

氣流線自動分析之研究

Study on Automated Streamline Analysis

胡 仲 英

Chung-Ying Hu

ABSTRACT

A technique for automated streamline analysis is described. The input data are directly received and processed by ADAPS (Automatic Data Acquisition and Processing System) in Central Weather Bureau. The wind observations are fitted onto grid system by a simple method called successive correction method. The corrections are computed from a comparison of the observation data with the interpolated value of the guess field at those stations, and then added to the initial guess field. Utilizing grid-point values of wind directions, or u and v components of the wind, the described technique produces streamlines which are tangent to the instantaneous wind direction and are independent of speed. The computer program has been successfully applied to real-time upper-air sounding data and numerical model output.

一、前 言

氣流線分析之目的，乃利用觀測的地面或等壓面上的風向與風速，繪出連續的風場及氣流型態，來分析空間任何一點之水平風向和風速，並由氣流之型態計算空氣輻散及輻合量。

近年來，由於大氣環流理論的蓬勃發展，氣象學者對於中緯度與熱帶地區能量交換引發極大興趣，更因為氣象衛星的觀測，提供熱帶地區廣大洋面的觀測資料，促使熱帶氣象的研究工作方興未艾。衆所周知，熱帶區域等壓面的坡度頗小，單憑氣壓——高度資料實不能作出一可信賴之分析，探空資料之可信程度，尚未令人滿意，且測站分佈稀疏，如採用等高線分析技巧，難免會造成重大錯誤。

目前氣流線分析為熱帶天氣分析最適宜的方法之一，其理由如下：

1. 地面風的觀測儀器由於使用電子儀器，使準確性大為增加，高空風觀測採用飛機沿航路觀測及無線電探空 (Rawinsonde) 等，能在任何天候下舉行觀測，風之觀測相當正確，據研究統計 500

毫巴風速之觀測誤差為 2 m/sec，300 毫巴風速之觀測誤差為 5 m/sec (Kurihara, 1961)。同時，大氣層中風的報告亦遠較氣壓報告為多。

2. 熱帶地區風場與天氣場的關係遠較氣壓場更為密切，風隨時間之變化及其梯度均遠勝於氣壓，且不為日變化所掩蔽。

3. 目前赤道上空配置一系列的地球同步衛星，可以連續觀測廣大熱帶洋面及不同高度之風場，即時供氣流線分析使用。

作者鑑於氣流線分析日趨重要，特分段介紹風場客觀分析，氣流線自動分析原理及基本氣流線型式，並以實例說明氣流線自動分析之實際應用，俾期望對天氣分析與預報能有所貢獻。

二、風場之客觀分析

吾人首先需將分佈不規則的觀測站所測得的風場內插到等間距的網格點上，許多論文曾討論不同的客觀分析方法，本文介紹理論簡單，計算迅速的連續修正法 (Successive Correction Method)，此法最早由 Cressman (1959) 提出，而由

