

## ICAO Doc 9817 簡介(下)

豐年航空氣象臺

### 第四章 低空風切對航空器性能的影響

作用於飛行中航空器的主要作用力有四(圖 4-1)：引擎提供的推力、航空器本身重量的重力、機翼提供的升力以及阻力，當達到力平衡時，航空器呈現穩定且無加速度的飛行。在力平衡的方程式中，升力與阻力取決於機翼的攻擊角度(以下簡稱攻角)與空速，而攻角與空速會受風切影響，導致升力與阻力產生變化，進而影響航空器的力平衡狀態。

當風是漸進式的變化時，地面速度會隨著風的變化而不斷調整，但不影響空速；當風為瞬變的情形下，會短暫破壞力平衡狀態使得航空器產生沿著合力方向的加速度並改變空速，直到達到新的平衡。在調整至新平衡的過程中，航空器亦會改變到新的航路繼續飛行，也就是說航空器總是不斷找尋一條可以達力平衡的路徑飛行，當有風切存在時，路徑將會改變，但又為了讓航空器沿著原預定路徑飛行，此時機師就會介入操控以調整飛行方向。如低空噴流或鋒面伴隨的水平風切所造成的空速變化會使航空器的飛行路徑改變(圖 4-2)。

當航空器水平飛行時，是以俯仰姿態飛行，且有適合於空速的機翼攻角。假設空氣原本呈水平流向機翼前緣，當航空器處於下降或上升氣流中時，空氣則與水平線成一個角度流向機翼前緣，此角度取決於空速和風的垂直分量，因此改變攻角可以讓航空器的俯仰姿態保持不變。

從飛行員的角度來看，遇到風切所造成的一連串事件發生時，從儀表上可以觀察一些特定訊息，如風切的情形、風切開始的高度、航空器的狀況與飛行員的操作行為等。然而當固定某些控制因素(如飛行員不介入操作)，一旦遭遇風切，空速便會隨之改變，進而改變飛行路徑(圖 4-7)。在頂風減少或尾風增加的情況時，空速會減少，飛行員會以俯衝的方式來補足航空器失去的空速，若於著陸或起飛階段遇到這樣的情形則容易撞到地面或障礙物而造成飛安事故。

一般飛行員是以俯仰姿態與推力來控制航空器的速度和高度，進而改變爬升與下降速度，使航空器保持穩定。不過透過俯仰姿態的變化來改變航空器的速度與高度也會影響飛行路徑，但這些變化只是暫時的。而利用航空器引擎改變推力有其極限，當達上限時即為失速，此時航空器的升力不增反減，容易有事故發生。故藉由一些飛行技術來調整航空器的推力和俯仰姿態，這樣可以控制飛行路徑，但有時遭遇風切時，因不知風切的影響會持續多久，因此當超過某極限後，飛行員會選擇重飛以保飛安。

側風風切會影響航空器的側滑角，導致偏航及滾轉，但這對空速和高度不會有影響，而會造成飛行路線橫向偏離(圖 4-9)，此時可藉由飛行員的操控，讓飛行路線偏離的情形降低。當然如果遭遇到嚴重的側風風切影響時，仍需重飛。然而實際上側風風切也會伴隨著逆風/順風風切的變化，這些都會增加飛行員在操控時的困難度。

圖 4-10(a)為航空器於航路上遇到下衝流的情形，通常是先遇到逆風的增加，導致空速增加，進而使其飛在原有下滑面之上方，儘管飛行員可以藉由減少推力使航空器維持在原本的飛行路線，但

當逆風現象是由下衝流引起的，並不能藉由單純的減少推力來控制，而應該重飛。到達下衝流中心時，此時逆風分量消失，僅剩垂直向的風，此時攻角也減小，造成航空器開始迅速下降，其飛行路徑在滑行道之下方。為了克服這個狀況，必須透過增加推力和改變俯仰姿態使航空器爬升。圖 4-10(b)和(c)為下衝流在飛行路徑的兩側，亦會造成嚴重影響，但它不會像航空器直接通過下衝流那樣嚴重，乃因在此情況下，風的垂直分量會減少，且有更多側風分量與其抗衡，但如果遇到這個狀況，一般還是建議重飛，因為往往這些狀況下會使航空器速度增加或減速，或改變角度、空速等，而這都在短短 30 秒內發生，對飛行員仍是極大挑戰與危險。假設下衝流在跑道前方時，雖然水平流出的風相對於航空器為逆風，空速會比平常快，但起飛後仍然需要經過下沉氣流中心及其之後，風轉為順風，此時飛行員就要視跑道長度是否足夠來決定停止加速或是繼續起飛。而發生在跑道後方的下爆氣流亦有類似的情況，因為這種突來的順風，跑道長度往往不足以讓航空器有機會加速至起飛。圖 4-12 為飛行員未介入操控時的飛行路徑。

飛行員為了降低航空器在遭遇風切時所造成的影響，辨認風切與反應時間是平常訓練的重點，圖 4-13 以流程圖的形式表現出當遇到風切時飛行員應有的應變過程。大多航空器有裝載風切預警設備，飛行員可透過儀表板知道是否遭遇到風切，亦可藉由其他的航空器報告知道哪裡有風切存在，這些都可以讓飛行員事先預知風切的變化。

飛行員可藉由觀察以下的天氣現象來辨識風切(於第三章有詳細描述)：

- a) 地面強烈的陣風，特別在山的附近或跑道附近有較大建築物的機場，較容易產生局部的風切和亂流。
- b) 莢狀雲，表示大氣中存在駐波氣流，通常見於在山的背風面。
- c) 雨幡，即有降水，但雨滴未降至地表，可能是雨滴降落時在達到地表前蒸發，但大氣中依然存在下降氣流。(易發生於對流雲下方)
- d) 在雷雨底部捲起的雲層與雨帶前方產生的陣風鋒面。
- e) 風揚起的沙塵，特別在對流雲下方，因存在有下衝流。
- f) 風向多變的風場。
- g) 煙的飄向，可以表示高低層風向的不同。
- h) 雷暴，其具有強烈風切的存在。

當遭遇到風切，飛行員觀察儀器最重要的參考指標是空速、下滑路徑、垂直速度與推力的變化。通常推力有顯著變化時表示有風切存在，因此監測推力就顯得重要；從垂直速度和下滑面監測系統中，當遇到風切時可能會觀察到飛行路徑的異常或偏離；航空器裝載的氣象雷達則可以偵測對流胞以利閃避。飛行員可利用這些訊號提前知道風切存在，進一步採取必要措施。

有關起飛防護措施的相關設定如下：

- a) 推力設定--起飛時應使用最大額定起飛推力，如此可縮短起飛滾行距離並減少衝出跑道的風險。
- b) 跑道選擇--須考量航空器離地後受地面障礙物之影響程度及側風和尾風限制，以確保能有最長跑道以加速至仰轉速率，並在跑道末端和爬升剖面中可得到更多離地間隔。而當決定放棄起飛時，須有足夠的跑道距離讓航空器停下來。

- c) 起飛襟翼的選擇--與機型有關。相關研究顯示，較大的襟翼設定，在跑道上遭遇風切時可提供最好的性能表現。若是在空中遭遇風切，較小的襟翼設定反而較佳。
- d) 增加的空速--在增加的空速下仰轉可提升航空器與在離地後遭遇之風切相抗衡的能力，同時可改善飛行路徑，降低暴露在近乎失速警告器速率飛行的風險，也可減少飛行員的工作量。
- e) 飛行指導儀--除非配備有風切回復導引裝置，否則不得使用速率基準飛行指導儀，因為有可能會在無視於飛行路徑劣化的情形下要求進行改變俯仰姿態以遵循目標空速值，若需進行回復作業，則不應參考之；如時間允許，應由監控飛行員 (pilot not flying, PNF) 將其關閉。

