

台风蛇行摆动路径的成因分析

丁金才 唐新章

(上海中心气象台)

提 要

本文从台风运动方程一般解的形式,导出了台风产生自由蛇行摆动的判据,提出了台风自由蛇行摆动的成因是台风内力、台风的初始速度和环境气压场作用于台风整体的平均气压梯度力三者共同作用的结果。并指出在某些特定条件下,其摆动仅由台风内力所致。最后通过二个实例的拟合计算予以证明。

一、引 言

台风的蛇行摆动大致可分二种。一种是强迫蛇行摆动。当台风在流场多变的环境中移动时,移到不同位置因受到不同方向基本气流的引导使台风路径出现摆动,最后形成蛇行路径。由于这类蛇行摆动的成因显然是变化的流场强迫作用造成的,而且摆动的周期等时性不明显,振幅大小不一,因此本文不予讨论。另一种是自由蛇行摆动。当台风在流场少变的环境中移动时,在一定的条件下,也有可能出现蛇行摆动路径。由于在这种情况下,环境流场对台风移动的强迫作用不明显,因此称为自由蛇行摆动。这类摆动周期的等时性明显,振幅也较大。台风自由蛇行摆动路径是台风疑难路径之一,常给日常预报带来困难。本文就对这类路径的成因进行分析讨论。

关于台风自由蛇行摆动的成因,已有不少文章讨论过,大多数观点是归因于台风内力的作用^[1-4],有的认为台风的自由蛇行摆动应发生在均压场或相反引导场中^[5,6]。本文从台风运动方程的一般解出发,导出了台风在稳定气压场中自由蛇行摆动的判据,并认为文献[1-4]中的结论仅是二种特例。一般来说,台风自由蛇行摆动的成因,除了台风内力外,主要地还与环境气压场作用于台风整体的平均气压梯度力和台风的初始速度有关。至于台风内力的作用,在不同情况下,可能增大,也可能减小台风自由蛇行摆动的振幅。最后,本文对5904号台风和8211号台风的蛇行摆动路径进行了拟合计算,得到了较为满意的结果。

二、台风运动方程一般解的分析

台风中心移动的微分方程可写成

1983年10月24日收到,1984年3月12日收到再改稿。

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} - f \frac{dy}{dt} = P_x + I_x \\ \frac{d^2y}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} = P_y + I_y \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$P_x = -g \frac{\partial \bar{z}}{\partial x}, \quad P_y = -g \frac{\partial \bar{z}}{\partial y}$$

为环境气压场作用于台风整体的平均气压梯度力的二个分量。

$$I_x = -2\Omega \cos \phi \left(\bar{\omega} - \frac{r_0}{3R} \bar{v}_r \right)$$

$$I_y = \frac{2r_0}{3R} \Omega \cos \phi \bar{v}_\lambda$$

为台风内力的分量表达式^[1,4], 式中 $\bar{\omega}$, $\bar{v}_r$ 和 $\bar{v}_\lambda$ 分别为台风整体范围的平均上升气流速度、径向速度和切向速度, r_0 为台风环流半径, R 为地球半径。由于 $\bar{\omega} \ll \bar{v}_\lambda$, $\bar{v}_r \ll \bar{v}_\lambda$, 因此 $I_x \approx 0$ 。现假定在 P_x , P_y , I_y 和 f 为常数时解方程(1), 并令初始条件为 $t = 0$ 时, $x = x_0$, $y = y_0$; $u = u_0$, $v = v_0$ 。则方程(1)的一般解为

$$\begin{cases} u = \frac{dx}{dt} = A \cdot \sin(ft + \theta) + \frac{P_y + I_y}{f} \\ v = \frac{dy}{dt} = A \cdot \cos(ft + \theta) - \frac{P_x}{f} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = -\frac{A}{f} \cdot \cos(ft + \theta) + \frac{P_y + I_y}{f} t + c \\ y = \frac{A}{f} \cdot \sin(ft + \theta) - \frac{P_x}{f} \cdot t + d \end{cases} \quad (3)$$

(2)式为台风中心的速度方程, (3)式为台风中心的位移方程。式中右边的第一项是台风移动的摆动项, 第二项是台风移动的平移项。式中的积分常数

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{\left(u_0 - \frac{P_y + I_y}{f}\right)^2 + \left(v_0 + \frac{P_x}{f}\right)^2} \\ \theta &= \text{tg}^{-1} \left[\left(u_0 - \frac{P_y + I_y}{f}\right) / \left(v_0 + \frac{P_x}{f}\right) \right] \\ c &= x_0 + \frac{1}{f} \left(v_0 + \frac{P_x}{f}\right) \\ d &= y_0 - \frac{1}{f} \left(u_0 - \frac{P_y + I_y}{f}\right) \end{aligned}$$

