

五邊進場階段一陣側風對航機落地的影響

林 得 恩

國立臺灣大學 氣候天氣災害研究中心

壹、前言：

五邊進場（Final Approach）是航機降落過程中最為關鍵的階段之一，也是航機降落的基礎飛行路線。五邊從空中俯瞰，就像是一個四邊形，對於準備進近著陸的航機來說，其實就是圍繞機場盤旋一週。航機飛五邊，就是在塔臺調度中心和飛行員對周圍的環境進行全面的評估，對飛行姿態和飛行路線進行修正調整的關鍵過程。

此時，航機從跑道延長線進入穩定進場狀態，飛行高度逐漸降低，準備降落。當此階段，若遇到陣側風（gusty crosswind），常易對航機的穩定性、操作難度以及落地安全性產生顯著的影響外；甚至，因而肇生飛安事件。

貳、陣側風的特性及對航機的影響：

陣側風（Gusty Crosswind）是指具有快速變化特性的側風，即以側向作用於航機的風力，其特徵在於風速和風向的短時間內急劇變化。

所謂的側風，指的是相對於跑道方向並不正對航機的風，通常形成與航向垂直的分

量，對飛行穩定性造成的干擾與影響。2019年，強烈風暴「德尼斯」（Storm Dennis）影響英國地區，導致柏明罕機場頻繁出現大於30節的側風，嚴重的側陣風造成飛行方向舵控制困難，航機偏離跑道軸線。一架航機在側風條件下嘗試落地，因風速超出機型限制且航機偏離跑道中心線，被迫中止著陸，並重新進行復飛。

而陣風，指的是風速或風向在極短時間內，出現突發性的增強或改變，是不穩定氣流的重要特徵之一。2017年，一架聯合航空的波音737在丹佛國際機場著陸時，遭遇突然的強烈陣風。陣風在航機接近跑道時，改變了航機的垂直速度和進場角度，導致著陸點偏移，機輪幾乎無法完全控制方向。航機觸地後，產生劇烈晃動，偏離跑道中心線，最終安全停下，但機輪受到損壞，部分乘客受輕傷。

結合起來，陣側風是指具有強烈變化性的側向風，風速和風向在短時間內快速且不規則地變化。這種風在地形起伏、障礙物（如建築物或山脈）附近、低壓系統或強對流天氣系統中，尤為常見；對我航機在進場與著陸等階段影響最為顯著。對我航機的影響，根據過去的實際案例分析，又可概分以下4

個重點：

1. 方向控制的困擾：

陣側風會對航機施加不穩定的橫向作用力，導致航機偏離跑道中心線。當航機準備降落之際，環境陣側風以突發性或不穩定的模式吹向航機時，會在機身上產生不對稱的橫向氣流，導致橫向不穩定力矩；也可能在短時間內，改變航機左右兩側機翼的氣流角度，進而改變升力分布，嚴重情況下，也可能導致主起落架單邊過載或甚至「擦機翼」（Wing Strike）。此時，航機就需要依靠舵面及副翼的精確操作來修正航向，保持航機對準跑道；若修正不及，可能導致航機偏航或滑出跑道，增加了飛行操作的複雜性與應變性。

2. 升力與氣流流場的複雜變化：

陣側風對機翼氣流的影響可能導致左右機翼升力不均（如圖 1），引發滾轉（rolling motion），進一步影響航機的穩定性，甚至影響或破壞環境氣流流場的均一穩定特性。根據氣候統計顯示，陣側風現象多發於對流性天氣（例如：雷暴系

統）、氣旋系統（例如：颱風系統）或高氣壓與低氣壓之間的過渡區（例如：鋒面系統）；而發生在地面至約 300 米高度低空層的頻率最高，低層大氣受到地面摩擦作用影響，風速降低且產生紊流，導致陣側風特性更加顯著。對我航機進場和降落階段的影響最大。另一方面，山脈、山谷、海岸線或機場周邊建築物也可能造成環境氣流的突然變化，形成局部陣側風現象。根據過往監測統計的資料也顯示，風隙效應（Gap Wind）和狹管效應（Channel Effect）同樣也會進一步放大風速，使得環境氣流流場變得更加複雜。