有關進場防護措施的相關設定如下：

- a) 穩定性進場--航空器應於不低於 1000 呎之高度達成穩定性進場，以提升風切辨識能力。
- b) 推力管理--使推力之降低最小化。當空速增加時，與其立即降低推力來抵銷，不如暫時靜觀其變以評估空速的趨勢才是謹慎的做法。
- c) 跑道選擇--使用最合適的跑道，除了須避開風切疑似存在的區域，跑道的風亦須與航空器之側風與尾風限制相容。當預料之外的風造成著陸時產生高地速使得地面滾行距離增加時，較長的跑道能提供足夠的長度來因應。具精確(儀器)進場和其他幫助下滑道監控的設備之跑道則可提供即時、準確的飛行路徑偏移資訊，可加強風切之辨識。
- d) 落地襟翼設定--與機型有關。相關研究顯示，表 4-4 建議的

襟翼設定在廣泛的風切狀況下提供最好的整體回復表現。

- e) 增加的空速--進場時使用增加的空速，在無法避免地遭遇風切而進行回復時，可改善爬升表現能力，並減少在遭遇風切而進行回復時以失速警告速率飛行的潛在機會。
- f) 飛行指導儀、自動駕駛儀和自動油門--進場期間若將這三套系統運用搭配得天衣無縫是最完美的事。這些系統雖可分擔飛行員工作量，讓機組員有更多時間監控儀表和天氣狀況，但若缺乏妥善監控，則會因飛行員不清楚已完成之控制輸入反而會遮蔽風切襲擊的跡象。

為致力於協助機組員及早辨識出遭遇風切的跡象，遂制定一系列的建議，納入名為標準作業技術的文件中，可區分為組員警覺與組員協調兩大主軸。

組員警覺的部分，須留意的是正常垂直飛行路徑的指標(起飛階段時的高度、爬升率和空速建立，進場階段時的空速、姿態、下降率和油門位置)、空速的波動、低於 1000 呎以下的爬升俯仰姿態及仰轉率、進場階段須在不低於 1000 呎的高度前達到穩定性進場等現象，一旦超過表 4-6 的目標狀態參考值則須立即準備執行回復程序，但仍須以實際狀況來評估並判斷應採取的措施。

組員協調方面，操縱飛行員(PF)應專注於駕駛航空器，當遭遇風切時，必須應呼叫程序採取適當措施；監控飛行員(PNF)應注意空速、垂直速率、高度、俯仰姿態、下滑道偏離量和推力，如果有偵測到任何顯著偏離正常的訊息，應立即呼叫出此偏離狀況。駕艙中的呼叫程序應標準化並且易懂，以確保能及時理解。表 4-7 為起降標準作業技術文件的總結。

回復技術的首要目標是讓航空器盡可能保持飛行最久的時間，以期能遠離風切。經過研究過各種技術，以調整俯仰角至起始目標姿態(initial target attitude)並搭配必需的推力大小，可達到最佳效果。

## 第五章 低空風切的觀測、預報及報告

針對風切的地面觀測方式如下：

- a) 直接目視的方式可藉由第四章已摘錄的現象來做為警告飛行員可能風切的線索。
- b) 以標準氣象儀器觀測的方式，可透過：
  1. 多個風速計的水平觀測(如 LLWAS)、垂直觀測(架設於不同高度處的風速計)資料加以演算並產生風切警告；
  2. 無線電探空儀及測風氣球以偵測風隨高度的變化，前者同時可偵測低層逆溫，暗示著可能有風切存在，後者在研判垂直風切很有用，但與對流雲相關的風切反而沒有顯著的幫助，不過探空資料對預報適合風切發展的氣象條件卻非常有用；
  3. 氣象雷達偵測對流系統的型態及強度(如陣風鋒面前緣明顯的弧線回波)，並可以 PPI 及 RHI 來分析對流的水平分布及垂直結構；
  4. 氣象衛星看到的雲形(如積雨雲雲簇的陣風鋒面最前緣的索狀雲(圖 5-1))，並可搭配不同頻道的雲圖來解析雲種。

用以偵測低空風切的儀器包含：

- a) LLWAS 系統，此為設置在機場周邊的 5 套風感應器所組成，另有一套設置在場中央以及微處理器，負責持續監控以及比

較周邊的 5 套設備與中心的風向量差，當他們之間的風向量差大於 15kt，將會啟動警報器發出警告，而當 4 公里內的頂風分量減少 30kt 以上則視為微爆氣流，其缺點是僅能偵測地面的水平風切。

- b) 聲波雷達(SODAR)利用約 1500Hz 的聲波來偵測低層大氣的逆溫現象，但在吵雜的環境會受干擾(如機場)，且資料處理時間要將近 10-20 分鐘才能到使用者手中，對劇烈天氣引起的風切而言較無效益，然而其波束指向某一角度的特性可提供機場爬升及進場階段的三維風向量的連續觀測，特別適合針對觀測單一平面、持續性的風切現象，例如強烈的逆溫所引發的低層噴流。
- c) 都卜勒雷達可偵測及追蹤雲中的水滴粒子/雹/雪，進而分析及模擬雷暴的三維結構，增進我們對於陣風鋒面、微爆氣流以及龍捲風等對飛行具有顯著影響之現象的認知。
- d) 剖風儀可監測低層噴流和地形性亂流所引發的持續性的風切，但不適於偵測沿著起降路徑上對流性的風切。
- e) 都卜勒光達(LIDAR)可偵測地形、海風、陣風鋒面所引發的風切。附錄 4 介紹香港天文台利用內建 2 微米的 LIDAR 偵測徑向風，發展風切告警系統(LIWAS)以自動化偵測香港國際機場的風切，此系統於 2005 開始運作，LIDAR 被安裝在可以朝著離到場航機滑降路徑方向掃描的位置(圖 5-6)，從這個地方掃描而得的風就是離到場航機將會遭遇到的頂風，如有偵測到顯著的風切變量即自動產生警報，如果同時有好幾組風切事件，當經過風切強度因子的判斷後只會發出最顯著的事件。



在空中觀測風切的工具包含：

a) 傳統駕駛艙的儀器，包含空速指示器、垂直風速指示器及高度計，另若航空器的裝備包含高度指示器、水平狀態指示器、接近地面警告系統、失速警告系統及慣性導航系統的地速及風速風向顯示值等，整合這些儀器的資料以指出風切的存在。

b) 機載風切警告設備，分為兩類：

1. 以監測航空器表現為基礎的風切警告系統。此為「反應型」風切偵測/閃避設備，因為它們只能在航空器真正進入風切時才能警告機師有風切存在，早期使用的是傳統感測器，包含畢托管(偵測空速)、垂直陀螺儀(俯仰姿態)及失速警告氣流感應器(攻角)，結合警告系統本身的特殊水平與垂直加速器的資料經電腦隨時運算以得到水平及垂直風切分量，並考量機師所做出的補償反應，提供音效警示以顯示出達到閾值的風切所造成的能量增減效應。而自1986年起可用的商業用系統可提供風切偵測及警告能力，並可提供指引給機師參考，電腦進行連續不斷的比對所有相關資料，一旦有顯著偏差量發生時便可及時警告空勤人員可能有風切。

2. 機載前視風切警告設備。利用遙測方式來偵測並算出風切，使用工具包含被動式紅外線、都卜勒雷達、毫米波雷達及光達等，其中被動式紅外線技術乃基於偵測發生於微爆氣流相對周遭大氣較冷的溫度差異並將其與下衝流的垂直速度強度作連結，亦可用於偵測CAT及火山灰，但要

