

晴空亂流預報自動程序法 樊滌兮譯

An Automatic procedure for Forecasting Clear-Air Turbulence

撮 要

昔 A Computer program 一文對從高空資料中識別晴空亂流所獲之參數甚有裨益。此參數即垂直與水平切力，垂直與水平動能梯度及李察德遜數。此外，有關晴空亂流之噴射氣流及槽脊位置等亦均經研究調查。

李察德遜數判斷為最具前途之參數。為此自動化系統業經發展，可為全美探空每一切力層計算李察德遜數，為每一探空選擇最小的李察德遜數，分析最小的李察德遜數等值線，然後再用美國氣象中心的曲線繪圖儀繪出圖表。

由最小李察德遜數所構成之略圖範圍，小於一幅所設計的預報圖且假定可持久十二小時。獨立資料說明此種預報區可獲「中」及「重」晴空亂流發生報告的百分之四十近似值。

一、引言：

晴空亂流在近日文獻中雖曾擾攘不休引起重視，但實際各預報機構却仍對其無重大改進。哈利生(一)曾發展出一最早的有體系的預報技術，其參數為水平風切(50 knots/per 150 Nautical miles)與數種屬之噴射氣流性向。就在極地噴射氣流之左的氣旋性環流區域內，彼假定有產生中及重晴空亂流達75%的可能性。在近脊處此值將減為50%，至極噴射氣流之右，其或然率更降低至不足25%。而在副熱帶噴射氣流之左區復增為35—50%。喬治(二)曾發現哈利生的方法十分有用，雖其趨於超過發生數。他注意到甚多強烈水平風切形態未發生亂流。喬治的調查使其假設二者，即強烈的水平風切與垂直風切才為識別嚴重晴空亂流所必需。他的臨界值，對水平者亦如哈氏之50kts/per 150 Nautical miles，垂直者被定為6kts/per 1000ft。而最終的一般臨界區，即被歸納為獲得嚴重晴空亂流預報之區。

1961年11月，AWS 曾在米蘇里州坎薩斯城第8氣象大隊的第42分隊成立一「晴空亂流預報組」。該單位的此一作業，其注意力乃集中於美國本土15,000ft 以上空域內之中與重晴空亂流預報。其所用程序基本上仍循哈、喬二氏所倡者。垂直風切(實際為垂直風速梯度)之計算僅計算風速報告至少達60kts 以上者。在此等區域垂直風切至少為9

kts/per 1000ft，而同高度的水平風切亦需達25 kts/per 90 Nautical miles 才有中亂流出現。至嚴重者垂直風切需達15 kts/per 1000ft 或以上。然後將所預報此等區域再以飛行員報告檢查以為可能的修正。以300mb 預報圖作晴空亂流預報，運用平流概念預報亂流區的後16小時位置，(兩次每八小時預報)。一項修正「合眾航空公司」的程序，可用於預報「山波亂流」。數其他條件亦可作為預報晴空亂流之方法。快速移行深槽低壓槽不宜用於計算其垂直風切，接近對流層頂之盾狀移行卷雲對預報晴空亂流亦頗令人懷疑。1963年7月「晴空亂流預報組」的職責經過到第三氣象聯隊的 March 及 Westover 空軍基地的預報中心，但其基本預報技術仍保留未變。

位馬里蘭州 Suitland 國家氣象中心的分析預報組有與上述有異的預報法則。填繪平滑後的風剖面圖，繪出一低於最大風層却高於另一風層之垂直風切值。在切力區與最大等風速區間之存在關係被保留於預報切力區及從24小時「正壓預報」(Barotropic Forecasting)所獲之等風速線區間。當平滑後的風切大於每千呎四哩可報中度晴空亂流，而普通亂流亦可望於尖銳迅移之深槽中獲得。