3. 著陸速度與地速差異過大：

在飛行中，著陸速度（Landing Speed）和地速（Ground Speed）是兩個密切相關但有重要區別的概念。它們之間的差異主要由風速和風向所引起，特別是當航機進場著陸時，會受到氣象條件（如：順風、逆風或側風）的影響。強側風條件下，為抵消側風對航機的影響，可能需要採用更高的著陸速度，從而增加了落地滑行的距離與壓力，使得航機平穩降落的困難度增

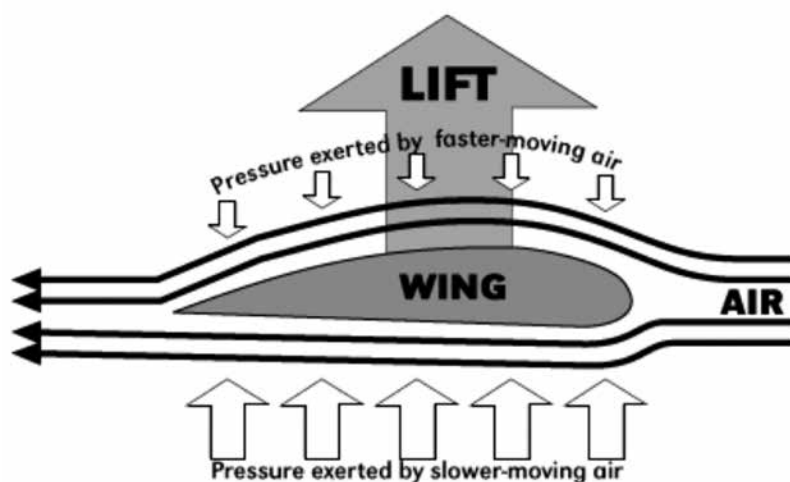


圖1、航機遭遇側風，由於產生垂直氣壓差，導致左右機翼的升力不均，常易使得空氣的漩渦或渦流沿著機翼的後緣滾轉（資料來源：NASA）

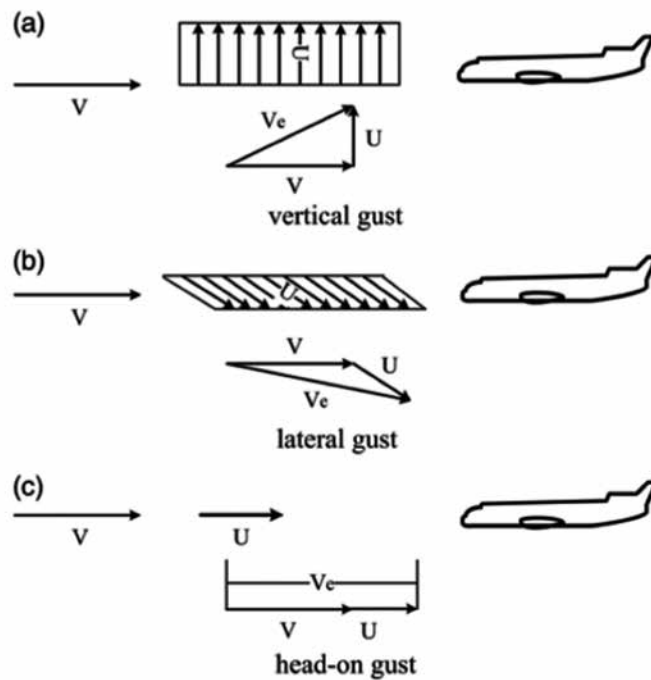


圖2、航機飛行常遇不同方向性的陣風型態，分別為垂直陣風、橫向陣風和迎面陣風， V 是飛機向前飛行速度， U 是陣風速度， V_e 是飛機有效速度（Wu et. al., 2019）

加。而側風對地速的影響，會使得航機的橫向穩定性降低，此時，就需要進行側滑法（Crab）或翼低法（Wing Low）來進行修正操作；若遭遇到陣風過大，就可能導致著陸不穩定，需要機組迅速調整修正飛行姿態。

