提供應變措施，俾利確保飛行安全。研究個案，梅雨鋒面除所伴隨劇烈顯著的降雨之外；併行有雷暴、亂流及低能見度等飛行視障同時發生。根據低層噴流、輻合區和高層輻散的綜合分

析，提前識別潛在的劇烈對流發生區域，作為有效預警反應；並進一步思考航路規劃和調整，避免飛行路徑直接穿越高風險區域，尤其是伴隨強對流和低層噴流所在的區域。最後，完善實時監控和應變，運用雷達、衛星以及落雷等觀遙測作業系統進行監測，實時追蹤對流降雨系統和中尺度渦旋的動態發展，提供精確的天氣資訊給飛行員和航空公司，做為飛航安全維護在劇烈天氣系統下的有效應對措施之重要的科學依據。藉由以上的氣象量場診斷，讓我們可以量化瞭解梅雨季局部地區發生劇烈對流條件環境特徵與誘發機制，進而提供飛航安全作業面臨劇烈天氣變化時之應變作為，俾利確保飛航安全。



參考文獻：

- 林得恩，2007：影響飛安甚巨之劇烈對流個案環境特徵分析－以 2006 年 6 月 9-10 日梅雨鋒面期間臺灣中南部豪大雨個案為例，飛航天氣，8。
- 林得恩，1999：梅雨季中尺度對流系統與低層噴流之數值模擬，臺灣大學大氣科學研究所碩士論文，73 頁。
- 林得恩，2010：梅雨季超大豪雨個案之模擬與診斷分析，臺灣大學大氣科學研究所博士論文，118 頁。
- 林得恩，2019：從氣象觀點來看梅雨季飛安潛在危險因子，2019 顯著危害天氣與飛航作業研討會，臺灣，臺北，民航局飛航服務總台，53-74。
- 林得恩，2024：伴梅雨鋒面個案之數值模擬研究，飛航天氣，41，1-28。

- Akiyama, T. 1975 : Southerly transversal moisture flux into the extremely heavy rainfall zone in the Baiu season. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 62, 485-504.
- Chen, G.T., C.-C.Wang and S.-W. Chang, 2008 : A diagnostic case study of Mei-Yu frontogenesis and development of wavelike frontal disturbances in the subtropical environment. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 41-61.
- Chang, S. W., 1982: The orographic effects induced by an island mountain range on propagating tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 1255-1270.
- Chen, G. T. J., 1992 : Mesoscale features observed in the Taiwan Mei-Yu season. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 70, 497-515.
- Chen, Y. L., X.-A. Chen, and Y.-X. Gang, 1994 : A diagnostic study of the low-level jet during TAMEX IOP5. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 2257-2284.
- Fang, Z., 1985: The preliminary study of medium-scale cloud cluster over Changjiang basin in summer. *Adv. Atmos. Sci.*, 2, 334-340
- Jou, B. J.-D. and S.-M. Deng, 1992 : Structure of a low-level jet and its role in triggering and organizing moist convection over Taiwan : A TAMEX case study. *TAO*, 3, 39-58.
- Qian, J.-H, W.-K. Taq and .-m.Lau , 2004: mechanisms for torrential rain associated with the Mei-Yu development during SCSMEX 1998 , *Mon, Wea, Rev.*, 132, 3-27
- Wang, J.-J. 2004: Evolution and Structure of the mesoscale convection and its environment : A case study during the early onset of the Southeast Asian summer monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 1104-1120.

2023年飛航安全報告書

譯者：邁德

前言：

依據世界飛安基金會「航空安全網路」(Aviation Safety Network, 後文簡稱 ASN) 的資料庫數據分析顯示，2023 年是商用航空營運記錄中，最安全的年份之一。從 ASN 的數據顯示，2023 年涉及商用噴射民航機的致命事故為零（註一）。此外，包括致命和非致命事故，其總數從 2022 年的 121 件，下降到 2023 年的 94 件；再與從 2018 至 2022 年間，每年平均 115.8 件的事故記錄相比，此飛航事故的數量顯著下降，也代表了飛航安全的提升。

2023 年沒有發生任何商用噴射民航機的致命事故，這確實是一個值得感謝的論據，並提醒我們必須繼續保持警惕的重要性，以確保航空業成為最安全的交通方式。但同樣重要的是，也要承認 2023 年發生了 7 件涉及渦輪螺旋槳或活塞發動機的民航機致命事故。這 7 起致命事故導致 107 名乘客和機組人員的死亡，以及地面上有一人死亡。此外，2023 年公務噴射機在執行各種任務時，發生了 32 件飛航事故，其中有 7 件是致命事故。

ASN 數據顯示，歷史上屬於高風險的事故類別，在減少其數量上獲得重大進展；諸如：可控飛行下撞地 (Controlled Flight Into Terrain, CFIT)、飛行中失控 (Loss Of Control—In flight, LOC-I)，以及偏離跑道

(Runway Excursion, RE) 等高風險事故。此係經由技術研發、營運業者、製造廠商，以及監管機構等的共同努力，才能在這些事故類別中獲得進步的成果。

問題是，沒有發生事故並不能證明飛航安全是存在的。航空業在 2023 年經歷了許多不可接受，並備受矚目的意外事件；如果不是飛行員、空中交通管制員，或是運氣有夠好的話，才能在最後一刻採取行動或是把危機化解掉，這些意外都可能發生致命事故。2023 年 2 月，一架聯邦快遞波音 767 貨機和西南航空一架波音 737 客機，在美國德州 Austin-Bergstrom 國際機場險些相撞。當時聯邦快遞貨機正試圖降落，而西南航空的噴射客機也正從同一條跑道起飛，兩架飛機相距不到 100 英尺 (30 公尺)；所幸，聯邦快遞的飛行員拒絕落地，因而避免了碰撞事故。在其他十幾起類似的嚴重意外事件中，機組人員幾乎是幸運地逃避了災難性的碰撞事故。世界飛安基金會在 2023 年 12 月「全球防止跑道入侵行動計劃」(Global Action Plan for the Prevention of Runway Incursions, GAPRI) 的報告中提出警告，如果不採取積極的預防措施，「跑道入侵」(Runway Incursions, RI) 的風險將會帶來嚴重後果。

然而，2024 的新年才剛過沒幾天，就發生了兩起飛航事故。2024 年 1 月 2 日，一架日航空巴士 A350 客機在東京羽田國際

機場的跑道上，與日本海上保安廳的德哈維蘭加拿大 Dash 8 飛機相撞，造成海上保安廳機上 6 人中的 5 人死亡；日航乘客和機組人員共 379 名，則皆順利逃脫而未受到重傷。2024 年 1 月 5 日，阿拉斯加航空的一架波音 737 MAX-9 客機，從 Portland 國際機場（美國俄勒岡州）起飛幾分鐘後，客機的窗戶突然鬆脫飛走，所幸機上 177 人無人受到重傷。這些都是可以預防的飛航事故和意外事件，但卻不僅威脅到乘客和機組人員的安全，也破壞了大眾對我們航空業的信心。

這些僥倖脫險的意外事件，係針對航空業自滿心態的一個嚴厲警告，特別是在獲得令人印象深刻的安全成效之際。當我們一方面感謝 2023 年所獲得的安全績效之外，但在另一方面，所有風險的共同承擔者，仍必須保持警惕之心。自滿心態是一種隱蔽性的安全威脅，除非能運用健全的安全文化來積極應對，否則它就可能悄悄地侵襲到安全和品質的協定作為之中。因為自滿心態會導致人們走捷徑、忽略程序、使用非常規術語、對周圍的「情境察覺」(Situational Awareness, SA) 能力減弱，以及對不斷升級的風險反應遲鈍等不安全習性。

挑戰自滿心態需要採取積極策略，諸如：持續專注提高品質、定期執行安全訓練、嚴格遵守安全規定、培養安全第一態度、公開討論潛在風險，以及促進個人和團隊的共同責任等。就實質面而言，想要持續達成安全的提升，其關鍵在於建立和培育健全的安全文化。

安全文化具體展現出組織對安全的概念、評價，以及優先等級。健全的安全文化源自於領導階層，並落實在整個組織部門，

反映出該團隊真實的奉獻精神，據以確保安全的最高水準。對航空業的所有領導者來說，最重要的是經由他們的行動、言語、政策，以及程序等具體作為，言行一致的傳達安全是所有其他因素的最高考量。

經由 2024 年的重大飛航事故、2023 年差點造成事故的意外事件、跑道入侵，以及其他嚴重影響安全和品質等諸多問題，顯示出航空業的安全緩衝裕量有些捉襟見肘，因此強調這些警告有其必要性。航空業正努力面對許多挑戰，包括招募、發掘，以及培訓數以萬計的新員工；不斷地擴增旅遊需求；以及必須去適應那些多樣化的新航空系統作業模式。無論如何，航空業也站在機會的門檻上，通過有效的技術落實、人為因素的更深入理解、品質標準的持續提升，以及堅持領導素質和安全文化的價值等，據以提升航空系統的作業彈性和安全性。

跑道入侵威脅

儘管在過去的 6 年中，只發生 5 件跑道入侵事故，而且在 2023 年並沒有發生過，但此項飛航事故的類別仍被包括在高風險之內，因為還有其他原因而發生了一些嚴重的僥倖脫險意外事件。其他長期存在的高風險飛航事故類別 — 諸如：CFIT 和 LOC-I 等，其事故數量在多年來都有所減少；但由於導致跑道入侵的相關因素非常複雜，航空業可能會隨著交通流量的增加，從而看到更多僥倖脫險的意外事件。跑道入侵通常不會導致飛航事故，但 ICAO 把跑道入侵列為必須解決的五項最高風險事件的類別之一，據以減少飛航事故造成死亡的可能性。降低風險需要飛航營運業者、提供空中導航服務單位，以及機場和監管機構的協調合作。

2023 年 12 月，世界飛基金會發佈了「全球防止跑道入侵行動計劃」。這項工作涉及來自全球 80 個組織的 200 多位航空專家，他們共同分析了全球和區域性的多樣數據資訊，並結合了從營運專業知識所累積的見解。這項策略超越了只針對危險事件的研究；這些建議納入了所有營運業者的經驗教訓——這包括作業中一切順利，以及出現某些問題的作業。值得回顧的是，「全球防止跑道入侵行動計劃」的那一個創始分析章節。

經由創始分析導引出該專案的建議事項，詳列如后：

- 依美國「國家航空系統」(National Airspace System, NAS) 在 2022 年的統計資料，跑道入侵事故的頻率為每百萬架次起飛和降落中有 33 次。最嚴重的跑道入侵事故 (A 類和 B 類，註二) 的數量正

在增加 (詳如圖 1 和圖 2)。

- 在美國發生跑道入侵事故的最常見肇因，是飛行員操控偏離。在最近 5 年間，跑道入侵事故因飛行員操控偏離佔 64%，其次是車輛 / 行人偏離佔 19%、與空中交通管制員作業有關佔 17%。
- 在美國的最近 5 年間，70% 的跑道入侵事故涉及通用航空飛機。
- 針對國際飛航事故和意外事件的審查中，從 68 起跑道入侵事故的樣本中，有幾起事件涉及使用不同的無線電波道和 / 或語言，在空中交通管制 (ATC) 和授權使用空側作業的車輛之間進行聯絡。這影響到其他交通人員的情境察覺能力，阻礙了解決交通衝突的機會。

圖 1：自 2005 至 2023 年，美國機場發生跑道入侵事故的 A 類與 B 類數量表。

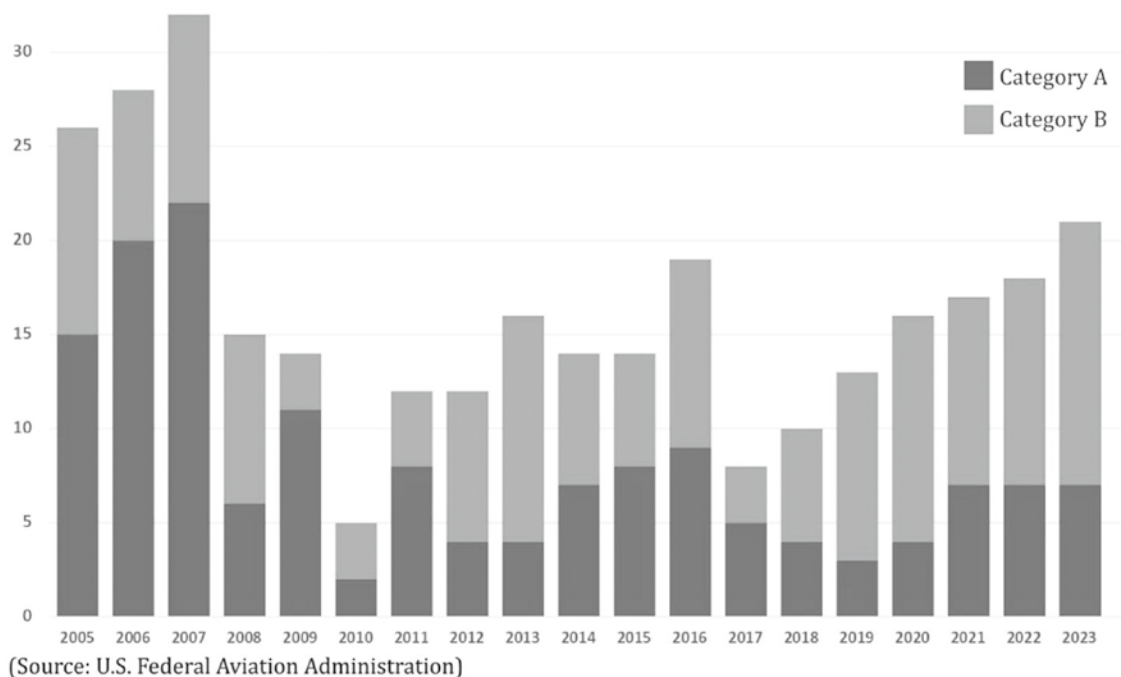
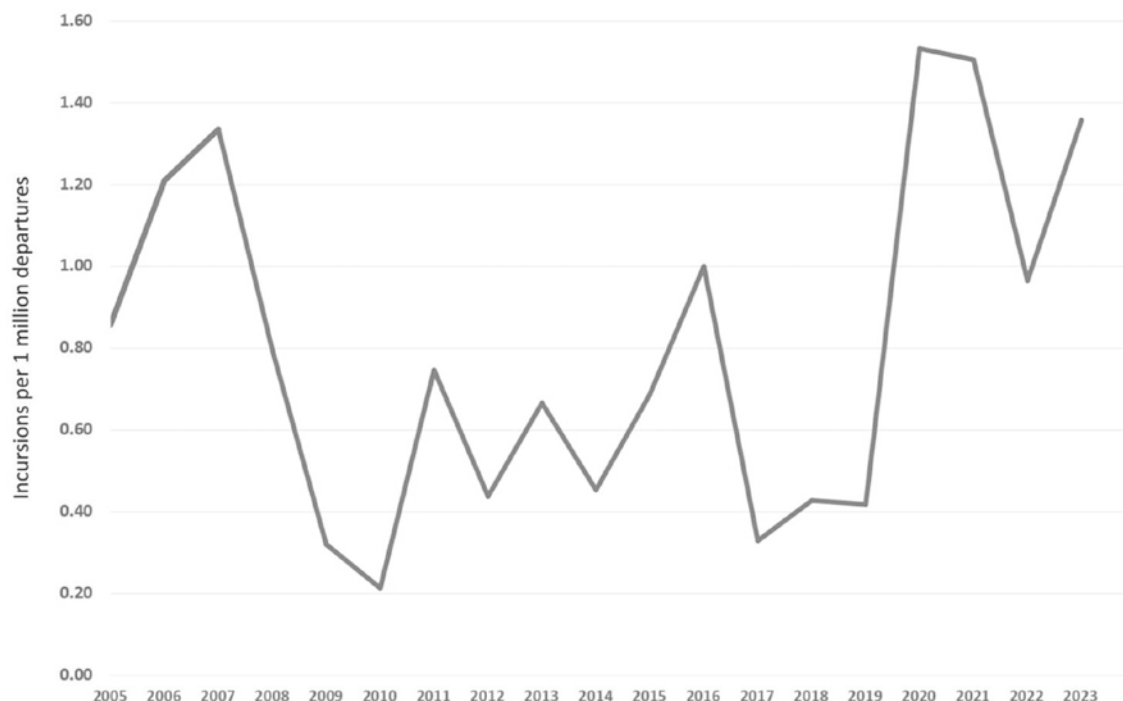


圖 2：自 2005 至 2023 年，每百萬離場架次（含定期 / 通勤和包機航班）發生跑道入侵事故數量表。



(Source: U.S. Federal Aviation Administration)

- 在同樣的國際案件審查中，有 68 起跑道入侵事故和嚴重意外事件，其中有幾起事件涉及管制員，並沒有檢查其關鍵性的許可是否符合安全考量。
- 根據 IATA 的「意外事件數據交換」(Incident Data Exchange, IDX) 數據分析，從 2020 年 1 月至 2022 年 12 月間，提報跑道入侵意外事件的頻率有在增加。提報最多的是歐洲地區 35%，其次是拉丁美洲 / 加勒比地區 26%，以及北美地區 18%。
- 大多數跑道入侵意外事件涉及飛機落地後的滑行階段，在穿越跑道時沒有獲得通行許可。

民航機飛航事故

2023 年沒有發生任何商用噴射民航機（註三）的致命事故，渦輪螺旋槳或活塞發動機的民航機則發生 7 件致命事故。這 7 件事故中，有 5 起涉及西斯納 208 客機，導致 107 名乘客和機組人員死亡，以及地面上有一人死亡。這 7 件致命事故有 3 起發生在非定期客運作業，一起發生在定期客運作業，一起發生在貨運作業；另外 2 起則發生在客運作業，但其營運類型仍尚未知悉。

2023 年民航機飛航事故的總數，包括噴射機、渦輪螺旋槳和活塞發動機等機型的致命與非致命事故，從 2022 年的 121 件下降到 94 件，總共下降了超過 22%。2023 年的 94 件飛航事故，與從 2018 至 2022 年間，

每年平均 115.8 件的事故記錄相比，也下降了接近 22%。

亂流是最常見的飛航事故類別，但與亂流相關事故在 2023 年的排名是第二位。至於 2023 年的高風險類別（偏離跑道、飛行中失控與 CFIT）的飛航事故數量，比從 2018 至 2022 的 5 年間，其每年平均數量大幅減少了 63% 之多。

當飛航事故變得不那麼常見時，世界飛安基金會認為，安全分析必須經由加強事故風險的理解來加以提升——這種理解可以透過意外事件的評估或其他作業的前兆來完成，諸如：跑道入侵、空中接近碰撞，以及重飛等意外事件。

針對民航機飛航事故，世界飛安基金會的數據分析顯示，2023 年發生 11 件民航機

飛航事故，約佔事故總數和所有致命事故的 92% 以上。然而從 2018 至 2022 年的 5 年間，其民航機飛航事故和所有致命事故的所佔比率，則遠低於 92%。這些民航機飛航事故類別，將會更強調的詳細說明如后。

民航機飛航事故類別

亂流 (Turbulence, TURB) 事故：亂流是最常見的飛航事故類別，但與亂流相關事故在 2023 年的排名是第二位。2023 年發生 21 件與亂流相關的民航機飛航事故，這與 2022 年的 22 件相比略有下降，但在 2022 年的整體營運量也比較少。從 2018 至 2022 年間，發生 97 件與亂流相關的飛航事故，平均每年有 19.4 件。2019 年是發生與亂流相關民航機飛航事故最嚴重的一年，當時有 27 件。2023 年與亂流相關的民航機飛航事故中，沒有一起是致命事故，但所有事故都

圖 3：自 2018 至 2023 年，民航機發生飛航事故的類別與數量表。

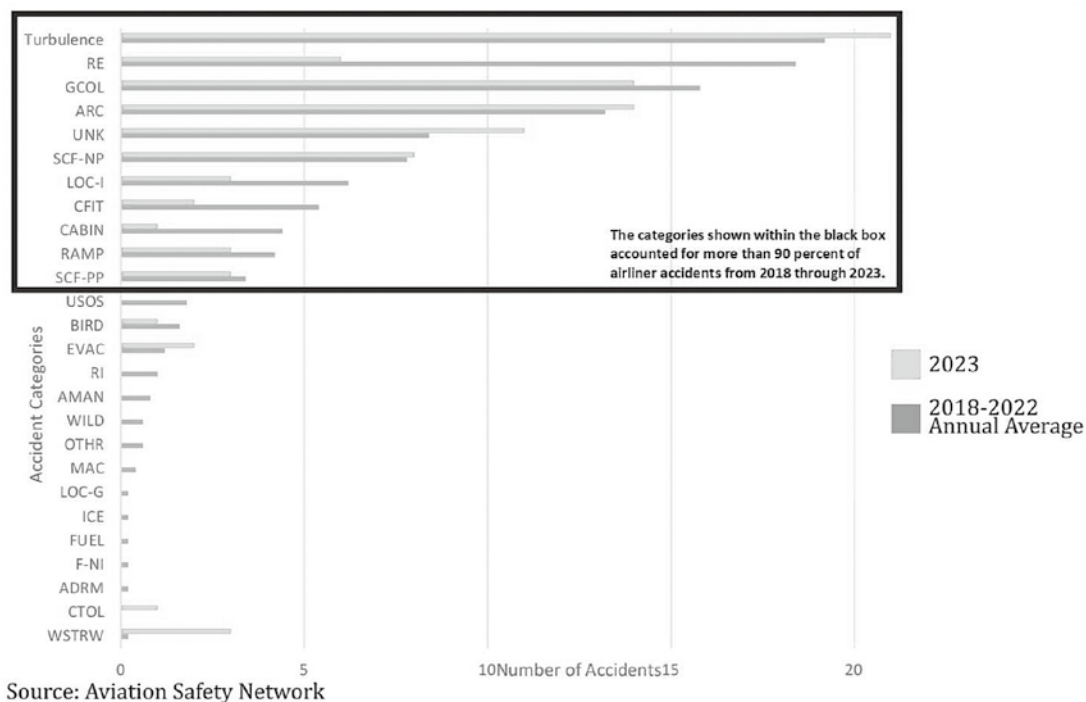
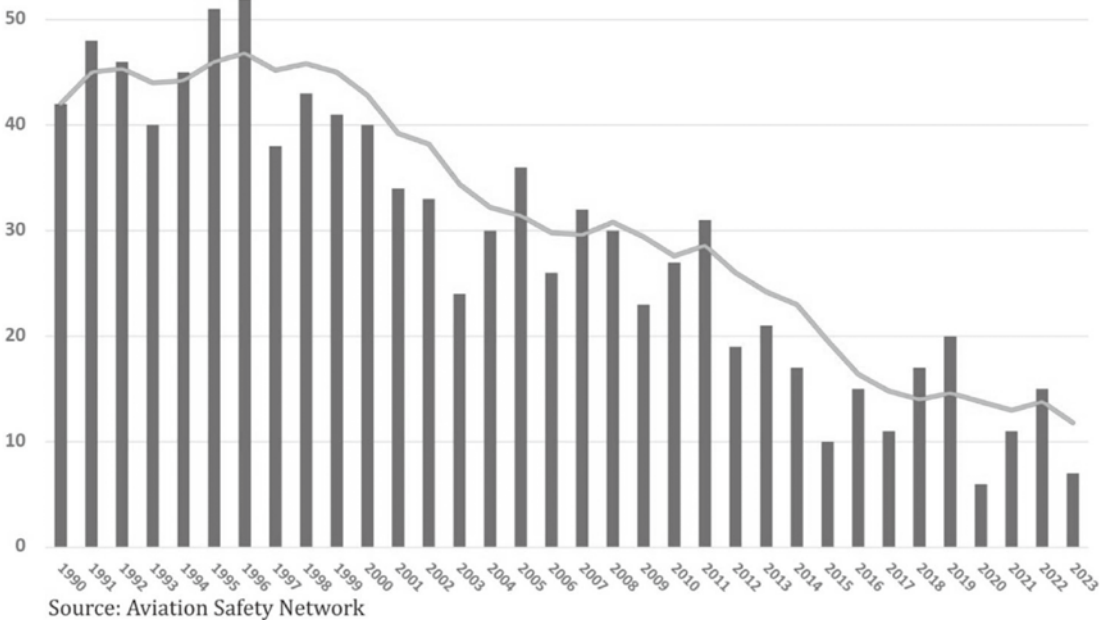