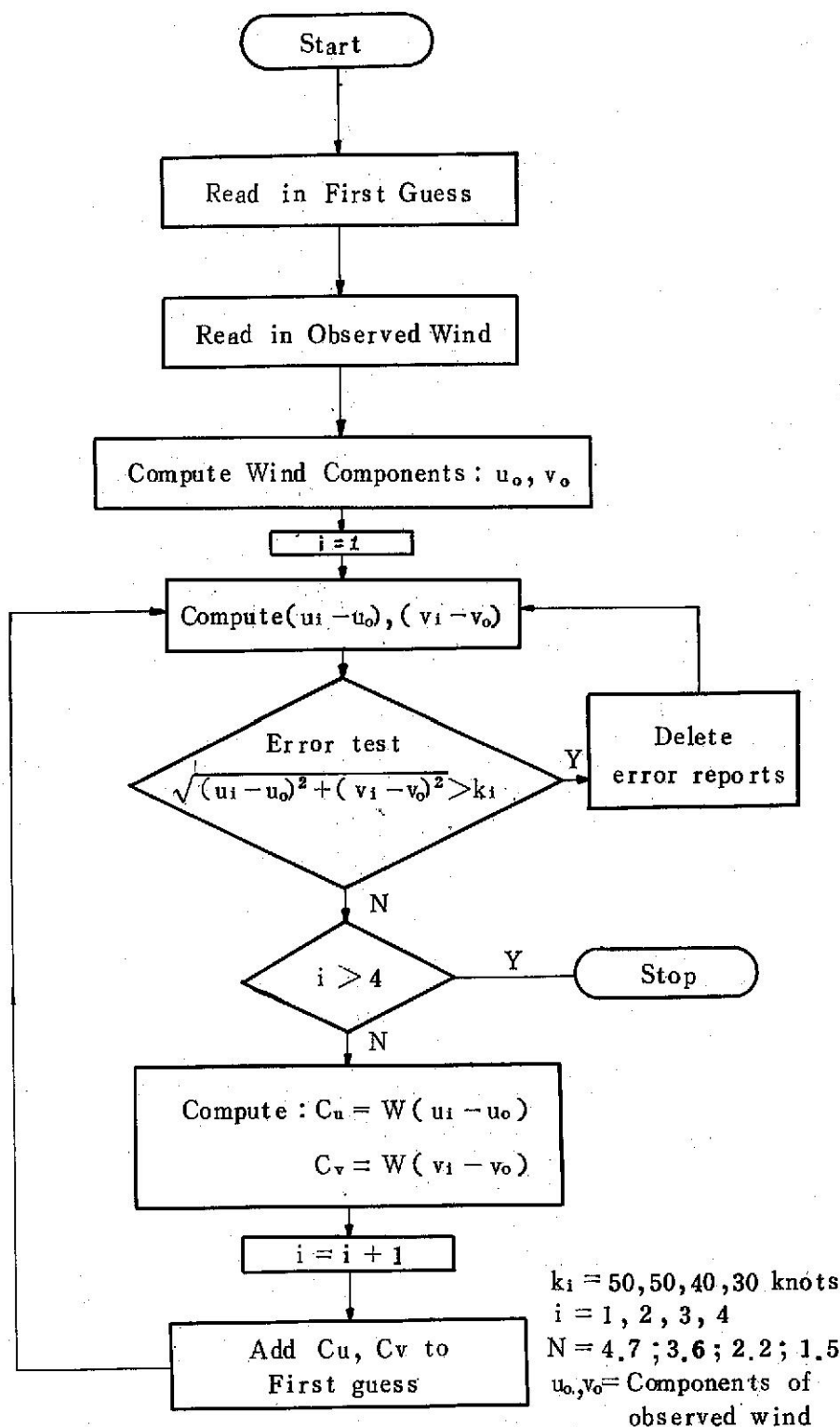


圖 1. 風場客觀分析流程圖

Fig. 1. Flow diagram of the objective analysis for wind field.

Bedient 與 Vederman (1964) 引用到熱帶地區風場的客觀分析。首先吾人利用前一時刻的網格點分析值當作初始猜測值 (First guess value)，例如吾人欲進行 1200 GMT 的風場分析，則取當天 0000 GMT 的風場分析結果當作初始猜測值，然後利用 1200 GMT 的觀測風場來連續的修正網格點上的猜測值，修正公式如下：

$$C_u = -W(u_i - u_o) \quad (1)$$

$$C_v = -W(v_i - v_o)$$

此式內 C 為網格點修正量， u_o 與 v_o 為觀測風場的分量， u_i 與 v_i 為觀測站第 i 次掃描的風分量內插值， W 係權重係數 (Weighting factor) 定義為：

$$W = \frac{N^2 - d^2}{N^2 + d^2} \quad (2)$$

此處 d 為網格點與觀測站間之距離， N 為掃描半徑，第一次掃描時取 N 為 4.7 個網格間距，如此可將大幅度的環流現象修正到網格點的初始猜測值，然後逐次減小掃描半徑，至第四次掃描時取 N 為 1.5 個網格，如此可將較小幅度的波動修正到網格點上。此分析法並可約略地檢查觀測誤差，如第一次掃描時觀測值與內插值之差異絕對值超過 50 哩/時，則該觀測值被視為錯誤而予剔除。第二、三、四次掃描的誤差判定值分別為 50 哩/時，40 哩/時及 30 哩/時。風場的客觀分析流程圖參見圖 1。

三、氣流線之自動分析

本節介紹一種利用電子計算機自動分析繪製氣流線的方法。此法係利用由風場客觀分析得到網格點上的風速分量 u, v 值，繪出與風速無關而切於瞬間風向之線 (Saucier, 1955)。這種方法曾經成功地應用在高空探空資料、地面逐時觀測和數值模式輸出資料的分析 (Whittaker, 1977)，以下分段說明此氣流線自動分析法之程序：

1. 格點資料

由風場的客觀分析，吾人得到網格點上風速分量 u, v ，在進行氣流線自動分析時，首先將風速分量常態化 (Normalize) 為所需的位移大小。在所有格點上計算位移分量，此位移分量決定所繪的流線軌跡為：

$$D_x = (u/V) * D \quad (3)$$

$$D_y = (v/V) * D$$

式中， D_x 與 D_y 為常態化後的位移分量， u 和 v 為相對於格點的風速分量， V 為風速， D 為待定的位移大小。

本文定義「格箱」為四個鄰近格點所圍成的區域，每一個格箱均附加兩個「旗子」(Flags)，第一個旗子指示是否已有流線通過此格箱，第二個旗子指示是否已有方向箭頭 (Directional Arrow) 在此格箱出現。後面將討論如何適當地使用這些旗子，以免流線和方向箭頭過於擁擠。

