

# 單經緯儀測風氣球觀測之誤差

林紹豪

## Errors in Single-Theodolite Pibal Observation Shao-Hou Ling

### Abstract

Expressions giving the errors in the balloon ascent rate, the horizontal distance, and the observed wind speed and direction are derived. It is found that the ascent rate is more sensitive to inflation errors than to variations in the mass of the balloons. The error in the horizontal distance increases with the increase of altitude and the decrease of elevation angle, and low elevation angles usually introduce serious errors. The error arising from the neglect of the earth's curvature is also investigated, and a simple correction is given. Finally, it is found that the smaller the elevation angle or/and the lighter the wind, the greater the error in the observed wind.

### 一、引 言

通常觀測高空風的方法，是在地面施放氣球，同時用光學經緯儀，無線電經緯儀，或雷達等儀器，不斷觀測氣球動向，以推算各高層的風向和風速。

氣球在空氣中，一方面上升，一方面也隨着空氣的水平方向流動而漂流。上升的快慢，對於水平方向的移動，通常可認為沒有影響。同時，因為氣球的面積不小，慣性則不大，對於氣流變動的反應十分靈敏，所以氣球的水平速度和空氣的水平速度，在實用上可認為是相等的。Perkins 會詳細討論氣球對於風的反應<sup>①</sup>，其結果亦顯示水平氣流的方向和速率，也就是風向和風速，一般可逕以氣球的水平移動方向和速率代表之。

觀測氣球動向的最簡單而且最常用的方法，是單經緯儀觀測法。用這種方法觀測，氣球的位置乃決定於高度，方位角，和高度角三個坐標。方位角和高度角，可以用經緯儀很快並且相當準確的測出來。至於高度，單單依靠一架經緯儀是無法測出的。不過，我們可以假定氣球有某一個一定的上升速度，於是根據升空的時間，便可算出它的高度。氣球在各時刻或各高度的位置測定之後，我們便可進一步算出它在水平方向的移動情形，也就是算出各高層的風向和風速。

氣球上升速度恒定的假設，是單經緯儀觀測法的特點。這可以說是很大的優點，因為它使問題簡化，使高空風的觀測可以隨時隨地很簡易的做起來。不過，這也可以說是很大的缺點，因為氣球升空時，上升速度實際上不很恒定，空氣若有比較強烈的上下流動，氣球上升速度變化更多，它的實在高度和我們所假定的可能相差很多，因此，風向風速的計算，也可能導致很大的誤差。

辦理測風氣球觀測時，可使觀測結果發生差誤的因素頗多。這些因素，有的是觀測員可以控制而使誤差達於最小的，如氣球的重量，氣球的浮力，讀數的時間，方位角，高度角等等。還有一些是觀測員無法控制的，如自然大氣中空氣的上下流動等是。對於某特殊一次的測風氣球觀測，氣球在空中的實際位置和我們所假定的究竟相差多少，除非有雙經緯儀法或其他方法的可靠紀錄可以比較，我們是無法確知的。不過，在一般情形下，各項測定值，例如球重、浮力、方位角、高度角等的可能誤差對於計算出來的各項結果，例如氣球的上升速度，水平距離，以至於最後得到的風向風速等的影響，則可以分析出來。本文所要討論的，也就是這方面的問題。

### 二、氣球上升速度

氣球的上升速度，和它的重量及浮力均有密切關係。根據亞基米德原理，氣球所受總浮力，應等於被氣球排開的空氣重量。設  $L$  表氣球的淨浮力， $W$  表球重， $\rho$  表空氣密度， $V$  表氣球體積，則總浮力為

$$L + W = \rho V \dots\dots\dots (1)$$

假定氣球內部氣體壓力和球外的氣壓相等，又假定氣球內外溫度亦相同，則根據理想氣體方程式，可知  $\rho V$  為常數，故  $L + W$  亦應為常數。再假定氣球所灌氣體並不外洩，則  $W$  恒定不變，故  $L$  亦應恒定不變。

氣球上升時，必受到空氣阻力，設為D。根據球體的風洞實驗結果，

$$D = \frac{C_D \rho A v^2}{2} \dots\dots\dots(2)$$

式中A為氣球截面積，V為氣球上升速度，C<sub>D</sub>為一與V、A、ρ、及空氣黏滯性等有關係的係數，它並不是一個不變的常數，不過在通常測風氣球的上升速度範圍內，它是一個近似的常數②。