排除介於目標與感應器之間因亂流及降水所產生的訊號雜訊，對被動式紅外線技術而言是個難題，但並非無法克服，只是要在一個已經非常擁擠的飛行甲板上安裝全新的裝備有一定的難度。最新一代氣象雷達已用都卜勒訊號處理技術來偵測風暴中的亂流區，同時具有合適的天線，於運作中同步發射可調整的 X-band，再藉由某些模組的調整及外加的微爆氣流偵測/警告方法的設計，便可用於偵測風切，但除了假警報問題之外，還有發射主瓣與側瓣因地面物造成的雜訊等問題，尤其對下視雷達於進場及降落階段更是嚴重。在毫米波雷達的應用上，大多數的研究將努力放在發展用於能見度近乎於零的儀降系統，讓機師甚至在霧或雨中降落時能在抬頭顯示器看見跑道，若能成功，則可預期前視風切警告模式能加在此系統中，但目前仍提不出可經認證的系統。都卜勒光達的運作與都卜勒雷達的原理完全相同，只是它應用的是由二氧化碳紅外線雷射產生的同步紅外光，其雷射光束聚焦於航空器之前的 500-600 公尺處並測量此點相對於移動發射器的空氣運動，故能提前於四秒之前提醒機師航空器前方可能有因風切導致空速的變化，但尚無法量測其沿著飛行路徑的風之垂直及側風分量(如下衝流)，據說此系統堅固耐用、可靠且輕量，不大需要維護、調整及校正，且可於晴空或雲中量測航空器前方 800 公尺之空速，但目前仍無法提出可經認證的系統作為前視風切警告系統。

為了能夠即時以動能及位能的方式完整的表現出風切對航空器的影響，Bowles 利用現有的機載感測器及電腦資料導出一能量公式

$$E_T = V_a \frac{(T-D)}{W} - \frac{U_x}{g} + \frac{w}{V_a} = V_a \frac{(T-D)}{W} - F$$

，發展出一個無因次指數

$F = \frac{U_x}{g} - \frac{w}{V_a}$ ，將風切對航空器的威脅定量化，其中  $U_x$  為風的水平分量變化率或指風切項，而  $w$  為風的垂直分量， $V_a$  為空速， $g$  為重力加速度， $T$  是推力， $D$  是阻力。當  $F$  為正值(尾風增強/頂風減弱/空氣下降運動)會使航空器能量狀態減少，機師可由增加推力或上仰以維持或增加高度，藉此將空速換取高度或由動能轉為位能。經由 NASA 及 FAA 的測試之後，此指數已被採納做為機載風切警告系統的驗證基礎。此公式描述的是航空器遭遇風切的瞬間效應，如要完全代表風切的危害，則必須對適當尺度的長度進行積分。FAA 採用 1 公里長度尺度且以  $F$  值為 0.13 以上做為警告閾值。為了驗證機載警告設備，FAA 將大於 0.1 的  $F$  值視為可能遭受風切危害，並以 0.13 為警告標準。舉例來說風切所造成的現象之典型  $F$  值，低層噴流不太可能產生高於 0.1 的閾值；雖然機師仍會遭遇困難無庸置疑，但在預先得到警告的狀況下，機師通常能夠藉由增加推力以應付此困境。微爆氣流的  $F$  值在已知的個案中約有一半超過 0.1 的閾值，而在強烈微爆氣流的中心則有 0.25-0.36 的值，對多數噴射運輸航空器而言被視為不適合飛行。

在受風切影響但缺乏偵測及測量風切設備的機場，要預報風切是極度困難的，唯一可行的方式乃試圖從已知天氣現象來預報顯著風切會不會發生，若發生，其強度亦無法預測。隨著都卜勒雷達用於分析雷暴的結構與動力及其伴隨的風切研究與日俱增，以及安裝於多數大型噴射運輸航空器的 AIDS 在起降階段遭遇風切所反演的全球性資料不斷累積，配合已知的氣象定理，許多機場發展出各自

的風切預報經驗法則。針對特定地區的氣象預報須針對某現象的型態、時間及強度進行預報，即預期某現象會發生，其發生時間、持續多久以及其強度將會是多大。

在風切預報中，強度的預報至關重要，然而如表 5-4 所列，同樣強度的風切對不同機型有不同的影響：對某些機型而言認為嚴重，而對另一種機型則覺得只有中度，穿越風切時的速度、遭遇風切的操作距離及經歷風切的時間對航空器的影響程度也不同，而且對沿 3 度角飛行的機師而言，以多少距離的多少速度為風切單位的資訊並沒有直接幫助，最直接的感受是空速的變化程度，加上表 5-4 所分類為嚴重的風切程度，對降落航空器的機師而言實際上的感受卻只有一點點或沒有問題。

Annex 3 規定風切的報告、預報和警報無須量化強度以示尊重，在其附錄 6 的 6.2.4 節註 2 規定當機師報告有風切時，得大多基於他們的主觀認定使用修飾用語「中度」、「強度」、或「嚴重」描述他們遭遇的風切強度，且此用語在報告中必須保持不變。

為了避免一般風切強度分類的問題，有個方法是發展出以風切模式模擬強度為「嚴重」情形之機型反應為基礎的機載風切偵測系統之程序(美國在 1983 年 7 月發行的諮詢公告(Advisory Circular (AC)) 120-41)，定義嚴重的風切為：一旦遭遇如此強度的風切，將超出特定機型之操作能力，倘若機師無法從符合第四段 b) 的標準之機載風切警告及飛行導引系統獲取可用資訊，將導致失控或觸地。諮詢公告的第四段 b) 內容規範能辨識嚴重風切現象存在並可即時提供機師以下的警告及飛行導引機載風切警告及飛行導引系統：1) 進場/誤失進場時允許航空器在沒有失控、失速及尚未觸地時得以最大

表現效能飛行；2)起飛及爬升時允許航空器於最初或後續爬升區段在仍有多餘能量時尚未失控或觸地得以最大表現效能飛行。在當時，此諮詢公告適用於「反應型」機載風切警告系統。隨著機載前視風切警告系統發展的出現，FAA於1990年發表 Technical Standing Order (TSO)C117--運輸航空的機載風切警告及逃生引導系統之文件，將風切程度為「嚴重」的定義微調成：若無法從符合此文件規定的標準得到可用資訊，將導致失控或觸地。

從預報時間長度的觀點，可將低層風切分為短暫性或非短暫性(表 5-5)。

非短暫性風切，可能與顯著低層逆溫、山岳波或障礙物附近的氣流有關，傾向影響特定地區並持續相對較長的時間；短暫性風切可能與對流雲特別是雷暴有關，通常不長命，尺度小、移動快且劇烈，以致於極難預報。後者卻是目前對飛安危害影響程度最大者。

在非短暫性風切的天氣現象中：

- a) 須先了解氣團鋒面最重要的特徵：強度、移速和斜率，尤其斜率是預報低層風切非常重要的因子。
- b) 海風鋒面則須仰賴預報員的當地知識與經驗。
- c) 機場鄰近地區的地形或建築物引發的風切本質、盛行率及平均強度為已知情形，使其發展之充分且必要的特殊天氣條件一旦決定，則可建立對每一機場特定的經驗法則以協助預報員。
- d) 山岳波一般只考慮坐落於與盛行風場呈垂直且為高又長的山脈背風側的機場，其生成高度一般高於 1600 呎，以駐波鏈的形式出現，從山脊或特定山峰越往下游振幅越小，當強

