

第十二章 航空氣象

第一節 前言

西元 1903 年 12 月 17 日萊特兄弟完成人類史上第一次以機械動力飛行之壯舉，隨後由於飛機的問世，不但縮短了時間和空間的距離，而且也改變了地緣的關係。從前，飛行被認為是年青人冒險的活動，如今卻變成我們日常生活中最重要的交通工具之一，於是航空事業乃脫穎而出，成為 20 世紀人類文明最重要成就之一。綜觀航空事業發展的過程，我們體認到航空工程今日的成就，乃是集合了各有關科學的結晶。譬如空氣動力學之探討和應用；高效率渦輪噴射引擎之發展；新合金航空材料之推出；航空電子工業之興起；電腦化的設計以及生產和管理程序的廣泛應用等等。雖然現今出廠的飛機各方面都有革命性的改進，飛機本身安全性的提高，幾乎達到完美無缺的境界，但是我們今日在天空裡所遇到的大氣狀態，與航空初期所遭遇的情形類似，甚至有些特殊的危險天氣現象，卻更嚴重威脅今日高性能飛機的飛航安全，因此更突顯航空氣象對飛機操作和飛航安全的重要性。

為了解航空氣象對飛機操作和飛航安全之重要性，首先要知道飛行之基本理論，飛機於空中飛行時，端賴四種飛行要素---飛機總重量（Weight）、飛機透過機翼所產生之舉升力（Lift）、飛機向前飛行所產生之空氣拖曳力（Drag）和飛機引擎所產生之推進力（Thrust）。飛機之飛行可以分為三個階段----起飛（Take-off）、巡航（In-flight）和降落（Landing），而航空氣象單位所提供的觀測和預報資料，就是要滿足每個階段之需求。

最直接影響飛機操作和飛航安全之航空氣象因素，大致可歸納為風（Wind）、雲和能見度（Clouds and Visibility）、溫度（Temperature）、氣壓（Atmospheric Pressure）、密度（Air Density）、降水（Precipitation）和其他顯著危害天氣如飛機結冰（Aircraft Icing）、亂流（Turbulence）、雷暴雨（Thunderstorm）引發下爆氣流（Downburst）和低空風切（Low-level Wind Shear）、濃霧（Heavy Fog）所引起的低能見度（Low Visibility）等等。本文就這些航空氣象因素對飛機操作和飛航安全之影響加以討論。

第二節 地面風

飛機舉升力等於飛機總重量時，即表示飛機在一定重量下，飛機正好由空氣所支撐，此時飛機之臨界速度係在失速狀態下，飛機就在這種空速和失速狀態下

起飛和降落。飛行員和管制員依據地面風來選擇跑道方向，同時飛行員也依據地面風來計算飛機起飛可承受的重量。如果有較強的頂風，浮力增加，起飛的速度就可減少，即較強的頂風時，起飛所需要的跑道較短，載重量也較多。另一方面，如果頂風較弱或靜風時，載重減輕才能起飛。同機型的飛機，允許最大的跑道側風也有不同，有時候超過跑道側風最大限制時，飛機降落就會有危險。風速的變化可決定飛機起降階段之穩定性，一般而言，重型飛機對於風的變化較不受影響，可在較大側風下起飛，但是控制其變化的反應力較慢；輕型飛機對於風的變化較容易受影響。如果降落階段碰到陣風時，其反應力較快。

民用航空局飛航服務總臺所屬臺北松山、桃園、高雄、臺東豐年、蘭嶼、綠島、馬祖南北竿、金門尚義及恆春等機場航空氣象臺，氣象人員每天按時從事地面觀測，其中觀測地面風為最重要觀測項目之一，機場地面風資料都是即時廣播和提供管制員及航空公司來使用。各機場地面風速順風超過 10 浬/時 (Knot; kt)，就須換跑道，如松山機場地面風吹西風超過 10kt，管制員就須使用 28 號跑道讓飛機起降。

第三節 高空風

飛行員和航空公司運務員需要高空風資料，有兩種理由，第一理由為飛機來往兩地，需要高空風資料。飛機於靜風中飛行時，係相對於空氣呈直線向前移動，飛行員為從甲地飛往乙地，必須考慮風場。因此低速飛機更需高空風向和高空風速等資料，其中風速佔空速很重要的部份。