若假定 P_x 、 P_y 相对应的地转风即基本流场对台风的地转引导气流为

$$u_g = \frac{P_y}{f}, \quad v_g = -\frac{P_x}{f},$$

则积分常数 A 又可写成

$$A = \sqrt{\left(u_0 - u_g - \frac{I_y}{f}\right)^2 + (v_0 - v_g)^2}$$

下面分三种情况讨论:

1. 等速直线运动

若初始速度 $u_0 = u_g + \frac{I_y}{f}$, $v_0 = v_g$ 时, 则有 $A = 0$, 即(3)式的摆动项为零, 因此可简化成一匀速直线运动方程

$$\begin{cases} x = u_0 t + c \\ y = v_0 t + d \end{cases} \quad (4)$$

这说明当台风的初始速度满足这一条件时, 台风的运动状态保持不变, 仍以初始速度作匀速直线运动。

2. 自由蛇行摆动路径

当 $0 < A \leq \max\left(\left|\frac{P_y + I_y}{f}\right|, \left|\frac{P_x}{f}\right|\right)$ 时, 则台风在沿引导气流方向移动的同时, 作自由蛇行摆动, 如图 1 所示(其中 $\max(a, b)$ 表示取 a, b 二个数中的大者)。为了说明问题, 现以台风在西北象限方向上的蛇行摆动路径为例进行叙述。由于台风蛇行摆动的基本移动方向应与环境气压场的地转引导气流一致, 因此台风沿西北象限方向移动时, 应有下列关系式: $u_g \leq 0, v_g \geq 0$, 即

$$\frac{P_x}{f} \leq 0, \quad \frac{P_y + I_y}{f} \leq 0.$$

①若台风蛇行摆动的基本移动方向在 W-NW 范围内, 则应有 $|u_g| \geq v_g$; 且 $u < 0$, 而 v 可以在正、负之间变化, 根据(2)式

$$u = A \cdot \sin(ft + \theta) + \frac{1}{f}(P_y + I_y)$$

可知, 只有当

$$0 < A \leq \left|\frac{1}{f}(P_y + I_y)\right|$$

即

$$0 < \sqrt{\left(u_0 - u_g - \frac{I_y}{f}\right)^2 + (v_0 - v_g)^2} \leq \left|u_g + \frac{I_y}{f}\right| \quad (5)$$

时才能保证 $u < 0$ 。(5)式就是台风在 W-NW 方向上蛇行摆动的判据。

②若台风自由蛇行摆动的基本方向为 NW-N, 同理可得判据

$$0 < A \leq \left|\frac{P_x}{f}\right|$$

$$0 < \sqrt{\left(u_0 - u_g - \frac{I_y}{f}\right)^2 + (v_0 - v_g)^2} \leq |v_g| \quad (6)$$

(5)、(6)式表示台风自由蛇行摆动应是台风的内力、初始速度和环境气压场作用于台风整

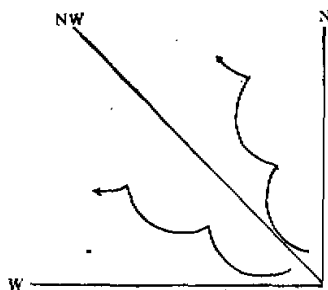


图 1 西北象限方向蛇行摆动路径

体的平均气压梯度力共同作用的结果。其摆动的振幅为

$$S = \frac{A}{f} = \frac{1}{f} \sqrt{\left(u_0 - u_g - \frac{I_y}{f}\right)^2 + (v_0 - v_g)^2} \quad (7)$$

它与 $\sin \phi$ 成反比,即纬度越低,摆动的振幅越大;与 $|u_0 - u_g|$ 、 $|v_0 - v_g|$ 的值成正比,即台风的初速度和基本流场对台风的地转引导气流速度的差值越大,台风蛇行摆动的振幅亦越大。当然其差值不能太大,还要受(5)、(6)式的限制。

