

低空風切變預警系統（LLWAS）的改進

陳介中 袁曉峰

台灣成功大學航空太空學系民航研究所

摘要：大氣中的垂直對流所造成的低空風切變，對航機飛行安全造成很大的威脅，因此在起飛和降落的過程中，當航機穿過大氣裏最低的幾百英尺空間時，是最危險的時刻，正說明瞭機場是發生因氣象所造成的空難最頻繁的地方。低空風切變預警系統（LLWAS）是用來偵測機場跑道風切變的出現，但是多年來出現了無法監測的“盲區”。本文提出改善此系統的方法，增強它的功能。

前言

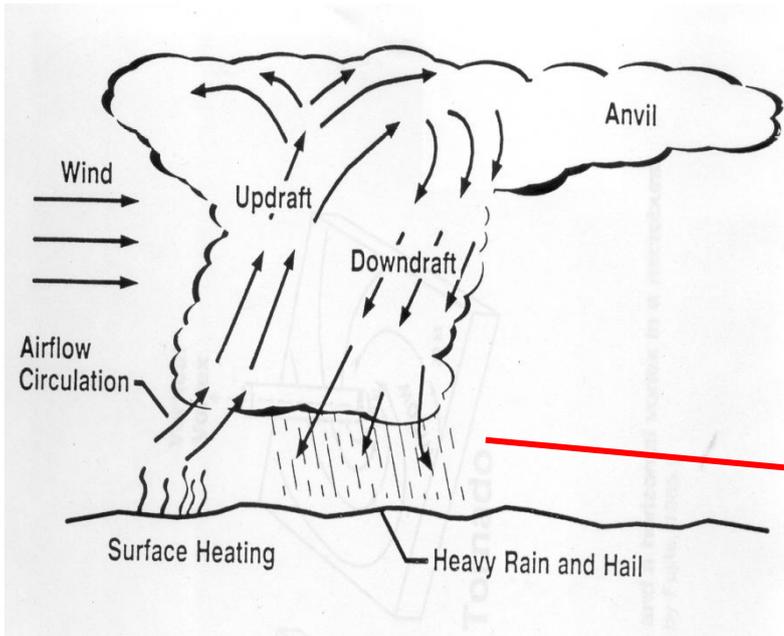
一個多世紀前，在 1903 年 12 月 17 日上午 10:35，美國萊特兄弟自製的雙翼單引擎飛機騰空而起，升空 12 秒鐘，飛行距離 120 英尺，完成了人類的第一次動力飛行。幾個世紀以來，人們幻想飛行的美夢終於成真。在此之前，他們曾詢問國家氣象局有關穩定強風的地區，根據資訊，他們選擇了大西洋岸邊的北卡州 Kitty Hawk 小鎮。從此，這些“人，地，時”，都被載錄了“飛行名人堂”，而飛行也從此和天氣結下了不解之緣。

地球上的大氣層為民用航空提供了運輸人員和貨物的環境，同時也給了我們機會來經驗飛行的喜悅。但是在大氣裏偶爾發生的極端天氣會嚴重的影響到飛行的安全和減少了空中交通的容量，造成民航空運效率的降低。這些天氣的變化事件有時會被很精準的預報出來，但是有時會出乎意料，結果造成了不便和誤點。在最嚴重的情況下，還會造成空難，連帶著的生命和財產的損失。因為天氣對飛行的重要影響，改進航空氣象的預報能力和觀測就成了當務之急。

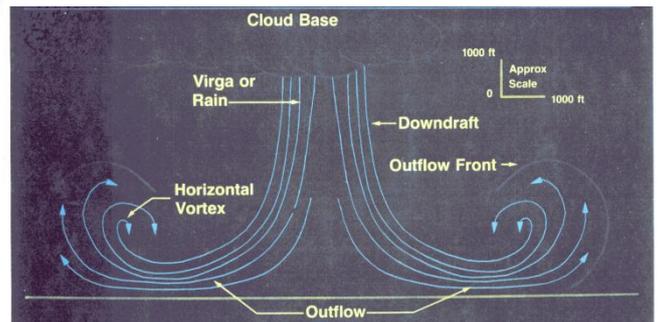
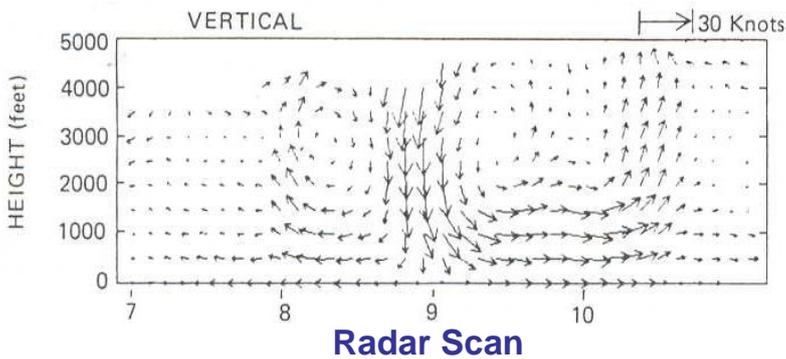
災難性天氣 — 風切變

對於飛行，風場的變化是一個永遠無法逃避的問題。氣象環流或受地形影響的風場會在短時間內和短距離內造成很大的風速變化。相對的，它也造成機翼和其他控制面上流場的變化，可能會使飛機進入危險的姿態。因此當航機在起飛和降落的過程，穿過大氣裏最低的幾百英尺的空間時，小尺度的風場變化和湍流是對飛行安全有很大的危險性。風場不僅是隨著距離在變，它也隨著時間在變，往往“風場變化”是用來形容低空飛行時所面對的危險。從技術的觀點來說，風切變是個局部地區的變化現象，說明風速隨著距離變化的關係，它是以兩點的風速差除以兩點的距離作為測量的指標。如果在 10 英尺之內有很大的水平風速變化，就可能造成航機運作的困難。在低空的 3 度空間流場和相關的風切變和湍流是隨著地區，季節和氣象情況而變，根據過去的經驗，它所造成的危害性程度，發生次數，以及對風切變偵測的難度都可以做一個粗略的估計。

地面和大氣的溫度差別，可能會造成垂直方向的大氣對流。一個地區的上升氣流在高空形成冷氣團會在另一個地區下沉，這種現象在雷暴的惡劣天氣裏最為常見。隨著雷暴的強度，這股下沉氣流可能會發生在雷暴中心 10 英尺外，垂直流速可高達每分鐘 6,000 英尺。這就是所謂的“下擊雷暴(Microburst)”。下擊雷暴所造成的低空風切變在一般情況下的強度都偏高，災難性大，這也是航空氣象人員追尋它的理由。