在平衡情況下，D應等於L。L既恒定不變，故D亦應為常數。因此，若以V<sub>0</sub>、A<sub>0</sub>、ρ<sub>0</sub>代表地面附近的情況，V、A、ρ代表高空某一高度的情況，則

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = \frac{\rho_0 A_0}{\rho A} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{但 } \frac{A_0}{A} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{2/3} = \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{-2/3} \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{故 } \frac{v}{v_0} = \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{1/6} \dots\dots\dots(5)$$

由式(5)，可見氣球的上升速度應隨空氣密度的減小而增大。由地面至高約十公里處，(ρ<sub>0</sub>/ρ)<sup>1/6</sup>約增加20%③，④，故氣球的上升速度，似亦應增加此數。

實際上，氣球內的氣體，可以不斷的透過橡皮膜向外擴散，所以氣球的浮力應逐漸減小，上升速度因之亦應隨之減小。這個效應，多少可和上述的密度效應抵消一部份。許多地方許多次數的雙經緯儀觀測，例如美國陸軍通信兵團氣象勤務組在1918年間的五千次左右雙經緯儀測風觀測⑤，皆顯示氣球的上升速度除偶受到上下氣流的影響外，一般皆十分恒定。

假定空氣的密度變化可略去不計，則氣球的上升速度公式，可簡單推導如下：

因為A和V<sup>2/3</sup>成正比，而當ρ不變時，V係與L+W成正比，故由式(2)，可得

$$L = C v^2 (L+W)^{2/3} \dots\dots\dots(6)$$

式中C是好幾個常數或近似常數的乘積，故為一新的近似常數。

解式(6)，即得

$$v = \frac{KL^{1/2}}{(L+W)^{1/3}} \dots\dots\dots(7)$$

式中K為另一近似常數，其值需根據雙經緯儀法或其他方法的可靠紀錄定之。英國的測風氣球上升速度，即採用此式⑥。

為求與實際情況較為符合，我們可將式(7)改寫為

$$v = \frac{KL^x}{(L+W)^y} \dots\dots\dots(8)$$

式中之k、x、y皆為常數，需由實際觀測結果決定之。美國和我國皆採用此式，各常數係根據美軍通信兵團在1918年前後的多次雙經緯儀觀測結果定下的⑦，⑧。如L及W皆以克為單位，v以每分鐘若干公尺為單位，則適用於普通之充氫測風氣球各常數為：K=72，x=0.63，y=0.42。

因大氣實際情況時有變化，故計算出來的上升速度和實際的上升速度，隨時隨地，都可能有頗大的差別。這種差別除非有實際的可靠高度紀錄可資比較，實不易獲悉。不過，由於淨浮力L及球重W的不準確所引起的誤差，則可簡單的分析出來：

先假定W為定值，則當L有ΔL之變化或誤差時，v之變化或誤差為

$$\Delta v_L = \left(\frac{\partial v}{\partial L}\right)_w \Delta L \dots\dots\dots(9)$$

若採用我國所用公式，則

$$\Delta v_L = 72 \left( \frac{0.63}{L^{0.37} (L+W)^{0.42}} - \frac{0.42L^{0.63}}{(L+W)^{1.42}} \right) \Delta L \dots\dots\dots(10)$$

故因L的誤差而生v的百分誤差為

$$\% \Delta v_L = \frac{\Delta v}{v} \times 100 = \left( \frac{63}{L} - \frac{42}{L+W} \right) \Delta L \dots\dots\dots(11)$$

如要知道v的百分誤差 $\% \Delta v_L$ 和L的百分誤差 $\% \Delta L$ 之關係，可寫為

$$\% \Delta v_L = \left( 0.63 - \frac{0.42L}{L+W} \right) \% \Delta L \dots\dots\dots(12)$$