2. 流線之建立

(1) 開始繪流線

由經驗得知，若格箱內不曾有其他流線通過，則由此格箱內繪出的流線較為悅目。吾人以旗子設定最初的可利用格箱如圖 2 所示，採用跳格式設計可以減少開始繪流線之搜尋時間。同時，搜尋可利用格箱的先後次序是無關緊要的。

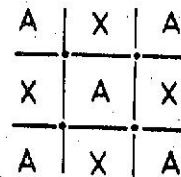


圖 2. 圓點代表網格點，格箱 A 為流線開始繪製之可利用格箱，格箱 X 則否。

Fig. 2. Grid system

(2) 繪圖

一旦找到新流線的起點，有兩個繪圖方向：第一個向前，使用如公式(3)所計算的位移分量，然後向後，使用其互補量 (Complements)，每一條流線是把一連串的点以平滑曲線連接起來而繪成的。在包含流線現在位置 (Current Position) 所在格箱的四個網格點，利用位移分量的反線性距離權重內插公式 (Inverse linear Distance-Weighted Interpolation)：

$$D_p = \sum_{i=1}^4 W_i D_i / \sum_{i=1}^4 W_i \quad (4)$$

$$W_1 = 1./[s+r]$$

$$W_2 = 1./[s+(1.-r)]$$

$$W_3 = 1./[(1.-s)+(1.-r)]$$

$$W_4 = 1./[(1.-s)+r]$$

式中 W_1 至 W_4 係鄰近 4 個網格點的距離權重， r, s 為流線現在位置 p 點在該格箱內之座標 (參見圖 3)， D_p 係流線現在位置的位移分量，利用 (4) 式可將位移分量之值內插到流線現在位置，參見圖 4 (A)，然後將內插值加到流線現在位置座標

上，計算出新的流線現在位置。同時在圖上繪出一條線平行於風的吹向，參見圖 4 (B)，若流線移入一新的格箱內，此格箱就被旗子所標示，此後不會再有流線由此格箱開始。

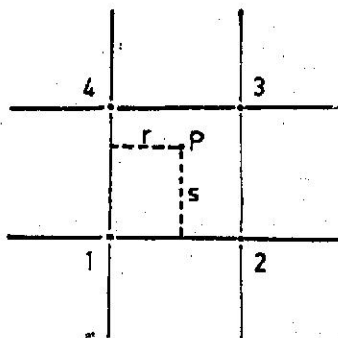


圖 3. 反線性距離權重內插法圖示
Fig. 3. Coordinate inverse linear distance-weighted interpolation.

當所繪流線進入一個不含有方向箭頭的格箱內時，繪完流線的位移後就加繪方向箭頭，方向箭頭的大小可以視圖形尺寸予以調整，就像開始繪流線的預先設定條件，只有每一個第二格子是為箭頭所預先設定的（參見圖 2）。最後，利用當時內插位移值，計算線段的斜率繪出箭頭。

至此，已計算出所有相對於格點的座標，再使用適當的轉換公式，將格點座標（行與列）轉換為繪圖機的座標系統來顯示分析結果，此繪圖機可以是平板式（flat-bed type）或滾筒式（Drum Type）繪圖機，也可以是陰極射線終端繪圖機（Graphic CRT）。當座標系統已轉換為繪圖顯示系統後，就調整位移大小，使位移不會太大，如此可避免有不勻滑的折線段，也不致太小，以確保每次疊代皆有移動，不致過於耗費計算機時間，作者選取 D 值等於網格點間距的十分之一。

(3) 終止繪流線

終止繪流線所遵循的規則如下：

- 若流線超過網格系統的側向邊界時，終止繪該流線。
- 若計算機經過 50 次或事先定好的一定次數的疊代後，仍無法顯示流線明顯位移，則終止繪該流線。
- 檢查在匯流或分流區域，流線是否過於擁擠，並避免流線沿一羣格箱後繞回原來的流線上。為進行此項檢查，每次流線進入新的格箱，就將流線座標置於一圓形表上（Circular List）