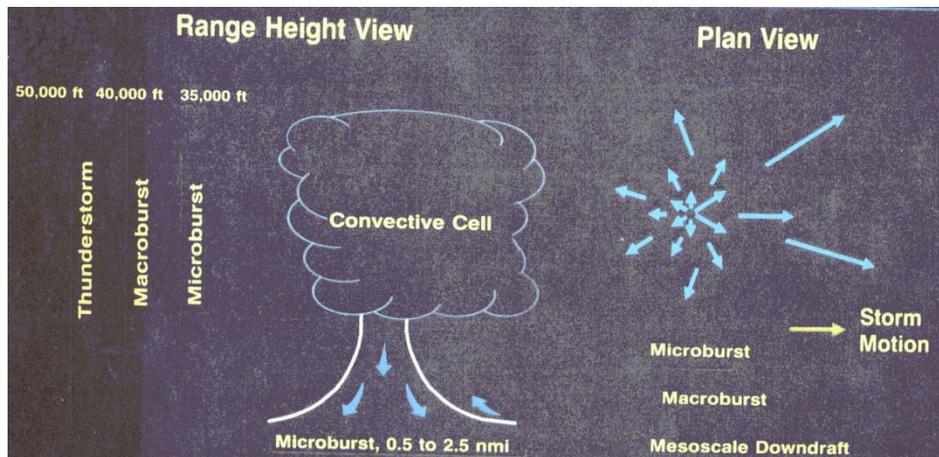


图一：下擊雷暴(Microburst)的形成



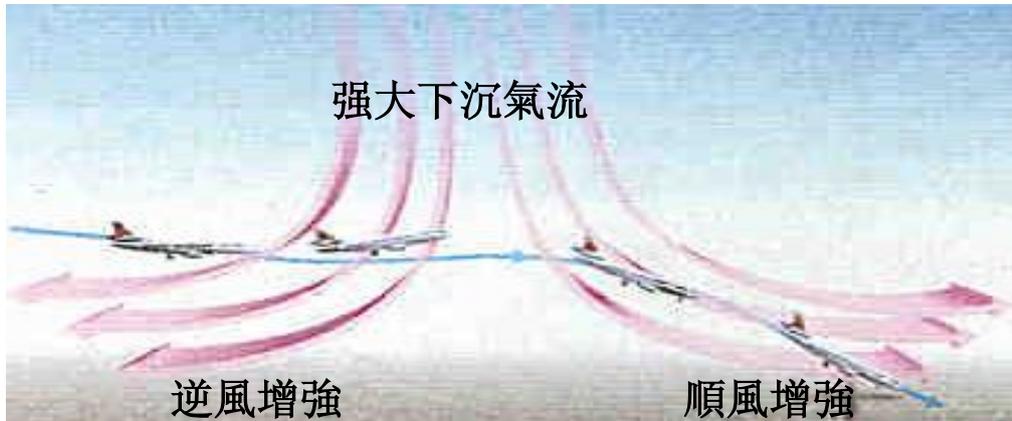
图二：下擊雷暴的雷達反演

當低空飛行的航機從任何方向進入了水平擴散的风場時，在短短的時間和空間裏，首先遇到的是逆風，然後是一股下沉氣流，最後是順風。當航機進入了低空下擊雷暴所造成的風切變影響範圍時，由於強烈的風速和風向變化或是瞬間的逆順風變化，在極短的時間內喪失了所有的浮力。



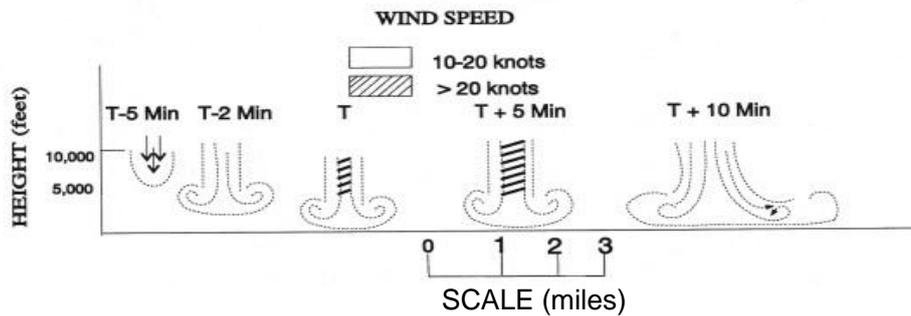
圖三：下擊雷暴觸地後的水平擴散

在雷暴的過程中，一股旋渦式的湍流下沉觸地後造成微型下擊雷暴引發了風切變。當飛機進入了微型下擊雷暴，首先就遭遇到強大的逆風，增加了通過機翼的風速，使飛機上升。在飛進微型下擊雷暴的中心時就會遭遇到強大的下沉氣流，然後立刻就進入強大的順風，使飛機失去了高度和上升力。駕駛員可以增加馬力和爬升來重新控制飛機，但是機翼上風速流場的破壞造成失速和最終的墜落。



圖四：航機進入下擊雷暴觸地的水平擴散墜落過程

“下擊雷暴”在接觸地面後的 5 分鐘內，強度會繼續增加，但是在 10 分鐘到 20 分鐘內就會消失了。它在接近地面後，以水平方向擴散，水平擴散的風場大小是 0.5 到 2.5 海裡的直徑範圍。風速可高達每小時 80 海裡。