度夠強，且背風側近地表有顯著的低層逆溫存在，或可阻擋強風到達地面，但會在逆溫層頂形成一風切帶駐波的一部分，同時有最大的振幅可增強焚風效應，甚至有時會在第一個或接下來的幾個波峰處產生滾軸雲，向下擴展到地面的滾軸氣流會反轉平時的地面風(圖 5-13)。

- e) 坐落於山谷中的機場須留意下坡風伴隨的風切，其適合發展的氣象條件之一是在反氣旋籠罩時之晴朗無風的夜晚，輻射冷卻造成強地表逆溫，阻止下坡風抵達地面，因此導致其沿著逆溫層頂滑動，此時谷底近地面幾乎為靜風狀態，而逆溫層頂則產生風切帶，隨著日出而升高同時增強，其肇始及強度一般可依據各地的特性經驗做出合理且準確的預報。
- f) 低層噴流軸通常出現在低於 1600 呎的高度，該軸的高度會逐漸往下游抬升，其成因主要是地表夜間的急速冷卻作用，故於日落後開始形成，於破曉時分達到最強，以都卜勒 SODAR 逐時監測機場上方低層逆溫的發展及量測低層風場是最合適的方式。

關於短暫性風切的預報方面：

- a) 預報對流雲伴隨的風切，尤其是成熟期的雷暴，對飛航而言最關鍵卻也最困難，然而並非所有的雷暴都會產生這樣的風切，而非雷暴之對流雲有時亦會有風切，機師應理解該積雲或積雨雲可能伴隨有風切發生。過去幾十年來對小尺度的強烈雷暴預報之重要性與日俱增，主要是因為其伴隨的強風、地形雨、雹及龍捲風會造成生命的威脅及駭人的損害。技巧發展快速以致於觀測與預報間的區別越來越模糊，因為其大多以某一地點每分鐘更新的大氣狀態為依據，這樣的預報結

果在極限上最多只不過被視為關鍵幾分鐘的警報，這種技巧成為所謂的「即時預報」，世界氣象組織(WMO)定義即時預報為短期預報的子集合所組成，且為目前天氣的描述及 0-2 小時的預報，這也是 Annex3 第六章特別針對航空目的提供的「趨勢預報」之定義。

- b) 預報雷暴產生的最大陣風大多依據雷暴產生陣性下衝流前後之地面溫差來估算，其相差量與圖 5-14 所示之最大陣風成正比。強烈的雷暴及鋒面或飆線雷暴會產生組織良好且快速傳播的陣風鋒面，為強烈的下衝流，且會造成嚴重災損，可由其行經路徑的觀測資料及雷達資料估算，地面最大風速可達陣風鋒面的 1.5 倍，其雷達回波通常可達 40dBZ 以上。針對這些可能產生下衝流、陣風鋒面、微爆氣流及龍捲風等危害天氣的雷暴之預報可由傳統非都卜勒雷達的回波型態來研判，如圖 5-15 所示的鈎狀回波、弓狀回波及逗點回波、圖 5-16 的矛頭回波，另可使用紅外線衛星雲圖研判可能產生下衝流的雷暴之雲頂樣貌(圖 5-17)。

有關風切報告的部分，在傳送過程中會遇到的問題分為時間性與專業性兩大類。

大多數的危害性低空風切都屬於短暫性的劇烈天氣現象，為了有效率，在傳送風切的空中報告及警報或警告給航空器的過程中，僅能有最小程度的延遲，此為時間性的問題。

專業性的問題包括風切本身的複雜度、缺乏足以偵測及量測風切的儀器，以及如何讓機師理解各種風切的強度分級對不同航空器機型所造成的影響程度並採取適當的反應措施。由於缺乏可用於遙

測地面風切的儀器，大部分的機場都是根據航空器報告來得知風切資訊，然而機師在遭遇風切當下有相當大的工作量，因此期待機師能回報所有細節是有些不切實際。

低層風切及亂流研究小組(WISTSG)為了協助機師編寫風切報告而訂定方針，期望機師將盡可能提供相關資訊，並考量駕駛艙裡的工作量及航空器上擁有可量測風切數值的特殊裝備，因此航空器報告應包含：

- a) 盡可能詳細描述該事件，包括使用「風切」一詞，並主觀評估強度，可用「輕度」、「中度」、「強度」和「重度」，或陳述對空速度/對地速度的變化量、可能是過高效應、過低效應等；
- b) 機型；
- c) 遭遇風切時的高度或某段高度區間；
- d) 遭遇階段(爬升或進場)；
- e) 適當描述風切天氣現象和作業相關資訊。

若裝載有符合規定的導航儀器，遭遇風切後應回報相關資訊，如風向風速的變化。

圖 5-18 為提供風切資訊的作業流程圖，可見飛航服務單位(ATS)是串連航空器之間以及氣象單位與航空器間的橋樑。當接到風切報告時，飛航服務單位應該要考慮的是：

- a) 立刻將報告傳送向其他相關的航空器；
- b) 將報告加入自動終端資訊服務(ATIS)廣播；
- c) 將報告轉交給氣象單位。

飛航服務單位應持續傳送風切報告給其他航空器，直到該報告



由氣象單位升級成風切警報，改為傳送該警報給相關的航空器，直到警報取消為止。

氣象單位則應以風切警報、風切告警以及特別天氣報文補充資訊欄附註風切的方式將低層風切資訊提供給飛航服務單位和作業人員。發布風切警報的時機包括：

- a) 當機場的氣象單位評估機場當時的氣象條件和天氣現象、氣候狀況、機場建物和附近的地形條件後，認為風切情況顯著時；
- b) 參考飛航服務單位通知的航空器報告；
- c) 預報有風切發生時；
- d) 可能有微爆氣流產生時。

針對非對流性風切(如低層噴流)的形況時，風切天氣跟預報的相關性較高，且長時間的警報是這類風切的典型，這也是某些風切天氣(如地形造成的風切)的機場氣候特徵，這些資訊應於該機場的飛航指南註明，作為機師基本參考，也有利於其他作業人員的導航指引工作。

發布風切警報後，如果後續的航空器報告沒有風切，或是過了一段時間後仍沒有航空器報告，則風切警報應該取消，各機場應該根據當地情況並考量飛航服務、氣象、其他工作人員，來制定取消的標準作業。

在有裝設自動地面風切遙測或偵測系統的機場，當頂風/尾風達到或超過 15 kt 時應立即告警，至少每分鐘要更新一次，當未達此標準時應立即取消。若沒有此裝備，則該地無須發布風切告警，但每個機場都要根據狀況發布風切警報。

## 第六章 風切相關的訓練

無論是否擁有風切警報系統，要能平安度過強烈風切都須仰賴機師的快速反應跟駕駛技術，因此對機師和氣象員來說，預報或預見低空風切至關重要。而缺乏準確性除了失準之外，當發布風切警報後，亦會因風切的空間或時間尺度小、航空器沒有遇到該情況也認為不準，故遭遇風切的航空器報告就顯得重要，而唯一改善疑問跟誤解的方法，就是提供基礎訓練，在機師訓練時假想遭遇未預期的風切狀況，透過收聽訊息判斷並且快速反應。因此關於風切訓練課程的設計，必須安排在機組人員受訓初期開始，定期重複訓練，並專注在強化辨別、避免、面臨風切現象，訓練對象包含機師和其他機組員、航務員、管制員及其他協助人員，而氣象人員需有針對風切預報的專業訓練，特別要加強風切對航空器作業的影響，空服員也必須了解風切危害。

機組人員訓練目標包含：a)了解風切的動力機制和其對航空器的影響；b)提供以利於了解風切類型的方法；c)在初期能辨別所遭遇的風切；d)能夠執行在風切狀況時可能最極端的飛程序。前兩個目標是屬於地面的課程訓練，而後兩者須透過在模擬機內的飛行才能有效訓練。