試以通常測風氣球所用的標準條件為代表，即W=30克，L=154克，v=180 每分鐘公尺；或W=100克，L=503克，v=280每分鐘公尺，由式(12)計算所得結果皆為：

$$\% \Delta v_L = 0.28 \% \Delta L \dots\dots\dots(13)$$

是即表示，由氫氣之差誤所引起的上升速度百分誤差，約為淨浮力百分誤差之三成。

同樣，可求出因球重之差誤 $\Delta W$ 所生之上升速度誤差：

$$\Delta v_W = \left( \frac{\partial v}{\partial W} \right)_L \Delta W, \dots\dots\dots(14)$$

$$\text{即 } \Delta v_W = - \frac{72 \times 0.42L^{0.63}}{(L+W)^{1.42}} \Delta W, \dots\dots\dots(15)$$

$$\text{故 } \% \Delta v_W = - \frac{42}{(L+W)} \Delta W, \dots\dots\dots(16)$$

$$\text{或 } \% \Delta v_W = - \frac{0.42W}{(L+W)} \% \Delta W. \dots\dots\dots(17)$$

如同樣以上述的通常測風氣球條件代入，則得

$$\% \Delta v_W = -0.07 \% \Delta W. \dots\dots\dots(18)$$

是乃表示，由球重之不準確所引起的上升速度百分誤差，尚不及球重百分誤差的十分之一。

如比較(13)和(18)兩結果，可知球重和淨浮力兩種誤差對於氣球上升速度誤差的影響，浮力誤差較球重誤差靈敏四倍。因為這個原因，同時因為氣球的重量平常都相當準確，而且容易稱得準確，但是浮力則比較不容易量得準確，所以氫氣球的時候，對於浮力的準確度，要特別小心。

### 三、水平距離

設氣球高度為Z，高度角為 $\theta$ ，則由氣球在地平面上的射影點到經緯儀安置點的距離，即所謂氣球的水平距離，應為

$$R = Z \cot \theta. \dots\dots\dots(19)$$

由氣球的水平距離R及方位角 $\phi$ ，可繪出氣球在地面上或與其平行的其他平面上之射影路徑圖，或簡稱路徑圖。路徑圖繪出來後，便可算出各時間，間接也就是各高度的風向和風速。所以，要結果好，R和 $\phi$ 都應該十分準確。

$\phi$ 是直接讀自經緯儀的，所有的誤差都是來自儀器本身的毛病和觀測員的疏誤。至於R，則和 $\theta$ 及Z都有關係。茲將R的誤差分析如下：

在某高度Z時，因高度角誤差 $\Delta \theta$ 所生的水平距離誤差為

$$\Delta R_\theta = \left( \frac{\partial R}{\partial \theta} \right)_Z \Delta \theta. \dots\dots\dots(20)$$

故由式(19)，可得

$$\Delta R_\theta = -Z \csc^2 \theta \Delta \theta. \dots\dots\dots(21)$$

由式(21)觀之，可知R之誤差（指絕對值）隨Z之增高而直線增加。同時， $\theta$ 愈小，R誤差愈大；當 $\theta$ 很小的時候，R的誤差可能很大。假如Z很高而 $\theta$ 很小，則情形最不好。試舉一個極端的例子，如Z=10公里， $\theta=5$ 度， $\Delta \theta = \pm 0.1$ 度 =  $\pm 0.001745$ 弧度，則

$$\Delta R_\theta = \pm 10 \times (11.47)^2 \times 0.001745 = \pm 2.30 \text{ 公里}$$

誤差之大，殊堪驚人。自然，這只是一個極端的例子，在平常情況下，即高度不太高，高度角不太小的時候，若觀測小心，儀器正常，則因 $\theta$ 的誤差所引起的R誤差，通常不過幾公尺至幾十公尺而已。

茲假定 $\Delta\theta = \pm 0.1^\circ$ 度，用式(21)計算幾個例子，表列如下，以見一斑：

$\Delta\theta$	$\pm 0.1^\circ$														
	2000					5000					10000				
Z, m															
$\theta$	60°	30°	20°	10°	5°	60°	30°	20°	10°	5°	60°	30°	20°	10°	5°
$\Delta R_\theta, m$	$\pm 5$	$\pm 14$	$\pm 30$	$\pm 118$	$\pm 460$	$\pm 12$	$\pm 35$	$\pm 75$	$\pm 289$	$\pm 1149$	$\pm 23$	$\pm 70$	$\pm 150$	$\pm 579$	$\pm 2297$