圖 4：自 1990 至 2023 年，民航機發生致命事故數量表 (直線表示每年數量，曲線表示滾動平均量)。



有涉及乘客和 / 或機組人員的嚴重傷害。

在本報告撰述期間 (從 2018 至 2023 年間)，亂流事故在北美和亞洲地區發生較多，在歐洲和非洲地區則相對較少。北美地區佔所有飛航事故的 41%，但佔所有亂流事故的 51%；亞洲地區佔所有飛航事故的 16%，但佔所有亂流事故的 26%。美國發生與亂流相關事故最多，有 59 件，日本則有 16 件。在本報告撰述期間，這兩個國家合計佔所有亂流事故的 64%(117 件中的 75 件)。(譯註：原文為美國 59 件 + 日本 16 件 =72 件有誤； $72/117=63\%$ 有誤)

基於氣候變化的發展因素，預計產生亂流的機率將會逐漸增加。IATA 在 2018 年推動「亂流察覺計劃」(Turbulence Aware program)時表示，長期以來亂流一直是飛機乘客，尤其是空服員在非致命事故中，造成受傷的主要原因。美國「國家運輸安全委員

會」(National Transportation Safety Board，後文簡稱 NTSB) 在 2021 年發佈的安全研究報告 (註四) 中指出，從 2009 到 2018 年間，發生與亂流相關的事故，佔美國定期航班所有飛航事故的三分之一以上。

根據 ASN 資料庫，2023 年發生 3 件與風切 / 雷雨相關的飛航事故。亂流和風切 / 雷雨事故合計佔 2023 年所有民航機飛航事故的 25% 以上。在過去 5 年中，這兩類事故加起來約佔民航機飛航事故總數的 17%。

NTSB 在報告中指出，空服員是客機上最有可能受到重傷的人；依民航法規 Part 121(定期航班)的營運業者，其遭遇到與亂流相關的飛航事故發生率，遠高於依民航法規 Part 135(通勤和包機)的營運業者。這可能是依民航法規 Part 121 營運的飛機，通常比依 Part 135 營運的飛機大些，而且搭載更多的乘客和機組人員；如果遭遇到非預期的

亂流，這將會大幅增加受傷的可能性。

偏離跑道(Runway excursion, RE)事故：

依 ASN 資料庫顯示，2023 年發生 5 件涉及民航機偏離跑道的飛航事故，這比從 2018 至 2022 年間的數量大幅減少，當時平均每年發生超過 18 件。2020 年發生 25 件偏離跑道事故，在此期間，大部分商用航空業者因疫情大流行而關閉，但隨著疫情減緩民航業開始復甦，在 2021 年才發生了 6 件偏離跑道事故。

雖然偏離跑道的飛航事故經常發生，但通常不會造成致命事故。2023 年 5 件偏離跑道事故中，只有一起是致命事故。該致命事故是巴西航空工業公司的一架 EMB-110P 1 Bandeirante 飛機，在大雨中墜毀在巴西亞馬遜州的 Barcelos 機場。當飛機落地後，它偏離跑道而撞向機場的防護圍欄，隨後又與路堤相撞。2 位飛行員和 12 名乘客在事故中喪生。

自 2018 年以來，已發生 9 件偏離跑道的飛航致命事故，導致 101 名乘客和機組人員死亡。這 9 件偏離跑道事故中，只有一次是發生在飛行的落地階段。那次是最慘烈的偏離跑道事故，2018 年 3 月美國孟加拉航空的一架德哈威蘭 Dash 8 客機，在尼泊爾 Kathmandu 機場落地時偏離跑道，造成 71 位乘客和機組人員中，有 51 人死亡。

自 2018 年以來，ASN 資料庫的 97 件偏離跑道事故中，有 82% 發生在落地階段，其中沒有對正跑道多過衝出跑道。不穩定進場和重飛失敗是最常見的肇事因素。其他影響因素包括：飛航組員操控疏失（速度和方向控制）、受污染跑道、側風、有關跑道狀

況和 / 或天氣資訊的延遲或不準確報告、機械故障或起落架故障，以及未能在 V1（註五）之前放棄起飛。

在本報告撰述期間，亞洲、非洲和南美洲地區的偏離跑道事故發生率較高，而在歐洲和北美地區則相對較低。

在本報告撰述期間，亞洲、非洲和南美洲地區佔所有飛航事故的 35%，但佔所有偏離跑道事故的 49%。

基於偏離跑道所涉及的風險因素相當複雜，諸如：穩定性進場、穩定性落地、跑道狀況、飛機性能，以及空中交通管制的指示等；預防需要眾多風險共同承擔者的協調合作，包括：營運業者、機場、提供空中導航服務單位、製造商和監管機構等。2021 年，世界飛安基金會和歐洲飛航安全組織 (EUROCONTROL)，以及來自 40 個組織的 100 多位航空專家合作，發佈了「全球防止偏離跑行動計劃」(Global Action Plan for the Prevention of Runway Excursions, GAPPRE)，該計劃為眾多風險共同承擔者提供了指導資訊和建議事項。世界飛安基金會在 2017 年公佈的「重飛決心下達與執行」(Go-Around Decision-Making and Execution, GADM&E) 報告，也包含了極具參考價值的數據與建議事項。

地面碰撞 (GCOL) 事故：2023 年發生 14 件地面碰撞 (Ground Collision, GCOL) 飛航事故，但有 4 起意外事件被計算了兩次，因為它涉及 2 架商用民航機之間的碰撞。這 4 起意外事件造成 8 架飛機受損。其他 6 起意外事件涉及飛機與地面裝備之間，或是商用民航機與非商用飛機之間的碰撞。地面碰

撞事故的 5 年平均值，為每年 15.8 件。最糟糕的一年是 2019 年，當時發生了 28 件地面碰撞事故。檢視地面碰撞事故，通常發生在機場的後推或滑行作業階段。如果在跑道入侵期間發生碰撞，該案件則將被包含在跑道入侵事故的類別中。

跑道異常接觸 (ARC) 事故：2023 年有 15 件跑道異常接觸 (Abnormal Runway Contact, ARC) 事故，略高於從 2018 至 2022 年間，平均每年 13.2 件。這 15 件跑道異常接觸事故中，沒有一起是致命事故。該類事故包括：任何落地或起飛時，涉及跑道或落地道面的異常接觸。至於異常接觸則包括：猛烈和重落地、太遠 / 超速落地、偏離中心線落地，以及蟹行落地等。2023 年的跑道異常接觸事故，其中有 5 次尾部撞擊道面、一次主起落架壓縮、一次前起落架伸放失效，以及一次翼尖觸擊道面等。從 2018 至 2023 年的 6 年間，發生 80 件跑道異常接觸事故，其中有一起是致命事故。這 80 件事故中，除了 7 件事故外，其他都發生在落地階段，其中有 6 件發生在起飛階段，另有 2 件發生在地面上。這 80 起事故中，有 35 件涉及尾部撞擊道面，8 件涉及起落架未伸出，3 件涉及起落架未被放下，以及 10 件涉及重飛。該類事故的發生情境，有許多是在機場的風力條件具有挑戰性；當在進場落地階段，可能不符合穩定性進場標準；或者是在飛機接近地面或仰轉落地時，飛行員操控不當。

未知 (UNK) 事故：如果沒有足夠的資訊把飛航事故歸類，則將其歸類為「未知」(Unknown, UNK) 事故。2023 年發生 12 件未知事故，前 5 年的平均值為每年 8.4 件。這 12 件未知事故中，有 3 件是致命事故，造成 20 人死亡。最嚴重的未知事故，發生

在 2023 年 10 月 29 日，當時由 ART Taxi 航空營運的一架西斯納 208B 客機，從巴西 Rio Branco—Plácido de Castro 國際機場起飛後不久，墜毀在樹木繁茂的森林地區，機上 12 人全部遇難。有關未知類別的許多事故，我們對飛行過程中所發生的事情知之甚少，或者是飛航組員在飛機墜毀時，並沒有進行任何聯繫。隨著事故調查的完成，有許多飛航事故可能會被重新分類。

在過去的 5 年中，共有 42 件未知類別的飛航事故，其中有 11 件是致命事故，造成 219 人死亡。從 2018 至 2022 年間，有 21 件事故缺乏證據或缺少調查；8 件事故涉及某種結構的機械故障（發動機、襟翼、電氣起火、起落架，或是其他組件故障）；9 件涉及在起飛、進場、滑行，或是落地時與某物發生碰撞；其餘的則涉及外物損壞 (FOD)、貨物起火，以及可能涉及重量和平衡等裝載問題。

系統組件故障—非發動機 (SCF-NP) 事故：2023 年發生 8 件系統組件故障—非發動機 (System Component Failure—Non Power plant, SCF-NP) 事故，大約相當於前 5 年的每年平均值。2023 年的事故中有 4 件是起落架故障，2 件涉及液壓故障，一起是輪胎爆裂，另一起是增壓問題。從 2018 至 2023 年的 6 年間，發生了 47 件事故，其中包括一起致命事故。這起致命事故發生在 2022 年 9 月，當時一架裝有浮筒的加拿大德哈威蘭 DNC-3T 渦輪水上飛機，在前往目的地的途中突然俯衝並墜毀在美國華盛頓州 Mutiny 灣的水中，機上 10 人全部遇難。NTSB 確定的可能肇因是，在飛行中水平穩定器的配平致動器之螺栓鬆脫，導致水平穩定器被移動到向下的最大位置。

在本報告撰述期間，幾乎所有的系統組件故障—非發動機事故，全都對飛機造成了重大損壞，而且至少有一件造成乘客受傷。超過一半的事故發生在落地階段，有 11 件發生在地面階段，6 件發生在起飛階段，1 件發生在初始爬升階段，3 件發生在航程階段。一般來說，這些事故是因起落架故障所引起的，導致起落架在作業時壓縮 (28 件)，或未能伸放或收上 (3 件)。其他機械故障涉及飛行控制、增壓、輪胎、客窗、煞車、貨艙門、起落架損壞、發電機損壞，以及外物損壞 (FOD) 等。至少有 5 件事故，與維護不足或不正確有關。

可控飛行下撞地 (LOC-I) 事故：2023 年發生 3 件 LOC-I 事故，其中有 2 件是致命事故，導致 73 名乘客和機組人員死亡。這 2 件致命事故中最嚴重的一起發生在 2023 年 1 月 15 日，當時一架 ATR 72-500 客機，在尼泊爾 Pokhara 國際機場最後進場階段時墜毀，造成 72 名乘客和機組人員全部遇難。從 2018 至 2022 年間，平均每年發生 6.2 件 LOC-I 事故。

LOC-I 被認為是高風險的事故類別之一，因為這些通常都是致命事故。從 2018 至 2022 年間，發生 31 件飛行中失控事故，其中 20 件 (佔 65%) 是致命事故，導致 846 名乘客和機組人員死亡，以及 7 名地面人員死亡。自 2018 年以來，在 3 件最嚴重的 LOC-I 致命事故中，有 2 件是印尼和衣索比亞的波音 737 MAX 客機墜機事故，一共造成 346 人死亡。另一件是在 2020 年 1 月，伊朗防空部隊在伊朗德黑蘭附近，擊落烏克蘭國際航空一架波音 737-800 客機，造成 176 人死亡。

從 2018 至 2022 年間，有 10 件事故涉及空氣動力學的失速狀況，其中有一些是因為結冰狀態，另一些則是因為操控的仰角太大和空速太小。有 6 件事故是對下降氣流、風切或側風的反應操控不當，另 4 件則涉及操控過度。其他情況包括：惡劣天氣中失去情境察覺 (SA) 能力、無意中啟動重飛模式，以及發動機故障等。

CFIT 事故：這與飛行中失控一樣，都是屬於高風險的事故類別，因為都有可能造成致命事故。所幸，2023 年發生的 2 件 CFIT 事故，都沒有造成人員死亡。

從 2018 至 2022 年間，發生 27 件 CFIT 事故，平均每年 5.4 件。在這 5 年間，有 15 件是致命事故，導致 111 名乘客和機組人員死亡。在此期間最嚴重的事故之一，發生在 2021 年 7 月 6 日，當時 Kamchatka 航空一架安東諾夫 An-26B-100 客機，執行俄羅斯國內定期航班作業，在 Kamchatka 機場進場階段時，撞到 Kamchatka 半島附近的 Peninsula 懸崖，造成 28 名乘客和機組人員喪生。

從 2018 至 2022 年間，大多數的 CFIT 事故都涉及惡劣天氣條件，諸如：低能見度、低雲層、霧霾、下雪等；也有許多是發生在山區地形。此外，大多數事故都涉及某種操控的限制，包括：「目視飛航規則」(Visual Flight Rules, VFR) 持續飛入「儀器氣象條件」(Instrument Meteorological Conditions, IMC)、下降到低於最低下降高度、偏離既定航線，以及延遲或不當重飛等。許多偏離航線和低於最低下降高度的操控，可以被認定是故意不遵守規定；但也有人認為在事故調查中，此一因素可能沒有獲得充分的認識。自 2018 年以來，總共有 27 件 CFIT 事故，

其中有 12 件發生在貨運作業。

客艙事故：從 2018 至 2023 年的 6 年間，客艙內發生 23 起造成機組人員和 / 或乘客的嚴重受傷，因此被認定是飛航事故，但沒有一次是致命事故。其中 19 件涉及機組人員受傷，6 件涉及乘客受傷。一般而言，這些事故通常是在飛機內或外跌倒、被某物絆倒、碰撞餐廚推車、熱液體溢出，以及飛機突然改變速度等原因所引起。2023 年發生一起與客艙有關事故，從 2018 至 2022 年間，其每年平均為 4.6 件。

客機舷梯 (Ramp) 事故：2023 年發生 3 件客機舷梯事故，美國 2 件、德國 1 件；在前 5 年間，平均每年發生 4.2 件。從 2018 至 2023 年的 6 年間，發生 24 件客機舷梯事故，其中一件是致命事故。在這起致命事故中，有一位空服員從打開的飛機艙門墜落致死。這 24 件事故中，10 件涉及乘客受傷、4 件涉及機組人員受傷，9 件涉及地勤人員受傷。一般而言，這些事故通常是在飛機樓梯跌落、飛機艙門、噴射氣流、飛機突然停下來，以及地勤人員被飛機撞到所引起。

系統組件故障—發動機 (SCF-PP) 事故：2023 年發生 3 件系統組件故障—發動機 (System Component Failure—Power plant, SCF-PP) 事故，其中 2 件與發動機起火有關，另一起與發動機熄火有關，所幸沒有一件是致命事故。在前 5 年間，平均每年發生 3.4 件此類事故。

從 2018 至 2023 年的 6 年間，發生 21 件系統組件故障—發動機 事故，其中有 5 件是致命事故，導致 11 名乘客和機組人員、一位地面人員死亡。在這 21 件事故中，有

8 件發生在航線飛行階段，其他則分別為起飛 (4 件)、初始爬升 (2 件)、進場 (3 件)，以及落地或停機 (各一件) 等階段。大多數狀況是其中一具發動機失去動力，其他狀況則包括：起火或著火警告、「未封閉性」(Uncontained) 故障 (2 件)、吸入某物或某人、燃料不足、劇烈振動，以及壓縮器失速等。一般而言，這些狀況通常都需要飛行員關掉一具發動機，或是執行發動機熄火或推力完全喪失的緊急處置。從許多案例中顯示，發動機故障可能會導致迫降。

公務噴射機飛航事故

根據 ASN 資料庫，2023 年公務噴射機 (註六) 發生 32 件飛航事故，其中有 7 件是致命事故，導致乘客和機組人員共 27 人死亡，以及 2 位在地面上死亡。從 2018 至 2022 年的 5 年間，公務噴射機平均每年發生 33.8 件飛航事故。

從 2018 至 2023 年的 6 年間，公務噴射機發生 203 件飛航事故，其中有一半以上 (110 件) 是發生在落地階段。在這 203 件事故中，有 40 件是致命事故，造成 148 名乘客和機組人員死亡，以及 5 位在地面上死亡。

世界飛安基金會對公務噴射機的飛航事故數據分析，集中在 6 個事故類別，這些類別約佔 2023 年飛航事故的 84%，以及佔從 2018 至 2022 年間飛航事故的 82% (圖 5)。

公務噴射機飛航事故類別

偏離跑道 (RE) 事故：到目前為止，2023 年和本報告撰述期間，偏離跑道是公務噴射機作業中最常見的事故類別。2023 年的 32 件飛航事故中，有 14 件涉及偏離跑道，

在這 6 年間，則有 84 件偏離跑道事故。

2023 年 14 件偏離跑道事故中，有一件是致命事故。那是發生在 2023 年 11 月，一架執行空中救護任務的 Learjet 35A 公務機，墜毀在墨西哥 Cuernavaca 國際機場，造成 2 名飛行員和 2 位乘客遇難。

從 2018 至 2023 年間，有 84 件偏離跑道事故，其中 7 件是致命事故，導致 21 名乘客和機組人員死亡，以及 1 人在地面上死亡。最嚴重的致命事故發生在 2020 年 3 月 29 日，當時以色列航太工業公司的一架 1124A West wind II 型飛機，在菲律賓馬尼

圖 5：自 2018 至 2023 年，公務噴機發生飛航事故的類別與數量表。

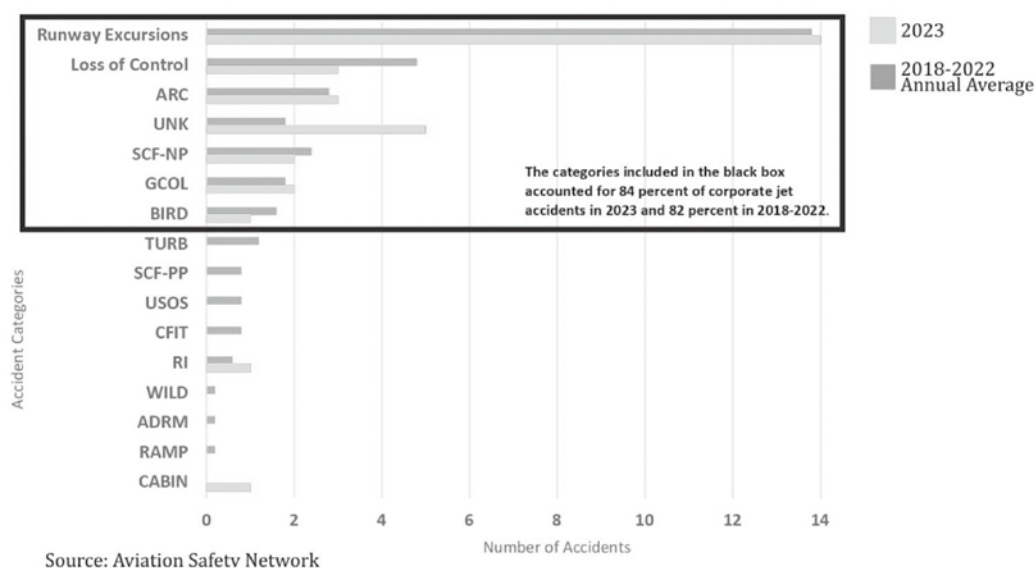
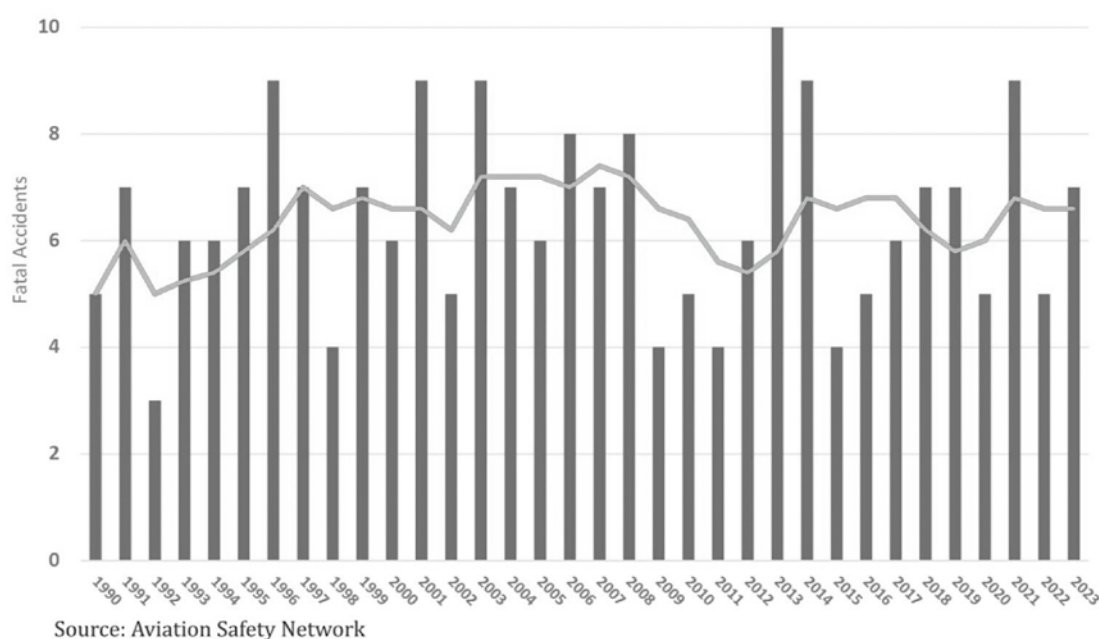