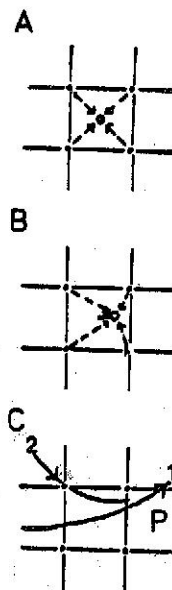


圖 4. (A) 由四個網格點風速分量內插至現在位置，圓圈顯示氣流線由網格中心位置開始。
(B) 將內插位移分量加至現在位置即得流線新的現在位置，此內插過程一直重複進行。
(C) 繪畢流線 1 後，開始繪流線 2，流線 2 在格箱 P 時太過於接近流線 1，因此終止繪製流線 2。

Fig. 4. Step-by-step diagram of streamline generation

，此表含 500 至 1000 個點，表上的新座標取代舊座標可重複使用。當流線進入一個新的格箱，其座標就與表上其他座標比較，如發現目前流線太密集（通常取 0.05 吋），則停止繪此流線，此過程示於圖 4 (c)。每當進入一個新的格箱均要搜尋此圓形表，此過程所耗的計算機時間幾乎和其餘過程之總和相同。

氣流線自動分析流程圖參見圖 5。

(4) 等風速線分析

等風速線（Isotach）為風速相同點之連線。在熱帶區域，等風速線通常採用每 5 哩/時為間隔，若分析區域位於較高緯度之噴射氣流附近，或熱帶風暴來臨時，則每 5 哩/時之間隔可能使等風速線太密集，可改用每 10 哩/時為間隔。