二、參數調查：

下述參數調查有垂直與水平風切，垂直與水平動能梯度及關係晴空亂流的槽脊與噴射氣流之李察

德遜數。有關計算前四項參數的計劃業已擬定。高空資料之「軋孔紙帶」準備亦已由美國氣象中心的「自動資料處理系統」(Automatic Data processing System)完成。為數七十二個區域中的每一探空站之0000GMT 與1200GMT 的垂直參數亦均經完成計算。晴空亂流出現資料亦獲得於美氣象局「晴空亂流計劃」之考爾生(三)博士(Dr. Dever. Colson)。本文各表列晴空亂流不包括對流活動。1962年3月11—25日期共包括亂流總數達593次並用為附屬資料，而1962年10月1—28日期者共為470次被用為獨立資料。

(一)垂直風切：

如近由考爾生所檢討，可能此為一最流行與最重要的參數之一。垂直(向量)切力數值的審查係

參 數	臨 界 等 風 速 線	臨界等風速線內發生晴空亂流百分率
1. 最大垂直風切	6knots/per 1000'	78
2. 最大垂直風切	9knots/per 1000'	26
3. 最大水平風切	200mb 圖 27knots/per 100 n mi	23
4. ①+③之聯合情形		21
5. 水平最大動能梯度	300mb 圖 knots ² /per 100 n mi	36
6. 最小李察德遜數	0.5	30
7. 最小李察德遜數	1.0	49

被每千呎6哩風速線所描述者佔該類晴空亂流報告的78%，且佔各類百分率總和之40%。而每千呎9哩者，與此相比，則只佔該類出現率之26%。

(二)垂直動能梯度：

如以公式將此動能(每單位體積)與高度微分，即可得此層之垂直風切與平均風速之積。

$$\partial(K.E.)/\partial z \left(\frac{1}{2} v^2 \right) / \partial z = v \cdot \partial v / \partial z \quad (1)$$

其單位為每千呎平方哩。賴克(四)發現此量當施於稀薄空氣層測量時最為宏大。垂直動能梯度最大值之填圖分析工作與分析垂直風切者同。總之，其所獲之數亦甚相近於最大垂直風切者。至於進一步之調查業已中斷。

(三)水平風切：

此量經哈、喬二氏發現甚具重大意義，為避免不適或不正確的線條平滑技術，此計劃經運用國家氣象中心的圖表，分析u與v值二分速。此水平

取23,000—45,000ft 間每二次報告之計算方式完成之。這些高度約近400—150mb 層其選定原因為極多數晴空亂流之飛行員報告真實鑑定係發生於此高度層。各個別層其高度不足2000ft 之較薄氣層常發現會產生無代表性結果故予捨棄之。每次探空中將22,000ft 層之最大風切填出，其等風速線亦按每1,000ft 6.9及15哩之間隔繪出。此分析圖所包括之時間從1962年3月11—25日之每日0000GMT 及1200GMT 二次繪圖時間之資料。而在此繪圖時間的6小時之內所發生之中度(或較強)晴空亂流亦均填入此圖。據此所製之統計結果如表一。

表一、以附屬資料運用識別晴空亂流各參數之比較技術，將發生於繪圖時間六小時內之593次中重亂流填入圖中。此為1962年3月11—25日期內23,000—45,000ft 之所有晴空亂流之分析表。

向量風差數值乃獲得於：

$$|v_2 - v_1| = \left[(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

其中各分速下之數字可應用計算表中之方格點。風差分別可獲得於從左至右的x軸及從頂至底的y軸意識。然後計算方格點間之距離，並將切力場印於300mb及200mb圖上。結果其合成場當切力值之y向(美國者一般為南北向)常大於x向時呈不連續狀。總之，此場之分析在於找出切力最大值。200mb圖上之切力與300mb者十分相近唯參數較小而已。以此求出之或然率僅27%的中重亂流可落入哈、喬二氏臨界值之27%/per 100 Nautical miles (40kts/每2.5緯度)。

(四)水平動能梯度：

此項結果之計算，係用方格點間平均風速乘水平風切而得。臨界等風速線之決定為1600knots²/per 100 Nautical miles (60kts×27kts per 100 Nautical miles)。36%的晴空亂流飛行員報告落