圖 6：自 1990 至 2023 年，公務噴機發生飛航事故數量表 (直線表示每年數量，曲線表示滾動平均量)。



拉 Ninoy Aquino 國際機場放棄起飛時起火墜機，造成 8 名乘客和機組人員遇難。

在落地後發生偏離跑道事故，要比在起飛階段更為普遍。從 2018 至 2023 年間，在 84 件偏離跑道事故中，有 72 件發生在落地階段。依據 ASN 更寬廣的數據分析顯示，包括公務噴射機和商用民航機在內，從 2018 至 2023 年間的 222 件跑道入侵事故中，也有 186 件發生在落地階段。更寬廣的數據資訊，可在世界飛安基金會「全球防止偏離跑道行動計劃」(GAPPRE) 的網站頁面上找到；該數據資訊還顯示，偏離跑道比衝出跑道更為常見。

LOC-I 事故：除了偏離跑道事故類別之外，LOC-I 事故也是最常見的類別。2023 年發生 3 件公務噴射機 LOC-I 事故，其中 1 件是致命事故，共造成 8 人死亡。從 2018 至 2022 年的 5 年間，一共發生 24 件，平均每年 4.8 件。

從 2018 至 2022 年的 5 年間，在 24 件飛行中失控事故中，有 16 件是致命事故，導致 80 名乘客和機組人員死亡。2021 年是死亡人數最嚴重的一年，當時發生 5 件致命事故，一共造成 27 人死亡。在此期間，最嚴重的致命事故是加拿大一架挑戰者 601-3A 公務噴射機，從美國內華達州 Las Vegas 機場飛往墨西哥 Monterrey 機場，在飛行途中墜毀在沙漠地區，造成 13 名乘客和機組人員全部遇難。

空氣動力學中的失速狀況，一向是飛行中失控事故的主要肇因，其中約佔 25% 涉及失速。更具體地說，環繞進場階段的失速狀況，依然是飛行中失控事故的重要肇因；另

一項影響因素，則是空間迷向所導致。

跑道異常接觸 (ARC) 事故：2023 年發生 33 件跑道異常接觸事故，都沒有成為致命事故。在過去 5 年間，發生 141 件跑道異常接觸事故，平均每年發生 2.8 件。在此期間，沒有任何一件是致命事故。

在這 5 年間，至少有 2 件事故涉及飛航組員沒有放下起落架；而在其他事故中，則因零附件發生故障，導致起落架壓縮。有 2 件事故，在落地階段因起落架維護不當而造成；另 2 件事故則涉及在放棄起飛，以及跑道偏離時起落架壓縮。2023 年的 2 件事故，一件是在穩定進場後重落地，另一件則是在起落架觸地後發生故障；這 2 件事故仍在調查中。

未知 (UNK) 事故：2023 年共有 5 件事故符合未知狀況，意指沒有足夠的事故相關資訊可用，因而將其歸納為此特定類別。在過去 5 年間，平均每年發生 1.8 件未知事故，比過去 5 年間的任何一年都多。2023 年未知事故中有 4 件致命事故，相當於前 5 年的總數。在本報告撰述的 6 年間，發生 8 件致命事故。另在 7 件事故中有 5 件致命事故，造成 24 人死亡。其他的許多飛航事故，我們對其為何發生知之甚少；有某些事故，在飛機墜毀的飛航組員殉職前，都沒有與之進行任何溝通。也有某些事故，可能會隨著事故調查的完成，將會被重新分類。

在過去 5 年間，有 15 件事故被歸類為未知事故。這些事故的促成因素包括：機械故障；在起飛、進場或落地階段時碰撞到某物；滑行階段發生事故；以及武裝衝突期間的損害。

系統組件故障—非發動機 (SCF-NP) 事故：2023 年發生 2 件系統組件故障—非發動機事故，其中有一件是致命事故。2023 年 3 月 3 日，一架龐巴迪 BD-100-1A10(挑戰者 300) 公務噴射機，從美國新罕布夏州 Keene 機場飛往維吉尼亞州 Leesburg 機場的航線途中發生事故。當時有一位乘客在飛機突然俯仰升降的過程中受傷，這可能是因為水平安定配平系統(可調整水平的穩定器)故障所引起；這名乘客後來因為傷勢過重，在醫院中死亡。

在過去 5 年間，發生 12 件系統組件故障—非發動機事故，其中有 2 件是致命事故。2022 年 9 月 4 日，一架西斯納 551 Citation II/SP 飛機從西班牙飛往德國的航線途中，墜毀在 Baltic 的海中。在無線電通話中表示，飛機發生了加壓的問題；從戰機在護航時拍攝的照片顯示，一名喪失行為能力的飛行員坐在駕駛艙左側，他的氧氣面罩懸掛在架上而沒有戴好。雖然調查仍在進行中，但懷疑這架飛機是在燃料耗盡後墜入海中。另一起致命事故發生在 2018 年 1 月，當時一架灣流 G150 飛機在地面上，座艙開始加壓；座艙門因壓力過大而開啟，機長被座艙門擊中受傷後死亡。從 2018 至 2022 年間，其餘事故則涉及起落架壓縮、飛行中加壓故障，以及煞車起火等。

鳥擊事故：2023 年發生一件鳥擊事故。在過去 5 年中，發生 8 件事務，平均每年 1.8 件。在本報告撰述期間，沒有發生任何致命事故。在每一件事故中，都造成飛機的重大損壞；至於這些事故，幾乎發生在所有的飛航階段。除了有一件事務之外，所有的事故報告都發生在美國，這可能與美國有廣泛的公務航空交通運作，以及「聯邦航空總署」(Federal Aviation Administration, FAA) 鼓勵營

運業者，加強提報鳥類和野生動物襲擊事故有關。

政策與行動需求

近幾十年來，航空業在安全方面獲得重大進展，但世界飛安基金會和其他利益相關業者，仍持續不斷地追求更大的提升。先進技術對空中碰撞、CFIT 等事故的減少，產生積極性的影響；另對 LOC-I、偏離跑道等事故的降低，也有較小幅度的進步。經由作業流程和行為規範的改變，飛航安全也能得到提升。近幾年來，隨著安全績效的進展腳步趨緩，往往更需要加強標準作業程序(SOP)，以及強化造成事故的薄弱環節。世界飛安基金會認為，本報告所討論的還有很多地方需要學習，諸如全球飛航事故記錄中，有關事故類別與優先考量降低事故的努力等範疇。

安全文化 — 有鑒於安全文化必須健全的重要性，以及隨著營運增加而促成推動安全改進的必要性，營運業者、製造廠商、監管機構，以及其他共同利益相關者，都有必要克服自滿心態，並積極關注有助於降低風險的政策與行動。這些措施包括：嚴格遵守安全協定和標準作業程序、定期進行安全訓練、促進個人和團隊的安全責任、針對風險識別和降低方面進行合作，以及從高層到基層和組織之間共享安全資訊。

亂流事故 — 與亂流相關的飛航事故正在增加中，氣候變化可能是一個促成因素。搭機乘客必須認知繫好安全帶的重要性，並遵守機組人員的指示；不論這些指示是口頭傳達，還是通過安全帶標誌的燈號顯示。乘客在就座後，也應該習慣於把安全帶繫好。營運業者必須考量，如何提醒所有乘客和機

組人員，注意到未繫好安全帶的相關風險。除此之外，營運業者必須審查航班和客艙組員的標準作業程序，以確保客艙或空廚的安全檢查、客艙組員的自我保護，以及在威脅與疏失管理等作業流程之間取得平衡。營運業者必須持續提高檢測區域亂流的能力，特別是晴空亂流，並且要分享這些資訊。本報告引用NTSB的研究，其中包括一些值得考慮的建議事項，不僅只是適用於美國，並且適用於全世界。

偏離跑道事故 — 任何偏離對所有飛航階段而言，都是一個重大風險。世界飛安基金會全力支持並落實這些建議，因而發表了「全球防止偏離跑道行動計劃」(GAPPRE)、「重飛決心下達與執行」(GADM&E)等報告。「歐盟航空安全局」(European Union Aviation Safety Agency, EASA)即將提出指令，在商用航空營運中的大型飛機，必須配備衝出跑道的察覺與警告系統，某些飛機製造商已經在他們的機隊中配裝。該項技術在機隊的運用時間還不夠長，尚無法評量其有效性；但世界飛安基金會認為，該項技術有減少偏離跑道的潛力，應該全力支持之。

跑道入侵事故 — 世界飛安基金會也關注到跑道入侵的發展風險，特別是自2023年才開始有的跑道入侵事故報告，並認為提高這種安全風險認知非常重要。2023年12月，世界飛安基金會發佈了「全球防止跑道入侵行動計劃」(GAPPRI)，並且全力支持所有航空共同利益相關者，審查該計劃文件及建議事項。

地面損壞事故 — 面對地面碰撞和所造成的損壞風險，必須採取預防措施，並納入飛航、地面、維護，以及其他作業的常規程序中。當航空業招募大量新人與缺乏經驗人

員時，相關作業領域之間的介面，可能會導致相當風險；而這些風險經由適當的專業人員，可能就足夠處理化解之。世界飛安基金會強烈建議營運業者、維護和地勤單位，加強日常作業的第一線員工，運用適當的標準程序和安全規範。投入適當的培訓資源，也至關重要。此外，世界飛安基金會也支持技術運用的解決方案，諸如：防撞系統以減少地面損壞的發生。

LOC-I 事故 — 儘管最近有些改進，但這一領域仍然需要關注，並且必須更好地遵守檢查程序。當完成飛航班表的壓力與標準作業程序發生衝突時，營運業者必須盡力落實健康的「組員資源管理」(Crew Resource Management, CRM)，並且確認該風險管理必須在可接受的範圍內。如果風險管理不能滿足飛航組員的需求，就必須重新審查並隨之修訂。營運業者和監管機構必須確保飛航組員的訓練，符合ICAO Annex 6 Part 1 Chapter 9 Para 9.3.1的旨意，內容涵蓋相關知識和技能，以及人類績效的展現等。

CFIT 事故 — 儘管情況有些改善，但風險依然存在。「儀器氣象條件」(Instrument Meteorological Conditions, IMC)下的情境察覺(SA)能力喪失，係該事故類別最常見的肇因之一。與飛行中失控事故一樣，確保飛航組員的訓練質量至關重要。如果飛機配備了地形警告系統，營運業者必須定期監控飛航組員，對這些警告的遵守和回應情況；如果飛機沒有配備這些系統，營運業者必須確保其標準作業程序涵蓋了預防措施。同樣重要的是，營運業者必須確保使用最新的地形資料庫，並且在可能的情況下，使用全球定位系統作為位置資訊的來源。

世界飛安基金會對事故的研究重點，放在全球各地規模龐大與相關的類別上。想要的安全方面獲得重大進展，就必須關注發生事故的環境和肇因；這些事故類別佔事故的大多數，以及所有死亡人數的 90% 以上。技術改進可能會持續解決這些事故的某些肇因，但人類關注的是作業細節，修改程序以確保對安全成果的高度信心，經由過去錯誤以吸取必要教訓，在多方面扮演重要角色以採取必要行動。正如我們在分析中指出的那樣，並非全球每個地區或每個部門都經歷過類似的結果，所以解決方案可能需要專注於獨特的經驗和挑戰。世界飛安基金會將繼續尋找機會，以改善航空業的整體風險狀況；毫無疑問的是，改進措施將需要共同利益相關者之間的密切合作。

ASN飛航事故網路平台

世界飛安基金會創建了一個互動式的飛航事故網路平台，可以在其中找到有關 2023 年和過去 5 年所發生的飛航事故數據。該網路平台涵蓋民航機和公務噴射機的飛航事故，使用者能夠檢視數據並進行自己的研究。它還包括與 ASN 相關飛航事故的入口連結。飛航事故網路平台可在網路中找到。



註一、ICAO 對飛航事故的定義：係與航空器運作有關的事故，該事故發生在任何人登上飛機意圖飛行時，至所有此類人員下機期間所發生的事故；其中某人因在飛機內，或直接碰觸飛機的任何部分，或直接曝露在噴射氣流中，或飛機遭受到嚴重損壞，或結構故障等，因而造成致命或重傷的情境。完整定義可在 ICAO 的網路上獲得。

註二、跑道入侵意外事故分類：A 類係指嚴重意外，非常勉強才能避免碰撞發生。B 類係指隔離減少且有潛在發生碰撞的風險，這可能必須有立即糾正 / 閃避的反應措施，才能避免碰撞發生。

註三：在 ASN 的資料庫中，民航機的定義為原始認證：可搭載 14 名或更多乘客的飛機。

註四：「聯邦法規第 14 章第 121 節，登載航空營運業者在預防亂流相關傷害的指導，」安全研究報告，NTSB/SS-21/01 PB202 1-1 00927，2021 年 8 月 10 日公佈。

註五：V1 是指在緊急情況下，可以放棄起飛的最大安全速度。

註六：以下是本分析涵蓋的公務噴射機在 ICAO 的航機編號代碼：ASTR、BE40、C25A、C25B、C25C、C25M、CS00、CS01、CS10、CS2S、CS26、CSS0、CS51、CS5B、CS60、CS6X、C650、C680、C68A、C700、C750、CL30、CL35、CL60、DJET、E545、E550、E50P、ES SP、EAS0、F2TH、F900、FA10、FA20、FAS0、FA5X、FA6X、FA7X、FA8X、G150、G250、G280、G650、GA4C、GA5C、GA6C、GA7C、GA8C、GALX、GL5T、GL7T、GLEX、GLF3、GLF4、GLFS、GLF6、GSPN、HA4T、HDJT、HF20、LJ23、LJ24、LJ25、LJ28、LJ31、LJ35、LJ40、LJ45、LJ55、LJ60、LJ70、LJ75、LJ85、MS76、MU30、PC24、PRM 1、S601、SF50、SJ30、SJET、SP33、WW24。

譯自：2023 SAFETY REPORT/Flight Safety Foundation/MARCH 2024

2023 Flight Safety Report

FLIGHT SAFETY FOUNDATION

INTRODUCTION

An analysis of data in the Foundation's Aviation Safety Network (ASN) database reveals that 2023 was one of the safest years on record for commercial airline operations. The ASN data show that there were zero fatal accidents¹ involving commercial jet airliners last year. Additionally, the total number of accidents, including fatal and nonfatal events, fell to 94 last year, compared to 121 in 2022. This decline in accidents also represents a significant improvement when compared to the average of 115.8 accidents recorded per year from 2018 to 2022.

The absence of fatal commercial jet airliner accidents in 2023 is indeed a reason to be thankful and serves as a reminder of the importance of continued vigilance in maintaining aviation as the safest mode of transportation. But it is also important to recognize that 2023 witnessed seven fatal accidents involving turboprop or piston-engine airliners. Those seven accidents resulted in 107 fatalities among passengers and crew

and the death of one person on the ground. In addition, corporate jets used in a variety of operational roles were involved in 32 accidents last year, seven of which were fatal accidents.

ASN data show significant progress has been made in reducing the number of events in historically high-risk accident categories, such as controlled flight into terrain, loss of control-in flight, and runway excursions. Improvements in these areas have been made through advances in technology and through the collaborative efforts of operators, manufacturers, and regulators, among others.

However, the absence of an accident is not evidence of the presence of safety. The aviation industry experienced an unacceptably high number of high-profile incidents in 2023 that could have been fatal accidents if not for a last-minute intervention or action by a pilot or air traffic controller or a stroke of luck. One notable incident was the near-collision of a FedEx Boeing 76 7 and a Southwest 737 at Austin-Bergstrom International Airport in Texas, U.S., in

¹ The International Civil Aviation Organization (ICAO) defines an accident as an occurrence associated with the operation of an aircraft that takes place between the time any person boards the aircraft with the intention of flight until such time as all such persons have disembarked, in which a person is fatally or seriously injured as a result of being in the aircraft or in direct contact with any part of the aircraft or has direct exposure to jet blast, or the aircraft sustains serious damage or structural failure. The complete definition is available [here](#).

February 2023. The two aircraft came within 100 feet (30 m) of each other as the FedEx aircraft was attempting to land and the Southwest jet was taking off from the same runway. A collision was avoided when the FedEx pilots rejected their landing. In a dozen other similar serious incidents, crews barely avoided catastrophic collisions. In the December 2023 *Global Action Plan for the Prevention of Runway Incursions (GAPPRI)* report, the Foundation warned of the severe consequences of runway incursion risks if proactive measures are not taken.

Just a few days into the new year, however, two accidents were recorded. On Jan. 2, 2024, a JAL Airbus A350 collided with a Japanese coast guard de Havilland Dash 8 on the runway at Tokyo Haneda International Airport, killing five of the six people in the coast guard airplane; all 379 JAL passengers and crew escaped without serious injuries. On Jan. 5, 2024, an Alaska Airlines Boeing 737 MAX-9 door plug blew out minutes after takeoff from Portland (Oregon, U.S.) International Airport; no one was seriously injured. These were preventable accidents and incidents that not only threatened the safety of passengers and crew but also undermine the public's confidence in our industry.

These close calls serve as stark warnings against complacency in an industry where impressive safety achievements are a given. While we acknowledge the safety performance achieved in 2023, all

stakeholders must remain vigilant. Complacency is a stealthy threat that can quietly infiltrate safety and quality protocols unless it is actively countered with a strong safety culture. Complacency can lead to shortcuts, neglect of procedures, the use of unconventional terminology, diminished awareness of surroundings, and a delayed response to escalating risks.

Combatting complacency demands an active strategy focused on ongoing quality enhancement, regular safety training, strict adherence to safety protocols, cultivation of a safety-first attitude, open discussions of potential risks, and the promotion of both personal and collective responsibility. Essentially, achieving sustained improvements in safety hinges on establishing and nurturing a robust safety culture.

Safety culture embodies an organization's perception, valuation, and prioritization of safety. A strong safety culture originates from leadership and flows through the entire organization, mirroring its genuine dedication to maintaining the highest levels of safety. It is crucial for leaders across all industry sectors to consistently convey, via their actions, words, policies, and procedures, that safety supersedes all other factors.

The near misses of the past year, the notable accidents in 2024, and the ongoing issues with runway incursions and other serious safety and quality concerns signal that safety buffers within the industry are being

stretched thin, highlighting the need to pay attention to these alarms. The industry is grappling with numerous challenges, including the recruitment, sourcing, and training of tens of thousands of new workers; the rising demand for travel; and the need to accommodate new and diverse types of operations within the airspace system. However, it also stands at the threshold of opportunity to bolster the resilience and safety of the aviation system through effective technological implementation, a deeper comprehension of human factors, a sustained dedication to quality, and a steadfast focus on leadership and safety culture values.

Runway Incursion Threat

Although there have only been five runway incursion accidents in the past six years and none in 2023, this accident category is included because there have been a number of serious close calls, among other reasons. Other long-standing accident categories — such as controlled flight into terrain (CFIT) and loss of control-in flight (LOC-I) — have seen a reduction in the number of accidents over the years, but because of the complex set of related factors that contribute to runway incursions, the industry could see more close calls as traffic increases. Runway incursions usually do not result in accidents, but the International Civil Aviation Organization (ICAO) lists runway incursions among the five highest-risk categories of events that must be addressed to reduce the possibility of aviation fatalities.

Reducing the risk requires a collaborative approach involving aircraft operators, air navigation service providers, airports, and regulators.

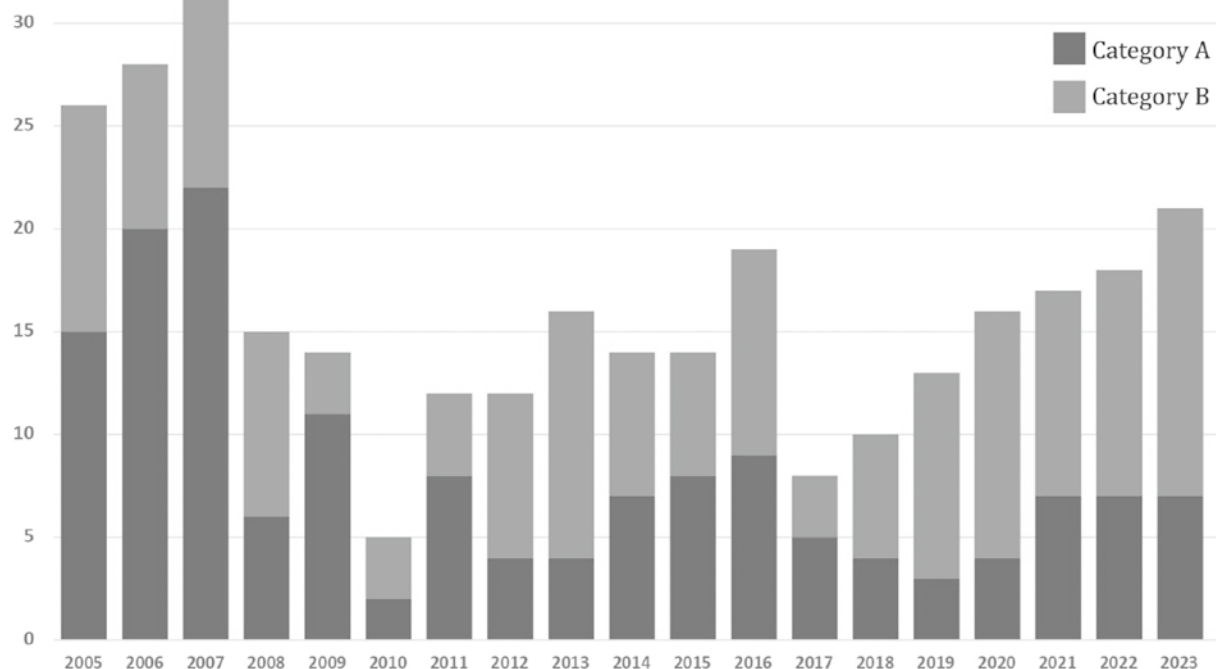
In December 2023, the Foundation published the Global Action Plan for the Prevention of Runway Incursions (GAPPRI). This effort involved more than 200 aviation experts from 80 organizations around the world working together on the analysis of multiple global and regional datasets, combined with insights garnered from operational expertise. This strategy extended beyond the study of only hazardous events; the recommendations incorporate lessons from all operations — operations in which everything goes right as well as those in which something goes wrong. It's worth reviewing the analysis that was part of the GAPPRI initiative.

The analysis, which led to the project's recommendations, found that:

- The frequency of runway incursions in the U.S. National Airspace System (NAS) during 2022 was 33 per 1 million takeoffs and landings. The number and rate of the most serious runway incursions (Categories A and B)² are increasing. (Figures 1 and 2)
- In the United States, the most frequent contributor to runway incursion events is pilot deviation. Over a recent five-year span, pilot deviation accounted for 64 percent of the incursions, followed by

Figure 1:

The number of Category A and B runway incursions reported at U.S. airports since 2005 .