一般而言，航管是氣象和機師之間、機師與機師之間通報風切資訊時最重要的溝通橋樑，正因如此，對所有管制員皆提供訓練課程相當重要，特別是針對在機場與近場臺工作的管制員，因為起飛、進場、降落都是遭遇低空風切最重要的階段。關於航管員的風切訓練課程的目標為：a)了解風切以及其可能對航空器之影響；b)辨別可能遭遇的風切情況；c)傳送風切警報的流程並實際練習流程的方

法。有機會也應讓管制員觀看當遭遇風切時機師的模擬機操作流程。

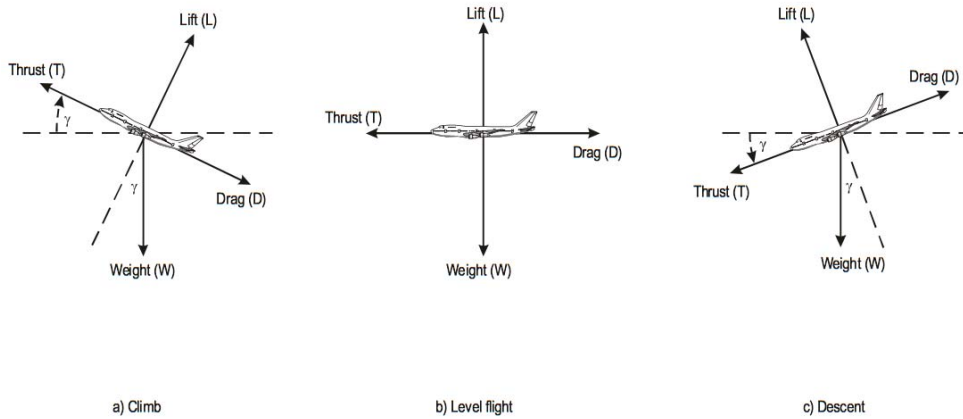
有鑑於 ICAO 和 WMO 分工上的安排，「WMO 為了國際民航的氣象服務人員，負責指定其所需的氣象知識，而 ICAO 負責定義非氣象人員所需的知識，並依指定的形式傳送給 WMO (見 Doc 7475)。」因此有關航空氣象人員的教育訓練指南，參見 WMO-No. 258, 第二章、第四章，還有 WMO/TD No. 1101, 第三章第三節，其中有推薦給航空氣象的氣象員及技術員的課程大綱，分別為：BIP-M1 及 BIP-MT，在氣象員的 BIP-M1 裡氣象知識的部分，包含了針對風切的參考(非對流性及對流性風切皆有)、風切對航機在進場與降落階段的影響，而且只要有關航空氣象，訓練標準應該與機師證照一樣。BIP-M1 氣象員的訓練裡，也包含了延伸的預報訓，預報關於低空風切的特殊天氣(低層噴流、逆溫層、海陸風、氣團鋒面、雷雨、特別是強雷雨等等)，訓練裡也應該有編碼解碼課程，才知道應如何發布風切警報跟告警。WMO-No. 364, Volume II Part 2 亦提供氣象員和氣象相關技術員低空風切訓練的課程概要。

儘管我們可能沒發覺，但風切始終存在，藉由風切的飛安事故讓我們越來越重視這個可能的致命因素，同時也越來越清楚風切的影響，並增進預報技術。訓練對飛安來說無比重要，對所有人員在所有層面的有效風切訓練是很重要的，由於風切天氣變化莫測，訓練時機師應保持警覺，特別是強對流或是風切預報的區域。就目前所有知識和經驗，須將下列關鍵重點牢記於心：

- a) 避開風切區域；
- b) 評估天氣和環境條件；
- c) 遵循標準作業流程；

- d) 處於高機率風切情況時，保持警戒，採取需要的預先行動；
- e) 非預期遇到風切時，採取回復流程，絕不遲疑；
- f) 如果風切不明，延遲起飛，如果風切明確，不要遲疑，啟動誤失進場或是留在空中等到情況改善，或可轉降其他適合之處。

以上內容為 Doc 9817 於 2005 年第一版(2011 年修訂)摘錄的第四章到第六章內容簡介，在此感謝豐年航空氣象臺全體同仁的協助，合力完成此文件的翻譯。希望大家一起為了飛安繼續努力!



Notes.— 1) Assuming steady, unaccelerated flight, and thrust acting along flight path,  
 2) Assuming angle of climb or descent is  $\gamma$ ,  
 3) Resolve forces normal to and parallel to the flight path:

$T = D + W \sin \gamma$  .....(1)

$T = D$  .....(3)

$T + W \sin \gamma = D$  .....(5)

$L = W \cos \gamma$  .....(2)

$L = W$  .....(4)

$L = W \cos \gamma$  .....(6)