入此線中。此區域較臨界水平風切之相同區域為大。

(4) 李察遜數：

此參數可能最富理論興趣，且已由安德生(4)考爾生，凱茲(5)羅斯特貝(6)發現可產生良好結果，下列為計算李氏數方程：

$$Ri = g(\bar{\theta} / \partial z + r) / [\bar{\tau}(\bar{\theta} / \partial z)^2] \quad (3)$$

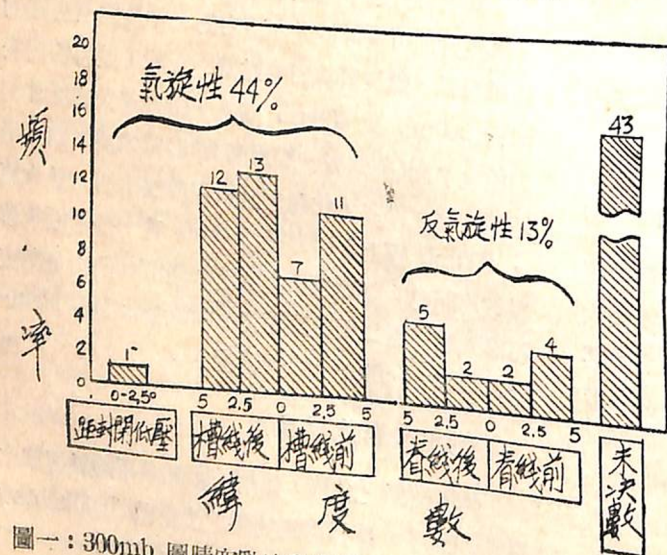
g 為重力加速度， $\bar{\tau}$ 為平均溫度 z 為高度， r 為乾絕熱遞減率， $\bar{\mu}$ 為平均速度。

重要的溫度資料首先被隱沒於假設的溫度資料中，遞減率之計算係從 400-150mb 之各層，然後比較每層平均氣壓，以最近之穩定層配合垂直風切層。再將每層探空中之最小李氏數填入圖中，並按李氏數 0.5 及 1.0 之間隔的等風速線將圖繪成。結果，有 30% 亂流落入 0.5 的等風速線區，49% 落入 1.0 區。

(5) 晴空亂流之分佈及其與槽脊和噴射氣流的關係

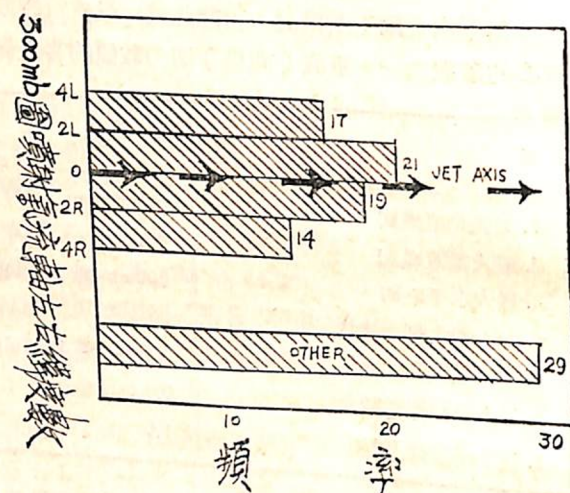
一項嘗試性工作擬將 470 次在 300mb 圖上與槽脊及封閉低壓有關的晴空亂流出現予以分類業已完成。將 0600-1800GMT 期之晴空亂流報告填於美國氣象中心 1200GMT 圖，其他者則填於 0000GMT 圖，其結果如圖一所示。

由圖一知發生於氣旋性環流情況之晴空亂流報告大於發生於反氣旋者約三倍餘。25% 發生於槽線後，18% 發生於槽線前，18% 發生於槽線後，18% 發生於槽線前。對反