(Source: U.S. Federal Aviation Administration)

vehicle/pedestrian deviation (19 percent), and operational incidents related to air traffic controllers (17 percent).

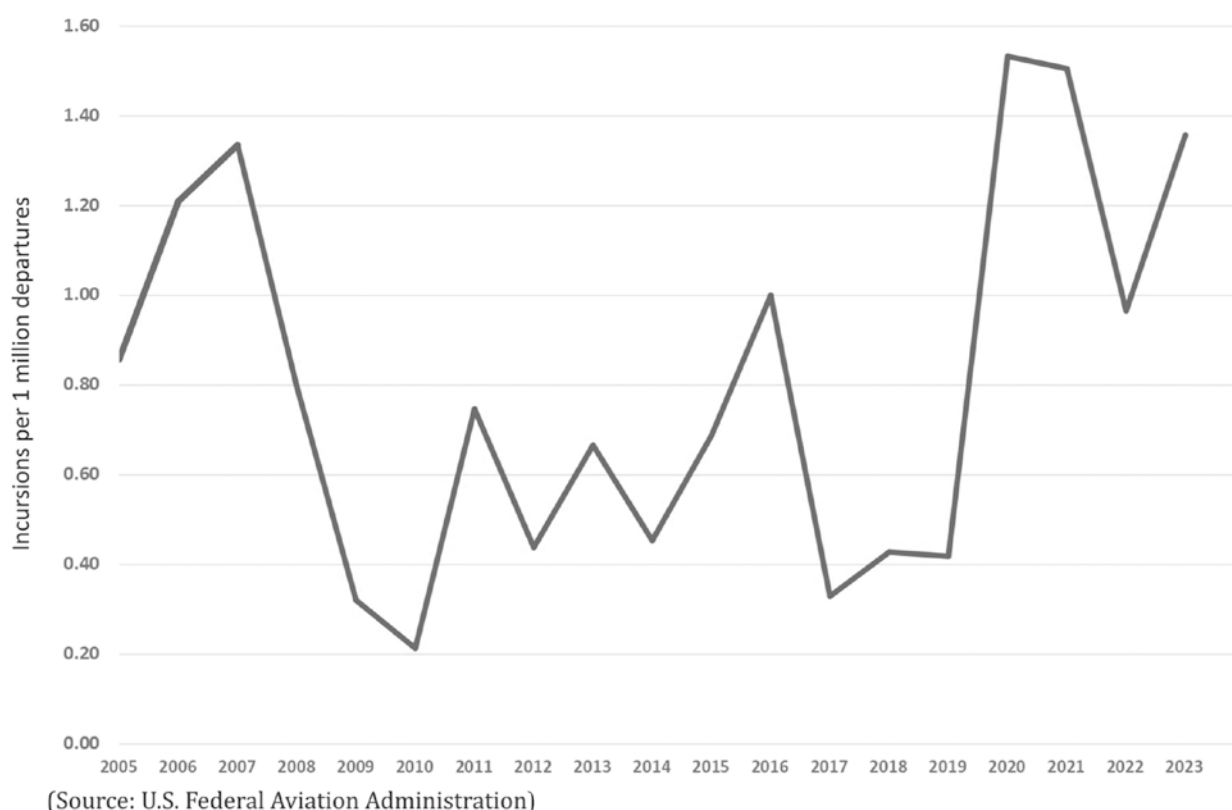
- In the United States, general aviation aircraft were involved in 70 percent of the runway incursion incidents during the five-year period.
- In a review of international accidents and incidents, several events from a sample of 68 runway incursion events involved the use of different radio channels and/or

language for communication between air traffic control (ATC) and vehicles authorized for airside operations. This impacted the situational awareness of other traffic and prevented the resolution of traffic conflicts.

- In the same international review of 68 runway incursion accidents and serious incidents, several events involved controllers not checking compliance with potentially critical clearances.

² Category A is a serious incident in which a collision was narrowly avoided. Category B is an incident in which separation decreases and there is a significant potential for collision, which may result in a time critical corrective/evasive response to avoid a collision

Figure 2 The number of Category A and B runway incursions per 1 million departures incurred by Part 121 and Part 135 carriers since 2005.



- The rate of reported runway incursion incidents increased during the period from January 2020 through December 2022, according to an analysis of International Air Transport Association (IATA) Incident Data Exchange (IDX) data. The most reported events came from the European region (35 percent), followed by Latin America/Caribbean (26 percent) and North America (18 percent).
- The majority of runway incursion incidents involving aircraft taxiing across a runway

without clearance occur during the after-landing phase.

Airliner Accidents

There were no commercial jet airliner³ fatal accidents in 2023 and seven turboprop and piston engine airliner fatal accidents. Those seven accidents, five of which involved Cessna 208 Caravans, resulted in 107 fatalities among passengers and crew and one ground fatality. Three of the fatal

³ In the ASN database, airliners are defined as aircraft originally certificated to carry 14 or more passengers

accidents occurred in nonscheduled passenger operations, one in scheduled passenger operations and one in cargo operations. The other two fatal accidents occurred in passenger operations, but the type of operation is unknown.

The total number of airliner accidents, including both fatal and nonfatal accidents involving jet-, piston-, and turboprop-powered aircraft, declined 22 percent to 94 in 2023 from 121 the previous year. The 94 accidents in 2023 also represent a decline of nearly 22 percent from the average of 115.8 accidents per year in the five-year 2018-2022 period.

For the second year in a row in 2023, turbulence-related accidents were the most frequent accident type. However, the number

of accidents in the high-risk category (runway excursions, LOC-I and CFIT), was 63 percent less in 2023 than the annual average for the five-year 2018-2022 period.

As accidents become less common, the Foundation believes safety analysis must be strengthened through an improved understanding of accident risks — an understanding that can be achieved through an assessment of incidents or other operational precursors, such as runway incursions, near-midair collisions, and go-arounds.

The Foundation's analysis of airliner accident data shows that 11 accident categories accounted for slightly more than 92

Figure 3 Airline Accidents and Accident Categories, 2018-2 23.

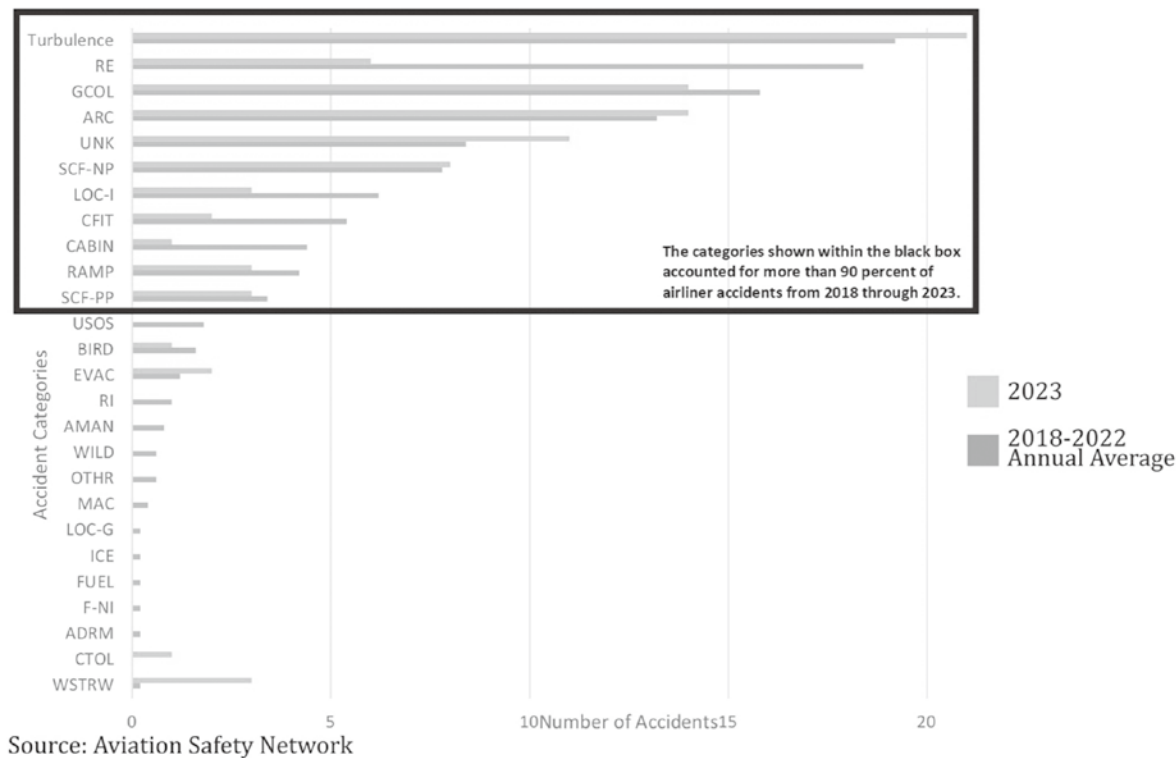
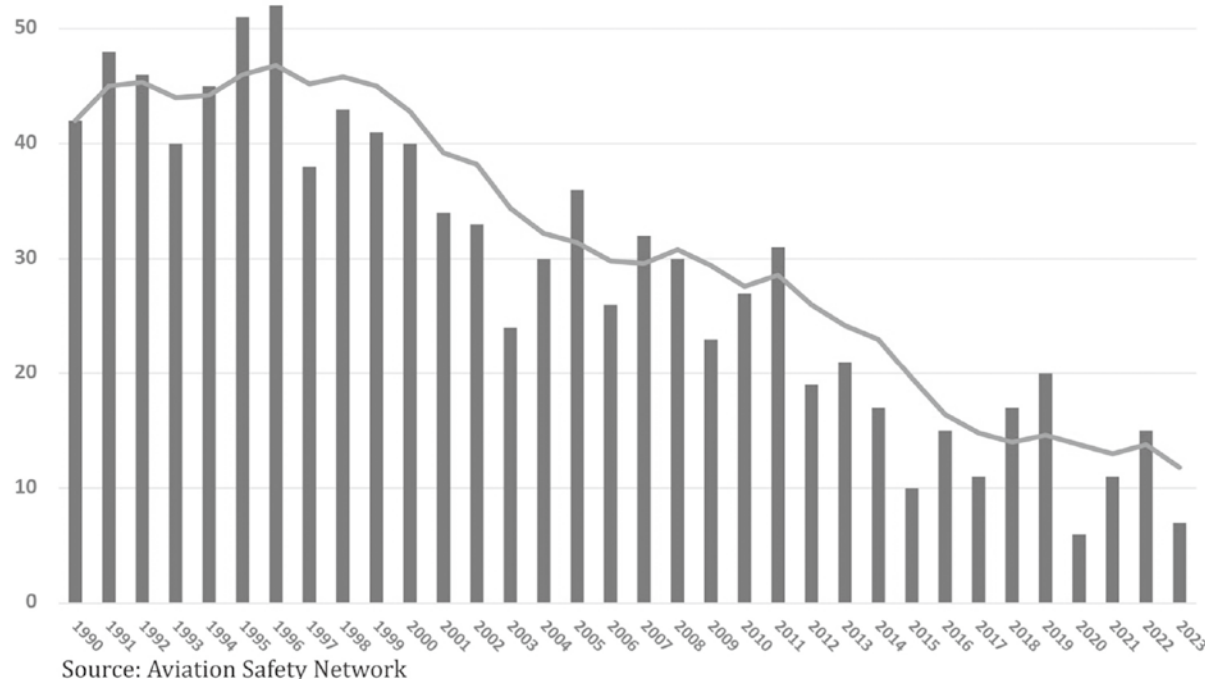


Figure 4 Airliner Fatal Accidents, 1990-2023 (Blue bars represent annual number of fatal accidents, orange line indicates the rolling average).



percent of total airliner accidents in 2023 and all of last year's fatal accidents. During the five-year period from 2018 through 2022, those categories or accident types accounted for a little less than 92 percent of all airliner accidents and nearly all fatalities. Each of those categories is highlighted in more detail below.

Airliner Accident Categories

Turbulence (TURB): For the second year in a row, turbulence-related accidents were the most frequent accident type. There were 21 turbulence-related airliner accidents in 2023, which is a slight change downward from 22 accidents in 2022, when there were fewer overall operations. In the 2018-2022 period, there were 97 turbulence-related accidents, or

an average of 19.4 per year. The worst year for turbulence-related airliner accidents was 2019, when there were 27. None of the 2023 turbulence-related accidents was a fatal accident but all involved serious injuries to passengers and/or crewmembers.

During the period under review (2018-2023), turbulence events occurred more often in North America and Asia and less often in Europe and Africa. North America accounted for 41 percent of all accidents, but for 51 percent of all turbulence accidents. Asia accounted for 16 percent of all accidents but 26 percent of all turbulence accidents. The United States had the most turbulence-related accidents, with 59, and there were 16 in Japan. Together, these two countries accounted for 63 percent (72 of 117) of all

turbulence accidents during the review period.

Turbulence has long been a leading cause of injuries to airplane occupants, particularly flight attendants, in nonfatal accidents, and incidences of turbulence are expected to increase because of climate change, IATA said in 2018 when launching its Turbulence Aware program. In a Safety Research Report⁴ published in 2021, the U.S. National Transportation Safety Board (NTSB) said that from 2009 through 2018, turbulence-related accidents accounted for more than one-third of all accidents involving U.S. scheduled airlines.

According to the ASN database, there were three wind shear/thunderstorm-related accidents in 2023. Together, turbulence and wind shear/thunderstorm accidents represent more than 25 percent of all airliner accidents last year. During the previous five years, those two categories combined represented roughly 17 percent of total airliner accidents.

The incidences of turbulence-related accidents are far higher among Part 121 (scheduled operations) carriers than among Part 135 (commuter and on-demand) operators, and flight attendants are the most likely people on board airliners to be seriously injured, the NTSB report said. This is likely due in part to the fact that Part 121 aircraft often are larger than Part 135 aircraft and

carry more passengers and cabin crew, which increases the potential for injuries if an aircraft encounters severe, unexpected turbulence.

Runway Excursions: The ASN database shows there were five runway excursion accidents involving airliners in 2023, which is a significant reduction from the 2018-2022 period, when then there was an average of more than 18 runway excursion accidents per year. There were 25 runway excursion accidents in 2020, during which much of the commercial aviation industry was shut down due to the pandemic, but only six in 2021 as the industry began to recover.

Runway excursions occur frequently, but usually are not fatal. In 2023, of five runway excursion accidents, one was a fatal accident. In that accident, an Embraer EMB-1 IOPI Bandeirante crashed at Barcelos Airport in Amazonas, Brazil, during heavy rain. After touching down, it ran off the runway and collided with the airport's protective fence and, subsequently, with an embankment. The two pilots and 12 passengers died in the accident.

Since 2018, there have been nine fatal runway excursion accidents resulting in 101 fatalities among passengers and crew. All but one of the nine occurred during the landing phase of flight. The worst fatal runway excursion accident during the period occurred in March 2018 when a US-Bangla Airlines de Havilland Dash 8 veered off the runway while

⁴ "Preventing Turbulence-Related Injuries in Air Carrier Operations Conducted Under Title 14 Code of Federal Regulations Part 121," Safety Research Report, NTSB/SS-21/01 P82021-100927, Adopted Aug. 10, 2021

landing at Kathmandu, Nepal, resulting in 51 fatalities among the 71 passengers and crewmembers.

Since 2018, 82 percent of the 97 excursion accidents in the ASN database occurred during landing, with more veer-offs than overruns. Unstable approaches and failure to go around were the most common contributing factors. Other contributing factors included flight crew handling errors (speed and directional control), contaminated runways, crosswinds, late or inaccurate reports on runway conditions and/or weather, mechanical failures or gear collapses, and failure to reject the takeoff before V_1 .⁵

In the period under review, runway excursion accidents occurred disproportionately more often in Asia, Africa, and South America and less often in Europe and North America.

Asia, Africa, and South America accounted for 35 percent of all accidents during the period, but 49 percent of all runway excursion accidents.

Because of the complexity of risk factors involved in runway excursions—such as stability of the approach, stability of the landing, condition of the runway, capabilities of the aircraft, and instructions from air traffic control, among others—prevention requires coordination among numerous stakeholders, including operators, airports, air navigation

service providers, manufacturers, and regulators. In 2021, the Foundation and EURO CONTROL, working with more than 100 aviation professionals from 40 organizations, published the Global Action Plan for the Prevention of Runway Excursions (GAPPRE), which provides recommendations and guidance materials to a variety of stakeholders. The Foundation's 2017 Go-Around Decision-Making and Execution (GADM&E) Project report also contains valuable data and recommendations.

Ground Collision (GCOL): In 2023, there were 14 ground collision (GCOL) accidents, but in four cases the accident is counted twice because it involved a collision between two commercial aircraft. Those four cases resulted in damage to eight aircraft. The other six events involved collisions between an aircraft and ground equipment or between a commercial aircraft and a non-commercial aircraft. The five-year average for GCOL accidents is 15.8 per year. The worst year was 2019, when there were 28 accidents. Ground collision accidents usually occur during push back or taxi operations at an airport. If a collision occurs during a runway incursion, that event is included in the runway incursion category.

Abnormal Runway Contact (ARC): In 2023, there were 15 abnormal runway contact (ARC) accidents, slightly more than the average of 13.2 per year during the 2018-

⁵ V_1 is the maximum speed at which a rejected takeoff can be safely initiated in an emergency

2022 period. None of the 15 ARC accidents in 2023 were fatal. ARC includes any landing or takeoff involving abnormal runway or landing surface contact. Included in this category are hard and heavy landings, long/ fast landings, off-center landings, and crabbed landings. Included in the 2023 accidents were five tail strikes, one main landing gear collapse, one failure of a nose landing gear to extend, and one wingtip strike. In the six-year period 2018-2023, one of the 80 ARC accidents was fatal. All but seven of the 80 accidents occurred during the landing phase, with six on takeoff and two on the ground. Of the 80 accidents, 35 involved a tail strike, eight involved landing gear not extending, three involved the landing gear not being selected down, and 10 involved a go-around. Many of these types of events happen when wind conditions at the airport are challenging, when unstable approach criteria may not be met before attempting to land, or because of improper handling as the airplane approaches the ground or while the aircraft is being flared for landing.

Unknown: Accidents are categorized as "unknown" if there is not sufficient information to place them in other categories. There were 12 accidents in 2023 in this category. The average for the previous five years was 8.4 per year. Three of the 12 accidents in 2023 were fatal accidents, resulting in 20 fatalities. The worst accident occurred on Oct. 29, 2023, when a Cessna 208B Grand Caravan operated by ART Taxi Aereo was destroyed when it crashed in a heavily wooded area

shortly after takeoff from Rio Branco-Placido de Castro International Airport, Brazil. All 12 people on board were killed. For many of the accidents in this category, little is known about what happened during the flight or the aircraft crashed without any communication from the flight crew. As accident investigations are completed, many of these accidents may be recategorized.

In the previous five years, there were 42 accidents in the unknown category, 11 of which were fatal accidents resulting in 219 fatalities. In the 2018-2022 period, there was a lack of evidence or a missing investigation in 21 of the accidents; eight accidents involved some form of mechanical failure (engine, flaps, electrical fire, landing gear, or other part failures); nine involved collisions with something on takeoff, approach, taxi, or landing; and the remainder involved issues like foreign object damage, cargo fires, and possible weight and balance issues.

System Component Failure-Non Powerplant (SCF-NP): There were eight SCF-NP accidents in 2023, about equal to the average per year for the previous five years. Four of the 2023 events were gear collapses, two involved hydraulic failure, one was a burst tire, and the other was a pressurization problem. For the six-year 2018-2023 period, there were 47 accidents, including one fatal accident. The fatal accident occurred in September 2022, when a float-equipped de Havilland Canada DHC-3T Turbine Otter that was en route to its destination abruptly

pitched down and crashed in the water in Mutiny Bay, Washington, U.S. All 10 people aboard were killed. The NTSB determined that the probable cause was the in-flight unthreading of a clamp nut from the horizontal stabilizer trim actuator, which resulted in the stabilizer moving to an extreme trailing-edge-down position.

Nearly all of the SCF-NP accidents during the review period resulted in substantial damage to the aircraft. At least one involved injury to passengers. More than half of the accidents occurred during the landing phase, but 11 occurred during the ground phase, six during takeoff, one during initial climb, and three during the en route phase. Generally, these events were caused by landing gear malfunctions that resulted in a landing gear collapse while operating (28) or a failure to extend or retract (three). Other mechanical failures involved flight controls, pressurization, tires, windows, brakes, cargo door, damage to landing gear, damage to a generator, and foreign object damage (FOD). Insufficient or incorrect maintenance was related to at least five events.

Loss of Control-In Flight (LOC-I): In 2023, there were three airliner LOC-I accidents, of which two were fatal, resulting in 73 fatalities among passengers and crew. The worst of the two fatal accidents occurred on Jan. 15, 2023, when an ATR 72-500 crashed while on final approach to the new Pokhara International Airport in Nepal. All 72 passengers and crew were killed in the

accident. In the 2018-2022 period, there were an average of 6.2 LOC-I accidents per year.

LOC-I is considered a high-risk accident category because these accidents often are fatal. During the 2018-2022 period, there were 31 LOC-I accidents, and 20 of them, or 65 percent, were fatal accidents resulting in 846 fatalities among passengers and crew and seven ground fatalities. Two of the three worst fatal LOC-I accidents since 2018 were the Boeing 737 MAX crashes in Indonesia and Ethiopia, which together resulted in 346 fatalities. Also included in the total is the accidental January 2020 shutdown of a Ukraine International Airlines Boeing 737-800 near Tehran, Iran, by Iranian air defense forces, which resulted in 176 fatalities.

Ten accidents in 2018-2022 involved aerodynamic stalls, some because of icing conditions and others because of excessive pitch and slow airspeeds. Improper response to downdrafts, wind shear or crosswinds was noted in six of the accidents, and four involved excessive maneuvers. Other conditions included loss of situational awareness in severe weather, inadvertent activation of go-around mode, and engine failure.

Controlled Flight Into Terrain (CFIT): Like LOC-I accidents, CFIT accidents are a high-risk category because of the likelihood of fatalities. However, neither of the two CFIT accidents that occurred in 2023 was a fatal accident.

During the 2018-2022 period, there were 27 CFIT accidents, or an average of 5.4 per year. Fifteen of the accidents during the five-year period were fatal, resulting in 111 fatalities among passengers and crew. One of the worst accidents during the period occurred on July 6, 2021, when an Antonov An-268-100 being operated by Kamchatka Aviation Enterprise on a scheduled domestic flight in Russia struck a cliff while on approach to Palana Airport on the Kamchatka Peninsula. Twenty-eight passengers and crew were killed in the accident.