关于台风内力对台风自由蛇行摆动的作用在不同情况下是不同的。因一般来说台风内力较小,而 $|u_0 - u_g|$ 的值相对较大,故有 $|u_0 - u_g| > \frac{I_y}{f}$ 。因此,若 $u_0 - u_g > 0$, 则 I_y 越大, $\left[(u_0 - u_g) - \frac{I_y}{f}\right]^2$ 就越小,振幅 $\frac{A}{f}$ 也越小。这表示若台风以较小的初速度进入一个相对较强的稳定气压场时,台风的内力是阻碍台风作自由蛇行摆动的。相反,若 $u_0 - u_g \leq 0$, 则 I_y 越大,蛇行摆动的振幅亦越大。这说明当台风以较大的初速度进入一个相对较弱的气压场时,台风的内力有助于台风作自由蛇行摆动。

为了更好地说明这三者的作用,现分三种特例情况进行讨论。

①若 $I_x = I_y = 0$, 即台风内力可以忽略不计,则(3)式中的

$$A = \sqrt{(u_0 - u_g)^2 + (v_0 - v_g)^2}.$$

若 $0 < A \leq \max(|u_g|, |v_g|)$, 台风也可能作自由蛇行摆动。如实例1(5904号台风)的计算中, $u_0 = -7.2$ 米/秒, $v_0 = 4.6$ 米/秒; $u_g = -7.2$ 米/秒, $v_g = 2.1$ 米/秒,若完全略去台风内力的作用,则 $A = 2.5$ 米/秒,满足判据(5)式,其振幅 $S = \frac{A}{f} = 0.37$ 个纬距。这说明 $(u_0 - u_g)$ 和 $(v_0 - v_g)$ 确是引起台风自由蛇行摆动的成因之一。当然,台风内力实际上总是存在的,以上仅为了说明台风初始速度和基本流场对台风的地转引导气流的差值所起的作用才作这样的假设。

②若 $P_x = P_y = 0$, 即台风处在均压场中,那只有当 $u_0 = 0, v_0 = 0$ 的特殊情况下,才能满足判据

$$0 < A \leq \max\left(\left|\frac{P_y + I_y}{f}\right|, \left|\frac{P_x}{f}\right|\right).$$

于是方程(3)中的 $A = \frac{I_y}{f}, \theta = -\frac{\pi}{2}, C = x_0, D = y_0 + \frac{I_y}{f^2}$ 。因此可得出与文献[1, 2]中的同样结论

$$\begin{cases} x = -\frac{I_y}{f^2} \cdot \sin ft + \frac{I_y}{f} t + x_0 \\ y = -\frac{I_y}{f^2} \cdot \cos ft + y_0 + \frac{I_y}{f^2} \end{cases} \quad (8)$$

这时,摆动仅由台风内力所引起。但(8)式是台风正东方向移动的蛇行摆动路径公式,而观测事实表明,极大多数的台风自由蛇行摆动是发生在西北象限方向上,也有个别的是发生在东北方向上,象上述假设情况下的正东方向的蛇行摆动路径尚未发现。因此,一般来说,台风的自由蛇行摆动不应发生在均压场中,而应发生在稳定的非均压场中。

③若 $u_0 = u_g$, $v_0 = v_g$, 即台风的初速度和基本流场的地转引导气流速度相同时, 便有 $A = \frac{I_y}{f}$. 在这种情况下, 判据 $0 < A \leq \max\left(\left|\frac{P_y + I_y}{f}\right|, \left|\frac{P_x}{f}\right|\right)$ 一般都能满足. 同理, 简化(3)式, 就可得出与文献 [3]、[4] 同样的结论

$$\begin{cases} x = -\frac{I_y}{f^2} \cdot \sin ft + \left(u_g + \frac{I_y}{f}\right)t + x_0 \\ y = -\frac{I_y}{f^2} \cdot \cos ft + v_g t + y_0 + \frac{I_y}{f} \end{cases} \quad (9)$$

其摆动也仅由台风内力所引起. 但实例已证明了仅由台风内力所引起的蛇行摆动的振幅是较小的. 例在 5904 号台风的拟合计算中, 若假定 $u_0 = u_g$, $v_0 = v_g$, 而台风内力 $I_y = 9.6 \times 10^{-2}$ 米/秒², 则仅由内力引起的蛇行摆动振幅 $S = \frac{I_y}{f} = 0.23$ 个纬距, 但实际路径的摆动振幅有 0.5 个纬距. 因此, 一般来说, 台风在稳定气压场中的自由蛇行摆动应是台风内力、初始速度和环境流场的引导气流这三种因素共同作用的结果. 只有在上述的后二种特例情况下, 才仅由台风内力所致.