圖一：300mb 圖晴空亂流與有關的槽脊和封閉低壓分佈圖。
(頻率百分數，距離緯度數)。

氣旋者似無偏好，脊之前後共佔13%，對封閉低壓更不感興趣在距其150哩(2.5緯度)處，所發現者尚不足1%。此種較低數字乃因其所包範圍較槽脊為小故可期出現如此情況。總之，此其間，封閉低壓出現頻仍，另有43%尚屬未知之數故未能分類。因其發生於直線氣流區，欲清楚識別其槽脊誠屬困難。茲爾生利用發生於1961年9月至1963年3月之5623次報告曾作過一次類似分析。他發現全部有16%之數落入距槽線2.5緯度處，其地甚多分散於槽之前後。其封閉低壓之數字約佔3%。此相同晴空亂流報告之分佈分類，均根據300mb 圖噴射氣流軸之左右距離為則，此種情形可參見美國氣象中心據以分願之圖二。



圖二：300mb圖晴空亂流與噴射氣流軸分佈關係圖

其中有71%的晴空亂流發生於480哩之範圍中，分列噴射氣流之兩側。然仍以氣旋性環流者較多，約佔38%。此種分佈與考爾生之例正不謀而合。他發現居左者為36%，居右者為28%。

三、預報法

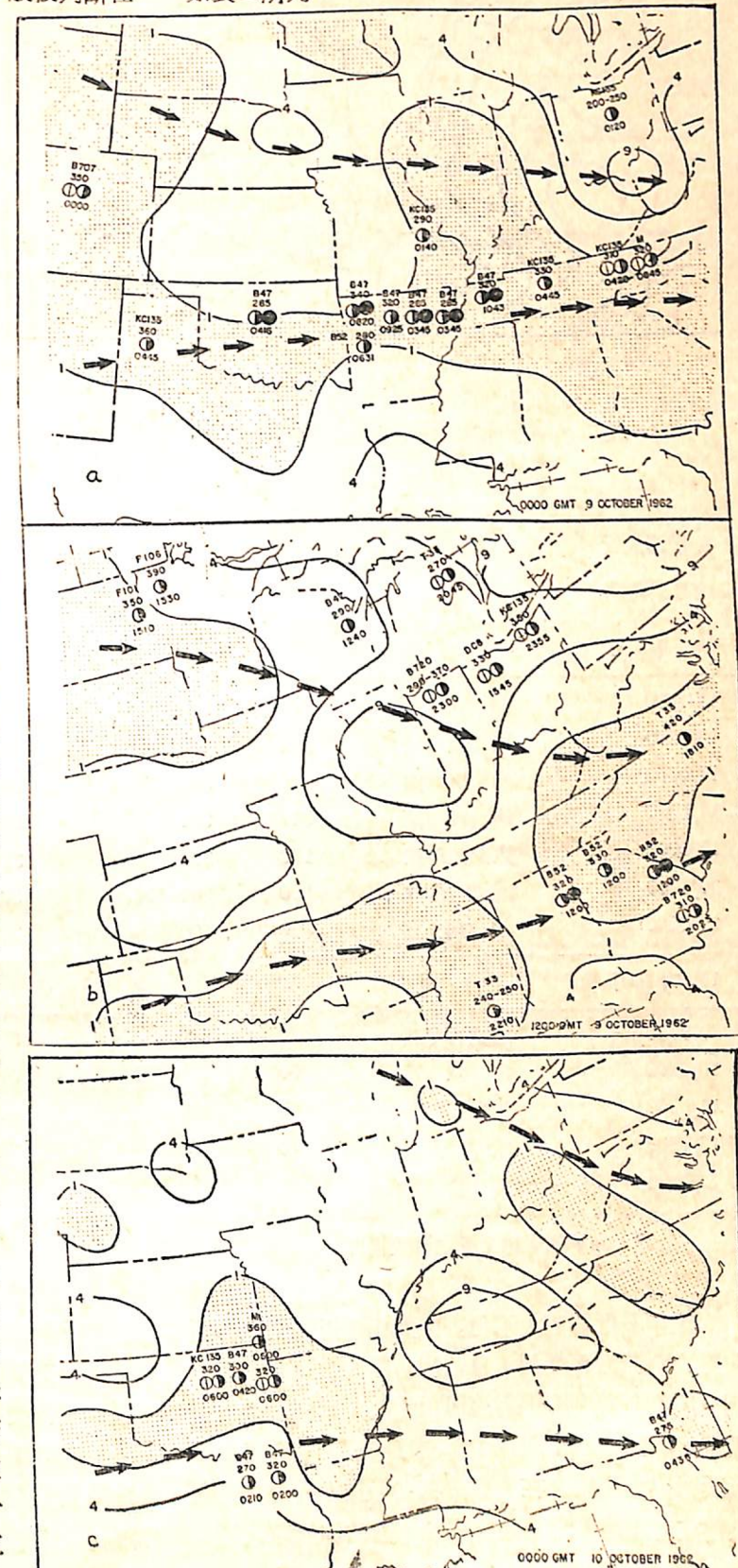
最佳參數與諸參數合併應用之選擇為一困難問題。附屬資料有許多熟知缺點。如晴空亂流之強度為一純主觀之觀察；否定報告；多數主要航線缺乏地理代表性；機速與姿態情報亦欠翔實。以此型態之資料而從事分析，勢需利用廣泛統計法，以代替僅以少數代表性報告的盡詳檢查法不為功。