Most of the CFIT accidents that occurred during the 2018-2022 period involved adverse weather conditions, such as low visibility and ceilings, fog, and snow. Many happened in mountainous terrain. In addition, the majority of accidents involved operational shortcomings of some kind, including visual flight rules flights continuing into instrument meteorological conditions, descent below established minimums, deviations from established routes, and late or improper go-arounds. Many of the deviations and descents below minimums could be characterized as intentional noncompliance, a factor that some believe may be under-recognized in accident investigations. Of the total of 27 CFIT accidents since 2018, 12 occurred during cargo operations.

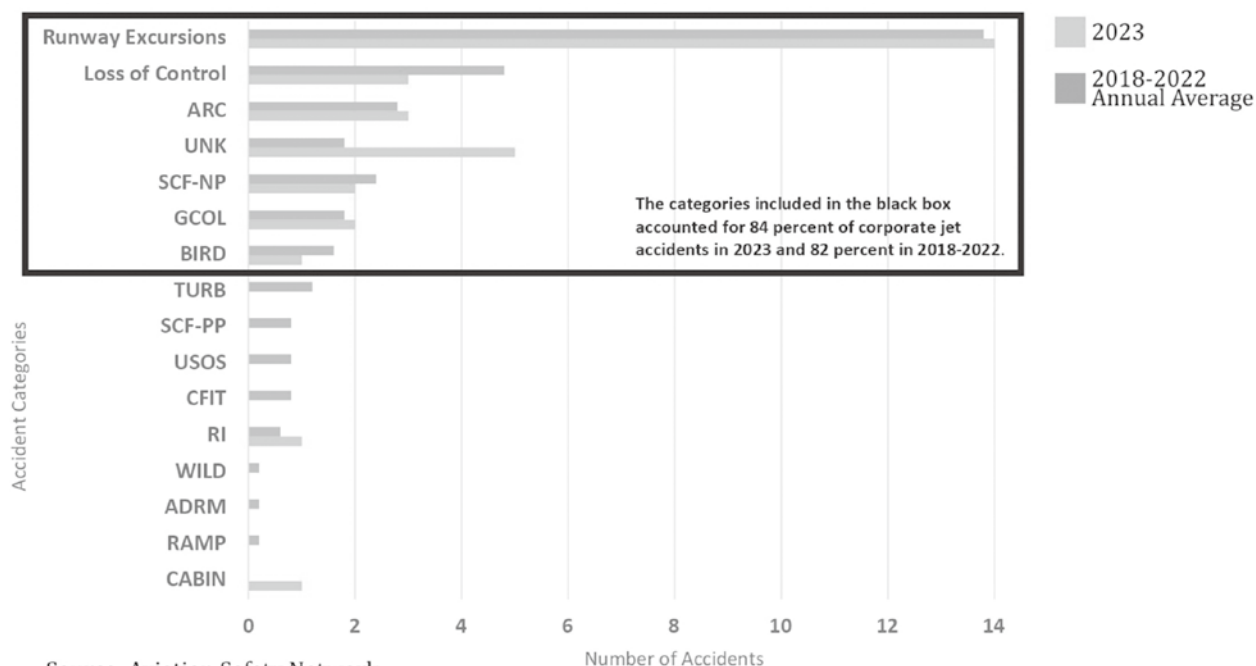
Cabin: In the six-year period 2018-2023, there were 23 events that occurred in passenger cabins that are considered accidents because of the seriousness of the

injuries suffered by crew and/or passengers. None of the events were fatal. Nineteen of these events involved crew injuries, and six involved passenger injuries. Generally, these events were caused by falls in or outside the aircraft, tripping over something, collisions with galley carts, hot liquid spills, and the aircraft abruptly changing speed, among other reasons. There was one cabin-related accident in 2023, and the average for the 2018-2022 period was 4.6 per year.

Ramp: There were three ramp accidents in 2023, two in the United States and one in Germany.

The average for the previous five years was 4.2 accidents per year. In the six-year period, 2018- 2023, there were 24 ramp accidents, one of which was fatal. In the fatal accident, a flight attendant fell from an open aircraft door. Ten of the 24 events involved passenger injuries, four involved crew injuries, and nine were ground staff injuries. Generally, these events were caused by falls from the aircraft stairs, an aircraft door, jet blast, a sudden stop by the aircraft, or ground staff being hit by the aircraft.

System Component Failure-Powerplant (SCF-PP): In 2023, there were three SCF-PP accidents, two of which were engine fire-related, and one of which was a flameout. None of the accidents were fatal. In the previous five-year period, there were an average of 3.4 accidents per year.

Figure 5 Corporate jet Accidents and Accident Categories, 2018-2023

In the six-year period 2018-2023, there were 21 SCF-PP accidents. Five of these accidents were fatal, resulting in 11 fatalities among passengers and crew and one ground fatality. Eight of the 21 accidents happened during the en route flight phase, with the others being divided among takeoff (four), initial climb (two), approach (three), and one each during landing or standing. Most involved loss of thrust in one of the engines. Other factors included fire or fire warnings, uncontained failures (two), ingestion of something or someone, fuel starvation, heavy vibrations, and compressor stalls. Often these

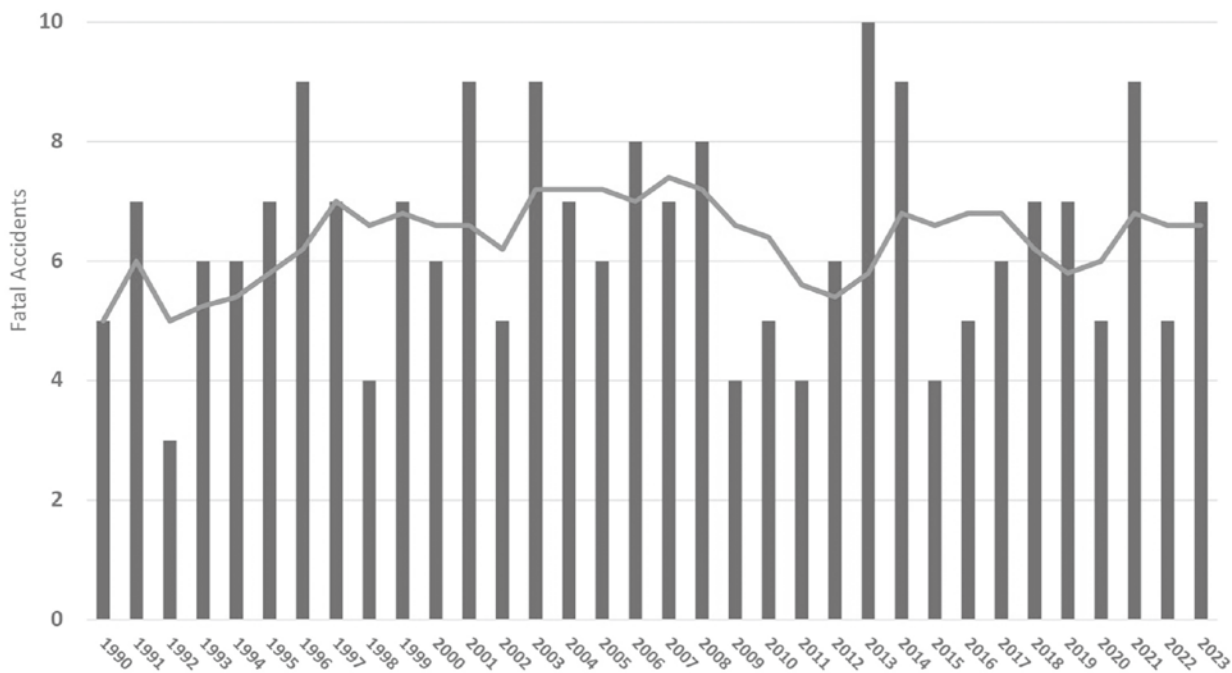
created conditions in which pilots had to shut down an engine, or deal with complete power loss or flameouts. The loss of engine operation in many cases led to a forced landing.

Corporate Jet Accidents

Corporate jets⁶ were involved in 32 accidents in 2023, of which seven were fatal accidents, according to the ASN database. The fatal events resulted in 27 fatalities among passengers and crew in addition to two people on the ground. During the five-

⁶ The following are the ICAO aircraft designators for the corporate jet models covered in this analysis: ASTR, BE40, CZSA, CZSB, CZSC, CZSM, CSOO, CSOI, C510, CSZS, C526, CSSO, CSSI, CSSB, C560, C56X, C650, C680, C68A, C700, C750, CL30, CL35, CL60, DJET, ES45, ESSO, ESOP, ESSP, EASO, FZTH, F900, FA10, FAZO, FASO, FASX, FA6X, FA7X, FABX, GISO, GZSO, G280, G650, GA4C, GASC, GA6C, GA7C, GABC, GALX, GLST, GL7T, GLEX, GLF3, GLF4, GLFS, GLF6, GSPN, HA4T, HDJT, HFZO, LJ23, LJ24, LJZS, LJ28, LJ31, LJ35, LJ40, LJ45, LJSS, LJ60, LJ70, LJ75, LJ85, MS76, MU30, PC24, PRMI, S601, SFSO, S30, SJET, SP33, WW24

Figure 6 Corporate Jet Fatal Accidents, 1990-2023 (Blue bars represent annual number of fatal accidents; orange line indicates the rolling average.)



Source: Aviation Safety Network

year 2018-2022 period, corporate jets were involved in an average of 33.8 accidents per year.

In the six years from 2018 through 2023, corporate jets were involved in 203 accidents, slightly more than half of which (110) occurred during the landing phase. Of those 203 events, 40 were fatal accidents resulting in 148 fatalities among passengers and crew and five ground fatalities.

The Foundation's analysis of corporate jet accident data focused on six accident categories, which accounted for approximately 84 percent of accidents in 2023 and 82 percent of the accidents during 2018-2022 period (Figure 5).

Corporate Jet Accident Categories

Runway Excursions (RE): Runway excursions were, by far, the most common accident type in corporate jet operations in 2023 and throughout the period under review. In 2023, 14 of the 32 accidents involved runway excursions, and in the six year-period, there were 84 runway excursion accidents.

One of the 14 runway excursions in 2023 was a fatal accident. In November, a Learjet 35A operating as an air ambulance was destroyed when it crashed at Cuernavaca International Airport in Mexico. Two pilots and two passengers were killed.

During the 2018-2023 period, seven of the 84 runway excursion accidents recorded were fatal accidents, resulting in 21 fatalities among passengers and crew and one person on the ground. The worst of the fatal accidents occurred on March 29, 2020, when an Israel Aerospace Industries 1124A Westwind II crashed following a rejected takeoff from Manila-Ninoy Aquino International Airport in the Philippines and burst into flames. Eight passengers and crew were killed.

Runway excursions are far more prevalent after landing than during the takeoff phase. Of the 84 excursion accidents reported for the 2018-2023 period, 72 occurred during the landing phase. Analysis of a broader ASN data set including corporate jets and commercial airliners showed that 186 of 222 runway incursion accidents reported during the 2018-2023 period occurred during the landing phase. That broader dataset is available on the [Global Action Plan for the Prevention of Runway Excursions \(GAPPRE\)](#) page on the Foundation's website. The broader dataset also shows that veer-offs are more common than runway overruns.

Loss of Control (LOC-I): After runway excursions, LOC-I accidents usually are the most common accident type. There were three corporate jet LOC-I accidents in 2023, but in the five-year 2018-2022 period, there were 24, or an average of 4.8 per year. One LOC-I accident last year was fatal and resulted in a total of eight fatalities.

In the five-year 2018-2022 period, 16 of the 24 LOC-I accidents were fatal accidents resulting in 80 fatalities among passengers and crew. The worst year for fatalities was 2021, when five accidents resulted in 27 fatalities. The worst fatal LOC-I accident during the period involved a Canadair Challenger 601-3A corporate jet that crashed in desert terrain during a flight from Las Vegas, Nevada, U.S., to Monterrey, Mexico. All 13 passengers and crew were killed.

Aerodynamic stalls remain a leading cause of LOC-I accidents, and about 25 percent of these accidents involved stalls. More specifically, a stall during a circling approach remains a significant factor in LOC-I accidents. Another contributor is spatial disorientation.

Abnormal Runway Contact (ARC):

There were three abnormal runway contact accidents in 2023, none of which were fatal. In the previous five-year period, there were 14 abnormal runway accidents, or an average of 2.8 per year. None of the ARC accidents during the period was fatal.

In at least two of the accidents during the five-year period, the crew did not lower the landing gear, and in other events, a part failed, causing the gear to collapse. In two cases, improper maintenance had been performed on the landing gear, and one case involved a runway excursion and landing gear collapse following a rejected takeoff. In two of the 2023 accidents, the aircraft landed hard

after a stable approach and gear failed upon touchdown. Both accidents are still under investigation.

Unknown (UNK): There were five accidents in 2023 that qualify as unknown, which means there is not enough information available about the event to put the accident in a more specific category. In the previous five years, there were an average of 1.8 accidents of unknown causes per year, which is more than in any year in the prior five years. Four of the unknown accidents in 2023 were fatal accidents, which equals the total for the previous five years. During the six-year period under review, there were eight fatal accidents. This category also accounted for 24 fatalities in five of the seven events. For many of the other accidents, little is known about what happened; in some cases, the aircraft crashed without any communication from the flight crew before they died. As accident investigations are completed, some of these accidents may be recategorized.

In the previous five years, there were 15 accidents that are categorized as unknown. Contributing factors in this group of accidents included mechanical failures; collisions with something on takeoff, approach or landing; mishaps during taxiing; and damage during armed conflicts.

System Component Failure-Non-Powerplant (SCF-NP): There were two SCF-NP accidents in 2023, one of which was fatal. On March 3, 2023, a Bombardier BD-100-IAIO

(Challenger 300) was involved in an accident while en route from Keene, New Hampshire, U.S, to Leesburg, Virginia. A passenger was injured during an abrupt pitch-up event that was potentially caused by a faulty stab trim (trimmable horizontal stabilizer) system. The passenger later died at a hospital because of her injuries.

In the previous five years, there were 12 SCF-NP accidents, two of which were fatal. On Sept. 4, 2022, a Cessna 551 Citation II/SP was destroyed when it crashed into the Baltic Sea while en route from Spain to Germany. Radio communication indicated a pressurization problem, and fighter escorts took photos showing an incapacitated pilot in the left seat and his oxygen mask hanging unused in its place. An investigation continues, but it is suspected that the plane crashed into the Baltic Sea after fuel was exhausted. The other fatal accident occurred in January 2018, when a Gulfstream G150 cabin became pressurized while the aircraft was on the ground. The captain of the aircraft died from injuries sustained when he was struck by the cabin door which blew open with excessive force. The remaining accidents in the 2018-2022 period involved gear collapses, pressurization failures during flight, and brake fires.

Bird Strike: There was one bird strike accident in 2023. In the previous five years, there were eight accidents, or 1.8 per year, on average. None of the accidents during the review period was fatal. In every event,

significant damage occurred to the aircraft, and these events happened in nearly every phase of flight. All but one of the reported accidents occurred in the United States, which likely is related to the country's extensive business aviation traffic and to the emphasis that U.S. Federal Aviation Administration puts on encouraging operators to report bird and wildlife strikes.

Call to Action

The aviation industry has made significant safety progress over the decades, but the Foundation and other industry stakeholders are continually in pursuit of greater improvement. Technology has had a positive impact on the decline in the number of midair collisions, CFIT accidents, and, to a lesser extent, LOC-I accidents and runway excursions. Safety also is improved by changes to processes and behavioral norms. As safety performance improvement has slowed in recent years, there is often an even greater need to strengthen SOPs and weak links in the chain of events leading to an accident. The Foundation believes there is still much to learn from the worldwide accident record about prioritizing accident-reduction efforts in the accident categories discussed in this report.

Safety Culture — Given the importance of a robust safety culture and the need to drive safety improvements as operations increase, it is imperative for operators, manufacturers, regulators, and other stakeholders to combat

complacency and maintain an active focus on actions and policies that will help reduce risk. These include strict adherence to safety protocols and SOPs, regular safety training, promoting personal and collective responsibility for safety, collaborating on risk identification and mitigation, and sharing safety information up and down and across organizations.

Turbulence — Turbulence-related accidents are increasing, and climate change may be a contributing factor. Airline passengers need to recognize the importance of adhering to crew instructions to fasten their seat belts, whether those instructions are delivered verbally or through illumination of the seat belt sign. Passengers should also habitually keep their seat belts fastened whenever seated. Operators should consider ways of bringing to the attention of all passengers and cabin crew the risk associated with failing to wear a seat belt. Additionally, operators should review their SOPs to ensure that the balance between cabin or galley checks and self-protection for cabin crewmembers is included in the threat and error management processes for flight and cabin crews. The industry must continue to improve its ability to detect areas of turbulence, particularly clear air turbulence, and to share that information. The NTSB study referenced in this report contains several recommendations that deserve consideration, not just in the United States but around the world.

Runway Excursions — Excursions are a significant risk for all sectors of aviation. The Foundation strongly encourages the implementation of recommendations made in the GAPPRE and GADM&E reports. In advance of the coming European Union Aviation Safety Agency mandate that large aircraft operated in commercial air transport be equipped with a runway overrun awareness and alerting system, some manufacturers are already equipping their fleets. The technology has not been in the fleet long enough to measure its effectiveness, but the Foundation believes this technology has potential to reduce excursions and equipage should be encouraged.

Runway Incursion — The Foundation also is concerned about the ongoing risk of runway incursions, particularly in light of the incursion events reported since the start of 2023, and believes it is important to raise awareness of this safety risk. In December, the Foundation released the Global Action Plan for the Prevention of Runway Incursions (GAPPRI) and strongly encourages all relevant aviation stakeholders to review the document and its recommendations.

Ground Damage — The risk of a ground collision and resulting damage requires precautions as part of regular procedures in flight operations, ground operations, maintenance, and elsewhere. As the industry acquires a large number of new, inexperienced personnel, the interfaces

between operational areas can lead to risks that may have been handled more capably by seasoned professionals. The Foundation highly recommends that operators and maintenance and ground handling organizations reinforce safety norms and proper procedures among front-line workers when daily activities are conducted. Investment in proper training also is critical. In addition, the Foundation supports the practical use of technology solutions, such as anti-collision systems, to reduce ground damage occurrences.

LOC-I — Despite some recent improvement, this area still needs attention and better compliance with checklist procedures. When pressures to meet schedules clash with SOPs, operators need to practice healthy crew resource management efforts and recognize that risk must be managed within the boundaries of an acceptable process. If the process is not serving the needs of flight crewmembers, it must be revisited and revised accordingly. Operators and regulators must ensure that the training of flight crewmembers is carried out in the spirit of International Civil Aviation Organization Annex 6 Part 1 Chapter 9 Para 9.3.1, which covers training in knowledge and skills related to human performance.


CFIT — Despite improvement, risks persist, with loss of situational awareness in instrument meteorological conditions one of the most common occurrences in this accident category. As with LOC-I, ensuring

the quality of flight crew training is paramount. If aircraft are equipped with terrain warning systems, operators should regularly monitor adherence and response to these warnings, and if aircraft are not equipped with these systems, operators should ensure additional precautions are part of their SOPs. It is also important that operators ensure that the most up-to-date terrain database is being used and, where possible, the global positioning system should be used as the source of position information.

The Foundation chose to focus on accident categories that are sizeable and relevant around the world. Making significant safety progress requires focusing on the circumstances and causes of accidents in the categories that account for the majority of accidents and more than 90 percent of all fatalities. Technology improvements likely will continue to address some of the causes of these accidents, but human attention to details, revising processes to ensure the highest confidence of safe outcomes and applying the necessary lessons learned from the mistakes of the past also play an important role and will require actions on several fronts. As we have noted in our analysis, not every region of the world or every sector is experiencing similar results, and solutions may need to be focused on unique experiences and challenges. The Foundation will continue to look for opportunities to improve the overall risk picture for the industry, and undoubtedly, improvements will require great collaboration

among stakeholders.

ASN Accident Dashboard

The Foundation has created an interactive dashboard where data on the accidents that occurred in 2023 and in the previous five years can be found. The dashboard, which covers airliner and corporate jet accidents, enables users to examine the data and do their own research. It also includes links to the relevant accident entries in ASN. 