同樣的，我們可以分析單獨由高度的誤差 $\Delta Z$ 所引起的水平距離誤差 $\Delta R_z$ ：

$$\text{因 } \Delta R_z = \left( \frac{\partial R}{\partial Z} \right)_\theta \Delta Z, \dots\dots\dots (22)$$

$$\text{故由(19), 得 } \Delta R_\theta = \cot\theta \Delta Z \dots\dots\dots (23)$$

可見 $\Delta R_z$ 並不直接隨高度之增而增，而是與 $\cot\theta$ 成正比。所以 $\theta$ 愈小， $R_z$ 愈大。這和 $\Delta R_\theta$ 的情形相似，都顯示着 $\theta$ 太小的時候，誤差太大，不切實用。

Z與 $\Delta R_z$ 雖不直接發生關係，但 $\Delta Z$ 則和 $\Delta R_z$ 直接發生關係。 $\Delta Z$ 的大小通常和氣球上升速度的誤差，或是球重及淨浮力誤差，與及空氣密度的變化等等有關，所以氣球升空愈久，也就是Z愈大， $\Delta Z$ 應該也愈大。因此， $\Delta R_z$ 實際上也將隨Z之增而增，與 $\Delta R_\theta$ 的情形又是相似。

Z的錯誤，一方面可引起R的錯誤，以致由是而算出的風向風速失真，另一方面，也將使我們張冠李戴的把別一高度的風向風速當做是此一高度的紀錄。各高層的風向風速變化若小，這還沒有甚麼大關係；變化若大，相差就多了。

在自由大氣中，氣球的上升速度常因環境之影響而起變化，故根據公式計算出來的v值及Z值，誤差有時會相當大。茲為明瞭Z的誤差對於R的影響，假定Z僅有2%的誤差，而根據式(23)，計算在不同的 $\theta$ 和Z的情況下之 $\Delta R_z$ 值，表列於後，以見一斑：

Z, m	2000					5000					10000				
	$\Delta Z, m$					$\Delta Z, m$					$\Delta Z, m$				
$\theta$	60°	30°	20°	10°	5°	60°	30°	20°	10°	5°	60°	30°	20°	10°	5°
$\Delta R_z, m$	$\pm 23$	$\pm 69$	$\pm 110$	$\pm 227$	$\pm 457$	$\pm 58$	$\pm 173$	$\pm 275$	$\pm 567$	$\pm 1143$	$\pm 115$	$\pm 346$	$\pm 550$	$\pm 1134$	$\pm 2286$

如將 $\Delta\theta$ 和 $\Delta Z$ 合併討論，則因 $\Delta\theta$ 與 $\Delta Z$ 並無若何關連，故由此兩誤差所導致的R誤差，可根據誤差傳播定理 (Theory of the Propagation of Errors) 寫為

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta R_\theta)^2 + (\Delta R_z)^2}, \dots\dots\dots (24)$$

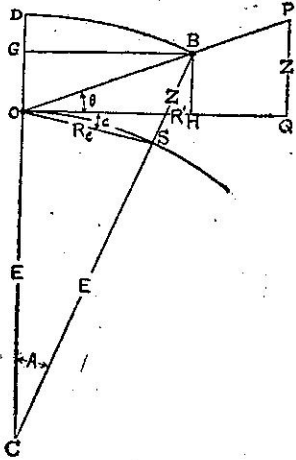
$$\text{或 } \Delta R = \csc\theta \sqrt{Z^2 \csc^2\theta (\Delta\theta)^2 + \cos^2\theta (\Delta Z)^2} \dots\dots\dots (25)$$

例如，Z=5000m.,  $\theta=30^\circ$ ,  $\Delta Z = \pm 100m.$ ,  $\Delta\theta = \pm 0.1^\circ$ , 則 $\Delta R = \sqrt{(35)^2 + (173)^2} = \pm 177m.$

#### 四、地面彎曲的影響

在測風氣球觀測中，吾人係假定地面為平坦的。所謂水面距離  $R = Z \cot\theta$ ，便是氣球在此假定的平面上的射影點到經緯儀所在點的距離。這種平坦地面的假定，在一般的測風氣球觀測問題中，因為R通常不太大，誤差至為微小，故相當完滿，可是，若R相當大，特別是在Z高 $\theta$ 小的情況下，地面不平的假定，便會使算出的R比實際的距離大，因此算出的風也大於實際的風，誤差有時可達百分之二十<sup>⑥</sup>。