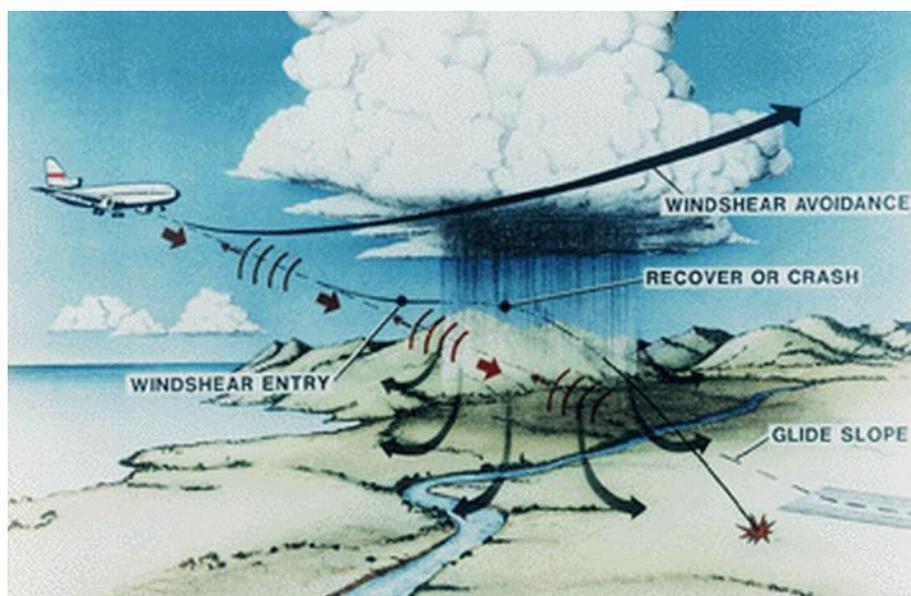
圖五：下擊雷暴的生成及消亡過程

民航飛行員認為最可畏和最恐怖的航空氣象是低空風切變。如果飛行員知道他將遭遇到風切變，同時也明白它的強度，他可以在某種程度裏調整進場的空速，也許可能逃過一場災難。但是，這僅僅是個可能而已。風切變是個非常複雜，也是很難預測的小尺度氣象情況，它所造成的風場變化可能是緩慢的，也可能是快速和突然的。強烈的順風和逆風可以在瞬間變的微弱或是更強。它可能有伴隨著的湍流，也可能夾帶著側風，造成方向的偏差。風切變最重要的參數就是風速在時間裏的變化。有了這參數就能決定駕駛員的能力和飛機的性能是否能夠應付眼前的風切變。如果飛機為了反應對風場的變化，能在瞬間加速度或是減速度，問題就好辦了。但是駕駛員和飛機的反應都會有時間上的延遲，尤其是大型航機的反應要比小型通用航機要慢的多。因此，在遭遇到嚴重的風切變時，結果是否能夠安然無恙，就要看駕駛員的反應動作是否正確了。在啟動修正行動時，既使是一個非常短暫的延誤，都可能造成航機失去了關鍵性的性能而無法從強大的低空風切變裏逃脫災難。某些資訊是可以幫助駕駛員明白風切變的出現和及時的躲避，這包括了來自其他遭遇到風切變駕駛員的報告，低空風切變預警系統的警報和雷暴天氣的出現。在降落和起飛的過程中，駕駛員要特別注意空速的變化，垂直速度和飛機的姿態。任何過度的變化都可能是因為風切變所造成的，應該即刻啟動矯正行動。

低空風切變被認為是對飛行安全最危險的氣象條件，主要是因為它發生在航機運行時原本就是最緊張和最危險的時

段，就是當航機的兩個最大的安全因素：高度和速度，都是最低的時候，也就是起飛和降落。在這短暫但是緊要的時刻，航機要經歷逆風，下沉氣流和順風的風場。另一個重要的事實是，目前還沒有一個成熟的科學依據，可促成對下擊雷暴和引發的低空風切變做精確的預報。總結風切變的特性和對飛行所造成的困難，最佳的避難方法就是躲避，美國聯邦航空總署（FAA）給民航業者的建言和忠告也是“避開！避開！避開！（Avoid! Avoid! Avoid!）”。

因此，風切變的預報和預警成為必要的手段。



圖六：風切變時的避難和複飛

空難與機場

因大氣中的垂直對流所造成的低空風切變，還是因地形而造成的小尺度低空風場變化，對航機飛行安全都是產生最大威脅的時刻，就是當航機穿過大氣裏最低的幾百英尺的空間時，也就是起飛和降落的過程。這也正說明了機場是發生因氣象所造成的空難發生最頻繁的地方。

其實，天氣的變化有時會帶來悲劇性的災難。1985年，在美國德克薩斯州 Dallas/Ft. Worth 機場，一架 DELTA 191 航班在遇到強大風切變後，在跑道前方 6,000 英尺墜地，乘客及機組人員共 134 人，全體遇難。美國交通安全委員會的調查結論是：“空難的造成是機組人員的錯誤，雖然他們在事先看到了足夠的跡象，但是沒有正確地判定暴風雨的嚴重性”。Dallas/Ft. Worth 機場是美國南方最大的機場，設備完善新穎，安全記錄良好。根據交通安全委員會的報告，在 191 航班空難發生時的天氣和機場狀況是：

1. 機場地區當天的天氣惡劣，但氣象單位並未發出警報。塔臺也沒有接到其他航班機組有關雷暴雨的報告。
2. 在 191 航班落地之前的兩個航班，都安全著陸，沒有通報遭遇惡劣天氣。
3. 空難前 40 分鐘，地區的氣象雷達沒有監測到任何回波，但在空難前一分鐘接到 4 級暴風雨的回波。
4. “低空風切變警報系統”（LLWAS）沒有發出任何警報，但是在空難發生後發出了有低空風切變發生的警報。航機上的雷達缺少描述雷暴的功能。
5. 航管在空難前十分鐘，通知所有航機，機場地區有毛毛雨。

空難的發生帶出來很多的問題，但是最讓人深思和無法接受的是：為什麼正常的運行了多年的“低空風切變警報系統（LLWAS）”沒有及時發出警報，而是在空難發生後才起了作用？

回顧一下美國航空安全委員會對 DELTA 191 航班的調查報告，以及“黑盒子”的記錄（參考圖七）：

機組的副駕駛員在操縱航機，他啟動了 ILS，放下起落架，在狂風暴雨中飛向 17L 跑道進場降落。191 機組認識到前方進場航道上雷暴存在，但是決定繼續以自動導航降落。當進入雷暴後，逆風增強，然後就遇到下沉氣流，副駕駛員拉起機頭，增加攻角，但是隨後一個強烈的上升氣流將航機的攻角增大到接近失速。機艙內響起了尖銳的失速警告：“失速！失速！失速！……”，副駕駛員壓下機頭，減小攻角，由於浮力相對減小，再加上下沉氣流，航機被推到自動導航的下滑道之下。機組人員終於認識到航機進入了由下擊雷暴所造成的風切變，航機經過了逆風，下沉氣流，遭遇了強大的每小時 50 海浬的順風，幾乎喪失了所有的浮力。航機在 800 英尺的高度，脫離了自動導航的下滑道，機長下令“複飛”，航機開始執行 TOGA (take-off and go around)，但為時已晚，航機在跑道著地點前方 6,000 英尺處墜地，撞毀了兩座水塔和一輛汽車後起火。數據顯示，墜毀時，發動機是在全馬力狀態，副翼是在起飛狀態。