3. 移动打转路径

当 $A > \max\left(\left|\frac{P_y + I_y}{f}\right|, \left|\frac{P_x}{f}\right|\right)$ 时, 台风沿引导气流方向移动时会产生顺时针的打转

现象. 也以西北象限方向的移动打转为例进行说明. 根据(2)式, 当满足上述条件时, 则在某一时段内会有 $u > 0$ 或 $v < 0$, 即台风移动会出现短时间的与引导气流方向相反的迴转现象. 此文对之不予详细讨论.

三、实例拟合计算

我们选取了 5904 号台风的 WNW 方向蛇行摆动路径和 8211 号台风偏北方向蛇行摆动路径进行了拟合计算. 实例计算中的一些数据的确定参考了文献 [4] 中的计算方法(台风半径 r_0 根据台风的强度, 地面、700hPa、500hPa 天气图上的台风环流大小平均而得. 平均切向速度 $\bar{v}_2$ 根据飞机探测报中的地面和 700hPa 二层次近台风中心最大风速以及地面、700hPa、500hPa 天气图上读取的 r_0 处的切向风速平均而得. 台风整体所受到的平均气压梯度力 P_x 、 P_y 由 700hPa 和 500hPa 二层次算得的值平均而得).

5904 号台风的路径如图 2 所示. 它是一个快速蛇行摆动的例子. 从 28 日 08 时到

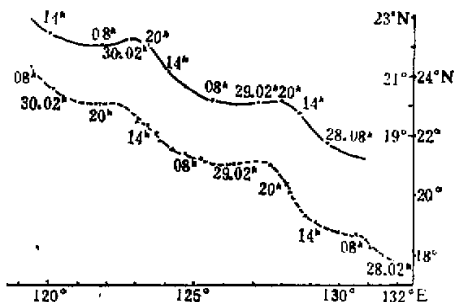


图 2 5904 号台风路径

虚线为实际路径, × 为中央台实时定位, Δ 为飞机探测位置; 实线为拟合计算路径. 括号内是对应于拟合路径的纬度

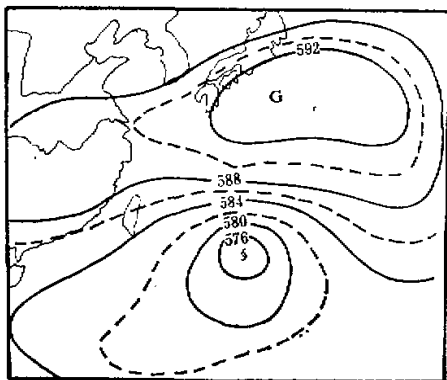


图3 1959年8月28日08时500hPa形势

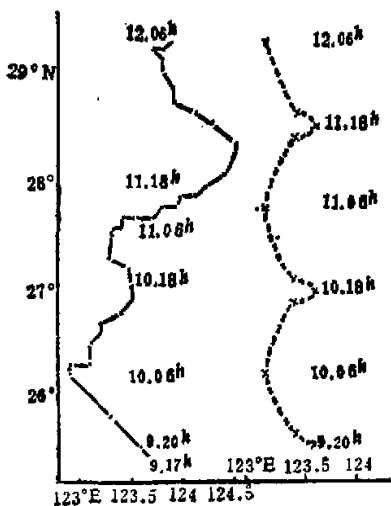
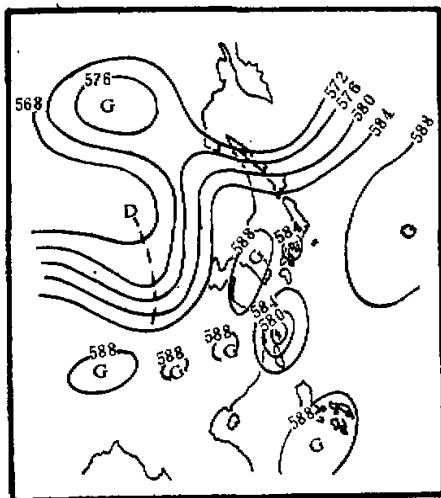
图4 8211号台风路径
实线为实际路径,虚线为拟合路径

图5 1982年8月9日20时500hPa形势

30日02时作了二次蛇行摆动,摆动的振幅约为0.5个纬距。这次蛇行摆动发生在一个气压梯度较强的气压场中,如图3所示。在台风的正北方是一个东西向带状分布的副热带高压,东部有些南落。台风的西侧和南侧均为低压区。台风整体所受到的平均气压梯度力较大,因此移速很快。据计算

$$\begin{cases} P_y = -44.70 \times 10^{-5} \text{ 米/秒}^2 \\ P_x = -13.24 \times 10^{-5} \text{ 米/秒}^2 \end{cases}$$