圖 4-1：爬升、平飛及下降時作用於航空器上的力。

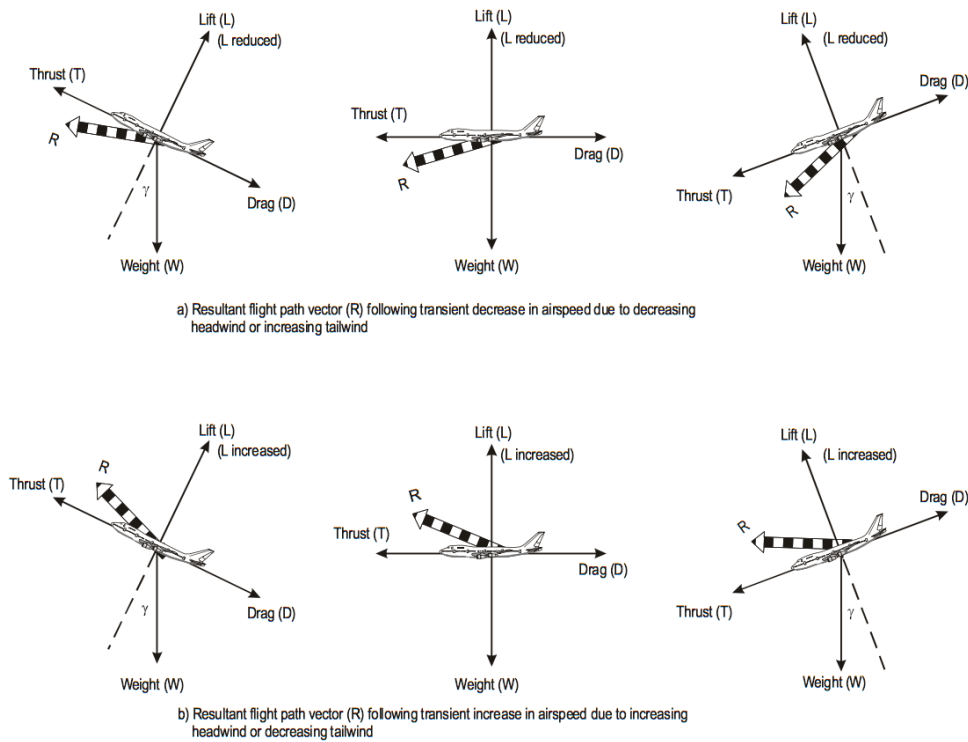


圖 4-2：水平風的風切作用於航空器上產生的合力。

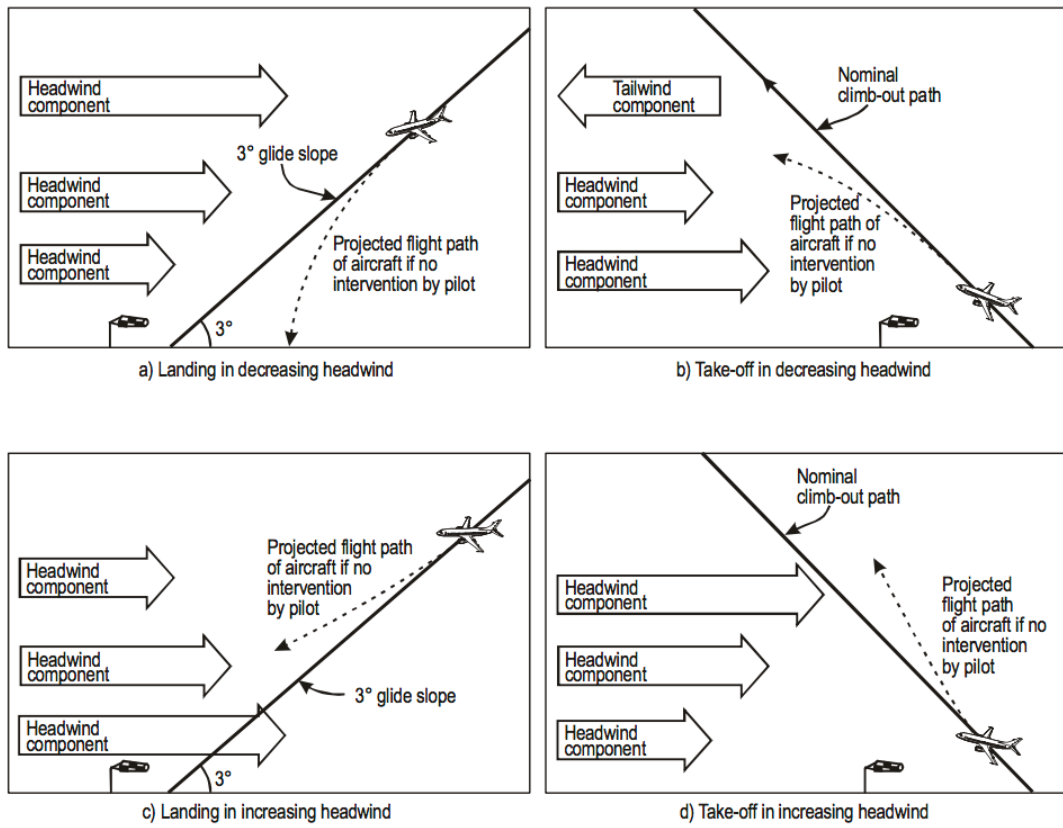


圖 4-7：無飛行員介入操控下，垂直風切對航空器路徑造成的變化。

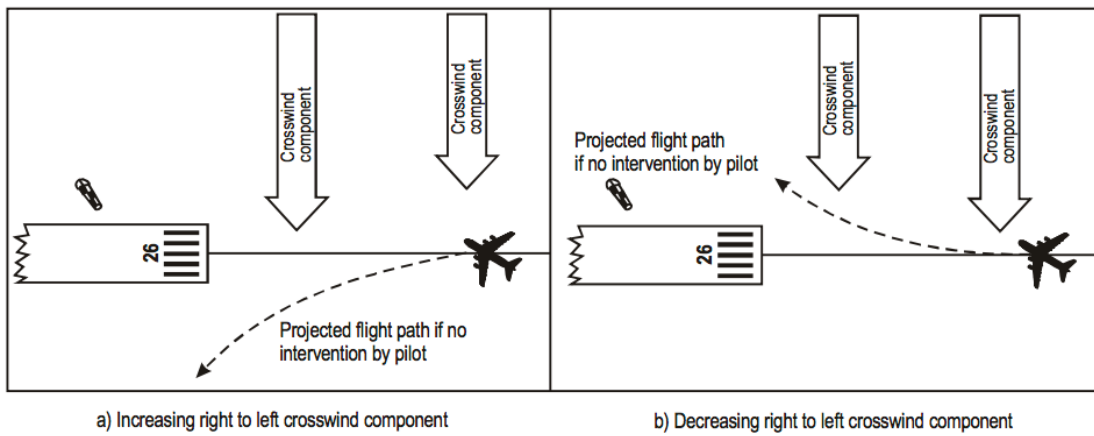


圖 4-9：無飛行員介入操控下，側風風切對航空器路徑造成的變化。

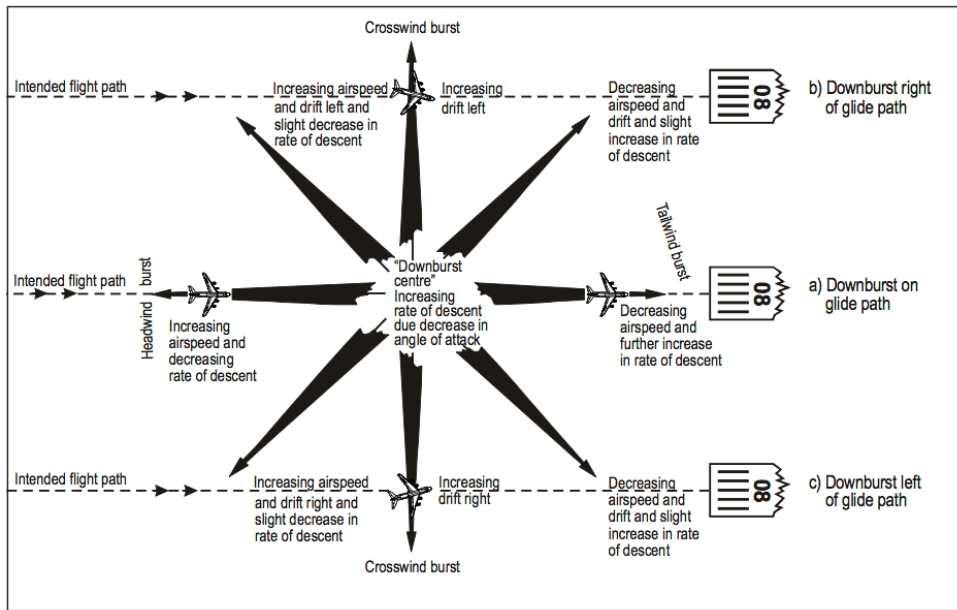


圖 4-10：無飛行員介入操控下，航空器於降落時遭遇下衝流造成下滑路徑之變化。

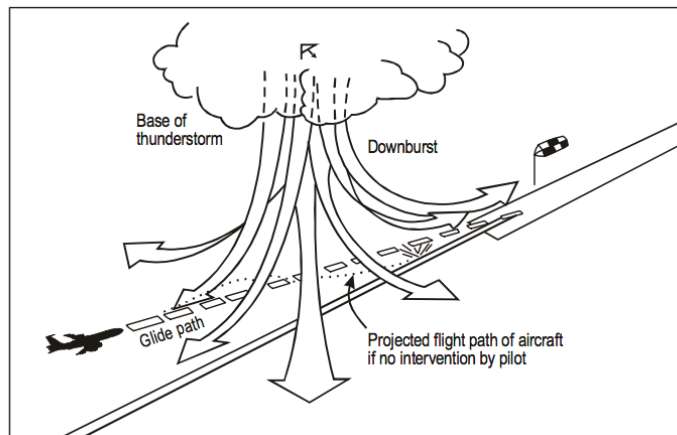


圖 4-11：航空器於降落時遇到下衝流之飛行路徑改變情形。

Aircraft type	Landing flap setting
B727	30
B737	5 to 30
B747	25 to 30
B757	30
B767	30
DC-9-10	*
MD-80	28
DC-10	35
L-1011	33