4. 陣風效應（Gust Effect）：

航機上的陣風負荷可能會產生有害影響，例如空氣動力和結構負荷增加、結構變形和飛行動力性能下降。陣風的快速且劇烈的變化，通常超出了自動油門和機組的即時反應能力。若從陣風的方向性來看，陣風又可分為垂直陣風、橫向陣風和迎面陣風三種。通常認為每種陣風的影響，分別等於改變航機的迎角、側滑角和動壓力。這是由於與飛行路徑正交的陣風速度的各個方向分量造成的，如圖2所示，其中

V 是飛機向前飛行速度， U 是陣風速度， V_e 是飛機有效速度。在陣風條件下，風速的突然變化，可能導致航機瞬間失穩，產生橫傾（banking）或俯仰（pitching）等現象，飛行員需快速反應，積極應變，妥慎處理。

參、五邊進場時的風險評估：

五邊進場，是航機降落過程中最關鍵的階段之一，當航機已進入跑道延長線，並逐步降低飛行高度，準備進場落地（如圖3）。此階段飛行高度低，飛行速度逐步減小，飛行員的操作空間有限，因此各種天氣、環境或機械問題在此階段都會對飛航安全構成重大挑戰。

在此階段，對環境天氣變化非常敏感，

對於側風修正（Crosswind Correction）的難度自然提高，在穩定進場階段，飛行員需進行側風修正，通常可以採用以下 2 種技術。第 1 種，就是對正跑道法（Crab Method），五邊進場，航機機頭對準側風方向，使得航向與地面跑道對齊，航機著陸時，則迅速修正機頭方向。另 1 種，則為側滑法（Sideslip Method），五邊進場，使用副翼和方向舵控制，讓航機在著陸過程中保持對準跑道方向。

通常，在陣側風影響的條件下，風速與風向的快速變化，常易使得飛行修正更為困難，容易導致降落角度不穩定，飛行降落風險增大。如果在觸地瞬間風速突然增加或方向改變，也易導致航機接地輪胎受力不均，引發方向偏移或滑行偏離跑道。一側主起落架過早接地，增加機體結構壓力；甚至，可

能損壞起落架。航機降落觸地後，陣側風也可能引發飛行方向的不穩定，尤其是小型飛機和側風限制較低的機型，滾行穩定性也會跟著大幅下降，飛安風險同步增加。尤其在最後進場階段（Final Approach），特別容易受到突變風速和陣側風的影響，導致航機失穩；甚至，偏離跑道、衍生飛安事件。

肆、因應對策與建議：

陣側風對航機的落地挑戰大，特別是五邊進場時，需應對不穩定橫向作用力，避免導致偏離跑道的風險。透過正確的操作方法、充分的風險評估以及先進的氣象設備，可以有效降低陣側風帶來的飛行安全隱患。以下將針對「飛行員的整備應處作為」及「航機與機場基礎設施的改善」等 2 個面向來討論。