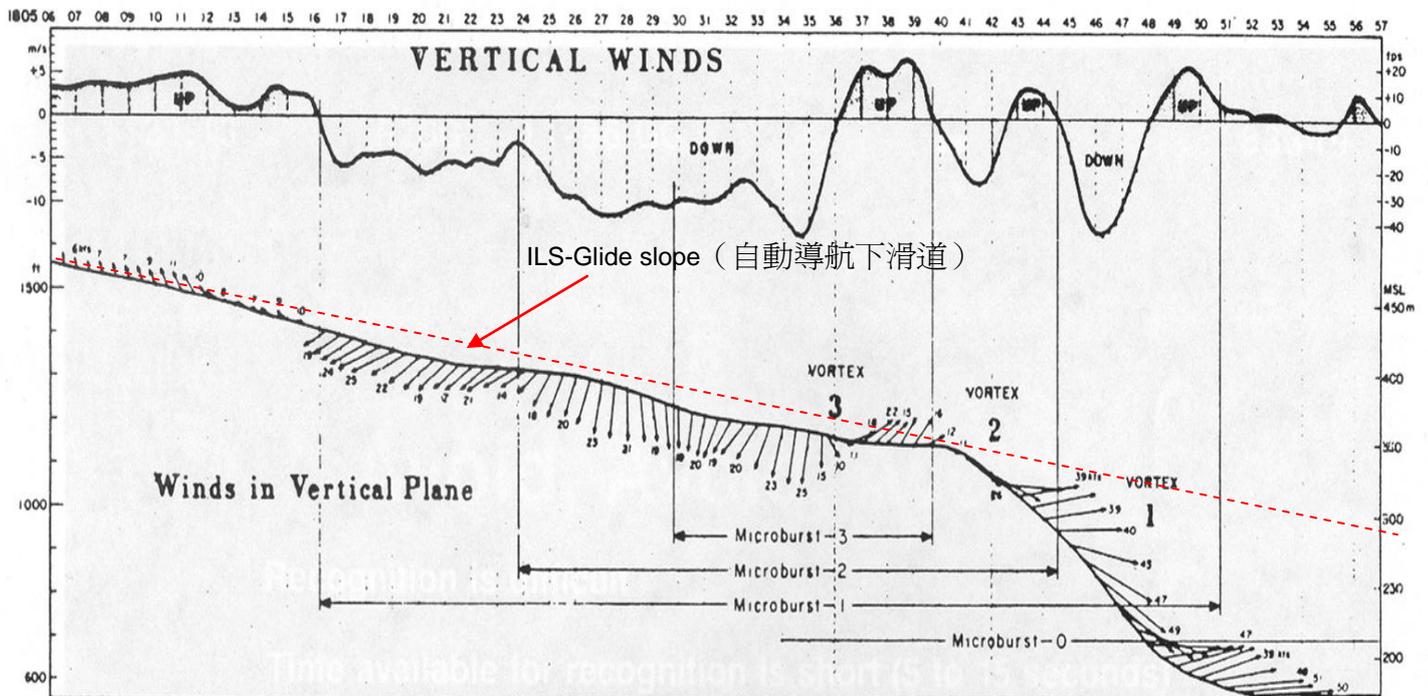
黑盒子傳來駕駛艙裏最後的對話：

“請求上帝幫助我，告訴我如何逃脫這場災難。”

“為什麼事先沒有人告訴我災難的來臨呢？”

航機是在全馬力的起飛狀態，但是還在下墜，正副駕駛員看見了窗外的樹林和迎面撲來的兩座水塔。

機長的“複飛”決定如果提前三分鐘，這場空難就可避免了。延誤的原因是機組人員缺少了正確和及時的氣象資訊。當然最重要的問題是：“低空風切變預警系統 (LLWAS)”的失效，是因為在下擊雷暴觸地前，強大的風切變已經出現在低空了，這是 LLWAS 的空間盲區。但是這已經不是第一次發生了。



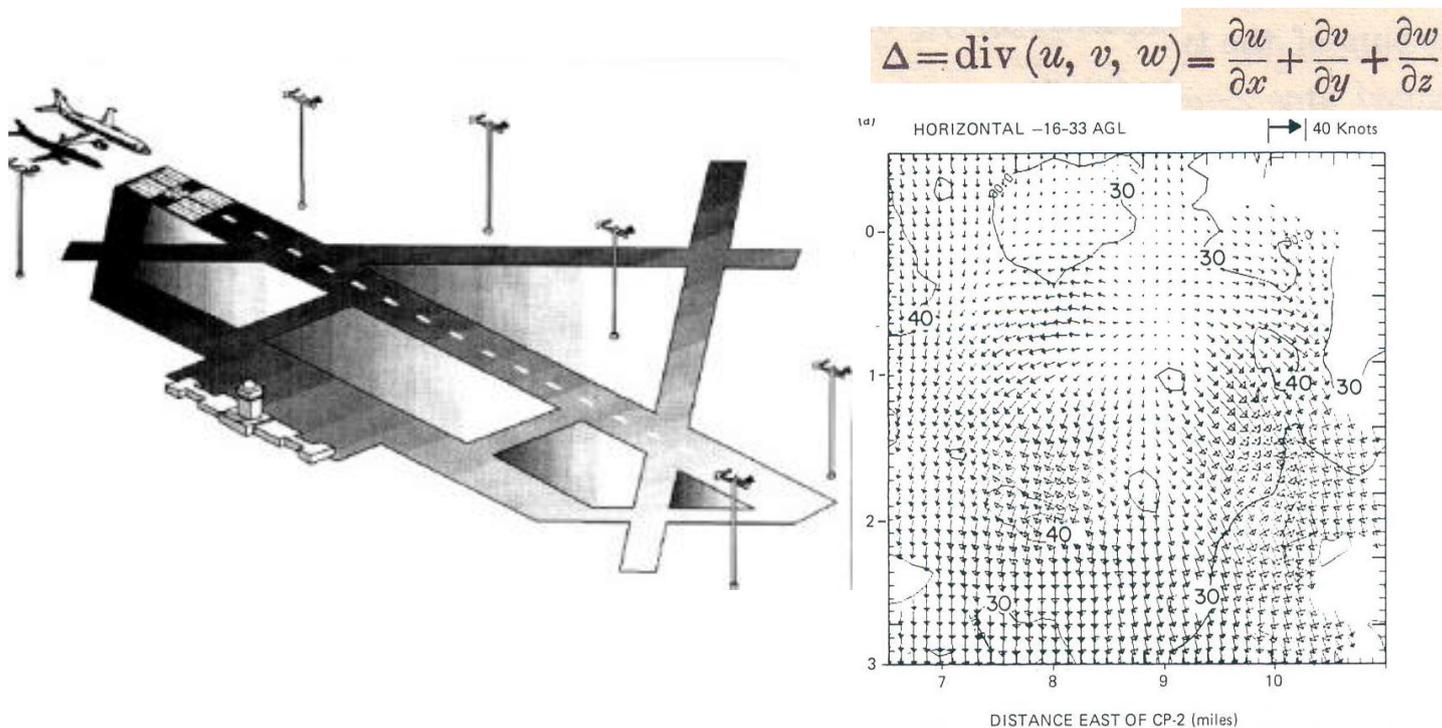
圖七：黑盒子記錄 191 航班降落時的風場

低空風切變預警系統 (Low Level Windshear Warning System, LLWAS)

LLWAS 是美國聯邦航空總署 (USFAA) 為了偵測風切變對航機在起飛和降落時所造成的危險而開發的。目前在全世界

各地的許多機場都裝置了這項設備，包括臺灣的桃園國際機場。LLWAS II 系統使用一組六個測風儀，其中的一個裝置在機場的中心位置附近，其他的五個裝置在較遠但是接近進場航道和各個跑道。測風儀的資料是利用電話線以每十秒一次的頻率傳送到資料處理中心。當六個測風儀中的一個監測到的風場和所有測風儀的平均風場有每小時 15 海涅的差值時，發生風切變的可能警報就會發出。另一個情況就是資料處理的結果，發現有擴散性 (divergence) 的風場，也會發出風切變的警報。LLWAS III 系統是使用以偵測擴散風場為原理的更先進電腦程式來進一步完善下擊雷暴的預警。