第二理由是航空公司準備飛行計畫時，計算油料需要風場資料，飛機由甲地飛往乙地，若逆風飛行，其所花費的時間比靜風飛行時為較長時間，也即需要更多的油料，相對地就要減少載重。例如，飛機在靜風中以每小時 500 浬之速度，飛行 3000 浬需要 6 小時，如果在 50kt 的順風中飛行，僅需 5 小時 27 分約可節省 10% 之時間，比起靜風就可節省 10% 之油料，因此就可增加載重。中華和長榮等航空公司由臺北飛往美國安克拉治、舊金山和洛杉磯等國際機場，冬天常選擇 200 百帕 (hecto-Pascal, hPa) 等壓面 (39,000 英尺) 以上之高度，由西向東之強噴射氣流 (每小時 100-200 浬左右)，順風飛行，可節省不少飛行時間和油料。返回臺北時，則選擇較弱西風帶飛行，即在避開逆風飛行，以免費時費油。

第四節 溫度

飛機舉升力與空氣密度成正比，所以在高溫下引擎效率低。空氣密度與氣溫

和氣壓有關，在一定氣壓下，氣溫比正常值為高時，飛機起飛需要較快的速度，較快的速度就需要較長的跑道，在某些天氣條件下，跑道長度不能滿足飛機正常的載重量所需，只好減少飛機的載重。高空溫度低，飛機引擎效率高，如果高空溫度比正常值為高時，所需油料更多，才能維持正常的巡航動力。在準備飛行計畫時，需要高空溫度資料來決定所需油料。

臺灣位於近北回歸線上，夏季於太平洋副熱帶高壓籠罩下，雲量少，日射強，日照長，跑道溫度高，通常國際班機由國外直飛臺灣，由於長程飛行，在起飛前，常要求航空氣象單位提供桃園或高雄國際機場之最高跑道溫度，以便準備飛行計畫時，計算其載重之最高限制。

第五節 大氣壓力和空氣密度

以大氣壓力和溫度兩者可以決定空氣密度，進而決定飛機舉升力。在其他因素相同條件下，空氣密度降低，飛機需要更快的速度，才能保持一定的高度。速度越快，飛機拖曳力越大，所需引擎推進力亦越大，越大的引擎推進力，所耗油料亦越多。因此高速飛行之噴射飛機需要甚多的油料。

前述在高溫下，當氣壓降低，密度減少時，需要較長的跑道，以獲取起飛的速度。從每天綜觀天氣圖氣壓場的分布，在低壓區，其影響更大，準備起飛計畫時，更應該考量。再如，機場海拔高度越高，其平均氣壓降低，平均密度亦減少，因此在設計機場時，高海拔機場需要較長的跑道，以應起飛之需。此外，空氣密度減小，引擎動力亦會跟著減弱，影響飛機爬升之動力，如果密度減至某一定值時，就得減輕飛機的載重量，飛機才容易起飛和爬升。

大氣壓力與高度有密切關係，即大氣壓力隨高度增加而遞減。在近海平面 1000 百帕 (hPa) 附近，高度每上升約 10 公尺，氣壓降 1 百帕 (hPa)；在 500 百帕 (5,500m) 附近，高度每上升約 20 公尺，氣壓降 1 百帕；在 200 百帕 (12,000m) 附近，高度每上升約 30 公尺，氣壓降 1 百帕；它應用於航空上，用來決定飛機飛行之高度。飛機上之高度表，就是以空盒氣壓計 (Aneroid Barometer) 之氣壓高度換算出高度，作為高度表 (Altimeter) 之標尺。國際民航組織 (ICAO) 假設在乾空氣、平均海平面之氣壓和氣溫分別為 1013.25 百帕和 15°C、對流層頂以下約 11 公里之溫度隨高度遞減率每公里下降 6.5°C 等標準大氣條件下，作為高度表之參考基準，在這種狀態下的大氣稱之為國際民航組織標準大氣 (ICAO Standard Atmosphere)。

由於各地之大氣條件隨不同高、低壓系統之移動而隨時在變化，所以高度表在不同時間、不同地點和不同高度皆與標準大氣有所不同。因此，飛機上之高度

表讀數必須經過適當撥定，才能顯示出實際高度。因此，飛機起飛前必須經過高度撥定，航程上因海平面氣壓不斷變化，其高度表所顯示之高度與實際海拔高度發生誤差，有時候誤差可能很大。依據高度表撥定程序之規定，凡飛行在海平面高度約 3,330 公尺（11,000ft）及以下之飛機，應採用飛經當地之實際海平面氣壓值（QNH）。飛行在離海平面高度約 3,940 公尺（13,000ft）及以上之飛機，以標準大氣壓力 1013.25 百帕為高度撥定值。