From FSF March 2024

第76屆世界飛安高峰會與會記錄摘要

民航局 游惠宇

國際飛安高峰會（International Aviation Safety Summit, IASS）是世界飛安基金會（Flight Safety Foundation, FSF）每年舉辦的國際盛會，受到全球航空業矚目與支持。自1947年起已舉辦76年，歷年皆由民航相關產、官、學界代表參加，為期三日的密集議程期間，由數十位航空領域專家發表航空安全相關專題，並透過此平台讓與會者交換管理策略及分享實用方案，對促進全球及各區域航空安全有顯著效果。

本屆會議主題包括安全調查之機會與挑戰、領導階層的飛安影響力、機組人員的心

智健康、航徑管理及手飛作業、飛航組員職能訓練、安全資訊交流、先進空中移動系統之整合、人工智慧之運用、疲勞管理、無人機作業之整合、安全管理系統、安全管理系統之限制等專題，亦為我國民航主管機關及航空業界關注的安全議題。

我國民用航空局（以下簡稱民航局）有3員代表參加此會議（林副局長同時亦以飛安基金會董事長的身份出席），以獲得最新航空界發展與資訊連結，並持續追蹤我國專注議題的後續發展，作為日後持續推動相關政策之參考。



圖1：飛安基金會董事長（民航局副局長）、運輸調查委員會主任委員、國際飛安基金會總裁兼執行長合影。



圖2: 國家運輸安全調查委員會、我國民用航空局、飛行安全基金會、長榮航空及中華航空共10人代表參加IASS第76屆會議。

壹、目的

世界飛安基金會 (Flight Safety Foundation, FSF) 每年在第四季舉辦國際飛安高峰會，2023 年在法國巴黎舉辦第 76 屆會議。為與多國民航主管機關、全球業界菁英、航空公司主管及飛安專家就安全調查之機會與挑戰、領導階層的飛安影響力、機組人員的心智健康、航徑管理及手飛作業、飛航組員職能訓練、安全資訊交流、先進空中移動系統之整合、人工智慧之運用、疲勞管理、無人機作業之整合、安全管理系統、安全管理系統之限制等熱門議題交換管理策略及實用方案，故參加此會議取得最新相關資訊，作為我國民航局後續推動相關政策之參考。

貳、過程

一、會議行程

本次會議在法國巴黎 Paris Marriott Charles de Gaulle Airport Hotel 舉行。會議日

期為 112 年 11 月 6 日 (一) 至 11 月 8 日 (三) 共 3 日，每日議程自上午 8 時 30 分至下午 4 到 5 時止，依議題由不同主持人引介講者發表專題或以爐邊談話 (Fireside Chat) 形式與受邀專家對談，又或以小專題之方式分享相關經驗，台下參加者可透過 APP 參考講者之背景資訊，並可現場提問與台上講者互動。

二、議程內容

會議議程重點內容及紀錄介紹如下：

(一) 第一日：11 月 6 日。

1. 開場主講 (Opening Keynote)

國際飛安基金會總裁兼執行長 (President and CEO, Flight Safety Foundation) Hassan Shahidi 博士及空中巴士董事長 (CEO, Airbus) Guillaume Faury 就航空產業未來所面臨的挑戰，提出了他們的觀點。討論的面向從航空再生能源的使用、創新科技的運用、及疫情後人才的留任等，點出了產業內所有相關單位所應該合作的課題。



圖3: Hassan Shahidi博士



圖4: Guillaume Faury (Airbus)

2. 層峰論壇：安全及永續理想的行動化 (Executive Panel - From Ideas to Action: Enabling Safe and Sustainable Pathways to the Future)

這場論壇邀請了世界飛安基金會理事會成員 (Board of Governors Member, Flight Safety Foundation) Conor Nolan 機長當主持人，與國際民航組織歐洲及北大西洋區域主任 (Regional Director, ICAO EUR/NAT Office) Nicolas Rallo、民用飛航服務組織主席 (Chair, CANSO) Alex Bristol、空巴資深副總及首席安全官 (SVP and Chief Product Safety Officer, Airbus) Yannick Malinge、以及大韓航空企安資深副總 (SVP of Corporate Aviation Safety and Security) Gilberto Lopez Meyer 等共同參與討論。

層峰主管們的論壇，強調了安全文化應該由高階主管以身作則，顯現其正向領導力，才有辦法落實到機關、企業及單位內。在此同時，飛安基金會即扮演了一個將理念行動化的角色，與談者並建議基金會應該開設給

高階主管們的安全管理課，才能確保正向文化的落實。

另外與談者也提及航空產業所面臨的挑戰：從資訊安全、資訊分享、創新、該如何傾聽及合作等等，引導出後續的專題所會討論到的議題。

3. 議題 1：型塑未來安全調查模式：其機會與挑戰 (Shaping The Future of Safety Investigation: Challenges and Opportunities)

此次主題圍繞在事件調查的未來趨勢，邀請了國際民航組織事件調查組組長 (Chief, ICAO Accident Investigation Section) Thor Thormodsson 當主持人，與阿根廷運輸安全委員會會長 (President, Argentina Transport of Safety Board) Julian Obaid 博士、法國航空事故調查處處長 (Director, France Bureau of Enquiry and Analysis for Civil Aviation Safety) Remy Jouter、澳洲運輸安全局局長 (Chief Commissioner, Australian Transport Safety

Bureau) Angus Mitchell 以及美國失事調查機構理事 (Board Member, NTSB) Michael Graham 等共同與會。

從阿根廷、法國、澳洲及美國等國的運輸調查機關所分享該國的運作模式，到討論未來走向，及可能面臨的挑戰與機會，本論壇多面向地探討事件調查機關當抉擇的幾個關鍵。

與會者闡述機關一開始的定位，即應保持其獨立性，針對事件提供相關單位建議，而非以強制執行的手段切入。然因其機構的特殊影響力，仍應審慎給予相關的建議。

未來的調查分享模式，提及該如何運用現代科技，將事件故事化、還原發生時的情況，使大眾能更清楚了解事件的來龍去脈（如圖 5：講者簡報截圖）。

會中並分享，對調查機關來說，如何將有限人力資源做最有效的運用，也會是各個機關所面臨的挑戰。但不論未來的模式會如何演變，都不該忘懷調查機關成立的初衷，調查人員所應具備“提出對的問題以還原事件真相”、以及遵循正規調查走向的宗旨。

氣候變遷所可能引發的事故多樣性，及如何整合跨國調查的資源共享，也會是調查機關會面臨到的其他挑戰。

4. 議題 3：飛航安全躍進：強化重視機組人員的心智健康 (Taking Flight into Wellness: Enhancing Mental Health and Wellbeing for Aviation Safety)

過去一個月內，你曾經有感到過大的壓力嗎？或是曾有焦慮的感覺呢？亦或覺得進入了低潮期？甚至有過輕生的念頭嗎？



圖5：事件還原故事化

Healthy You 執行長 (CEO) Jan Smith 博士一開始所丟出來的這些問題，不僅僅是每個與會者可能有過的心裡狀態，在飛航組員身上更是如此。但因為怕說出來了自己真實不安的感受會影響工作，很少有飛航組員願意和親密家人外的人溝通這種比較深層的心裡想法。

透由主持人美國聯邦航空總署航醫 (Federal Air Surgeon, FAA) Susan Northup 博士的引導，以及都柏林聖三一學院研究員 (Researcher, Trinity College Dublin) Paul Cullen 與法航人因安全促進部經理 (Head, Air France Safety Innovation and Human Performance) Julia Behrend 博士的分享，讓航空界有機會從德翼的感傷事件後，再重新檢視飛航組員心裡素質的重要性。

這並不是要歸咎於全世界每 4-5 人就有一人有憂鬱的情況，而是該如何提供給飛航從業人員一個值得信賴、依靠的外界傾訴單位，讓飛航環境更安全，是每個相關單位所應該要重視的問題。從監理機關如何調整相關法規條文，以更適合於現今狀態，到航空

公司該如何建立關懷機制，以有效預防從業人員在心理狀態不適的情況下，仍從事航空安全相關的任務，都是我們可以思考及改變的方向。

5. 議題 2：提升安全文化：探討領導階層的國際飛安影響力 (Elevating Safety Culture: Unleashing Leadership's Impact on International Aviation Safety)

您是正向安全文化的提倡者嗎？還是只是搖著安全文化的大旗呢？主持人航空公司機師協會國際聯合會安全工作小組組長 (Chairperson, IFALPA Safety Management Working Group) Helena Cunningham 機長、特使航空企業安全管理資深副總 (SVP, Envoy Air Safety, Security and Environmental Safety) Scott Trepinski 博士、Baines Simmons 顧問公司執行長 (Managing Director) Ian Holder、國際航空運輸協會全球安全處處長 (Global Director of Safety, IATA) Mark Seale 以及歐洲飛行員協會專業事務部副總 (VP, European Cockpit Association Professional Affairs Board Director) Paul Reuter 等邀請與會者來共同反思上述問題。

安全文化在航空界已經倡導並實行了有 20 來年，但在每個航空相關機構及單位，是否真的被落實，還有待商榷。

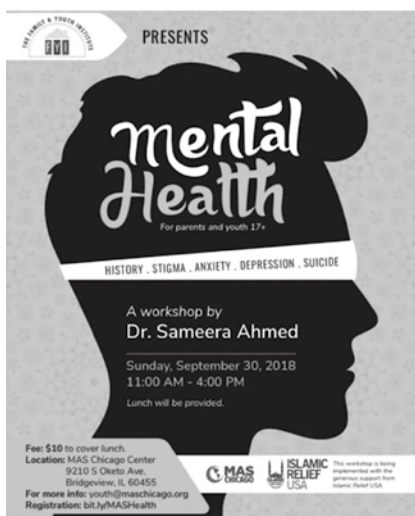


圖6：教育宣導講座海報

一個開放的關懷機制，需要經過時間的淬煉、以及信賴程度的考驗，也需要經過不斷地教育及宣導（如圖 6：講者簡報截圖），才能舒緩或許長久以來大家所不願意去碰觸的這個議題。

Safety Culture Measurement

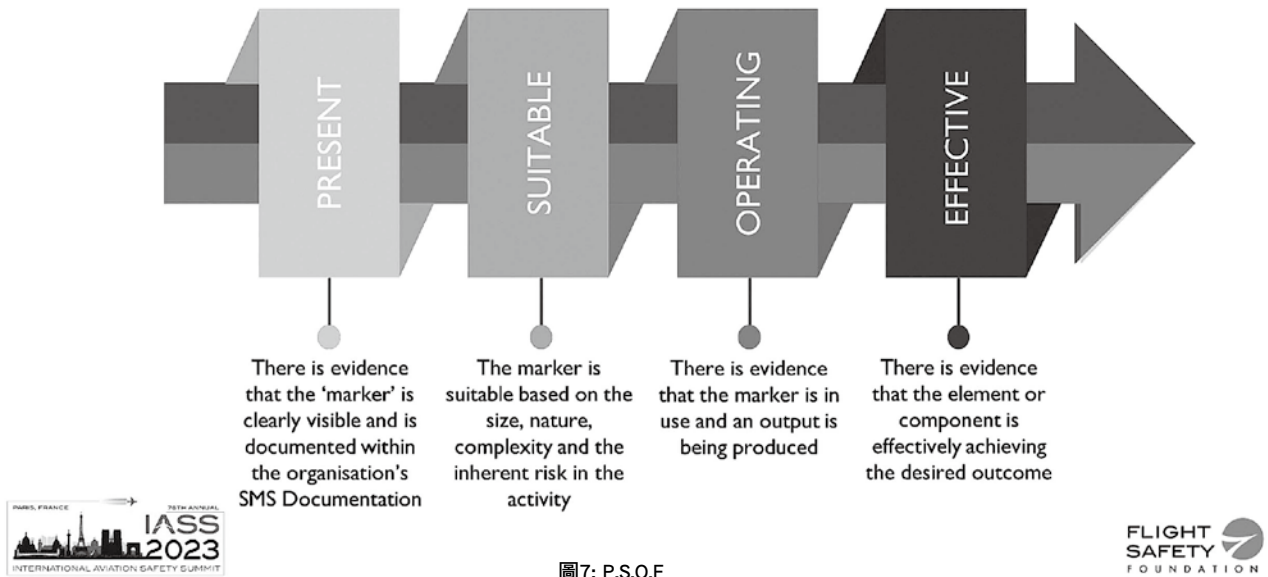


圖7: P.S.O.E

安全文化看似虛無飄渺，但卻是可以被衡量的，若用“P、S、O、E”去檢視（是否存在？是否適當？是否有在運作？是否有效？）（如圖 7: 講者簡報截圖），即可以得到客觀的評量結果。

高階主管人員是否將安全文化落實於其言行中，是正向文化（如圖 8 及 9: 講者簡報截圖）是否有效的最大關鍵，但是高階主管

人員也是需要被教育的。會中倡議該提供專門給高階主管人員的安全教育課程，以求確能落實航空界的正向安全文化。

分享者並提及，與每個產業相同，大量的新進人員及世代的交代，會有不同文化的衝擊，然後這些差異性，不應該是阻礙安全文化的發展，而應該是正向演進及創新的思維泉源。

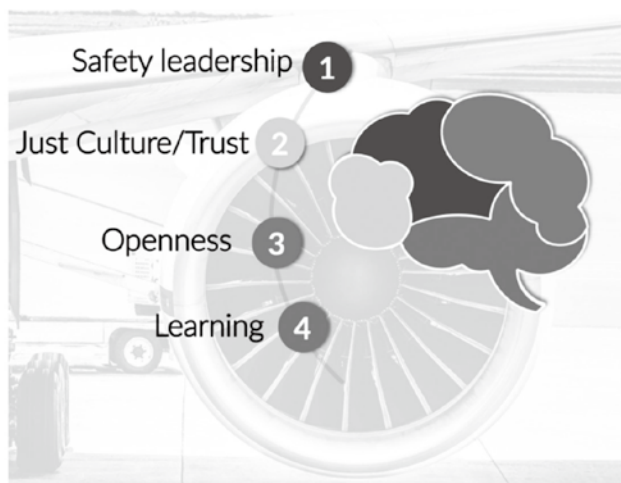


圖8: 正向安全文化



圖9: 有效的安全管理

Frequency of Events by Role Assignment and Geographic Region

Region	Role Assignment		
	PIC as PF	SIC as PF	TOTAL
	Events	Events	Events
Africa	41 (75.9%)	13 (24.1%)	54 (100%)
Asia and Middle East	204 (76.1%)	64 (23.9%)	268 (100%)
Europe	214 (66.9%)	106 (33.1%)	320 (100%)
North America	103 (65.6%)	54 (34.4%)	157 (100%)
South America and Caribbean	35 (83.3%)	7 (16.7%)	42 (100%)
Total	597 (71.0%)	244 (29.0%)	841 (100%)

圖 11: 機長主飛之事件比例

(二) 第二日：11 月 7 日。

1. 小專題：加拿大航空的穩定進場及重飛的經驗 (Stable Approach Landing and Go Around, SALGA: Air Canada’s Experience)

加拿大航空企安副總 (VP of Safety, Air Canada) Robert Palmer 分享了他們如何就穩定進場操作，進行研究分析。嚴謹的分析結果，讓加航大膽嘗試將穩定進場最後重飛高度決定點降到 200 英尺，原先進場該計劃讓航機於 1,000 英尺（儀器天氣條件）及 500 英尺（目視天氣條件）仍保持不變，並向監理機構說明，確定他們理解此作法及依據，才予以實行。結果發現，加航因不穩定進場

的航班比率確實明顯地降低（如圖 10: 講者簡報截圖）。

2. 議題 4：翱翔天際並強化安全網絡：航徑管理及手飛作業 (Navigating Global Skies and Enhancing the Safety Envelope: Flight Path Management and Manual Flight Operations)

若對飛航組員進行意見調查，問：“您對自己的手飛有信心嗎？”，答：“有的”，可能不是預期中的至少高於八成、近百分百。而航空意外事件是機長主飛的比例，也出乎預期，超過七成（如圖 11: 講者簡報截圖）。

Unstable Approach Data

SPI	Trend	Year 2019 Rate	Current Rate
Unstable Approach – Continued to Land	Stable	1.10	0.36
Greater Than 1 Dot Above Glideslope 1000’ – 200’	Decreasing	1.65	0.37

Unstable Approach Continue to Land reduction of 74%

圖 10: 加航不穩定進場航班數值

過於倚賴自動駕駛、缺少手飛練習、不信任副駕駛搭檔的能力等，都可能是飛航組員在飛行操作上還有許多進步空間的原因。

主持人世界飛安基金會諮詢委員會會長 (Chair, FSF International Advisory Committee) Mike Gillen、巴西民航安全協會 (Brazilian Commercial Aviation Safety Team) Fabio Catani、歐洲飛行員協會訓練長 (Head of

BOUNDARIES OF TRAINING

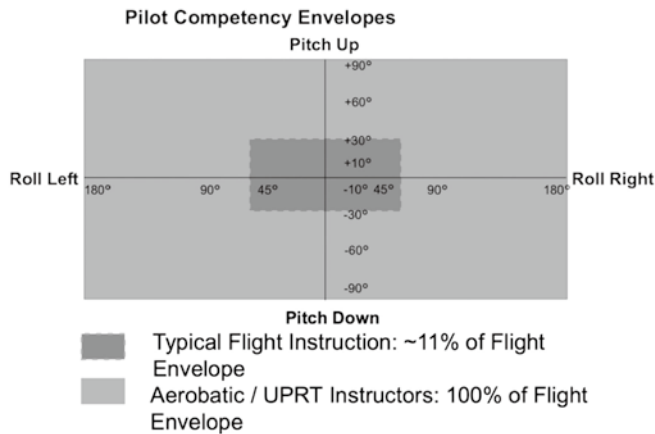


圖12: 訓練限制

Training, European Cockpit Association) Rob Akron-Punsellie、倫敦大學城市學院研究員 (Researcher, City University of London) Tom Becker 機長以及美國聯邦航空總署科技技術首席 (Chief Scientific and Technical Advisor, FAA) Kathy Abbott 博士等，就此議題進行熱

烈討論。並分享在訓練飛航組員於飛機不正常姿態改正時（如圖 12: 講者簡報截圖），不僅僅是一項技術操作的演練，同時也應該考量人為因素，將強化飛航組員面對飛機不正常姿態時的正確心裡素質納入訓練的評估，讓飛航組員更扎實地建立手飛操作的信心。

3. 議題 5：提升飛航安全及人員表現：增強飛航組員職能及相關訓練 (Elevating Aviation Safety and Human Performance: Enhancing Pilot Competency and Training)

說到飛航組員的訓練，適性之訓練及評估會是未來的走向（如圖 13: 講者簡報截圖）。而模擬機的仿真度再提升，也能強化飛航組員的訓練成效。

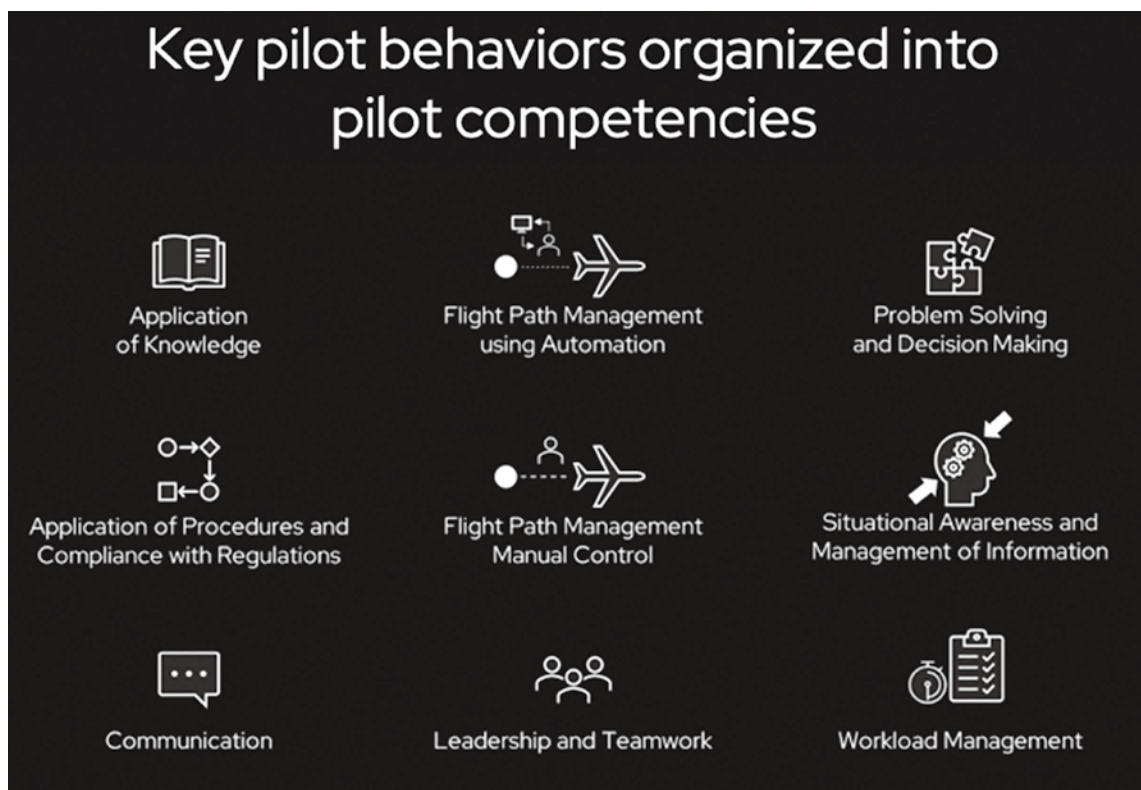


圖13: 適性訓練所包含的面向

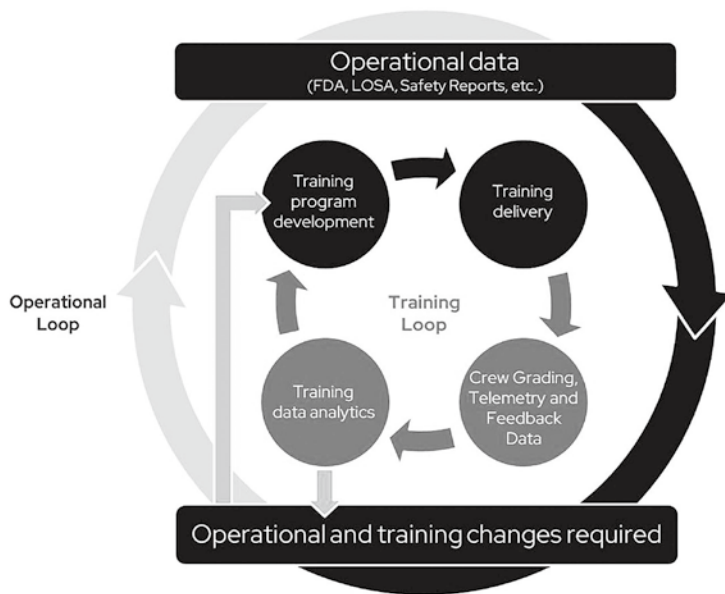


圖 14: 設計訓練的邏輯

主持人 SGA Solutions 軟體公司董事長 (Chairman) Shai Gill、CAE 人因及學習科學處處長 (Head of Learning Science and Human Performance, CAE) Richard J. Kennedy 博士、墨爾本皇家理工大學校長 (Director, RMIT University) Lea Vesic、L3Harris 模擬機廠商安全經理 (Safety Manager) Robert Holiday 以及美國聯合航空 B737 機隊資深機隊標準經理 (Senior Manager Fleet Standards B737, United Airlines) Dr. Mike Gillen 機長於討論過程中，另外拋出了一個思考面向：面對不同世代的飛航從業人員，是否也該讓新世代的人參與設計訓練的內容（如圖 14: 講者簡報截圖），以提升訓練的效度？如何進行不同世代的整合、如何將根本性價值觀差異的調柔，也會是訓練部門的課題。

4. 議題 6：推廣資訊交流以強化國際飛航安全 (Improving Global Aviation Safety by Unleashing the Power of Information Sharing)

過持人國際航空公司飛行員協會工程運

作部經理 (Manager of Engineering and Operations, ALPA) Randy Kenagy 與該協會飛安理事 (Aviation Safety Chair, ALPA) Steve Jangelis 機長、空巴安全資訊技術部副總 (VP of Safety, Security and Technical Affairs, Airbus) Craig Hoskins、拉丁美洲加勒比空運協會安全運作部處長 (Director of Safety and Operations, Latin America and Caribbean Air Transport Association, ALTA) Virginio Augusto Corrieri De Castro 以及韓國飛安科技學院工程研究員 (Research Engineer, Korea Institute of Aviation

Safety Technology) Jason Lee 等，就他們各自的專業對這議題進行了討論。

在強調資訊分享的航空產業裡，其實安全資訊分享仍有進步的空間。所蒐集到的資訊是否有價值？企業的安全文化是否鼓勵主動提報？提報者是否會擔心因主動提報而受罰？是否對報告、分享體制有信心？這些都是需要再克服的問題。

而當資料量夠的時候，該如何在時限內進行正確的分析，又是需要面對的另外一個難題。



圖 15 : Michael Graham

航空產業是一環扣著一環，從監理機關、業者到一線的作業人員，當良性的溝通平台建立後，安全資訊分享的效度也會跟著擴展開來。

5. 小專題：招聘的藝術 (Hiring For Success, Not Tragedy)