到 1988 年時，LLWAS 已經裝置在 110 個機場，其中有不少已經被都卜勒氣象雷達 (Terminal Doppler Weather Radar, TDWR) 和氣象系統處理設備 (Weather System Processor, WSP) 所取代。最終，所有的低空風切變系統都會被淘汰，僅會剩下 39 個機場還會使用最新的電腦程式和更先進的感測器把 LLWAS 提升到 LLWAS-NE (Network Expansion)。LLWAS-NE 系統不僅會給航管人員提供裝置有測風儀地點的風切變和下擊雷暴預警，它還能提供跑道附近的危險氣象情況。它最大的優點是具有彈性，可以隨著機場的擴建和跑道的增加而增大它的監測範圍，它最多可以容納 32 個測風儀分佈在相對於跑道的戰略性位置。

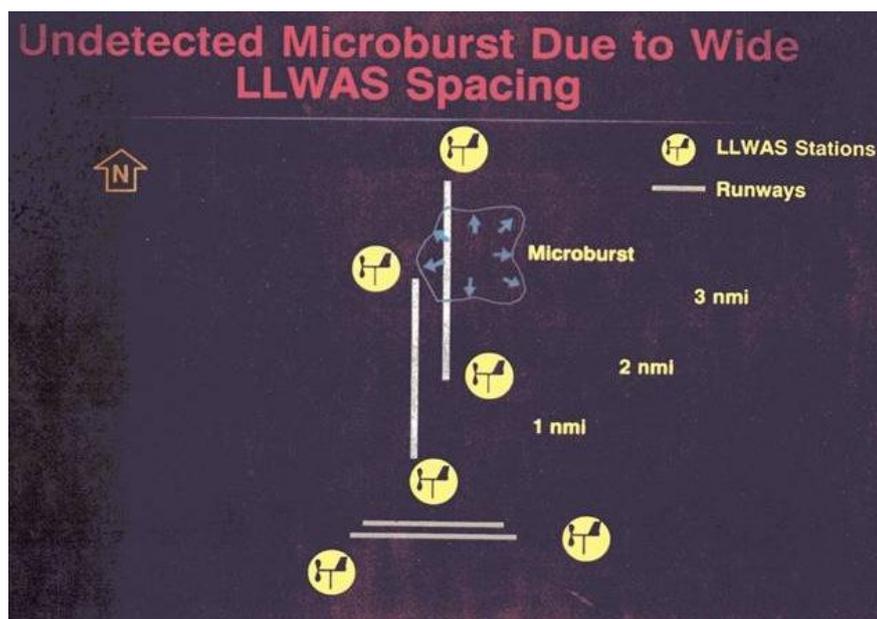


圖八：LLWAS 測風儀分佈及水平擴散演算

LLWAS 雖然有它的優點，但是個在被淘汰中的監測系統，從原來裝置在 110 個機場減為只剩下了 39 個機場。DELTA 191 空難指出來，LLWAS 只能測出在地面的風場變化，它沒有能力監測“低空”，也就是在地面以上的空間，應該是 LLWAS 的盲區。所以當 DELTA 191 是在 1,000 英尺的高度遭遇到強大的風切變時，LLWAS 並沒有發出警報。

显然，LLWAS 是測量“地面”的風場，而不是“低空”風場。多年前，在設計時，是假定地面風場是可以代表低空風場。所以 LLWAS 的警報只能說明下擊雷暴已經在進行了，對於還沒有進場或離場的航機是“預警”，但是對進入到影響範圍的航機是沒有用處的。只能說是為時已晚，這是 DELTA 191 的不幸。同時它也有地面上的“盲區”。“盲區”的缺

點和“地面風場”的局限都是來自測風儀的“定點監測”，它沒有“三維空間”的功能。另一個更重要的考慮，是它沒有“預報”的功能。



圖九：LLWAS 測風儀的盲區

改进方法

數學模型中的診斷性模擬，是在給出一個或數個變數後，計算方程式裏其他的變數，例如給出一個中尺度的下擊雷暴在距離跑道五公里處觸地，計算跑道上的風場變化。或是給出跑道上定點的風速，計算出整個跑道上的“低空”三維風場。目前在市場上有好幾個小尺度的流體診斷模式軟體，它們都將“運動效應 (kinematic effects)”，例如地形和建築物對流體的影響，考慮在內。數模以“點”的風速及風向為輸入，滿足連續方程和熱力方程，計算出三維的風場。因為忽略了動量方程 (momentum equation)，這是個近似解。但是將計算所需的時間大為縮減。

LLWAS 的測風儀的採樣頻率為每 1 秒至每 5 秒一次，但是從經驗得知，機場的風場變化最快也是要維持一分鐘不變，任何高於一分鐘頻率的風場應該是噪音信號或是因航機高速通過測風儀時產生的干擾。因此我們以 LLWAS 所取得的每分鐘的平均風場作為“點輸入”，計算三維風場。重要的是，在一分鐘內，也就是在取得下一個風場輸入值前，電腦必須完成運算，這一點將會限制數模網格的多少和電腦速度的選擇。如果筆記本型電腦的處理器速度不夠快，就需要工作站來處理了。將每一分鐘的三維風場求出後，連在一起就是風場在時間和空間裏的連續方程，它可以和相對的都卜勒雷達資料比較，也可以在裏面的航機進場下滑航道和離場起飛航道上的風速風向畫出來，作為發佈警報的依據，或是與機載航測資料對比。

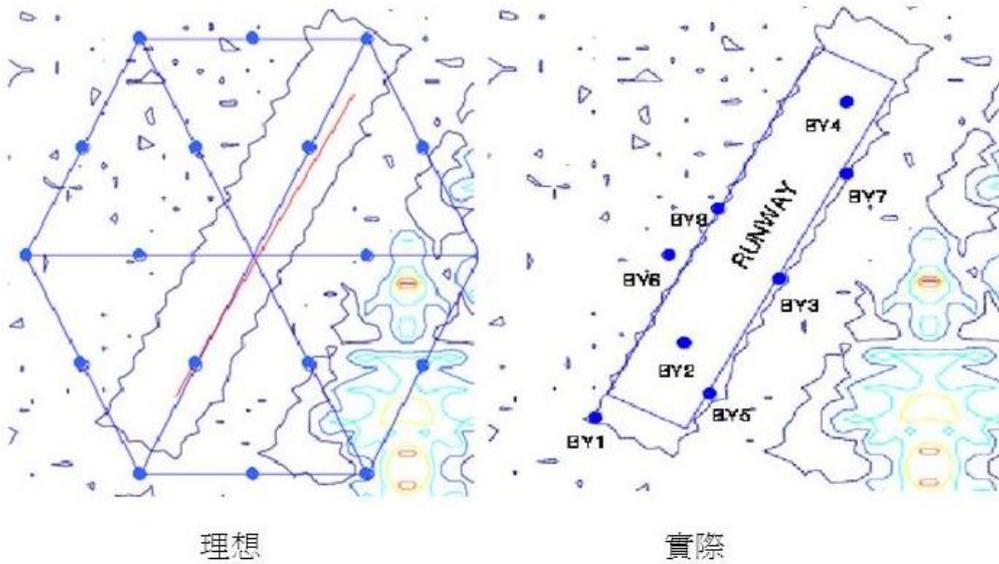
診斷型的數模計算一分鐘內的風場時，最重要的是滿足連續方程，來維持進出物質量的平衡。因為整個時間很短，動量的變化不大，忽略了 momentum equation 所造成的誤差是非常的小。