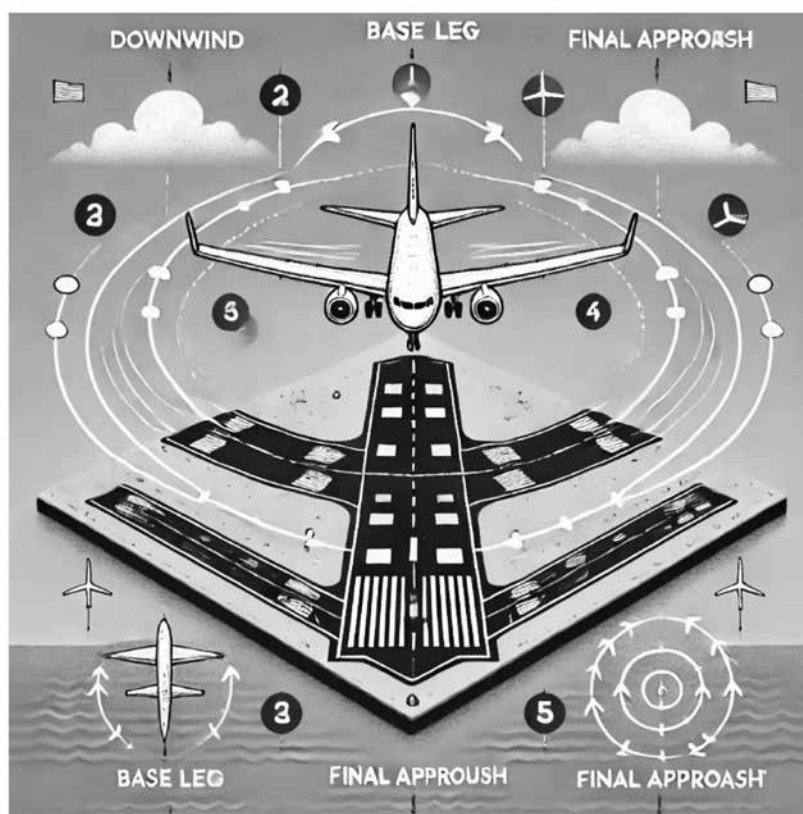


圖3、航機降落標準進場的五個階段的示意圖，圖中也顯示出側風和陣風所對應的條件

1. 飛行員的整備應處作為：

飛行員在操作航機進場前，需提前熟稔進場的風速參數與完善環境風場評估，加強飛行員的側風操控訓練，尤其是在模擬器中模擬強側風和陣風條件的訓練課程。若在強烈陣側風的條件下，需在風險管控的首要考量下，選擇延遲降落或另覓備降機場是應變處置的可能選項之一。

在飛行前的任務提示，飛行員應熟悉目的地機場的側風限制（Crosswind Limit），包括正側風（steady crosswind）與陣側風（gusty crosswind）條件；這跟所在天氣系統、山脈地形以及氣流流場有絕對的關聯性。充分利用空管提供的實時風速和風向數據，而在執行航機降落階段，也能通過機上系統即時監控陣風強度。保持穩定進場，在五邊階段，保持精確的進場速度與下滑道；通常，過高或過低的速度會放大風切與陣側風效應的影響。飛行員亦應靈活使用舵面，方向舵和副翼的協調使用是應對陣側風的關鍵，避免過度修正，導致航機反而進一步失穩。如果，增加進場速度，一般加速至陣風風速的50%做為預留量（例如，假設陣風為15節，則進場速度增加7.5節），藉以對抗風速的突然變化。也需考量降落環境的地形和障礙物影響，機場周圍的地形也可能會引發亂流或改變風場分佈，增加進場的困難度。

通常，在航機五邊進場前，飛行員應搜尋參考機場的即時風速、風向資訊（如ATIS廣播），進行飛行決策資訊的參考之一。另一方面，善用機場的低空風切變預警系統（LLWAS）、多普勒雷達即時監測和地面氣象站觀測資料，亦能有效協助機組判斷陣側風肇生演變的最新動態發展，藉此決定是否

適合繼續執行降落任務。

在著陸技術選擇上，也可適時調整修正。對於中大型噴氣式客機，通常採用對正跑道法，並在觸地瞬間進行機頭修正；對於小型飛機或螺旋槳飛機則更常用側滑法，則可保持更高的控制精度。

2、航機與機場基礎設施的改善：

在航機控制系統提升的方面，增強橫向控制系統，現代航機採用更高效的自動飛行控制系統（AFCS）和飛行增穩技術，有效協助飛行員在陣側風條件下，更能準確地控制航機。另一方面，在陣側風的環境下，自動調整垂直尾翼的偏航動作，減少陣側風所引起的航向偏移問題。同時，改進飛行管理系統（FMS），引入先進的預測功能，根據實時天氣數據情資，調整進場參數，降低陣側風可能帶來的影響與干擾。

在機體設計改良方面，採用改良的翼尖設計和副翼結構（如波音777X的折疊翼尖技術），提升航機在陣側風條件下的穩定性和操控性能。另一方面，增加尾翼面積或強化尾翼結構，幫助抵抗強側風所帶來的橫向力。同時，也可以思考強化提升起落架的側向抗風能力，確保在跑道接地時的穩定性維持。

在機場跑道設計方面，評估在風向變化頻繁的機場（如橫風較強的地區），建設多條方向不同的跑道（如35/17跑道和04/22跑道），提供較多樣化的五邊進場選擇。另一方面，改善跑道防滑表面，增加跑道表面摩擦力（例如：鋪設防滑塗層），減少航機在陣側風著陸時的滑移風險。