繪製等風速線之原理與繪製等壓線，等溫線之「無向量」分析相同（徐與胡，1976），唯等風速線可採用虛線或他色線條，以示與氣流線區別。

四、渦旋度（Vorticity）與輻散量（Divergence）之計算

吾人已計算得每個網格點上的速度分量 u, v ，

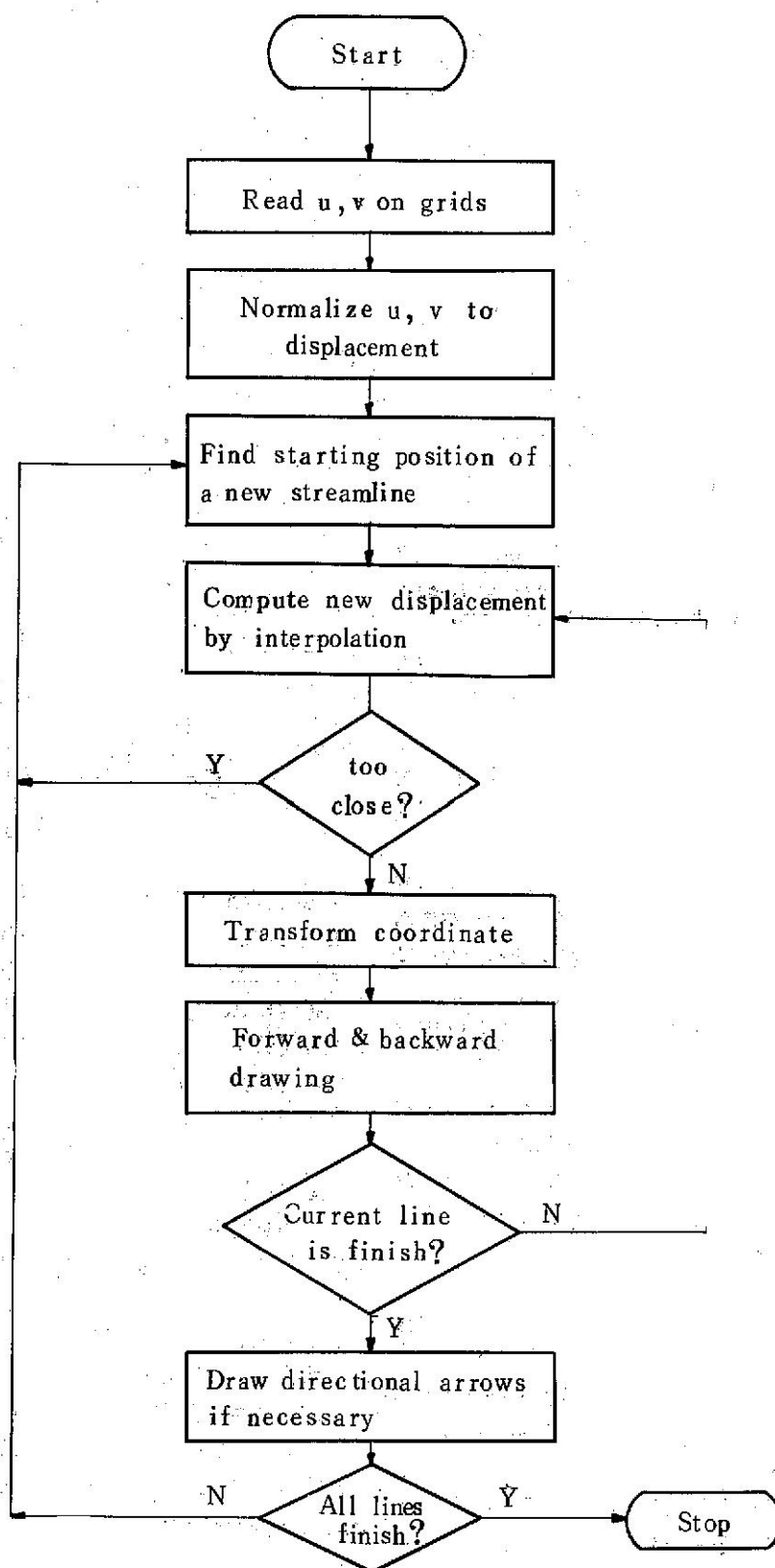


圖 5. 氣流線自動分析流程圖

Fig. 5. Flow diagram for automated streamline analysis

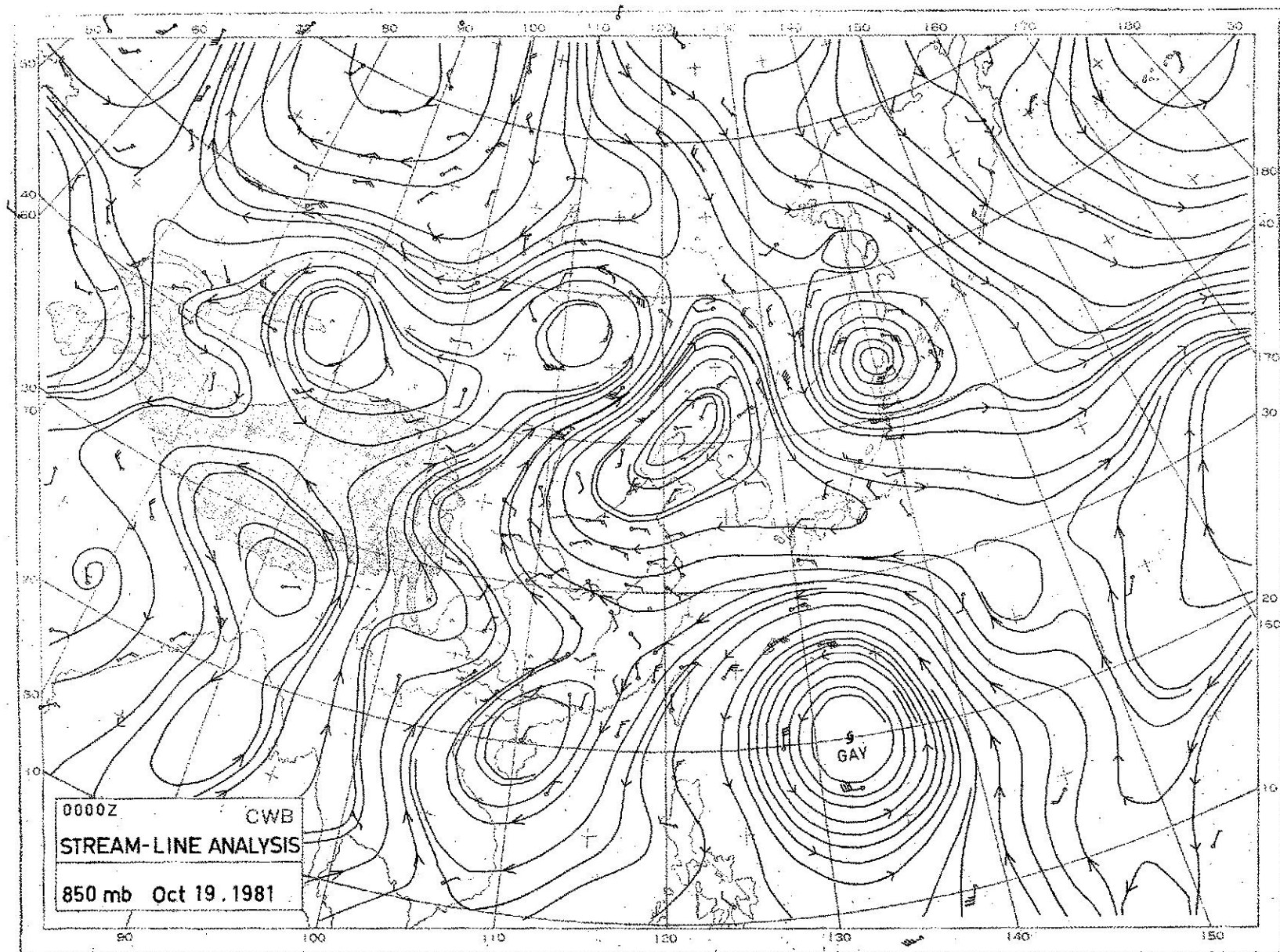


圖 6. 1981 年 10 月 19 日 800 毫巴氣流線自動分析圖
Fig. 6. 850 mb streamline analysis from radiosonde reports for
0000GMT 19 October, 1981.