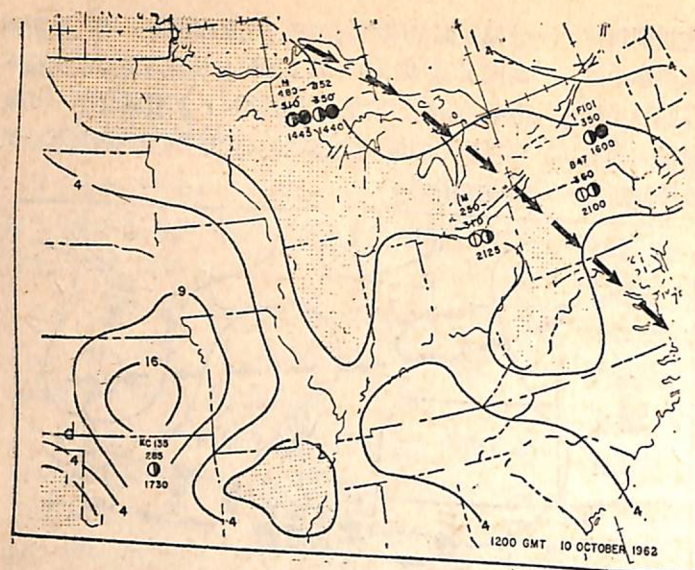
由附屬資料之檢討，可知水平風切在識別晴空亂流上實較垂直風切為差。而以計算垂直與水平動能為據則其所獲更屬微不足道也。以臨界的最小李察遜數等風速線計算位移區，其效實與以大的垂直風切值圖述同。總之，李察遜數一般被判斷在識別晴空亂流時，僅較垂直風切略優，尤其對包括小的垂直風切之不穩定區更屬如此。但從預報機構設計有高速電腦後，再利用剩餘時間去計算李察遜數則更顯多餘。

然敘述至此，有關為何選定最小的李察遜數應用於400-150mb層之理由仍尚未言及。促使大型擾動渦流生成之機械作用目前仍不明瞭。今試假設這些渦流形成即將在包含小的李察遜數之層內或近層處予以發現。另外，亦可假設原始的較大渦流係以均質強度傳播其能量於較小渦流，這些較小渦流又以輪流姿態作機械作用之繁殖一至其他。一旦當此最小的渦流改變其所有的擾動能為熱能之前，此渦流型，即可因氣流而變型為垂直或水平運動，而其體積亦會成為消性排列之順勢延展。此幅混亂迷惘圖尚在擬想或預想階段，其間較大的亂流已可被偵得，如時間幅度及氣象儀器網願惠吾人時。逐漸形成而呈散漫的渦流形與結合晴空亂流的渦流形假定可被預報，則居層中任何處之最小李察遜數必為小於1之數。由此規範所識別之區域，今假定可維持十二時之久。甚多例證說明同一地區晴空亂流報告的飛機所在高度不同，或同一架飛機報告區係穿過深厚的空氣層。此皆證明晴空亂流之延展性及持久性如此。