在28日08时—29日20时的时段内,其变化为 $|\Delta P_x| \leq 2.76 \times 10^{-5} \text{ 米/秒}^2$, $|\Delta P_y| \leq 4.96 \times 10^{-5} \text{ 米/秒}^2$ 。相对变化极小,可近似作常数处理。根据台风摆动前6小时的平均

移速可定初始速度 $u_0 = -7.2$ 米/秒, $v_0 = 4.6$ 米/秒, 地转参数 f 取 25°N 处的值 $f = 6.167 \times 10^{-5}$ /秒。台风半径 $r_0 = 5$ 个纬距, r_0 范围内的平均切向速度 $\bar{v}_1 = 25$ 米/秒。由此计算出台风内力

$$I_y = \frac{2r_0}{3R} \cdot \Omega \cdot \cos \phi_0 \bar{v}_1 = 9.6 \times 10^{-5} \text{ 米/秒}^2$$

$$\left| \frac{P_y + I_y}{f} \right| = 5.6 \text{ 米/秒}$$

$$A = \sqrt{\left(u_0 - \frac{P_y + I_y}{f} \right)^2 + \left(v_0 + \frac{P_x}{f} \right)^2} = 2.96 \text{ 米/秒}$$

满足 WNW 方向的蛇行摆动判据。算得其振幅 $S = \frac{A}{f} = 48000 \text{ 米} = 0.5$ 个纬距, 初位相

$$\theta = \sin^{-1} \left[\left(u_0 - \frac{P_y + I_y}{f} \right) / A \right] = -32.72^\circ = -0.571 \text{ 弧度}.$$

摆动周期 $T = \frac{2\pi}{f} = 28$ 小时。把上述各数据代入 (3) 式, 便得 5904 号台风蛇行摆动的拟合方程

$$\begin{aligned} x &= -0.5 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{28}t - 0.571\right) - 5.0 \cdot \frac{t}{28} + c \\ y &= 0.5 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{28}t - 0.571\right) + 2.0 \cdot \frac{t}{28} + d \end{aligned} \quad (10)$$

时间 t 的单位为小时。

图 2 中的实线是根据上述方程点绘出来的拟合路径。其蛇行摆动的趋势和实况基本接近。

8211 号台风是一个慢速北移的蛇行摆动例子, 如图 4 所示。图中的实线是根据洞头雷达站每小时台风眼的探测位置点绘出来的。从 8 月 9 日 20 时至 12 日 08 时, 台风缓慢北移的同时, 明显地作了二次蛇行摆动。摆动的振幅为 0.3—0.5 个纬距, 周期约一天。这次蛇行摆动是发生在气压梯度较弱的气压场中。从 9 日 20 时起, 台风进入一个被四个高压环流包围的区域中如图 5 所示, 所以移速突然减慢。但由于台风北侧的朝鲜高压略强于台风南侧的赤道高压; 台风东侧的太平洋高压也略强于大陆高压, 因此台风仍处于一个非均压场中。据计算 $P_x = -14.7 \times 10^{-5}$ 米/秒², 方向指西; $P_y = -7.3 \times 10^{-5}$ 米/秒², 方向指南。在 9 日 20 时—12 日 08 时, 由于贝加尔湖地区的西风槽底不断北缩, 导致朝鲜高压和副高脊线也不断北抬, 恰好和台风北移保持同步, 因而使台风中心和其北侧副高脊线的间距始终保持 10 个纬距左右(图略)。同时, 台风南侧的赤道高压也有所北抬。因此, 在这段时期内, 尽管东亚地区的环流形势发生了较大变化, 但台风环流附近的流场变化却不大, 作用于台风整体的平均气压梯度力 P_x, P_y 可近似地作常数处理。8211 号台风的范围较小, 取 $r_0 = 3$ 个纬距, r_0 范围内的平均切向速度 $\bar{v}_1 = 30$ 米/秒。算得 $I_y = 6.6 \times 10^{-5}$ 米/秒², 恰好和 P_y 大小相当、方向相反, 即 $P_y + I_y = 0$ 。因此台风实际上只受到偏西方向的气压梯度力的作用, 产生了向北移动的趋势。根据摆动前 3 小时内雷达探测到的平均