\* Minimum flap setting for particular model

表 4-4：不同機型在特定模式降落時所需的最小襟翼設定角度值。

**Table 4-6. Target conditions**

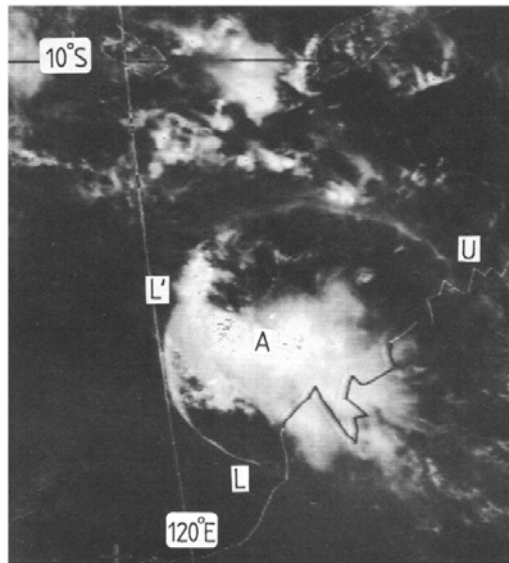
<i>Take-off/approach</i>	<i>Approach</i>
1) $\pm 15$ kt indicated airspeed	1) $\pm 1$ dot glide slope displacement
2) $\pm 500$ FPM vertical speed	2) unusual throttle position for a significant period of time
3) $\pm 5^\circ$ pitch attitude	

表 4-6：起降應達目標狀態之參考值。

**Table 4-7. Standard operating techniques summary**

<i>Take-off</i>	<i>Approach</i>
— Know normal attitudes, climb rates, airspeed buildup	— Know normal attitudes, descent rates, airspeeds, throttle position
— Know/use all-engine initial climb attitude	— Cross-check flight director commands
— Make continuous rotation at normal rate	— Avoid large thrust reductions
— Cross-check flight director commands	— Monitor vertical flight path instruments, call-out deviations (PNF)
— Minimize pitch attitude reductions	— Know recovery decision guidelines
— Monitor vertical flight path instruments, call-out deviations (PNF)	
— Know recovery decision guidelines	

表 4-7：起降標準作業技術總結。



**Figure 5-1. Weather satellite picture of arc cloud**  
(from Kingswell, 1984)

圖 5-1：氣象衛星雲圖，其中 L'L 為索狀雲，L'U 為 Ci(紅外線雲圖搭配可見光雲圖可看出)。

<i>Transitory</i>	<i>Non-transitory</i>
Convective (including gust fronts, downbursts, microbursts and tornadoes)	Air mass frontal surfaces (mainly)
Gravity waves (mainly)	Sea breeze frontal surfaces (mainly)
	Mountain waves
	Obstacles to prevailing wind flow
	Low-level jet streams

表 5-5：為了預報目的的風切分類。



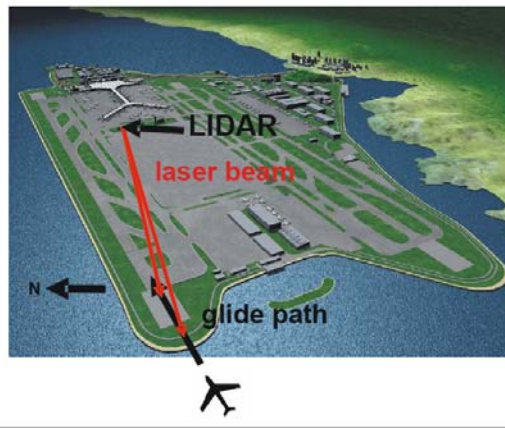


圖 5-6：香港機場的光達位置。

Light	— 0 to 2 m/s (0 to 4 kt) inclusive per 30 m (100 ft)
Moderate	— 2.4 to 4 m/s (5 to 8 kt) inclusive per 30 m (100 ft)
Strong	— 4.5 to 6 m/s (9 to 12 kt) inclusive per 30 m (100 ft)
Severe	— above 6 m/s (12 kt) per 30 m (100 ft)