飛機自甲地高壓區飛進乙地低壓區，若高度表不撥定為乙地的高度表撥定值時，則飛機上高度表所顯示高度值比實際高度為高，此時飛機有撞山或重落地之危險。反之，飛機自乙地低壓區飛進甲地高壓區，若高度表不撥定為甲地的高度表撥定值時，則飛機上高度表所顯示高度值比實際高度為低，此時飛機降落時有落空之危險。如果有甲、乙兩架飛機分別自甲地高壓區和乙地低壓區，採取儀器飛行規則對著飛，兩架在同一航路上之飛行員，均未即時做高度撥定，在各自高度表上所顯示高度雖保持 300 公尺之垂直隔離，但其實際飛行高度則逐漸接近，最後可能在中途互撞之危險。

第六節 飛機結冰

飛機飛經過冷卻的雲層或雲雨區域時，機翼機尾及螺旋槳或其他部分，常會積聚冰晶，多者可能厚至數吋。那些區域最容易使飛機結冰呢？飛機在氣溫攝氏 0°C 至 -9.4°C 間之高空飛行，機體上最容易結冰；雲中最易見到有液態水滴，尤其是積狀雲如積雲、積雨雲和層積雲等，此時空中水滴常在冰點以下而不結冰仍保持液態水之狀態，就是所謂的過冷卻水滴，飛機飛過，空氣受擾動，過冷卻水滴立刻結冰覆著於機體上，數秒鐘內機體上就會有嚴重的結冰；空氣中若濕度大，含有過冷卻水，容易構成昇華作用，飛機穿越其間，空氣略受擾動，迅速凝聚積冰；雖然晴空無雲，但是在結冰高度層上方，氣溫與露點溫度十分接近時，結冰之趨勢仍然存在。

飛機結冰，大概可以分為飛機外表結構上的結冰和飛機內部動力組上的結冰。飛機結冰可造成幾種危險，例如，飛機結冰增加重量，結果減低空氣動力之效能；機翼機尾結成冰殼，損壞其流線外形，致使飛機喪失抬升力；螺旋槳籠罩一層冰晶外殼，其外形改變，致喪失飛機之衝力；噴射發動機進氣口結冰，可能喪失發動機之發動能力；飛機操縱面煞車及起落架之結冰，可能傷害其正常動作；螺旋槳槳葉上結冰多寡不均勻，可能失去平衡，致其轉動產生搖擺現象；飛機動壓管結冰，使飛行速度與高度表讀數失真；飛機天線結冰，致無線電及雷達信號失靈。雖然現今飛機本身已有加溫系統，可克服上述飛機結冰的問題，但是

飛機仍然需要避開結冰區域以防止加溫不及而瞬間結冰，造成危險。

為克服飛機高空飛行遭遇之機翼結冰問題，所有的民航機都裝有除冰設施，除冰方式包括直流電加熱化冰，或是以除冰靴敲碎積冰，讓其自然被風吹落。除冰靴是一條中空的橡皮條，裝設在飛機機翼前緣或機翼翼側，當機翼出現積冰之後，冰靴會間歇性快速充氣膨脹及放氣萎縮，在冰靴間歇性脹縮之下把冰打碎或頂離飛機翼面，讓冰被風自然吹落。至於 ATR-72 型航機，除了機翼上裝有除冰靴外，螺旋槳之迎風面、機翼翼尖、垂直尾翼前緣等也都有直流電加熱式化冰裝置，進行除冰和化冰。而在 1994 年 10 月 31 日，美鷹航空一架 ATR-72 型客機，在芝加哥市郊因在空中盤旋過久，導致機翼結冰而失控墜落。FAA 因此發布適航指令要求所有同型航機必須加大除冰靴裝置。

第七節 亂流

飛機飛入對流性雲區，例如積雲、積雨雲和層積雲等，由於空氣發生上、下對流垂直運動，使機身起伏不定，致令乘客暈機嘔吐，極感不舒適，甚至導致飛機結構損壞，造成飛機失事，現今飛機常裝置雷達，避開對流性雲型。然而飛機在萬里無雲之高空飛行，突感機身顛簸，這就是所謂的晴空亂流，通常晴空亂流常發生在風向突然轉變或風速突然增加或減少等地區，即所謂風切作用最大地區。冬天常在中、高緯度地區，高度 9~12 公里地方有一股強風帶，風速可達到每秒 30 公尺以上，最大風速甚至可達到每秒 100~130 公尺，這就是所謂的噴射氣流。第二次世界大戰末期，美軍飛機到日本上空執行轟炸任務，以及德國空軍偵察機飛到地中海上空，都曾遭遇一股頂頭強風，使飛機無法前進。美國芝加哥大學隨即針對此現象做了研究，終於發現了噴射氣流。噴射氣流最初發現距離地面高度約 10 公里處，它經常繞著地球跑。亂流常是噴射氣流所造成的，因為噴射氣流附近風切特別大，產生亂流的機會也特別多。飛行員在起飛前，從航空氣象人員所提供的氣象圖表資料中，預知噴射氣流和亂流的位置和高度，便可迴避亂流區域，必要時尚可改變其飛行高度，使飛行較為平穩、安全。