依據渦旋度 (ξ) 和輻散量 (δ) 定義：

$$\begin{aligned}\xi &= \vec{k} \cdot \nabla \times \vec{v} \\ &= \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \\ &= \frac{m}{2d} [v_{i+1,j} - v_{i-1,j} + u_{i,j-1} - u_{i,j+1}] \quad (6) \\ \delta &= \nabla \cdot \vec{v} \\ &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \\ &= \frac{m}{2d} [u_{i+1,j} - u_{i-1,j} + v_{i,j+1} - v_{i,j-1}]\end{aligned}$$

可分別計算水平方向或等壓面上每一網格點氣流的渦旋度及輻散量。其中 m 為地圖投影因子，熱帶地區氣流線分析圖一般均使用麥卡特圓柱投影 (Mercator Cylindrical Projection)，中緯度地區則採用藍伯特正角圓錐投影 (Lambert Conformal Conic Projection)。

五、氣流線之基本型式

氣流線能代表大氣層的運動特性 (Kinematic Properties)，預報人員宜熟悉一般氣流線圖中的基本型式及其特性。目前確定的基本型式計有：熱帶波動 (Tropical Wave)，奇異點 (Singular Point)，漸近線，正切點，風切線以及等風速線型等，每一基本型式及其伴隨特殊的天氣現象，讀者可參見熱帶氣象學 (1976)，本文不作重複介紹。

六、實例討論

利用上述氣流線自動分析技巧，所繪製的氣流線圖實例參見圖 6 與圖 7。圖 6 係民國七十年十月十九日 850 毫巴高空氣流分析圖，資料來源經由中央氣象局電子計算機中心「氣象資料自動蒐集及處理系統」(ADAPS, Automatic Data Acquisition and Processing System, 胡, 1979)，利用 GA 小型電子計算機的即時處理系統每天二十四小時自動直接蒐集東亞及北半球地區地面、船舶及高空等各類氣象電報，經過解碼、偵錯、分類等處理後建立即時氣象資料庫，吾人由即時資料庫中取得高空 850 毫巴的風速風向觀測值，輸入風場客觀分析程式，該程式將觀測的風場內插至網格點上，網格系統係採用中央氣象局標準網格系統：以東經 120 度及北緯 30 度為參考點，X 方向取 38 個網格點，Y 方向取 23 個網格點，網格間距為 240

公里，網格系統涵蓋東亞及西太平洋。

由風場客觀分析程式計算的網格點上風速分量，再輸入至氣流線自動分析程式，最後由 Calc-omp 960 大型繪圖機將氣流線繪出。由圖 5 顯示，中度颱風蓋依 (GAY) 呈氣旋型渦流 (Cyclonic Vortex) 中心位置在北緯 20 度，東經 133 度附近，係氣流場中典型之奇異點 (Singular Points)，另一氣旋型渦流位於日本北海道東岸，此二氣旋型渦流環流結構均甚對稱，且風速均甚強。此外，在中國大陸東經 87 度，北緯 45 度及東經 112 度，北緯 47 度附近也各有一個氣旋型渦流。在山東半島及海南島附近則各有一個反氣旋型渦流 (Anti-Cyclonic Vortex)，其形狀較不對稱，且風速均較弱。此分析圖上鞍形場 (Cols) 甚多，較顯著者係位於中國華南 (115°E, 26°N)，外蒙古 (105°E, 45°N) 及青康藏高原 (90°E, 35°N) 等處，其特徵為一部分氣流趨近該區，一部分氣流遠離該區，鞍形場附近風向變化大，惟風速微弱。在中國東北 (115°E, 40°N) 附近有一氣流漸近線存在，西南方向氣流在此區輻合，附近的氣流線均沿此線互相趨近，此區所呈現之風速亦較大。菲律賓 (120°E, 18°N) 附近則有一不甚明顯的輻散區存在，鄰近的氣流線均在此區呈散開，此區的風速則較弱。