表 5-4：1967 年蒙特婁第五次空中導航會議建議的風切強度閾值。

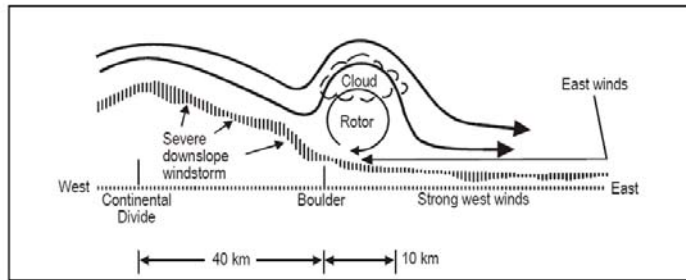


圖 5-13：1982 年 1 月 24 日於美國科羅拉多州波德市的案例，白天強勁的西風繞山後在波德市上方 2-3 公里處形成層積雲，而地面盛行風場為東風。

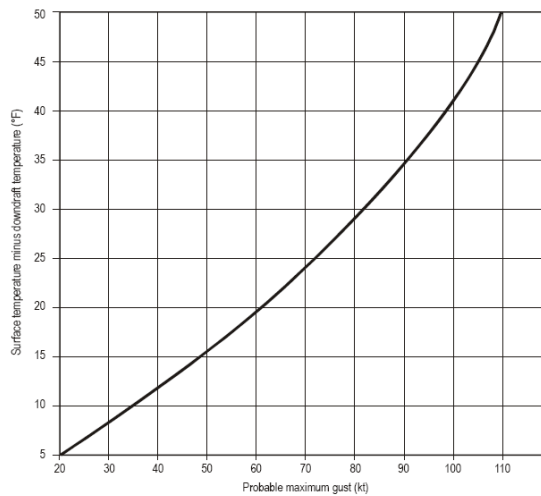


圖 5-14：下衝流達地面的前後溫差與可能的最大風速相關圖。

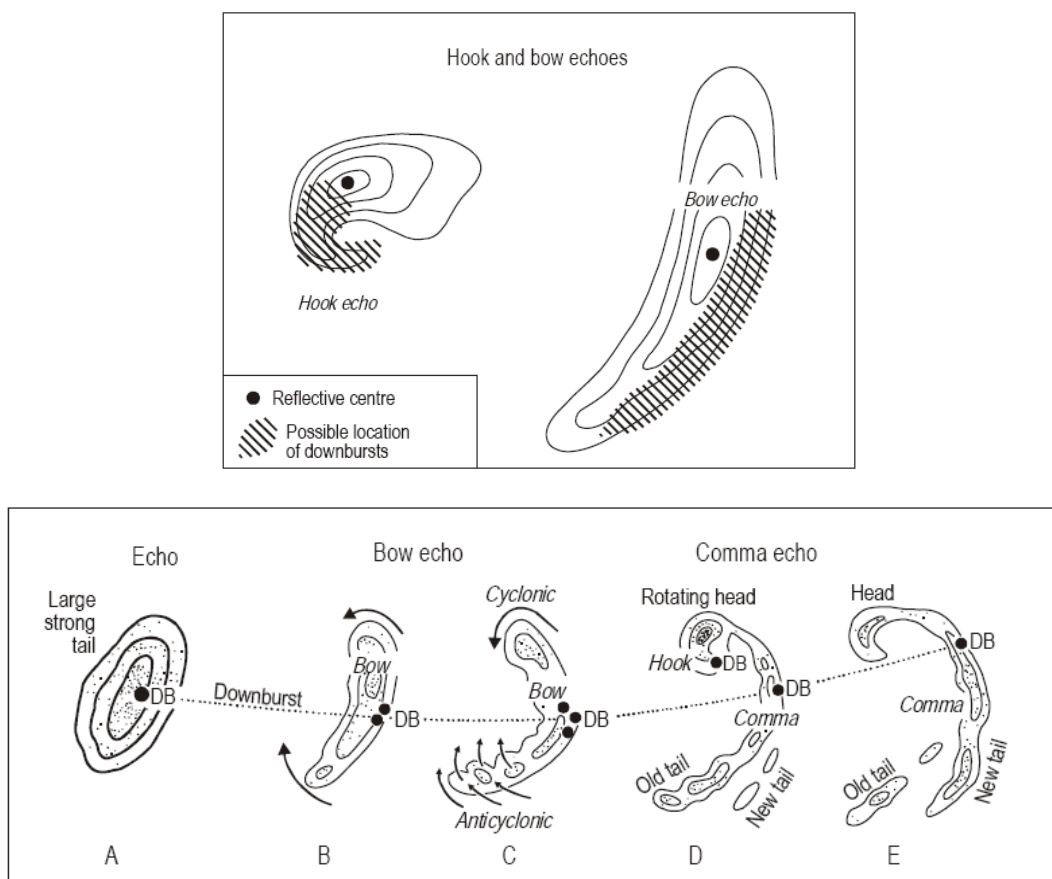


圖 5-15：上為勾狀及弓狀回波，下圖為回波傳遞過程的形態演變，下衝流(DB)常出現在沿著傳遞方向之回波的轉折處。

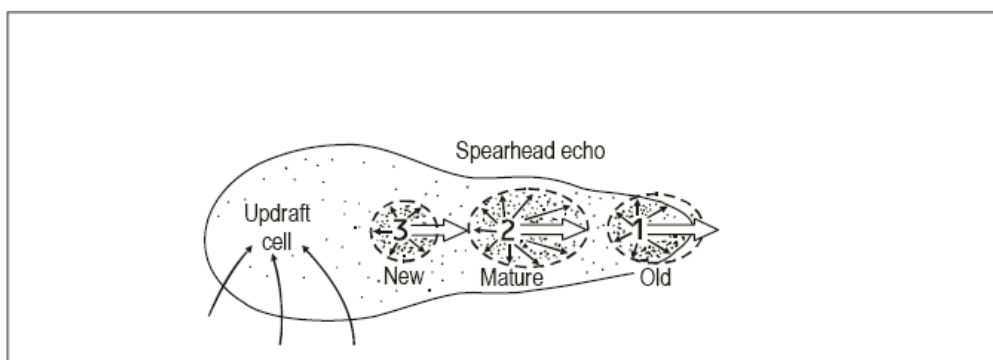


圖 5-16：Fujita-Byers 模型中矛頭回波的平面圖(Fujita,1976)。

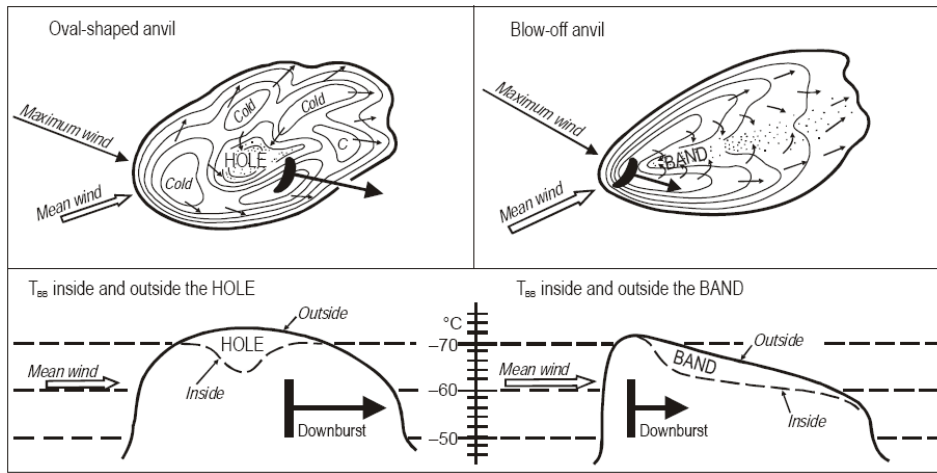


圖 5-17：雲頂溫度(TBB)之平面和剖面分布，平均風表示 0-3 公里或 3-6 公里砧狀層底下的平均，分析根據四個案例的紅外線雲圖(Fujita, 1978 and adapted by ICAO)。

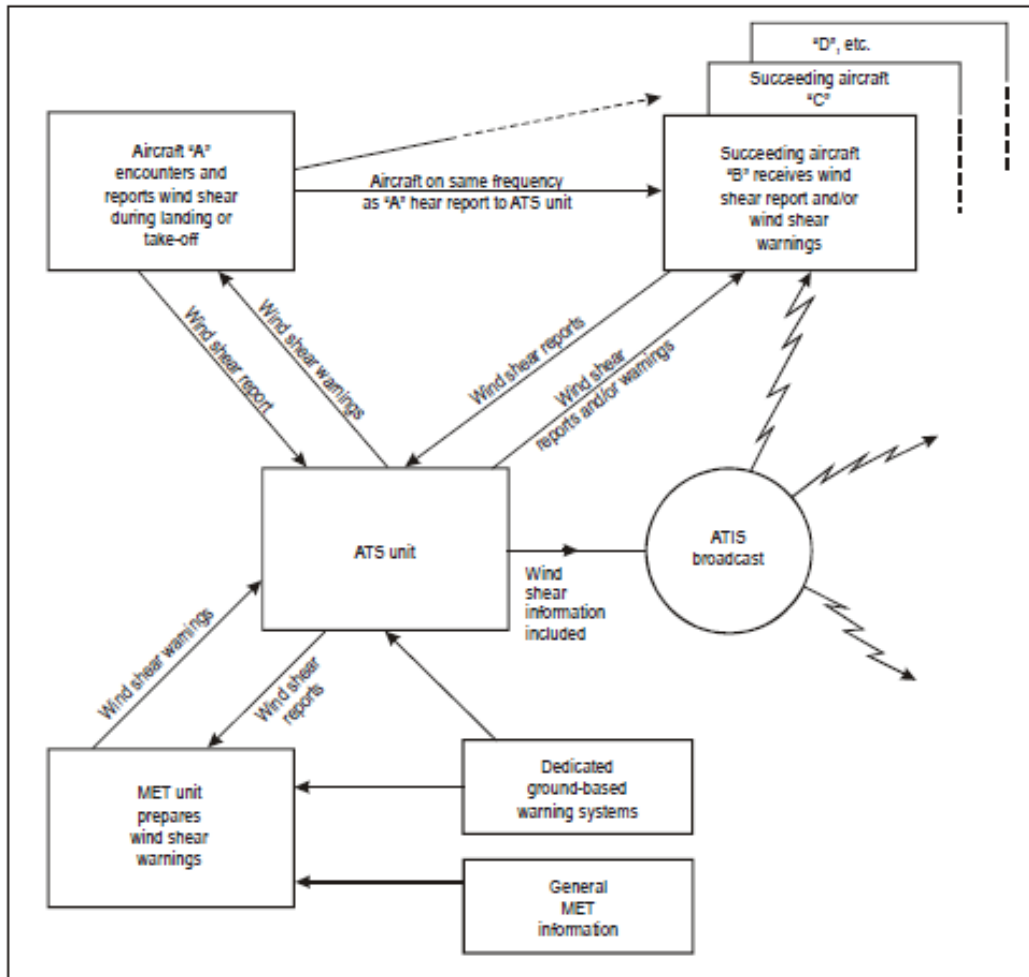


圖 5-18：氣象單位、飛航服務單位與機師之間的風切資訊傳遞流程。