此方法的另一優點是它可以做為輔助性的設施，補充現有已在運行中的“低空風切變預警系統”，也可以互相驗證。

此方法的基本概念曾在广州旧白云机场 (ZGGG) 进行实地验证；

運行期：1998.06.27 至 1998.10.26，共 122 天

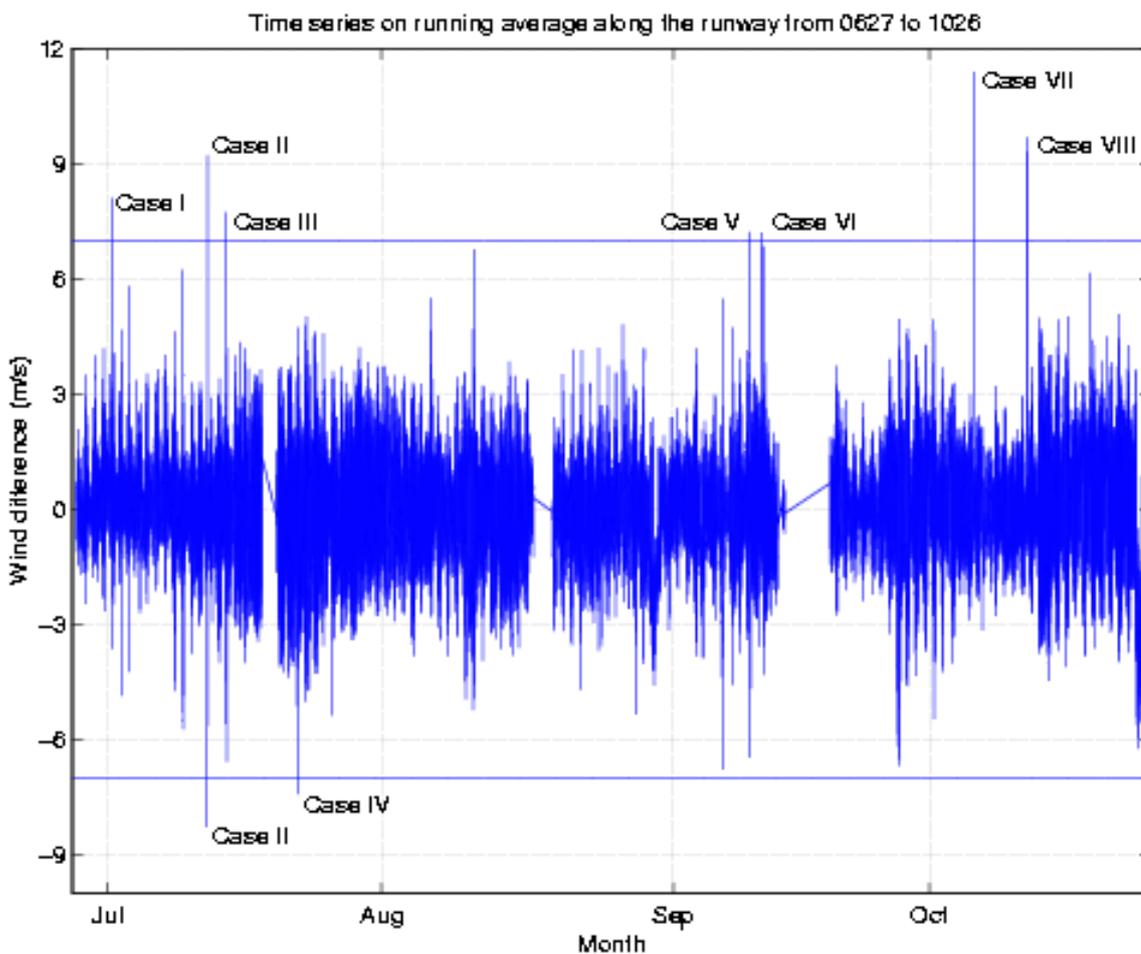
採樣率：測風儀，BY1, 3, 5, 6, 7, 8 為每秒一次，BY2, 4 為每 5 秒一次。即時連續採樣 122 天，建立 8 個時間座標的連續方程。



圖十：廣州舊白雲機場測風儀分佈

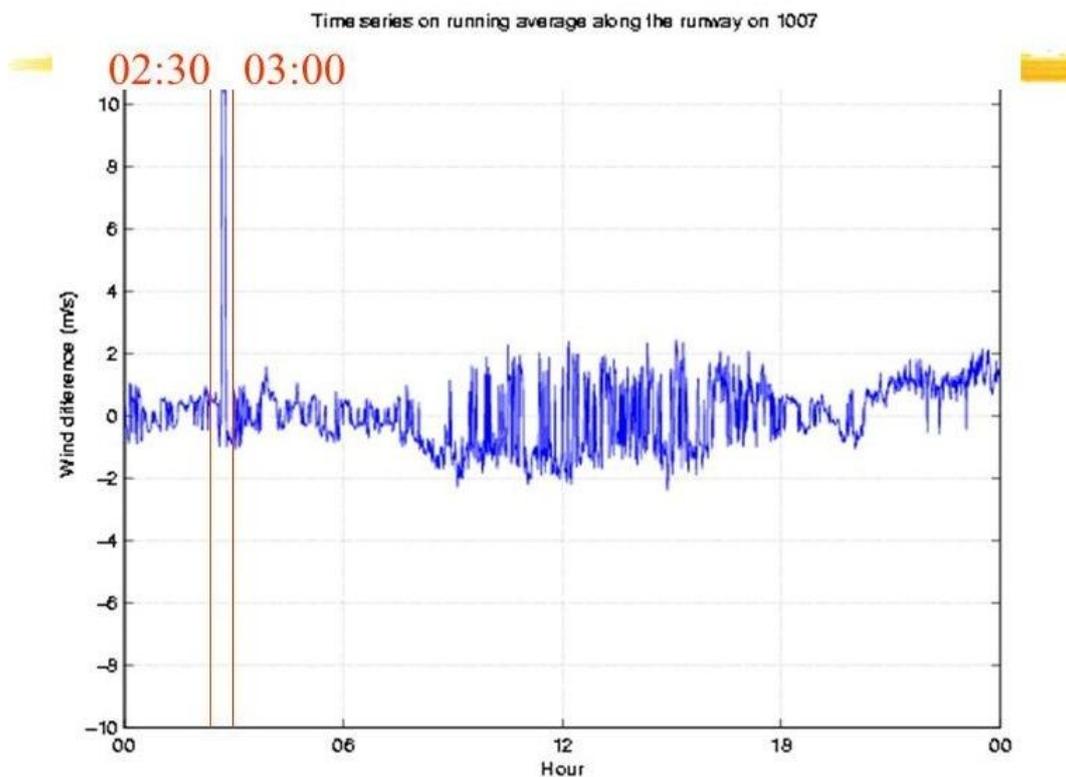
採樣率：測風儀，BY1, 3, 5, 6, 7, 8 為每秒一次，BY2, 4 為每 5 秒一次。即時連續採樣 122 天。