移速定初始速度 $u_0 = -2$ 米/秒, $v_0 = 2$ 米/秒, f 取 30°N 处的值为 7.29×10^{-3} /秒。算得 $A = 2$ 米/秒, $\left| \frac{P_x}{f} \right| = 2.2$ 米/秒, 满足判据 (6)。算得振幅 $S = \frac{A}{f} = 0.3$ 个纬距, 初位相 $\theta = -\frac{\pi}{2}$, 周期 $T = 24$ 小时。把上述各数据代入 (3) 式, 整理后可得

$$\begin{cases} x = -0.3 \cdot \sin \frac{2\pi}{24} t + x_0 \\ y = -0.3 \cdot \cos \frac{2\pi}{24} t + 1.6 \cdot \frac{t}{24} + y_0 + 0.3 \end{cases} \quad (11)$$

式中的 t 以小时为单位。

图 4 中的虚线是根据上式点绘出来的拟合路径, 也和实际路径基本相吻。5904 号台风和 8211 号台风基本上代表了台风在西北象限方向上自由蛇行摆动的特征, 拟合的结果说明上述关于台风自由蛇行摆动的成因的解释是合理的。但是应该指出, 上述的拟合计算只是粗略地刻划了台风自由蛇行摆动的基本特征, 和实际路径还存在一定的误差。这主要是由于 ① 环境流场作用于台风的气压梯度力完全是由天气图上的读数进行计算的, 这本身就不易算准; ② 台风整体所受到的平均气压梯度力应该由底层一直积分到台风柱体的顶层, 然后加以平均。但在本文的计算中, 由于受资料的限制, 仅以中层即 700hPa 和 500hPa 二层次的平均来代替; ③ 关于台风内力的计算公式本身还不是太完备的, 而且探测资料较少, 因此内力计算也是近似的。

四、结 论

1. 台风在稳定气压场中, 当 $u_0 = u_g + \frac{I_y}{f}$, $v_0 = v_g$ 时, 仍以初始速度作匀速直线运动。当满足 $0 < A \leq \max \left(\left| \frac{P_y + I_y}{f} \right|, \left| \frac{P_x}{f} \right| \right)$ 时, 台风作自由蛇行摆动。当满足

$$A > \max \left(\left| \frac{P_y + I_y}{f} \right|, \left| \frac{P_x}{f} \right| \right)$$

时, 作移动打转运动。

2. 台风自由蛇行摆动的成因是台风内力、初始速度和基本流场对台风的引导气流三者共同作用的结果。只有当 $P_x = 0$, $P_y = 0$, $u_0 = 0$, $v_0 = 0$ 或 $u_0 = \frac{P_y}{f}$, $v_0 = -\frac{P_x}{f}$ 这两种特例情况时, 台风自由蛇行摆动才仅由台风内力所引起。

3. 台风自由蛇行摆动的振幅与纬度的正弦成反比; 与台风移动的初始速度和基本流场对台风的引导气流速度之间的差值成正比, 即与 $|u_0 - u_g|$, $|v_0 - v_g|$ 成正比; 与台风内力的关系要视 $u_0 - u_g$ 的值而定, 就西北象限方向上的蛇行摆动来说, 若 $u_0 - u_g \leq 0$, 即台风以较大的初速度进入一个较弱的气压场内, 其摆动振幅与台风内力成正比; 若台风以较小的初速度进入一个较强的气压场时, 即 $u_0 - u_g > 0$, 则摆动振幅与台风内力成反比。

参 考 文 献

- [1] 陈联寿、丁一汇, 西太平洋台风概论, §7.2, §7.6, §9.6, 科学出版社, 1979.
- [2] 野本真一、岡村存, 气象研究ノート, 129, p. 191—236, 1976.
- [3] 董克勤, 气象, 2, p. 5—11, 1979.
- [4] 谢义炳、陈秋士, 气象学报, 27, p. 283—305, 1956.

AN ANALYSIS OF THE CAUSES FOR THE ZIGZAG TRACK OF TYPHOONS

Ding Jincai Tang Xinzhang

(*Shanghai Central Meteorological Observatory*)

Abstract

A criterion for the occurrence of free zigzag track of typhoons is derived from the general solution of governing equation of typhoon motion. It is pointed out that the free zigzag track of a typhoon is caused by the resultant effect of the interior force and initial velocity of the typhoon, as well as the averaged pressure gradient force exerting on it. Only under some special conditions is it caused by the interior force alone. Finally the above inferences are proved through the calculations of two real typhoons that have zigzag track.