第八節 雷暴雨引發下爆氣流和低空風切

飛行員在飛機降落和爬升階段須注意是否有風切現象，風切係某高度和另一高度間風速的改變。由於飛機之高動量，大型飛機在相當高速飛行時，不能立刻適應風切的變化，因此在起降階段遇到風切就會發生危險。飛機下降時，風速突然減弱造成飛機失速，於未抵達機場跑道就墜毀；風速突然增強，造成飛機超越

跑道降落。飛機爬升時，風速突然減弱，造成飛機爬升角度減小；風速突然增強，造成飛機爬升角度增大。以上種種現象都會造成飛機操作上的困難，甚至於造成空難事件。

雷暴雨所造成的下爆氣流(Downburst)或低空風切(Low-level Wind Shear)，影響飛機航道上風速有水平和垂直方向的急速改變，引起飛機空速也跟著急速的變化。譬如，強烈逆風突然轉變為順風造成飛機起降時浮力顯著減少，造成飛機掉落之危險。因此雷暴雨所造成的低空風切和下爆氣流，是飛機起降時最危險的天氣。雷暴雨引發下爆氣流和低空風切時，下爆氣流在接近地面時，空氣向四方衝瀉，當飛機起飛時進入下爆氣流區，首先遭遇到下爆氣流所帶來強大的逆風(Headwind)，空氣衝向機翼，飛機空速增加，快速爬升，但是當飛機繼續通過下爆氣流區，受下爆氣流向下的衝擊，最後下爆氣流轉變為強大的順風(Tailwind)，空速減弱，浮力大幅減少，因而造成飛機起飛時墜毀的慘劇。雷暴雨發展成熟階段，會產生強烈的上升和下降氣流，當飛機近場(Approach)時，朝向機場跑道且進入雷暴雨下降氣流風切區時，飛機首先遭遇到下爆氣流所帶來強大的逆風，使飛機抬升，因此飛行員必須修正下降高度，才能滑行降落，但是就在飛機以修正後的高度，繼續通過雷暴雨風切區時，下爆氣流在這個方位卻轉變為強大的順風，飛機頓失浮力，因而失速下墜，造成無法彌補的慘劇。目前民航局在桃園國際機場裝置有都卜勒氣象雷達，用來觀測臺灣北部雷暴雨，告知雷暴雨的位置和高度，好讓飛行員避開雷暴雨。同時民航局也採取一項措施，當雷暴雨位在機場上空時，氣象臺會即時發布雷雨當空(TS OVHD)特別天氣報告，提醒航機駕駛員注意，以協助其預為因應，避免飛機在雷暴雨中遇到下爆氣流和低空風切的危險。

第九節 雲、濃霧與低能見度

在任何天氣條件下，助航設施和降落技術都可克服之前，飛行員在近場時必須要能看清跑道，因此在近場時需要各種近場助航設施來引導飛機降落。儀降近場(利用儀器降落系統)比沒有無線電助航設施(目視飛航規則)，可以在較低雲幕和較差能見度之天氣條件降落。

飛行員可以從近場和下降區之雲狀知道有無亂流和亂流強度，積雨雲比層積雲有較強的亂流，由積狀雲的雲頂高度亦可顯示亂流程度。民用航空局每天提供飛行員之顯著危害天氣圖，即有積雨雲之地區隱含中度到強烈亂流和結冰。

為了避免濃霧影響飛航安全，目前機場和飛機上都裝有完善的儀器系統，由儀器來輔助飛機起降，同時由航空氣象單位提供濃霧所引起的低能見度資料，若

能見度低於起降天氣標準，航空公司簽派單位即會依規定暫停簽放作業，約等待個把鐘頭，濃霧消散，能見度轉好，才恢復航班正常輸運。我們的松山機場和高雄國際機場能見度最低降落標準均為 750 公尺，桃園國際機場能見度最低降落標準為 300 公尺。這些儀器系統和低能見度之最低起降落標準，都可確保飛航安全。