圖三 a 為阿肯色北部地區，飛行高度28,000-34,000ft 在俄亥俄有一飛機報告於穿過5,000ft 低空時，尚發出中度晴空亂流的發現報告。圖三 b 所示之例更較清楚，區域為北印第安納，其中之輕中亂流係8,000ft 層報告。圖三 d 如單機之俄亥俄6,000ft 層輕，中晴空亂流飛行員報告。在密執安半島上空為二架不同機型之中重晴空亂流報告。這二飛機確曾在同一經緯度作觀測報告，且其間隔僅有五

分鐘。但當甲員報告為35,000ft 時，而乙員所稱高度又為48,000-51,000ft 且均親身經歷亂流區。此時之對流層頂為39,000ft，其資料曾經一再檢查以視相似情況之雷同性究如何。上述測報其結果如表二所列。





圖三、1962年10月9日0000GMT至10日1200 GMT (間隔12小時)晴空亂流報告圖。(最小李察德遜等值線位400-150 mb 層，陰影區表示最小李察德遜數小於1。中或重亂流可望於十二小時後在此區內形成。圖中圓圈示不同晴空亂流飛行員報告，①為輕②為中③為重亂流報告，其上為機型及高度[單位百呎]。其下為報告出現時GMT，300mb 最大風帶如箭頭所示。)

表二、晴空亂流垂直發展之重要例證。所報中或重晴空亂流之最低最高高度以不同報告之時間順序列出。

距繪圖最近之日期時間	發現州(區)	最低高度 報告 (單位百呎)	最高高度 報告 (單位百呎)	對流層頂	報告時間 間距 (分鐘)	報告空間 間距 (哩)
1962年3月						
11/1200	印第安納	200-300	330-370	335	95	50
13/1200	坎薩斯	200	380	333	95	90
14/0000	猶他	220	360	333	10	60
14/1200	伊利諾	315	380	330	0*	0*
15/0000	賓夕凡尼亞	170	350	334	0*	0*
20/1200	威斯康辛	250	300-400	301	76	0
21/0000	伊利諾	260-310	400	360	0	80
1962年10月						
9/0000	西威吉尼亞	280-310	390	350	10	30
10/1200	密執安	350	480-510	390	5	0
11/0000	加利福尼亞	360	550	400	49	0
17/1200	威吉尼亞	310	420	380	87	0
23/0000	田納西	360	400	390	56	100

* 由單機穿越全層之亂流報告

表中最低最高之飛行高度與由最近高空資料所決定之對流層頂並列，且將報告階段之時間予以分列。所有各次例證中對流層頂之決定均極審慎。所需確定者為三月十四及十五兩日同一飛機通過全層，所報出之亂流存在於各層次之事實。故由此證據之存在可說明對流層並非為一有效的能障。

(一)方法例述：

一計算機計劃可獲每一高空站之最小李察德遜數。然後美國氣象中心的分析計劃可處理此一情報。該計劃有效以此資料用於各地理位置並藉內插法將其分配於細密的網狀圖表格上。然後另一計劃進行分析並由曲線繪圖儀製成一帶狀物，此帶狀物

可反複繪出所求的等風速來。在 $Ri=1$ 的範圍內假定可持久並為其後十二小時中晴空亂流的可能發生區。與所述相同之圖三所示者，即為確定之晴空亂流報告(繪圖時間後的0-12小時)而填入圖中者。粗箭頭所示為 300mb 圖上之最大風帶。注意圖三 a，多數所報告亂流係以南部最大風帶分佈。十二小時後沿低緯噴射氣流東部之晴空亂流仍被報出。有五次報告集中於密執安週圍，但當最小的李氏數達 2-3 時這些報告竟倏忽不見「不翼而飛」了。此時圖上情況此區顯示一含有甚小水平風切的弱脊現象。次一圖(圖三 c)之最小李氏數在此區域趨於更小但亦無晴空亂流發生報告。而接近南方噴射氣流之晴空亂流仍在報告且皆落入預報區。迄十二小時後之圖三 d 時，北方之最大風帶區晴空亂流出現報告復轉趨活躍。