濾波：使用高頻濾波器，去除任何短於一分鐘週期的信號（如滑行航機造成的瞬間風速脈衝），以及高頻噪音信號。



圖十一：測風儀 122 天的風速時間連續方程

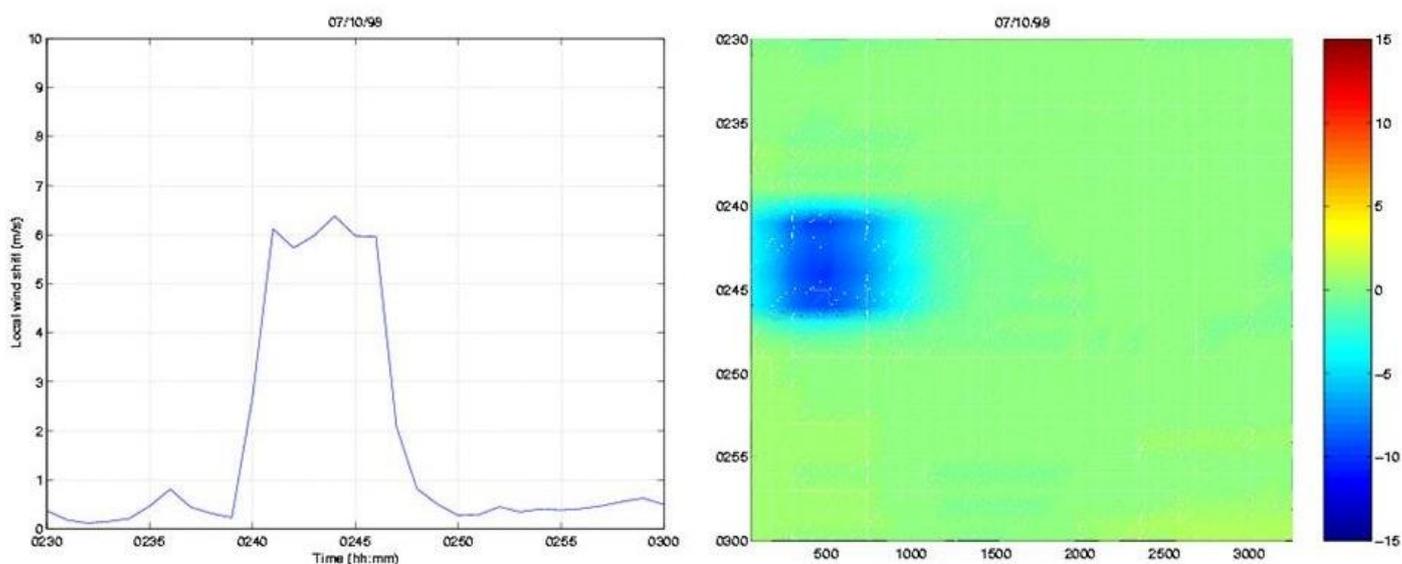
圖十一中的垂直座標，風速差 (wind difference)，是指相鄰的兩個測風儀的信號相減，它代表跑道上的風速變化。在 122 天中的最大值約為每秒 12 公尺，是發生在 1998.10.07，當天 24 小時的風速變化是如下圖十二所示。



圖十二：1998.10.07 的全日風速變化時間連續方程

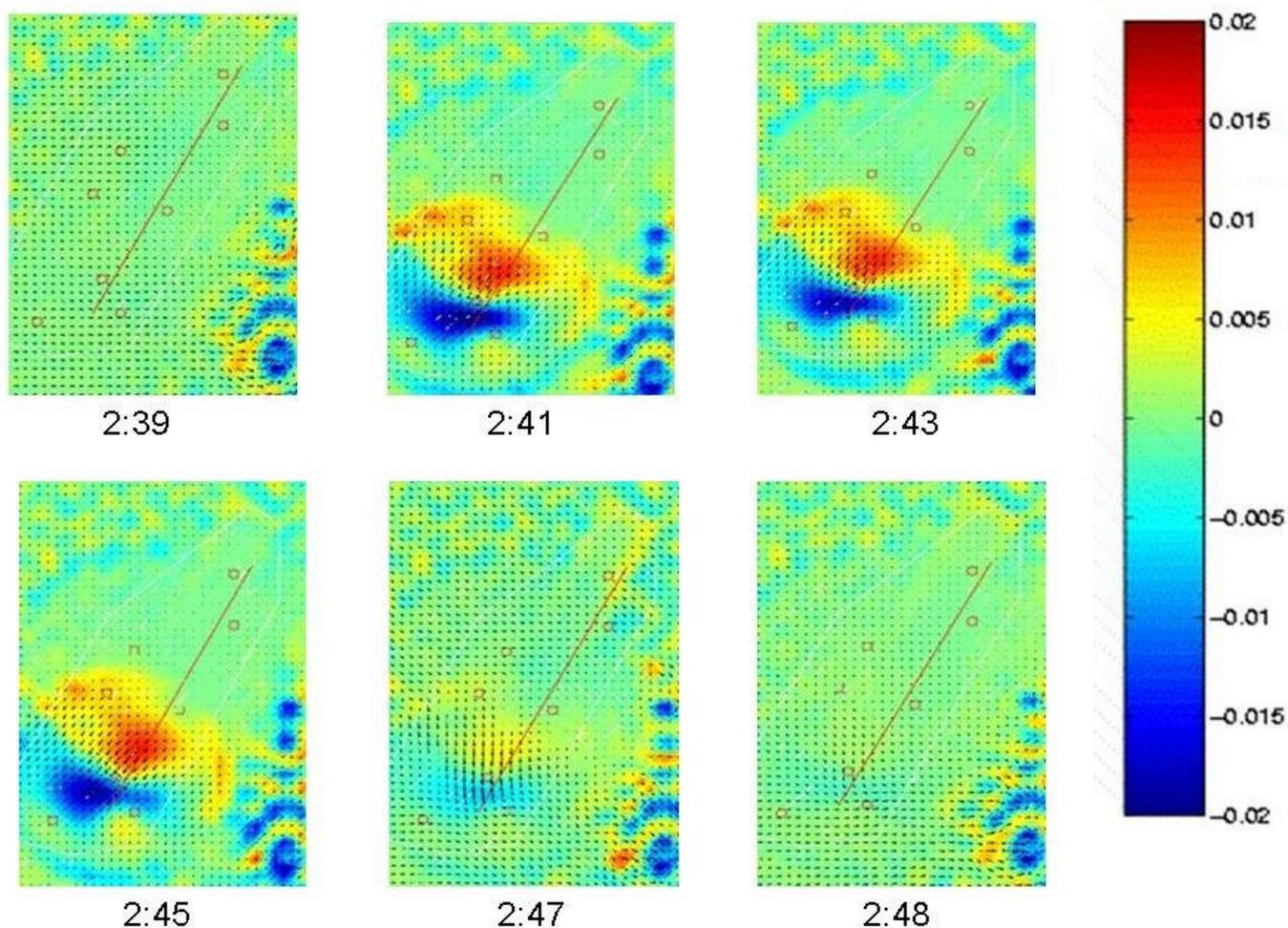
非常明顯的，在凌晨 2:30 至 3:00 跑道上發生了最大的風速變化，8 個測風儀在這時間段所採集的资料就用来作為計算風場的輸入資料。計算的工具是目前在市場上提供的診斷式流體數學模擬，CALifornia METeorological Model (CALMET)。