如圖，設C為地心，E為地球半徑，弧OS為地球表面的一部份，O為經緯儀安置點，B為氣球位置，S為氣球在地面上的射影點，Z=SB=QP為氣球高度， $\theta$ 為觀測所得之高度角， $R' = OQ = Z \cot\theta$ 為假定地面平坦時算出來的水平距離，弧DB則為實際的距離。



(第一圖)

通常Z遠小於E，故弧DB和弧OS實相差甚微。又因弧OS常遠小於E，角A常甚小，故弧OS和弦OS亦即R<sub>0</sub>，實可認為相等。

Gustafson<sup>⑨</sup> 和 Kessler<sup>⑩</sup> 曾以 R<sub>0</sub> 為準確的距離，Clem 諸氏<sup>⑪</sup> 則以弧DB為準確距離，各發表訂正公式及圖表。筆者認為，最少在測風氣球問題中，以 R<sub>0</sub> 為準確距離固已甚佳，如令 c = ∠SOQ，則 R<sub>0</sub> 與 Zcot(θ+c) 在實用上可謂相等，故可逕寫為

$$R_0 = Z \cot(\theta + c) \dots \dots \dots (26)$$

因此，c 可視為θ的訂正角。如求出c，可先加之於θ，即R<sub>0</sub>可立即求出，如平常之自Z與θ計算R然。此項訂正法較上舉諸作者所發表之方法均簡單，而其準確度在實用上並無遜色。

c之求法如下：

由直角三角形OHB，得

$$\frac{HB}{OH} = \tan\theta \dots \dots \dots (27)$$

再由直角三角形CGB，得

$$GB = OH = (CS + SB) \sin A = (E + Z) \sin A, \dots \dots \dots (28)$$

$$\text{且 } \cot A = \frac{CO + OG}{GB} = \frac{E + HB}{OH} \dots \dots \dots (29)$$

於是，由(27)、(28)、及(29)、可得

$$\cot A = \frac{E}{(E+Z) \sin A} + \tan\theta \dots \dots \dots (30)$$

試以 SinAcosθ 乘式(30)的兩邊，並移項整理，即得

$$\cos(\theta + A) = \frac{E \cos\theta}{E + Z}, \dots \dots \dots (31)$$

$$\text{故 } A = \arccos \frac{E \cos\theta}{E + Z} - \theta \dots \dots \dots (32)$$

$$\text{但 } c = 90^\circ - (90^\circ - \frac{A}{2}) = \frac{A}{2}, \dots \dots \dots (33)$$

$$\text{故得 } c = \frac{1}{2} \arccos \frac{E \cos\theta}{E + Z} - \theta \dots \dots \dots (34)$$

若採用 E = 6371229 公尺<sup>⑫</sup>，則由已知的θ和Z，便可算出c。此項c值，可預先算好，製成圖表，則應用較為便利。茲計算數例，表列於下，以見一斑：

Z	5000m				10000m				15000m			
	20°	15°	10°	5°	20°	15°	10°	5°	20°	15°	10°	5°
c	3.7'	5.0'	7.5'	14.7'	7.4'	9.9'	14.9'	28.2'	11.0'	14.8'	22.1'	40.7'

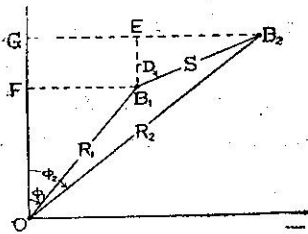
表中的c值都算到0.1分，實在這只對於繪製訂正圖表的時候有用，若直接用為訂正值，則0.1分實無意義，因為它比θ的觀測誤差還要小。此外，由上表所列，也可看出，只有在Z很高，θ很小的時候，c才比較大。若Z不太高或θ不太小，c實微不足道，無訂正之必要。一般言之，Z要在五千公尺以上，θ要在20度以下，才需要求出c來訂正θ。

### 五、風速及風向

由氣球高度Z和高度角θ（必要時可先加以訂正角c），可算出水平距離R。R算出後，再根據方位角的觀測

值 $\phi$ ，便可繪下氣球的射影位置。

如圖，設在某時刻的氣球位置為 $B_1$ ， $\phi_1$ 為其方位角， $R_1$ 則為其水平距離。隔若干時間 $t$ (例如二分鐘)後，氣球位置設為 $B_2$ ，此時的方位角為 $\phi_2$ ，水平距離為 $R_2$ 。在 $t$ 時間內，氣球在水平方向的平均移動情況，可由 $B_1B_2=S$ 明之。故 $f = \frac{S}{t}$ —即為所求之風速； $S$ 之方向，如 $\angle EB_1B_2 = D$ ，或習慣上用 $(180^\circ + D)$ ，即為所求之風向。