(二)檢討：

此法被以獨立資料檢討(1962年10月1-38日)，在此階段共有 475 次中，重晴空亂流曾被報出。其中有 188 次落入預報區，表示有40%的準確率。總數共81次的所報嚴重亂流有45次落入預報區，準確率達56%。西經 100 度以西之技術達35%，以東則達42%。此正與發現低的李氏數與高空亂流間有相互關係而以美國東部較西部情形為佳的羅斯特貝氏所見略同。由預報所涵蓋的平均區域較全部可用區域約少15%。

四、結論：

經發現證實存在的晴空亂流區，位於噴射氣流兩側者佔地 480 哩或然率佔71%。當考慮槽脊而將晴空亂流分類時，則應知在氣旋性環流情況下所出現的或然率約大於反氣旋者三倍，雖尚有43%似與槽脊位置之存在無關。

此外，晴空亂流亦偶被發現存在於十分深厚的氣層中。實際，此種層次係位於定義明確的對流層頂，呈如馴師所加於驚馬的「騎坐」姿勢。李氏數經發現為此種試驗之最佳參數。一項所設計完全自(上接第3頁)

(四)用由四求出之W值乘3600即得空氣分子在一小時內垂直移動之距離，如再乘以由原圖至你預報有效時間的時數，則可得到此時間內空氣分子所作垂直移動的總距離(厘米)

(五)在斜溫圖上循假絕熱程序適當移動各點即得一新探空曲線，由此曲線可獲得雲高，雲厚、逆溫，以及積雨雲可能發生之情形。

動化的系統，乃以高空資料為生品而輸入機器，然後生產出最小李氏數預報圖表。小於1的李氏數預報區，經發現可獲次十二小時階段內晴空亂流總發生數約40%。此系統證實可用，如經美國氣象中心的自動資料處理系統予以處理時。首次之資料處理乃由 IBM 7094 式電腦於繪圖資料時間後二小時又四十分鐘完成。此系統約需2分鐘之電腦準備時間及三分鐘之作用發生時間，以便曲線「從動輪」(Follower)繪出所需之預報區。如此，即可節省九小時的寶貴預報有效時(完)

取材於1964年4月 Journal of Applied Meteorology.

(註一) Harrison, H. T., 1959: The use of horizontal wind shear in forecasting high level clear air turbulence. United Airlines Meteorological Circular No. 49, Denver, Colo.

(註二) George, J. J., 1960: A method for the prediction of clear air turbulence. Eastern Airlines, Atlanta, Ga.

(註三) Colson, D., 1963: Summary of high level turbulence over United States 1961-63. U. S. Weather Bureau manuscript, Washington, D. C., 15 pp.

(註四) Lake, H., 1956: A meteorological analysis of clear air turbulence. Geophys. Res. Pap. No. 47, Air Force Cambridge Research Center, 63+iii pp.

(註五) Anderson, A. D., 1957: Free-air turbulence. J. Meteor., 14, 477-494.

(註六) Keitz, E. L., 1959: Differential advection as a factor in clear air turbulence. J. Meteor., 16, 57-62.

(註七) Rustenbeck, J. D., 1963: The association of Richardson's criterion With high level turbulence. Mon. Wea. Rev., 91, 193-198.

六、結語

以上是數值預報天氣的一種方法，尤其第三個求垂直速度的方法，可應用於單點，其兼有方法一之省時與方法二之準確，可使用於目前我們這個地區。

參考文獻：美空軍氣象訓練教材及有關手冊。

美賓州大學教材 Graphical Numerical Prognostic Model