它使用定點的風速輸入資料和地形的變化，計算出滿足質量連續方程式和熱動力方程式的三維風場。



圖十三：典型測風儀輸入資料及 CALMET 演算出的風場

上圖中的左方是測風儀之一在這三十分鐘所記錄的風速，明顯的它是一分鐘的平均值，目的是將高頻噪聲信號去除。右圖是白雲機場的 CALMET 診斷模型利用 8 個測風儀處理過的平均風速為輸入值，計算出的風場。右圖的垂直座標是時間，水平座標是跑道距離，大約在 2:40 至 2:46，跑道的一頭出現了風速約每秒 6 公尺的平穩風場，其他地區是無風。整個白雲機場的風場在時間及空間的變化是顯示在下圖。



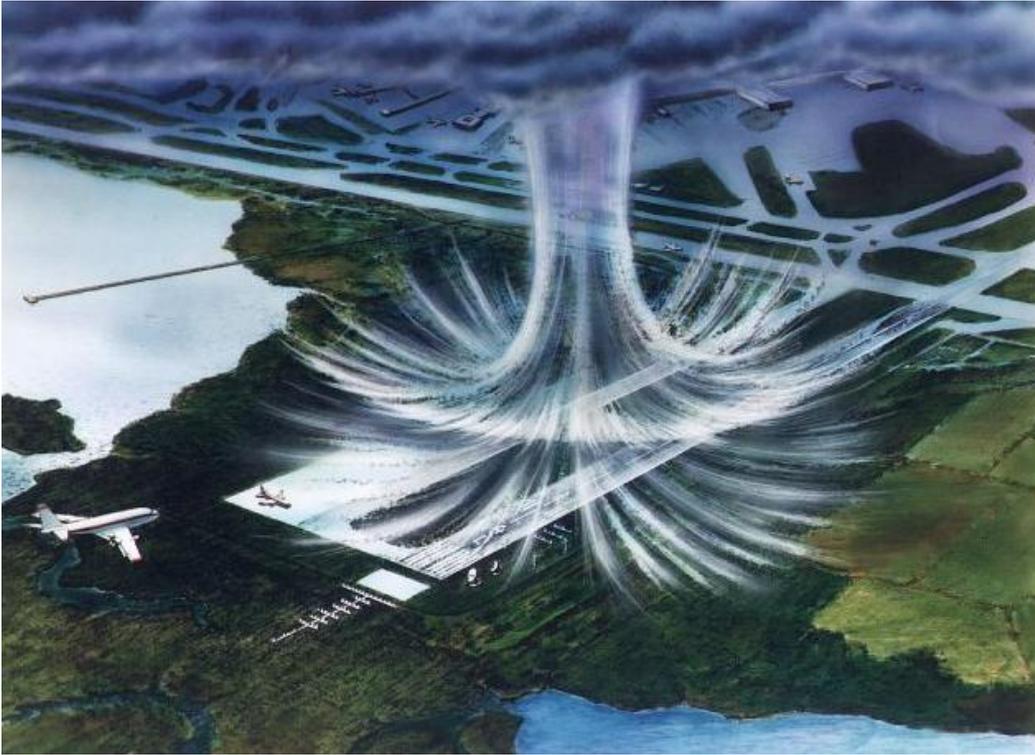
圖十四：1998. 10. 07 凌晨白雲機場的風場變化

根據診斷數模，在凌晨 2:39 之前時，除了在跑道的東南方，因受地形和建築物的影響，有非常輕微的湍流外，全機場的風場都是處於幾乎是無風的狀況。但是在此之後，跑道的南端出現了明顯的風切變，並且迅速的增長，到 2:44 時，強度到達最高，隨後開始減弱和消亡，到了 2:48 時，全機場又恢復是靜風狀態。

使用診斷數學模式和測風儀，在廣州舊白雲機場建立了類似 LLWAS 的風切變預警系統，並且克服了“盲區”的存在。

後語

當天氣情況急速的惡劣變化時，航空飛行的安全，效率和運輸容量都受到限制和威脅，本文的建議將會協助機場的航空氣象人員，航管人員和其他的相關業界克服因惡劣天氣所造成的影響。下圖說明我們的願景和我們的最終目的；



圖十五：航機在降落前遭遇下擊雷暴

在一個梅雨的冬季，中華航空的 CI001 班機經過了 15 小時的長途飛行，從美國西海岸飛抵臺灣，在航管的引導下，飛入了進場航道，降低高度，淡水河口已經清晰可見，前方的桃園機場出現。收到了塔臺的降落指示後，航機對準 05 跑道，進入了最後的下滑，這時駕駛艙內響起了呼叫；

Tower: "Runway 05 arrival, Microburst alert, 50 knots loss, 2 miles final."

Captain: "Dynasty 001, Request Immediate Landing Abort and TOGA."

塔臺：“洞五跑道落地點前方兩英哩處有下擊雷暴預警，將產生每小時 50 海浬的順風。”

機組人員立刻明白，航機正面臨因強大的風切變所造成的墜機危險。

機長：“華航洞洞么，要求立刻放棄降落和複飛。”

20 分鐘後，當再次進場降落時，下擊雷暴已經消失了。及時和正確的預警，保障了飛行安全及航機上的乘客和機組人員的生命。死裏逃生！