“An operation is only as strong as its weakest player.” 美國失事調查機構理事分享一失事案件，說明其實飛航組員是否適職，在該員一進入航空產業時，就有跡可循。勉勵有參與到面試篩選階段的產業同仁，應該替飛安把關，唯有所有人員都適職，才能避免悲劇產生。

6. 專題：著重於預防端的航機不正常姿態改正訓練 (Upset Prevention and Recovery Training – A Focus On Prevention)

航機不正常姿態的改正訓練，除了解套步驟的訓練外，聯合航空 (United Airlines) Robert Pucino 機長還說明應該強調飛航組員狀況警覺的訓練，及心理抗壓的訓練，才能讓飛航組員面對各式可能發展的航機不正常狀態時，都能從容地處置。

7. 議題 7：擴大飛航安全：先進空中移動系統的整合及發展 (Horizons of Aviation Safety: Navigating the Safe Integration and Progress on AAM)

「空中計程車」的時代即將來臨！隨著法國主辦 2024 年的奧運，在奧運期間，空中計程車就會馳騁於巴黎的天空（如圖 16: 講者簡報截圖）。而在美國加州，於 2025 年時，也會開始看到空中計程車的蹤跡。

主持人 SkyGrid 航太執行長 (CEO) Fabrice Kunzi、法國民用航空總局創新計畫經理 (Innovation Program Manager, French DGAC/DSAC)、Joby Aviation 的 Bonny Simi、Volocopter 空域場站部處長 (Head of Airspace and Vertiports) Jörn Jaeger 等說明這種不同的交通模式，當然少不了需要克服的一些挑戰：包括目視空域的限制、飛航計畫的整備、航空器能量的管理、轉降地點的選



圖 16: 巴黎奧運空中計程車的預劃路徑

擇等等。

而要無縫接軌地整合先進空中移動系統至現有的交通模式中，還需要立法機關、監理單位、航管單位、製造廠家及垂直起降場站管理者的合作，並透過相關事實數據、安全及保安

議題、航管、噪音調查等多方的回饋，才能讓大眾更安心地使用這種新式的交通工具。

(三) 第三日：11月8日。

1. 爐邊談話：

法航要歡慶其開航 90 週年，該如何正向延續很多人對法國的這第一印象標章，法航的執行總裁 Anne Rigail 分享了他們所做的努力。從不斷地反思如何讓公司的安全文化



圖 17: Anne Rigail

更精進，他們積極地尋求跨業學習的機會，從其他高風險產業的經驗分享，去汲取套用到法航的安全管理上；並如何在有限的資源情況下，極大化再生能源的使用，以因應全球節能減碳的訴求；以及如何吸引年輕才俊進入航空產業，尤其該如何培養足夠新一代的技術工程人員等等，都是法航不敢停下腳步的推動力。

2. 議題 8：轉變航空產業：探索人工智慧、全自動作業及數位發展的國際安全影響力 (Transforming Aviation: Exploring the Global Safety Impact of AI, Advanced Automation, and Digital Solutions)

科技的進步，讓飛行更加安全，也能幫助飛航組員在操控飛機時，有更多的餘裕（如

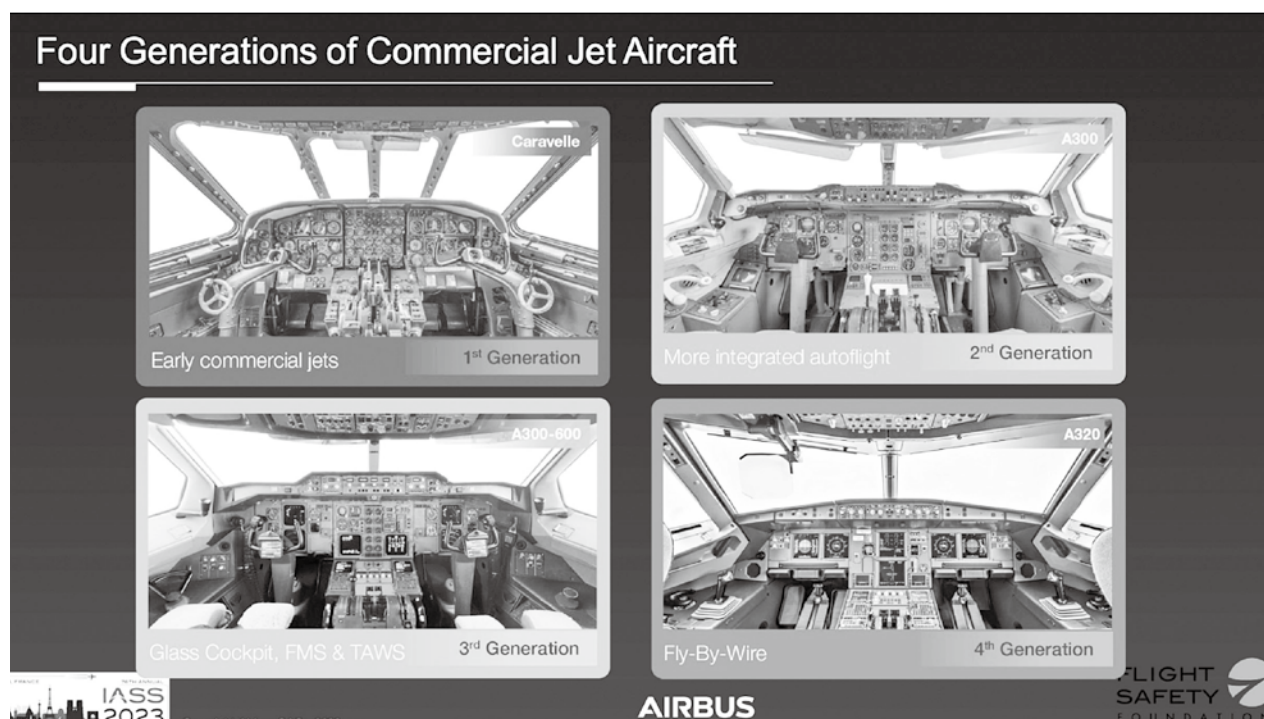


圖 18: 空中巴士的四代航機

KE Turbulence Trend Analysis System (KE TTAS)

KOREAN AIR

Expansion of flight data monitoring : Countermeasures from the continuous full flight

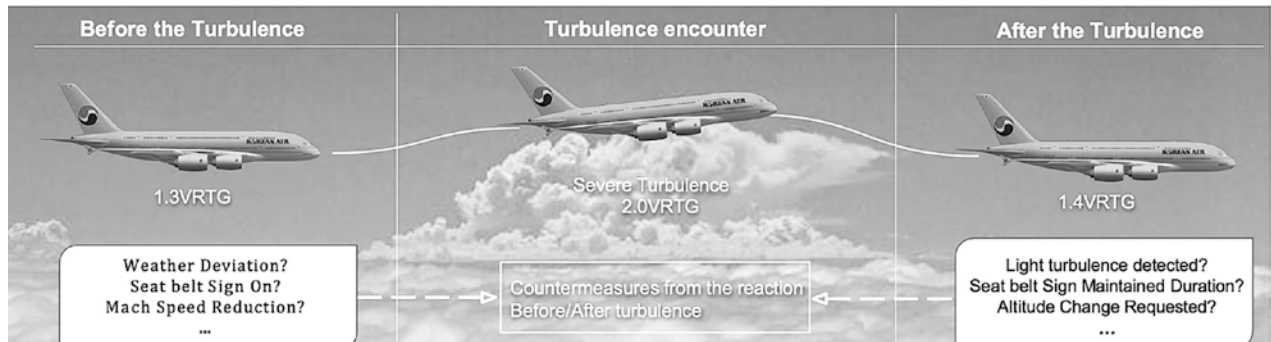


圖19: 韓航利用航機飛航數據來做亂流規避

圖 18: 講者簡報截圖) ; 但新科技的導入, 空巴駕客艙結構部處長 (Head of Flight and Cabin Architecture, Airbus) Nicolas Ranque 提醒, 需要格外地小心, 若使用不當, 也可能造成反效果。如何將科技的運用價值最大化, 與其他增進航空安全效度的方法一樣, 也需要航空產業內的相關單位及個體協力合作。

3. 議題 9 : 駕駛艙內的安全把關及危害管控: 探索疲勞管理、飛時及失能所致的影響 (Safeguarding

Operations and Managing Risk on the Flight Deck: Exploring Consequences of Fatigue, Flight Time, and Incapacitation)

透由主持人歐洲飛行員協會會長 (ECA Director) Didier Moraine 機長的引導, 與談者柯林斯航空系統機電產品驗發部處長 (Director of Avionics Product Strategy, Collins Aerospace) Adam Evanschwartz、波音排班安全部處長 (Head of Scheduling

CREW FATIGUE PRESSURES ALL ASPECTS OF THE SYSTEM



圖20: 疲勞影響的層面

Safety, Boeing) Tomas Klemets 以及歐洲空中航行安全組織運安長 (Head of Operational Safety, SQS, and Integrated Risk Management, EUROCONTROL) Antonio Licu 等說明「疲勞」議題雖常被討論，但有時候並不容易被正視的原因在於很難把它的影響量化。

與會者提及航空產業與疲勞有關的訓練，除了應該包含在初始訓練中，複訓的內容也應該有，或許不用一樣的訓練時數，但包含的目的，是為了要讓從業人員加深對疲勞這危險因子的正確概念，才能在航空作業中，規避因疲勞可能造成的危害。(如圖 20: 講者簡報截圖)

如何人性化的排班，也是航空相關產業永遠的課題。

4. 議題 10：確保無人機作業的安全整合：從立法者及業者角度來剖析 (Ensuring Safe Integration of UAS - Regulator and Operator

Perspectives)

無人機的運用範圍越來越廣泛，安柏瑞德航空大學航太系助理教授 (Assistant Professor of Aeronautical Science, Embry-Riddle Aeronautical University) Flavio Mendonca 博士倡議在美國每年因野生動物造成的航空危害事件，也應該多利用無人機可以大範圍搜尋的優勢，來了解野生動物的活動狀況(如圖 21: 講者簡報截圖)，進而發展出降低牠們所致危害的有效方法，以減少每年百萬美元的相關支出。

主持人世界飛安基金會先進系統部處長 (Director of Advanced Systems, FSF) Debbie Kirman 也進一步與無人機貨運商 DRONAMICS 安保部處長 (Director of Safety, Quality and Compliance) Martha Romero、力拓集團澳洲處首席運輸顧問 (Principal Advisor, Australia Aviation and Mass Transport, Rio Tinto) Kevan Reeves 以及美國聯邦航空總署無人機辦公室執行總監 (Executive Director,



圖21: 無人機的運用

FAA UAS Integration Office) Jeffrey Vincent 就此議題進行討論。

而目前參與無人機產業的許多業者，其多數的組成份子，都有航空相關的背景，所以他們的願景自然包括了如何讓無人機的運航，能同樣達到有人機讓旅客安心的期許，其中安全文化的落實不可少。

雖然監理機關的腳步往往跟不上業者，但設立適當的規定以讓業者遵循，還是一必要的環節。

5. 議題 11：安全管理系統：推廣最佳的安全措施及實作 (Safety Management Systems: Fostering Best Practices and Performance)

當 Arthur J. Gallagher & Co. 資深顧問 (Senior Advisor) Sandy Lonsbury 提出應該讓保險公司參與航空公司內部的安全管理趨勢

ISAT® Safety Performance Assessment

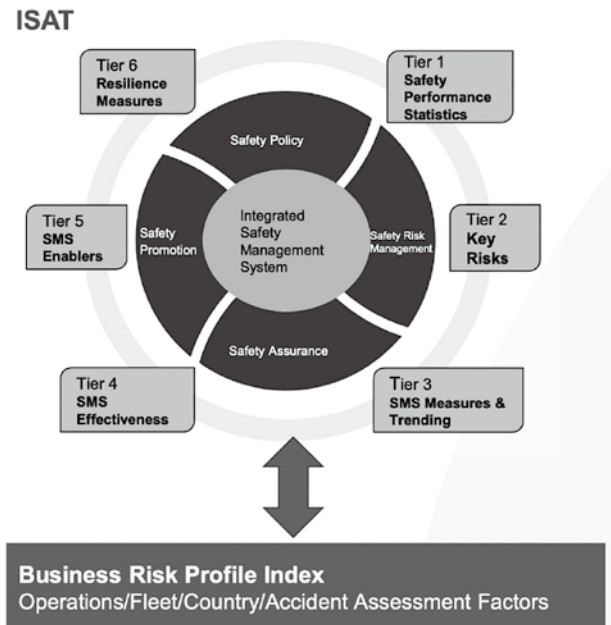


圖22: 保險公司的考量點

分析會議時，讓會場上出現不少驚訝的聲響；或許這是一個很實際的切入點，因為若是航空公司的安全管理到位，該公司的風險管控成效也不至於有太大的偏差（如圖 22: 講者簡報截圖）

FUELING THE SMS

AN ORIGINALITY AT AIR FRANCE: THE JOINT UNIONS FORUM



33 experts



11 Unions
Out of 18 main Unions



Flight Operations and Cabin Maintenance
OCC and Dispatch
Ramp, Passage and Cargo

All Operational Dpt.

圖23: 法航的安全文化

此議題在主持人 WYVERN Ltd 執行長 (CEO) Sonnie Bates 博士的引導下，進一步與德國鐵路無人機作業安全經理 (Safety Manager of UAS, Deutsche Bahn) Sebastian Blech 以及法航企安執行副總 (EVP, Air France Corporate Safety) Didier Nicolini 進行熱烈的討論。

而正向安全文化的推動，是每家航空公司都要持續努力的課題。法航分享了他們的做法，除了廣納工會的回饋建議（如圖 23: 講者簡報截圖），他們也鼓勵員工的主動提報，不論是和飛航安全有關的提報、或是疲勞方面的、甚至是與食品及環境安全有關的內容，都可提報。法航並開始啟用讓飛航組員可以回顧自己飛的航班狀態資料，增加了另一種歸詢的方式。

安全文化的有效落實，需要很多面向的情商整合，有心理層面的、有組織層面的、還有行為層面的。而在航空產業裡，尤其需要各相關部門的通力合作，並願意分享實際的經驗，才能把安全網絡編織地沒有縫隙。

6. 議題 12：探索安全管理系統的限制、與業界韌性的關係、其效益及未來的應用 (Exploring

Safety Management Systems Limitations, Relationship to Improved Resiliency, Measures of Effectiveness, and Future Applications)

主持人國際民航組織空運部安全組組長 (Chief of Safety Management Section, ICAO Air Navigation Bureau) Elizabeth Gnehm 分享她觀察到前面 11 個討論的議題內容，其實都圍繞著如何有效進行風險的控管。安全管理雖然在航空產業已行之有年，但其實還沒有達到無漏的境界。其難度在於往往安全管理會侷限在單一公司或作業的範疇，知道自己在做什麼，但別人在做些什麼，可能就不得而知。

國際民航公約第 19 號附約第 2 版於 2016 年發佈後，現正徵詢各會員國意見，著手第 2 修正草案的作業，如順利可望於 2026 年開始實施；相關的輔助性作業內容，如順利可望於 2024 年底納入新版安全管理手冊中。

除上述的手冊改版作業，國際民航組織於 2018 年第 13 次運航會議與第 2 次高層級航空保安會議 (the Thirteenth Air Navigation Conference and the Second High-level



圖24: 整合性的安全管理

Risk Integration

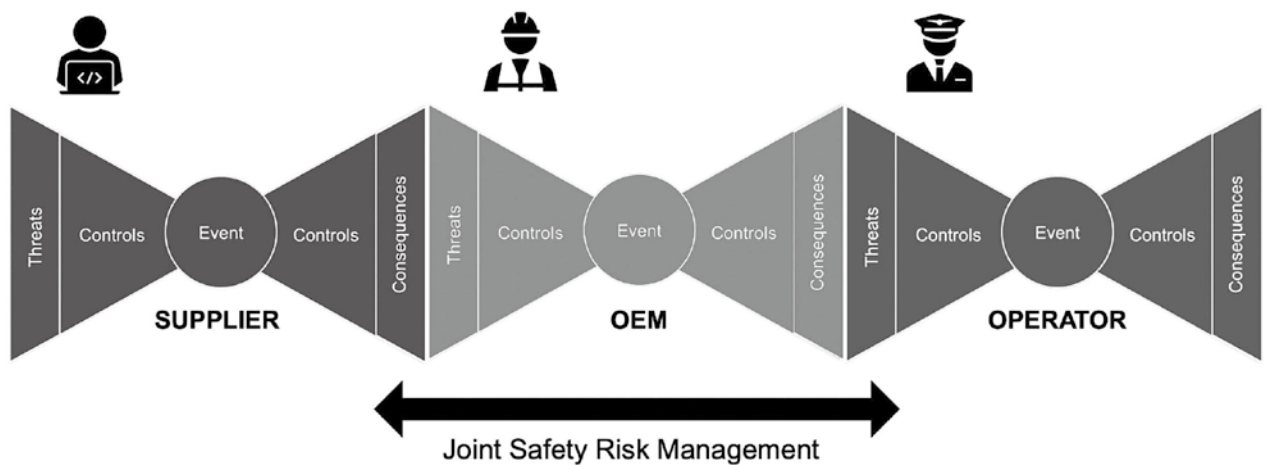


圖25: 波音的產業鏈安全整合

Conference on Aviation Security) 中即提出，安全管理尚有可突破的空間，應該倡導整合性的安全管理（如圖 24: 講者簡報截圖）；並後續成立了整合性風險管理研討小組 (Integrated Risk Management Study Group, IRM SG)，於 2021 年也訂定了該小組的職權範圍；目前邀請各會員國加入該研討小組，並預計於 2024 年召開相關的研討會議。

我國非 ICAO 會員國，針對該組織所推動的安全議題，若非參與此次會議，並不能及時更新相關之作業時程。本局代表林副局長更於會後與 Elizabeth Gnehm 交流互動，她表示理解我國之處境，希望我們能更即時地接受安全相關資訊。

波音安管副總 (VP of SMS, Boeing) Daniel Freeman 與資深安全工程師 (Senior Safety Engineer) Demi Coolen 並分享他們如何主動採行安全管理作業，如何進行從上游供應商、到波音等製造商、到最後的航空公司等營運單位，中間該如何溝通、協商、確定彼此有同樣的認知等，以再降低各環節危害

因子的出現率（如圖 25: 講者簡報截圖）。

另外還有 IBAC (International Business Aviation Council) Stephane De Wolf 與亞馬遜公司歐洲航安部處長 (Head of Air Safety Europe, Amazon) Ilias Panagapoulos 的分享。

最後與會者並提出了一個值得省思的議題：在航空產業的安全管理文化裡，其實存在著一個盲點，我們有時不敢表明自己對如何安全地管理所屬的領域，仍有許多未知的事項及待補強的部分；然而，若要真的收安全管理之成效，應該要開始多些誠實的對話了！

參、心得及建議

一、心得

(一) 整體會議規劃及議題安排適切：

IASS 第 76 屆會議，今（2023）年於法國巴黎舉行，共有來自 45 個國家與地區，345 名人士參與。議題皆是

當前航空產業所關心的內容，包含安全調查之機會與挑戰、領導階層的飛安影響力、機組人員的心智健康、航徑管理及手飛作業、飛航組員職能訓練、安全資訊交流、先進空中移動系統之整合、人工智慧之運用、疲勞管理、無人機作業之整合、安全管理系統、安全管理系統之限制等等面向，跨國產官學界的飛安專家在 3 天密集的會議中分享寶貴的知識與經驗，讓與會人員從中獲得相關資訊，獲益良多。

(二) 我國官方及業界積極參與國際年度飛安盛會：

我國共有來自國家運輸安全調查委員會、民用航空局、台灣飛行安全基金會、長榮航空及中華航空共 10 人代表參加 IASS 第 76 屆會議，展現我國對這場全球飛安盛會的重視及積極參與國際間航空安全事務的決心。

(三) 從會議談話及簡報內容獲得啟發：

“An operation is only as strong as its weakest player.” 如同 ICAO “No country left behind!” 的口號相同，航空產業環環相扣，我們要共同努力的是讓在這產業的每一組成份子，都能夠達到有效安全防護的綿密實力。

(四) 整合性的安全管理 (Integrated Safety Management System)：

從 2013 年第一版的國際民航公約第

19 號附約發佈後，安全管理的範疇，一直與時俱進，已不再侷限於單一部門內的運作，而是該如何廣納跨部門的意見，進一步去整合，才能更有效地管控風險。透過參與此次會議，我們知道這是國際民航組織未來所要推廣的重點之一；該如何即時更新最新的安全管理資訊及相關指引，以導入國內的安全管理系統作業中，是我們一直以來的一個課題，目前雖然仍有難處，但我們應持續努力。

二、建議

(一) 我國非 ICAO 會員國，應持續派員參加國際航空安全相關會議，以保持獲得最新航空界發展與資訊連結。

(二) 與本會議領域專家保持聯繫，並追蹤我國專注議題的後續發展，作為我國民航局後續推動相關政策之參考，並在未來國內舉辦會議或訓練時，視研討主題得邀請相關專家來台擔任講者或講師。✈

從頑童到紳士

—eVTOL 航空器技術特點與發展現況

作者：孟廣運、徐智原

壹、前言

自 21 世紀初期開始，隨著資通訊技術的成熟與電子產品全球供應鍊的發達，遙控無人機的技術創新與商業模式變革，不但對傳統交通運輸帶來衝擊，同時也影響了航空工業的製造模式與產品特性。複合材料、電池動力、衛星導航、飛行控制、馬達機電上的技術應用，提升了遙控無人機的性能卻同時降低了成本。電動垂直起降（eVTOL）航空器有別於傳統航空器的外型設計，配合自動化飛行系統與電池動力，以環保與節能的訴求，吸引了飛機製造商、汽車製造商、航空公司與私募基金的注意力，紛紛投資設計、製造 eVTOL 航空器的新創公司，發展頗具未來感的新型交通工具，滿足日益增加的智慧運輸需求，同時也顛覆了傳統生產、製造由少數幾家飛機及發動機製造商獨大的產業格局。其次，在商業模式創新上受到了共享經濟、數據經濟、智慧服務…等概念的興起，極大程度鼓勵了運用遙控無人機創造利潤的商業模式，自 2010 年起，遙控無人機開始執行空拍、巡檢、農噴植保、空中配送等多元服務，吸引了大量資金和技術的投入，不僅帶動經濟增長和就業機會，也影響了人們的生活方式。本文就無人機由竹蜻蜓玩具（頑童）到載客、載貨的 eVTOL 航空器（紳士）的發展歷程、飛行原理及幾家主