第十節 結論

交通部民航局飛航服務總臺為確保飛航安全，提供相當完善的航空氣象服務，其所屬下設臺北航空氣象中心，該中心依據國際民航組織和世界氣象組織之規定，綜理我國有關臺灣國內外航空氣象事務，負責我們臺灣航空氣象預報並對外提供航空氣象服務。臺北松山、桃園、高雄、臺東豐年、蘭嶼、綠島、馬祖南北竿、金門尚義及恆春等機場都設有航空氣象臺，分別負責機場飛航天氣觀測和守視。臺北航空氣象中心航空氣象預報員每天日夜分析地面天氣圖、高空天氣圖、衛星雲圖、雷達回波、氣象數值預報圖，用來預報機場場 24 小時天氣變化，同時發布臺北飛航情報區危險天氣預警和颱風警報，製作國內外航路危險天氣預報圖以及高空風向風速和溫度預報圖，並將這些預報資料發送給臺灣國內外航空作業單位參考。機場航空站根據颱風警報成立風災緊急應變小組，俾機場內裝備設施因颱風損壞時得以儘快排除；航空公司根據其目的地機場未來可能天氣變化情形研判要不要起飛，起飛要加多少油料；飛行員在起飛前，也由航空氣象預報人員給予航路危險天氣講解，並提供航路預報圖，根據這些預報圖，用來選擇最佳飛行高度，同時避開航路上雷雨、晴空亂流、結冰等等危險天氣。航空氣象人員日夜從事機場天氣觀測，隨時測報風向風速、能見度、現在天氣、雲狀雲高、溫度、露點溫度以及氣壓，並加註未來 2 小時天氣變化趨勢。塔臺和航空公司就根據機場天氣測報資料來決定飛機是否可以起飛？

飛航服務總臺所屬航空氣象人員經大學氣象養成教育、職前訓練以及赴國內外任職進修，始能勝任艱深的航空氣象工作。由於民航局非常重視航空氣象對飛航作業的重要性，目前已執行完成航空氣象作業現代化系統第一（1998 年 7 月至 2002 年 6 月）及二期（2006 年 1 月至 2010 年 12 月）之計畫，並自 2011 年至 2014 年執行第三期航空氣象現代化計畫。

於 2001 年 9 月 1 日啟用松山和桃園機場低空風切警報系統（Low-Level Windshear Alert System, LLWAS），系統可將偵測到機場風切資訊提供給塔臺管制人員並轉給飛行員注意低空風切所在位置和高度。於 2002 年 7 月 1 日啟用航空氣象作業現代化系統，整個系統可提供我們臺北飛航情報區航空氣象產品和資訊給氣象臺、諮詢臺、區管中心以及透過網路供航空公司使用，更可提昇航空氣象

服務品質及作業水準，達到加強飛航安全、增進飛航舒適和提升國家競爭力之目標。

航空氣象作業現代化系統在民航局飛航服務總臺臺北航空氣象中心、機場航空氣象臺、機場諮詢臺以及臺北區域管制中心設有航空氣象現代化系統工作站，同時為航空相關特定對象設有民航局航空氣象現代化系統網站（<http://aoaws.caa.gov.tw/>），使用者可在家或旅館透過網站索取所需的氣象資料。如今，民用航空局飛航服務總臺航空氣象作業也隨之由過去傳統作業方式，轉為航空氣象作業現代化方式，除了由航空氣象預報模式電腦自動輸出氣象產品，增加各高度層和各航路上數千種氣象產品和內容豐富之外，同時整合各種氣象資料，包括雷達氣象回波（RADAR）、衛星雲圖、風向風速、飛機積冰高度、濕度、晴空亂流、飛航種類、閃電、航路氣象、機場氣象觀測資料（METARs and SPECIs）、機場天氣預報（TAFs）以及探空資料（Sounding）等等資料。因此，我國民用航空局各機場天氣講解的方式與過去傳統方式大不相同，所提供的氣象產品更具多元化及豐富化，對飛航安全更有助益。

參考文獻

- 1.蒲金標，實用航空氣象電碼，徐氏文教基金會，民國 90 年，pp.184.2.蒲金標，航空氣象學試題與解析，秀威資訊科技股份有限公司，民國 92 年，pp.312.3.蕭華與蒲金標，航空氣象學（修訂版），秀威資訊科技股份有限公司出版，民國 92 年，pp.405.
- 4.Retallack, B.J., Compendium of Lecture Notes for Training Class IV. Meteorological Personnel. Volume II --- Unit IV Aeronautical Meteorology. World Meteorological Organization, 1984, WMO---No.266. p.387-455.
- 5.Tom, Bradbury, Meteorology and Flight --- A pilot's Guide to Weather, third edition, 2000, pp.186.
- 6.U. S. NAAA and FAA, Aviation Weather Services, Revised December 1999, p.14-23.