圖 7 係民國七十年十月十九日 00Z，由數值模式預測 500 毫巴 36 小時後網格點之風場，輸入氣流線分析程式所得之氣流線預測圖。中央氣象局現行作業採用的數值模式係相當正壓預報模式，其預報公式為 (蔡與胡, 1975)：

$$\begin{aligned}\nabla^2 \frac{\partial z}{\partial t} + J(z, \xi + f) &= \frac{A_0 f_0^3}{RT_0} \left[-\frac{\partial z}{\partial t} \right. \\ &\quad \left. - \frac{g}{f_0} J(z, z_g) \right] \quad (7)\end{aligned}$$

其中 T_0 為地面溫度， A_0 為地面風速與垂直平均風之比， Z_g 為地形高度， Z 為等壓面高度，(7)式只適用於一特定等壓面 P^* (Starred Level)，此特定等壓面的定義為 $A(P^*) = A^2(P)$ 時的等壓面。一般用東西方向風速求取 $A(P)$ 值，東亞區域冬天的平均值 $P^* \sim 450$ 毫巴，故吾人由(7)式預報 500 毫巴的等高線變化。然後，將網格點的高度預測值代入地轉風假設：

$$\begin{aligned}u &= -\frac{g}{f} \frac{\partial z}{\partial y} \\ v &= \frac{g}{f} \frac{\partial z}{\partial x}\end{aligned} \quad (8)$$

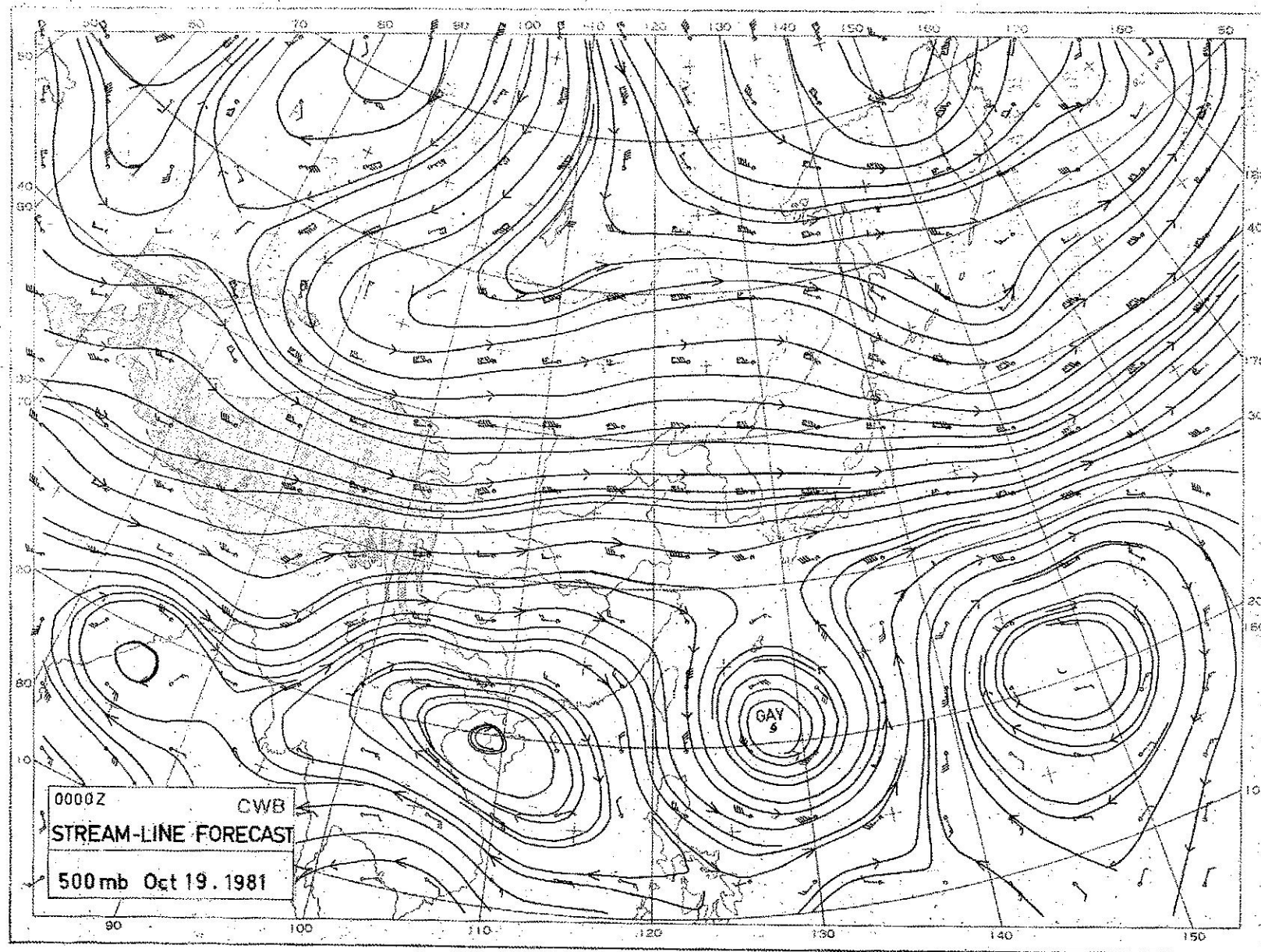


圖 7. 1981 年 10 月 19 日 500 毫巴氣流線 36 小時預測圖

Fig. 7. 500 mb streamline forecast for 0000GMT 19 October, 1981.