(第二圖)

因 $\angle B_1OB_2 = \phi_2 - \phi_1$ ，故由餘弦定律，得

$$S = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)} \dots\dots\dots(35)$$

$R_1$ 、 $R_2$ 、 $\phi_1$ 、及 $\phi_2$ 的誤差，對 $S$ 均有影響。試微分(35)式，即知因 $\Delta R_1$ 所引起的 $S$ 誤差為

$$\Delta S_{R_1} = \left(\frac{\partial S}{\partial R_1}\right) \Delta R_1 = \frac{R_1 - R_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)}{S} \Delta R_1 \dots\dots\dots(36)$$

同理，可知

$$\Delta S_{R_2} = \frac{R_2 - R_1 \cos(\phi_2 - \phi_1)}{S} \Delta R_2 \dots\dots\dots(37)$$

$$\Delta S_{\phi_1} = -\frac{R_1R_2 \sin(\phi_2 - \phi_1)}{S} \Delta \phi_1 \dots\dots\dots(38)$$

$$\Delta S_{\phi_2} = \frac{R_1R_2 \sin(\phi_2 - \phi_1)}{S} \Delta \phi_2 \dots\dots\dots(39)$$

綜合的 $S$ 誤差，可由下式算出：

$$\Delta S = \sqrt{(\Delta S_{R_1})^2 + (\Delta S_{R_2})^2 + (\Delta S_{\phi_1})^2 + (\Delta S_{\phi_2})^2} \dots\dots\dots(40)$$

以 $t$ 除 $\Delta S$ ，即得風速的誤差 $\Delta f$ 。

風向的誤差，可用 $\angle EB_1B_2 = D$ 的誤差 $\Delta D$ 表示之。由圖，知

$$\tan D = \frac{EB_2}{EB_1} = \frac{GB_2 - GE}{OG - OF} \dots\dots\dots(41)$$

$$\text{故 } D = \arctan \frac{R_2 \sin \phi_2 - R_1 \sin \phi_1}{R_2 \cos \phi_2 - R_1 \cos \phi_1} \dots\dots\dots(42)$$

微分(42)式，即知因 $\Delta R_1$ 所引起的 $D$ 誤差為

$$\Delta D_{R_1} = \left(\frac{\partial D}{\partial R_1}\right) \Delta R_1 = \frac{R_2 \sin(\phi_2 - \phi_1)}{S^2} \Delta R_1 \dots\dots\dots(43)$$

同理，可得

$$\Delta D_{R_2} = -\frac{R_1 \sin(\phi_2 - \phi_1)}{S^2} \Delta R_2 \dots\dots\dots(44)$$

$$\Delta D_{\phi_1} = \frac{R_1^2 - R_1 R_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)}{S^2} \Delta \phi_1 \dots\dots\dots(45)$$

$$\Delta D_{\phi_2} = \frac{R_2^2 - R_1 R_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)}{S^2} \Delta \phi_2 \dots\dots\dots(46)$$

風速及風向之綜合誤差，亦可用圖解方法明其大概。試以氣球射影位置為中心， $2\Delta R$ 為長， $2R\Delta\phi$ 為寬，作一矩形，是為誤差矩形。若原來的 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\phi$ 、 $\Delta Z$ 諸誤差值皆係標準誤差(Standard errors)，則導出的 $\Delta R$ 等亦為標準誤差。某量 $X$ 之標準誤差如為 $\pm x$ ，則測得之 $X$ 值與正確之 $X$ 值相差在 $\pm x$ 以內的或然率約為0.683，在 $\pm 2x$ 以內的或然率則約為0.954。故真正的氣球射影實在能出現於上述誤差矩形內的或然率，約為 $(0.683)^2 = 46.6\%$ 。若將誤差矩形各邊皆加倍，亦即各誤差皆以其標準誤差的二倍表示，則氣球射影實在能出現於此矩形內的或然率，可有 $(0.954)^2 = 91.0\%$ 。