要業者近況進行介紹。

貳、遙控無人機的分類與發展

最世紀初期開始，隨著資通訊技術的成熟與電子產品全球供應鍊的發達，遙控無人機的技術創新與商業模式變革，不但對傳統交通運輸帶來衝擊，同時也影響了航空工業的製造模式與產品特性。複合材料、電池動力、衛星導航、飛行控制、馬達機電上的技術應用，提升了遙控無人機的性能卻同時降低了成本。電動垂直起降（eVTOL）航空器有別於傳統航空器的外型設計，配合自動化飛行系統與電池動力，以環保與節能的訴求，吸引了飛機製造商、汽車製造商、航空公司與私募基金的注意力，紛紛投資設計、製造 eVTOL 航空器的新創公司，發展頗具未來感的新型交通工具，滿足日益增加的智慧運輸需求，同時也顛覆了傳統生產、製造由少數幾家飛機及發動機製造商獨大的產業格局。其次，在商業模式創新上受到了共享經濟、數據經濟、智慧服務…等概念的興起，極大程度鼓勵了運用遙控無人機創造利潤的商業模式，自 2010 年起，遙控無人機開始執行空拍、巡檢、農噴植保、空中配送等多元服務，吸引了大量資金和技術的投入，不僅帶動經濟增長和就業機會，也影響了人們的生活方式。本文就無人機由竹蜻蜓玩具

（頑童）到載客、載貨的 eVTOL 航空器（紳士）的發展歷程、飛行原理及幾家主要業者近況進行介紹。

根據美國垂直飛行協會（Vertical Flight Society，VFS）在(2022年)發行的資料顯示：到2022年為止，有48個國家中超過350家企業在開發 eVTOL 航空器，設計出的機型超過了600個以上。VFS 執行董事 Mike Hirschberg 表示：因 eVTOL 航空器的快速發展，公眾需要認識正在探索的先進空中交通（Advanced Air Mobility）創新概念。

與傳統航空器相比，eVTOL 航空器優勢如下：

一、能源效率較高

eVTOL 航空器在3度空間中運行，不受到地面的障礙限制而可縮短運輸距離；地面的汽車或水中的船隻行駛時都會產生有較大的摩差阻力，eVTOL 的空氣阻力相對較小，而能提高能源效率。

二、航線更加豐富

隨著 GNSS 衛星導航基礎建設的完善，航路設計的自由度的更大，同一空間中可容納的航空器更多，垂直起降與點對點飛行的運用彈性，更使得 eVTOL 的航線規劃更加豐富多元。

三、噪音大幅降低

噪音是 eVTOL 航空器的另一大優勢，以美國 Joby 公司生產的 eVTOL 航空器為例，與載荷相近的直昇機噪音相比，該公司 eVTOL 航空器噪音值約在60-65分貝，相當於城市地面交通幹線

道路兩邊的背景噪音，而同等級直昇機的噪音值仍然高達80分貝以上，大約是大型車輛行駛時的聲音。

四、應用範圍大

eVTOL 航空器應用場景包括以下幾種：城市內點對點服務，如城市商業大樓、交通樞紐、景點之間的載客及物流服務；機場接送服務，因為可直接改良現有的直昇機坪作為場站且有一定的高端客戶需求，是 eVTOL 航空器生產商目前最看重的一塊商機；至於在較長距離的跨城市客、貨運輸與空中醫療及緊急救援等範圍，也有許多應用空間。

參、eVTOL 航空器構型分析

介紹了 eVTOL 航空器發展背景後，接下來說明目前幾種不同的構型與其飛行控制方式：

一、多旋翼（multi-copter）

多旋翼是一種具有超過兩個旋翼的航空器。由每個旋翼帶動飛行器而產生上升動力。旋翼的傾角固定而不像直昇飛機那樣可以變化，而是透過改變不同旋翼之間的轉速改變扭矩，從而控制飛行器的運行軌跡。基於正常飛行時採用多個旋翼可以分散動力需求，旋翼失效時這種對稱的構型也較易進行容錯設計，此構型的 eVTOL 航空器往往裝置4個至10餘個不等的小旋翼。

二、升力 + 巡航混合（Lift+Cruise）

這是一種追求次音速巡航效率的外型設計，有效酬載可接近固定翼飛機。此構型採用大推力旋翼系統來保證低空懸停

能力，同時又具有長時間巡航所需的高效率但推力較小的螺旋槳系統，兩者相互獨立以簡化設計。因為直昇機與飛機的空氣動力、飛行品質、結構設計及負載特性等研究已相當成熟，六成以上的 eVTOL 航空器採用這種構型設計。

三、傾轉旋翼 (Tiltrotor) 或傾轉機翼 (Tiltwing)

這是一種同時具有旋翼和固定翼，在機翼兩側翼梢處各安裝有一套可在水平和垂直位置之間轉動的傾轉系統。傾轉發動機或機翼至垂直位置時，相當於採用橫列旋翼的直昇機，可進行垂直起降、懸停、低速空中盤旋等飛行動作；發動機或機翼維持在水平位置時則相當於螺旋槳飛機，擁有較高的航速。傾轉旋翼構型兼具直昇機和飛機的優點，缺點是傾轉系統的機械構造複雜，懸停過渡至平飛尚有潛在飛行動力與穩定性的問題並未完全解決，嚴重影響了系統的可靠

度。

四、涵道向量 (噴氣) 推力 (Ducted Vector Thrust)

電動涵道向量推力技術 (Ducted Electric Vectored Thrust, DEVT) 是新一代的航空動力裝置，在航空模型界被稱為電動導風扇。與傳統燃氣渦輪發動機的結構不同，由電動馬達驅動管道內渦輪轉子 (葉輪) 高速旋轉，利用管道截面積的變化對氣流進行加速、加壓，它只有渦輪轉子和噴嘴管道，沒有燃燒室，僅依賴於綠色環保的電動馬達驅動的渦輪系統，藉由氣流產生向後推力。德國 Lilium 公司 eVTOL 航空器的設計方案，就是在襟翼上安裝三個電動涵道噴氣發動機，襟翼各自獨立傾轉時安裝其上的電動旋翼涵道亦隨之傾轉，從而改變推力方向；當襟翼處於垂直狀態時，發動機的向量推力可提供其垂直起降和懸停所需的升力；轉換為向前飛行

多旋翼
(multi-copter)



升力+巡航混合
(Lift+Cruise)



傾轉旋翼
(Tiltrotor)



涵道向量(噴氣)推力
(Ducted Vector Thrust)



模式時，推力向量轉 90° 指向後方，提供前飛所需的推力。電動涵道噴氣發動機安裝了可調控的噴嘴，可依據飛行狀態改變噴氣管道截面形狀。在巡航飛行的情況下，噴氣管道截面面積最小；由平飛至懸停的過渡階段時，隨著發動機向下傾轉逐步打開噴嘴擴大管道截面面積，進入垂直起降和懸停狀態時，噴嘴完全打開，此管道截面面積最大。對於流速小於音速的次音速氣流，當流過收斂型管道時，隨著管道截面面積的減小，流速升高，同時伴隨壓力、溫度降低。當流過擴散型管道時，隨著管道截面面積增大，流速降低，同時伴隨壓力、溫度升高。收斂 - 擴散型管道的工作狀態下，次音速氣流在收縮段加速，至喉道（即管中橫截面最小處）達到最大流速，然後進入擴張段繼續加速，直到管道出口為止，氣流可由次音速加速至超音速。這種可調控的噴嘴可靈活調整 eVTOL 航空器不同飛行階段的推力需求。

肆、空氣螺旋槳的原理

上述四種構型的 eVTOL 航空器除了涵道向量推力外，其餘三種都是使用「空氣螺旋槳」推動空氣作為主要的力量來源，槳葉在空氣中旋轉把輸入的功率轉化為作用力，因安裝位置與產生拉力的作用方向不同，而有直昇機與多旋翼機的「旋翼」與飛機的「螺旋槳」二種不同名稱。

如果截取「空氣螺旋槳」一小段槳葉來看，恰像一片機翼剖面，其相對氣流速度由前進速度和旋轉速度合成，槳葉上的氣動力可分成向上和向前的力量，在前進方向的分

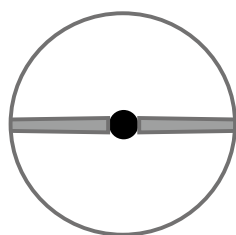
力構成拉力。槳葉剖面弦（相當於翼弦）與旋轉平面夾角稱槳葉安裝角。螺旋槳旋轉一圈，以槳葉安裝角為導引向前推進的距離，稱為「槳距」。槳葉上每一剖面的角速度相同，但線速度則與剖面距轉軸的距離（半徑）成正比，所以各剖面相對氣流與旋轉平面的夾角隨著離轉軸的距離增大而逐步減小，為了使槳葉每個剖面與相對氣流都保持在有利的迎角，各剖面的安裝角也隨著與轉軸的距離增大而減小，故每個槳葉剖面都有不同呈度的扭轉。

更進一步，空氣螺旋槳可再分為定距和變距兩種：定距槳葉的安裝角（槳距）固定，優點是構造簡單、重量輕；缺點是只在選定的速度範圍內效率較高，在其他狀態下效率較低，絕大多數的多旋翼無人機採用定距方案，大載重無人機的選用高距（大槳），要求速度快的無人機選用低距（小槳）。變距槳葉的安裝角（槳距）則可以改變，變距機構由液壓或電力驅動，起飛、爬昇、懸停等需要大扭力時使用高距，巡航時則使用低距，使槳葉始終保持在最佳的工作狀態。

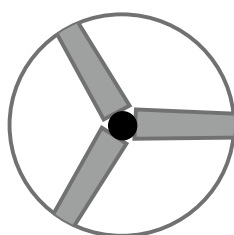
影響空氣螺旋槳效率的原因很多，主要有以下幾個因素：

- 直徑：空氣螺旋槳旋轉時，葉尖所劃圓圈的直徑叫做直徑，是影響螺旋槳性能重要參數。一般情況下，直徑增大而拉力隨之增大，效率也隨之提高。在結構允許的情況下，應盡量選較大的直徑。
- 翼型：槳葉的剖面形狀稱為翼型，其上、下表面的形狀設計，是產生拉力多寡的關鍵因素。

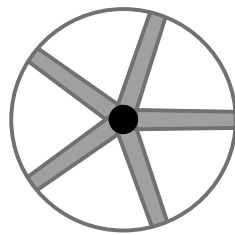
實度 1σ



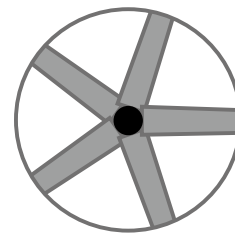
實度 3σ



實度 3σ



實度 5σ



- 轉速：一般來說旋轉速度越快效率越好，但是提高旋轉速度會受到葉尖速度的限制，葉尖速度太快出現過大的空氣渦流效應會使阻力變大，造成槳葉效率變差。
- 槳葉實度：實度（Solidity）是指所有槳葉面積之和與整個槳盤面積的比值（常用希臘字母 σ 表示），槳葉剖面弦長和葉片數量增加可以增加槳葉實度，高實度的槳葉在高扭矩情況下有效好的表現。
- 槳葉平面形狀：槳葉的平面形狀，特別是槳尖形狀對性能有重大的影響。槳尖區域是一個非常敏感的區域，它既是槳葉的高壓區，又是渦流的形成之處，槳尖形狀些微的改變就能導致渦流強度和流軌跡有較大的變化，從而影響整個流場的空氣動力。

- 槳尖扭轉（Twist）：早期受到材料、加工技術等條件的限制，直昇機旋翼主要採用矩形槳葉、小線性的負扭轉設計。為了有效地提升 eVTOL 航空器的性能，其使用的槳葉已經從早期的簡單外形發展到具有特殊平面形狀、非線性負扭轉和翼尖扭轉等多種外形設計，翼尖扭轉的氣動外形設計是 eVTOL 航空器的關鍵技術。至於是向上翻好，還是向下翻好，以及翻多大的扭轉角才最佳，不同槳葉實度有不同效果，需要透過計算流體動力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）或風洞試驗獲得最佳組合。

伍、開放式、涵道式與環形的空氣螺旋槳

仔細觀察探討 eVTOL 航空器的「空氣螺旋槳」，可以發現 eVTOL 航空器上的螺

翼尖向下扭



翼尖向上扭



旋槳直徑都比直昇機的旋翼直徑小而寬度大，其目的是優化結構，減小噪音與震動。有些會外面加一個圓桶形的外殼將槳葉保護起來，構成一種新的結構體，稱為涵道風扇（Ducted Fan）。雖然開放式螺旋槳結構簡單實用，但是由於螺旋槳槳葉高速圓周運動時，葉尖處的渦流會發出極大的氣動噪音；開放式螺旋槳的懸臂樑結構在氣動力的作用下，葉尖容易變形導致效率惡化。為了克服開放螺旋槳的缺陷，涵道風扇應運而生。

涵道風扇結構特點是把槳葉包覆在複合材料製成的涵道內部，旋轉時可形成較為流暢的涵道氣流。前飛時涵道處於前方來流和風扇的引流兩股氣流中，由於葉尖處空氣流動受到涵道限制與導引，氣動噪音較開放螺旋槳為小，引流牽引也可產生額外的推力，在同樣功率消耗下，涵道風扇可比同樣直徑的開放旋翼產生更大的推力。

在相同轉速下，涵道風扇的滑流區氣流速度小於開放螺旋槳，導致涵道風扇本身的拉力小於開放螺旋槳，但是涵道壁面由引流所形成低壓區產生附加的拉力效應，使得整體拉力略大於開放螺旋槳。另外由於涵道形狀改變了滑流的狀態，旋轉所造成的扭矩反而略小於開放螺旋槳。此種涵道結構改善了葉尖區域的渦流特性，氣動噪音小，外罩的包覆也能提升使用的安全性，但使用上並不算非常普及，主要原因是在較小的槳葉直徑下，前述優點抵消不掉涵道重量增加的負擔，複雜的結構設計也容易造成共振、維護不易等諸多問題。這也是起飛重量在 3 噸以下直昇機不採用涵道尾旋翼設計的原因。

空氣螺旋槳會發出令人討厭的噪音，其頻率範圍約在 1KHz 到 5KHz 間，如嬰兒哭

聲一般，是人類耳朵最為敏感的一段音頻。麻省理工學院林肯實驗室（MITs Lincoln Laboratory）研究團隊發現扭曲環形的螺旋槳可以大幅降低傳統螺旋槳的噪音問題。雖然運行環形螺旋槳的無人機的噪音與其他無人機大致相當，但是傳播距離只有普通無人機噪音的一半。原因是環形螺旋槳產生的渦流分佈在整個槳葉形狀上，而不僅僅集中於在槳尖。這使得渦流在大氣中能更快地消散。其次，環狀可增加結構的穩定性與槳葉切割其他外物的機率。環形螺旋槳的形狀非常奇特，但飛行時較為安靜，氣動效率也有所提高。缺點是一定得使用 3D 列印技術來製造極度扭曲的外型，從而限制了材料的強度。

陸、eVTOL 航空器的動力來源

eVTOL 航空器動力來源可以分為電池、油電混合及氫燃料等三種，以鋰電池為最主流。高儲能密度又可提供 eVTOL 航空器懸停所需的瞬間大電流鋰電池非常難以製造。油電混合則較為投資 eVTOL 市場的汽車製造商所青睞，日本 HONDA 公司就認為 eVTOL 航空器的潛在市場應為 250 英里左右的城際運輸，而這種距離已超過現階段鋰電池的技術能力，且 eVTOL 航空器的噪音主要來自於旋翼本身（理由如前述），混合動力的發動機所產生的噪音尚在可接受的範圍。氫能則是未來最為清潔、環保的動力來源，主要由南韓廠商依其國家政策推動相關的開發工作，技術問題在於儲備成本高及無色無味的氣體造成的潛在安全風險。三種動力的其優缺點簡單歸納如下表：

動力來源	優點	缺點
鋰電池	<ul style="list-style-type: none">● 電池造價低● 結構簡單● 清潔能源● 易於運輸	<ul style="list-style-type: none">● 儲能密度低● 續航能力低
油電混合	<ul style="list-style-type: none">● 造價成本高● 續航時間長● 電機更輕小● 爬升性能強	<ul style="list-style-type: none">● 系統複雜● 故障率高
氫燃料	<ul style="list-style-type: none">● 機動性高● 使用成本高● 維護簡單	<ul style="list-style-type: none">● 危險性高● 系統複雜● 載重量小

問題日益嚴重。傳統的地面交通方式，包括汽車、公共汽車和地鐵等，已經無法滿足人們日益增長的交通需求。同時，環境污染問題也促使社會尋找更加環保的交通方式。都會空中交通（UAM）的概念可以追溯到 20 世紀中葉，隨著直升機技術的發展，人們開始探索在城市中使用航空器進行交通運輸的可行性。然而，直升機的高噪音、耗油量大和操作複雜等問題限制了其大規模應用。進入 21 世紀，隨著電動飛行技術和自動駕駛技術的迅猛發展，eVTOL 航空器的概念逐漸成熟，為 UAM 及更長程的先進空中交通（AAM）發展奠定了基礎。以下介紹四家主要的 eVTOL 廠商。

柒、主要 eVTOL 航空器業者

隨著全球城市化進程的加速，城市人口和經濟活動集中度不斷提高，城市交通擁堵

一、德國 Volocopter 的 VoloCity

世界上第一架載人試飛成功的電動垂直起降飛行器就是該公司的產品，VoloCity 共有 18 個開放式旋翼，2011



Volocopter 公司的 VoloCity 預計本年巴黎奧運時投入試營運。
圖片來源：Volocopter 公司網站

年 10 月 21 日原型機載人首飛成功後，研發團隊成員隨後成立了新創公司 Volocopter，是同時持有歐盟 EASA 設計組織核准（DOA）和製造組織核准（POA）的公司，可以自主設計和生產，目前 VoloCity 已進入預量產階段，有望成為歐洲首家提供商業空中計程車服務的公司。此外，美國聯邦航空管理總署（FAA）也已接受了該公司的適航申請。

二、美國 Archer Aviation 的 Midnight

Archer's Midnight 是一架四人座（不含駕駛）的 eVTOL 航空器，其目標是用大約 10-20 分鐘的空中計程車服務取代 60-90 分鐘的汽車通勤，這飛行安全、可持續、低噪音且與地面交通相比具有成本競爭力。該公司的商業模式並不限於航空器製造商而同時也是一家航空公司，旗下子公司 Archer Air 已獲得美國 FAA 頒發的 Part 135 營運證書。該證

書允許 Archer 在獲得 Midnight 的型式檢定合格證後，可進行商業營運飛航。United Airlines 等航空公司亦有投資該公司。除了 Part 135 外，Archer 也獲得 FAA 頒發的 Part 145 維修廠證書，允許其提供專門的航空器維修服務。Part 135 的認證過程包括嚴格的五階段審查，公司需要向 FAA 提交大量的說明文件與操作手冊，操作 Midnight 的人員也需要向 FAA 展示證明對這些手冊和標準作業程序的熟練程度。

三、美國 Joby 公司的 S4

Joby 公司 2009 年成立於加州，致力於開發 eVTOL 航空器。2020 年 12 月 Uber 將發展空中計程車業務的 Uber Elevate 部門，以整併方式出售給該公司。Joby 並於 2022 年 2 月與全日空（ANA）結盟，規劃打造穿梭於都會和機場間的空中計程車隊。該公司在 2022 年獲得美國 FAA 頒發的 Part 135 營運



Volocopter 公司的 Midnight eVTOL 航空器。

圖片來源：Archer 公司網站



Joby Aviation的S4 2.0（第二代原型機）。

圖片來源：Joby公司網站

證書，並在紐約的曼哈頓推出空中計程車服務。S4 可搭載 1 名飛行員和 4 名乘客，最高時速可達 200 英里，鋰-鎳-鈷-錳氧化物電池在單次充電後可飛行 150 英里。S4 的六個傾轉螺旋槳位於固定高翼及 V 型尾翼上，機身高翼上的二個螺旋槳透過連桿機構直接傾轉，其他的四個螺旋槳則是與發動機短艙同步傾轉，透明大窗戶與可伸縮式的起落架設計非常具有未來感。

四、中國億航智能的 EH216-S

億航智能公司 2014 年於廣州成立，並於 2019 年在美國納斯達克上市。該公司的 EH216-S，機身高度 1.93 公尺；機身長 5.73 公尺；最大起飛重量 30 公斤；最大航程 30 公里；最大設計速度航程 130 公里 / 小時。該型航空器

在 2023 年 10 月 30 日獲得中國民航局頒發的無人駕駛載人電動垂直起降（eVTOL）航空器型號合格證（TC），隨後於 2024 年 4 月 7 日取得生產許可證（PC）；適航證書（AC）需另由購買者向民航主管機關取得。

結論

綜整以上說明，從遙控無人機到 eVTOL 近期發展趨勢對未來空中運輸的影響非常大，對民航業的啟發約有以下兩點：首先，eVTOL 航空器在低空域大量運用推動城市空間的重塑和再造，也促使城市設計的重新思考，其中涵蓋新的城市建築需要考慮到停機坪（Vertiport）的設計和機場場站相關標準及基礎設施建設和空域調整的改善。這些概念展示了航空技術和應用的大幅度進步，從



億航智能公司的EH-216S eVTOL 航空器。

圖片來源：億航智能公司網站

早期的小型無人機系統（sUAS）功能發展到城市、區域和先進的空中交通解決方案。每一階段的技術進步和應用的擴展都為下一階段奠定了基礎，形成了完整且相互關聯的航空交通生態系統。其次，eVTOL 航空器相關法規調整與完善尚待加強。我國民航法針對遙控無人機是以專章（民航法第 99 條）的形式去規定飛航活動、適航檢驗、人員操作、航空安全等法規制定，目前是以中小型遙控無人機作為管理目標。未來要完善 eVTOL 航空器的法規推動，就需要全方位思考空域管理的需要，並發展適用的空域管理方案，確保低空域的有效利用和飛行安全，包括空域劃分、飛行路徑規劃和飛航管理等方面，以及符合安全標準的航空器和運行的適航標準都與傳統航空器不同，涉及到設計認證、運行許可、維護管理等多方面的法規。當然現行其他法規也要配合調適，例如：需要制定配套的環境法規，如限制噪音污染、排放標準…等。eVTOL 航空器通過新型航空技術

和營運模式、技術創新、應用領域等，提供安全、高效、環保的新興的空中交通解決方案，遙控無人機從一般個人的娛樂運用發展到 eVTOL 航空器，就如同從頑童逐步成長到紳士再成為望族，將在未來航空產業中發揮越來越重要的作用。✈



113年3月12日本會會員單位派員前往松山機場進行「作業風險管理教育」訓練課程，以建立正確安全管理觀念，精進會員單位飛行與地面作業安全。



113年3月24日至31日由會員單位副調查官翟耀文先生與梁能先生等2位前往美國南加州大學參加「渦輪發動機事故調查」專案訓練。



113 年 4 月 8 日本會秘書長耿驊先生對會員單位執行「民航局無人機管理、安全與發展」專案授課，精進會員單位飛行與地面作業安全。



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