可計算出各網格點的預測風速分量。(前項地轉風假設引用於低緯度區並不適切,如日後中央氣象局改用初始方程式預報模式(P-E Model),則可直接得到網格點上的風速分量預測值。)

由圖7顯示氣流線與網格點風向非常吻合,蓋依颱風所呈現之氣旋型渦流三十六小時預測中心位置在 21.5°N , 129.0°E , 渦旋相當對稱且風速甚強, 20°N 緯度圈由西向東另有三個反氣旋渦流分別位於 147°E , 109°E 及 85°E 附近, 均呈橢圓形且風速較弱。北緯 30 度至 40 度係西風氣流, 風速甚強。位於 75°E , 45°N 處有一明顯的鞍形場存在, 附近風速也較弱。

850 毫巴高空氣流線分析連同客觀風場分析需計算機時間及繪圖時間約為 12 分鐘, 繪製 500 毫巴氣流線預測圖則只需約 8 分鐘(不包括數值模式計算所需時間), 而通常由一熟練之預報員繪製同一氣流線分析圖則至少需時 40 分鐘以上, 故引用此法對人力及時間之節省相當可觀。

七、結 論

本文介紹利用電子計算機自動分析氣流場, 首先由測站觀測風場經由連續修正法計算得網格點風速分量, 將此風速分量輸入氣流線分析程式, 即可繪製氣流線圖。觀念上, 氣流線的繪製過程類似於作出許多小氣塊的瞬時軌跡。氣流場分析的困難首先在於西太平洋區廣大洋面及低緯度區風場觀測報告稀少, 致使客觀分析處理困難, 由於測站少, 修正量亦少, 致使初始猜測值變成極重要, 此一困難似可由日後氣象衛星之連續觀測來克服之。其次, 在流線繪製過程中, 困難在於何處開始繪一新的流線及何時終止正在繪的一條流線, 本文介紹的方法提出一些規則來解決這些問題, 並使繪出來的圖形勻滑且能相當程度地縮短計算機時間。

最後, 作者並以民國七十年十月十九日 00Z 兩組不同的即時氣象資料, 引用此分析法分別繪製 850 毫巴的氣流分析圖及 500 毫巴的氣流線預測圖, 分析迅速結果良好, 顯示此法極具實用價值。

八、誌 謝

作者感謝中央氣象局吳局長宗堯及郭組長文鏞的大力支持, 王枝正時鼎提供寶貴資料, 蕭錫璋女

士提供具體建議並代為校稿, 徐月娟女士協助修改程式及中央氣象局電子計算機中心全體同仁的幫助, 才使本研究得以順利完成, 敬致最誠摯謝意。

參 考 論 文

1. Bedient H.A. and Vederman J., 1964: "Computer analysis and forecasting in the tropics" *Monthly Weather Review*, Vol. 92, No. 12, pp 565-577
2. Cressman G. P., 1959: "An Operational Objective analysis system" *Monthly Weather Review*, Vol 87, No. 10, pp 367-374
3. Kurihara, Y., 1961: "Accuracy of wind-aloft data and estimation of error in numerical analysis of atmospheric motion" *Journ. Met. Soc. Japan*, Vol. 39, No. 6, pp 331-345
4. Saucier, W. J., 1955: *Principles of Meteorological analysis* The University of Chicago Press, pp 305-310
5. Whittaker T. M., 1977: "Automated streamline analysis" *Monthly Weather Review*, Vol. 105, pp 786-788
6. 徐月娟與胡仲英, 1976: 「用電腦繪製天氣圖之研究」
氣象學報第二十二卷第四期, 32-38 頁
7. 熱帶氣象學, 1976: 空軍訓練司令部編印, 363 頁
8. 胡仲英, 1979: 「ADAPS 系統之研究與設計」
氣象學報第二十五卷第一期, 9-24 頁
9. 蔡清彥與胡仲英, 1975: 「以相當正壓模式研究地形的動力效果」
大氣科學第二期, 63-67 頁