在機場導航與氣象監測系統方面，強化擴充低空風切變預警系統（LLWAS）功能，部署高精度的陣風和側風監測雷達，實時監測低空風場變化，提前警告風切變和陣風的肇生。另一方面，增強儀表進場系統（ILS）功能，幫助飛行員在惡劣天氣下，更能準確地對準跑道中心線，也可減少陣側風所肇致的可能風險。

伍、結論：

五邊進場階段的陣側風對航機落地構成重大挑戰，尤其是風速與風向的突發變化，可能導致對航機的穩定性、操作難度以及落地安全性產生顯著的影響外；甚至，因而肇生飛安事件。

陣側風是指具有快速變化特性的側風，即以側向作用於航機的風力，其特徵在於風速和風向的短時間內急劇變化。除了會肇致航行方向控制上的困擾，可能在短時間內，改變航機左右兩側機翼的氣流角度，進而改變升力分布之外，進一步影響航機的穩定性，甚至影響或破壞環境氣流流場的均一穩定特性。根據氣候統計顯示，陣側風現象多發於對流性天氣（例如：雷暴系統）、氣旋系統（例如：颱風系統）或高氣壓與低氣壓之間的過渡區（例如：鋒面系統）；而發生在地面至約 300 米高度低空層的頻率最高，低層大氣受到地面摩擦作用影響，風速降低且產生紊流，導致陣側風特性更加顯著。

面對航機著陸速度與地速可能差異過大，強側風使得航機的橫向穩定性降低，此時，就需要進行側滑法（Crab）或翼低法（Wing Low）來進行修正操作；若遭遇到陣風過大，就可能導致著陸不穩定，需要機組

迅速調整修正飛行姿態。另一方面，在陣風條件下，風速的突然變化，可能導致航機瞬間失穩，產生橫傾或俯仰等現象，飛行員需快速反應，積極應變，妥慎處理。在穩定五邊進場階段，飛行員必須進行側風修正，通常可以採用對正跑道法（航機機頭對準側風方向，使得航向與地面跑道對齊，當航機著陸時，則迅速修正機頭方向）以及側滑法（五邊進場，使用副翼和方向舵控制，讓航機在著陸過程中保持對準跑道方向）等因應陣側風的肇生與干擾影響。

飛行員在操作航機進場前，需提前熟稔進場的風速參數與完善環境風場評估，加強飛行員的側風操控訓練，尤其是在模擬器中模擬強側風和陣風條件的訓練課程。若在強烈陣側風的條件下，需在風險管控的首要考量下，選擇延遲降落或另覓備降機場是應變處置的可能選項之一。在航機五邊進場前，飛行員應搜尋參考機場的即時風速、風向資訊，進行飛行決策資訊的參考之一。另一方面，善用機場的低空風切變預警系統、多普勒雷達即時監測和地面氣象站觀測資料，亦能有效協助機組判斷陣側風肇生演變的最新動態發展，藉此決定是否適合繼續執行降落任務。

在航機控制系統提升的方面，增強橫向控制系統，現代航機採用更高效的自動飛行控制系統和飛行增穩技術，有效協助飛行員在陣側風條件下，更能準確地控制航機。另一方面，在陣側風的環境下，自動調整垂直尾翼的偏航動作，減少陣側風所引起的航向偏移問題。同時，改進飛行管理系統，引入先進的預測功能，強化擴充低空風切變預警系統功能，部署高精度的陣風和側風監測雷達，根據實時天氣數據情資，調整進場參數，

降低陣側風可能帶來對飛航安全的影響與干擾。

參考文獻：

Cao, Y., Wu, Z. and Xu, Z.,2014： Effects of rainfall on aircraft aerodynamics, Progress in Aerospace Sciences, 71, 85–127.

Z. Wu, Y. Cao and M. Ismail,2019：Gust loads on aircraft, The Aeronautical Journal ,123,1216-1274.

林得恩，2022：全球氣候變遷下的飛航安全維護，財團法人中華民國台灣飛行安全基金會，飛行安全半年月刊，3-16。

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。

莊耀中、林裕豐與林得恩，2005：低雲幕對飛航安全影響之統計研究。氣象預報與分析，182，17-24。