先以原始的氣球射影位置 $B_1$ 為中心，作一誤差矩形。次以 $t$ 時間後的氣球射影位置 $B_2$ ，再作一誤差矩形。由此兩矩形的位置和大小，便可估計或量出，由第一矩形任何一點到第二矩形任何一點可能有的最短和最長距離各若干，以判斷測得風速的誤差範圍。同樣的，可估計或量出由第一矩形任何一點到第二矩形任何一點的可能最

偏右或最偏左方向，以判斷測得風向的誤差範圍。

不論解析法或圖解法，都顯示 $\Delta S$ 和 $\Delta D$ 的大小，與 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 等量及它們的誤差值均有直接關係。同時，因為 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 諸值與風速和風向有關，故 $\Delta S$ 和 $\Delta D$ 與風速風向也有關係。

一般言之，當 $Z$ 大， $\theta$ 小時， $R$ 大， $\Delta R$ 亦大，風速和風向的誤差都比較大。風大的時候， $S$ 大，則求出的風速風向，誤差常較小。反之，若風力小， $S$ 小，則求出的風速風向，誤差常較大。當風力輕微， $S$ 很小，致前後兩個誤差矩形有一部份互相重疊，則任何的方向都可能量出；換句話說，任何量出的風向，都靠不住。此外， $S$ 的方向對結果亦有影響。若 $S$ 與 $R$ 近於垂直，則風速誤差較小，風力大的時候，誤差尤小。若 $S$ 與 $R$ 近於平行，則風速誤差常較大，風速增大時，誤差也不如何減少。

總而言之，最不利的情況有二，一為高度角太低，一為風力微弱，兩者之中若碰到其一，觀測的結果便相當不好，若兩者同時碰到，則結果自更糟糕。若地面附近風力頗強，而愈高愈弱，便可能碰到高度角既小，風力又微弱的情況。補救的辦法，惟有改用升高較快的氣球，以避免太低的高度角而已。

### 參 考 文 獻

- (1) D. T. Perkins, "The Response of Balloons to the Wind", Bull. Amer. Met. Soc., Vol. 33 (1952), pp. 135-139.
- (2) Meteorology 206 Syllabus, the Univ. of Chicago(1951).
- (3) W. E. K. Middleton and A. F. Spilhaus, "Meteorological Instruments," (1953), p. 172.
- (4) E. Kleinschmidt, "Handbuch der Meteorologischen Instrumente und ihrer Auswertung," (1935), p. 447.
- (5) R. A. Millikan, "Some Scientific Aspects of the Meteorological Work of the U. S. Army," U. S. Monthly Weather Review, Vol. 47 (1919), pp. 210-215
- (6) B. J. Sherry and A. T. Waterman, "The Millitary Meteorological Service in the U. S. during the War," U. S. Mon. Weather Rev., Vol. 47 (1919), pp. 215-222.
- (7) B. J. Sherry, "The Rate of Ascent of Pilot Balloon," U. S. Mon. Weather Rev., Vol. 48 (1920), pp. 692-694.
- (8) L. H. Clem, et al., "Correction of Upper-Level Wind Computations for Effect of Earth's Curvature", Bull. Amer. Met. Soc., Vol. 35 (1954), pp. 357-362.
- (9) A. F. Gustafson, "The Error in Rawin Computations due to Neglecting the Earth's Curvature," Bull. Amer. Met. Soc., Vol. 35 (1954), pp. 295-300.
- (10) E. Kessler, "Curvature Corrections for Radiowind Reports," Bull. Amer. Met. Soc., Vol. 35 (1954), pp. 328-330.
- (11) Smithsonian Meteorological Tables, 6th Ed. (1951), p. 481.

### 氣象學報訂購辦法

- 一、本學報係限閱性質，以贈送各有關氣象單位團體，促進氣象學術之研究為目的。
- 二、個人如欲訂購，可報請服務之單位，備文證明，連同價款，逕寄本社，當按址寄送所需之學報。
- 三、本學報每期暫收成本費新臺幣伍元，郵票十足通用。

### 氣象學報徵稿啓事

本學報長期徵收稿件，歡迎各方踴躍惠稿，惟為配合出版時期起見，惠稿最好於二、五、八、十一等月，月中以前寄達，以便及時刊載，而免積壓，敬請惠稿諸先生注意。