

模拟台风异常路径(I) —— Rankine 涡模型^{*}

林 缅^① 李家春^① 李 栎^②

(1996 年 7 月 29 日收到, 1997 年 9 月 1 日收到修改稿)

摘 要

本文提出一个用 Rankine 涡模型模拟对称和非对称台风的方法。考虑到台风和 Rankine 涡之间物理性质的相似性, 从定性上分析了这一方法的可行性。参照 Yancy 台风的观测数据, 给出模拟某一时刻台风内部结构的 Rankine 涡模型的涡参数。这一结果是进一步用等值线动力学方法研究台风运动的基础。

关键词 台风 Rankine 涡 最小二乘法

中图分类号 O354

§ 1. 引 言

热带气旋是给人类生活造成巨大威胁的自然灾害之一。统计数据表明, 我们国家每年因台风造成的经济损失在世界排名第一, 伤亡人数名列第二。所以提高台风路径的预报精度, 减轻灾害带来的损失在我们国家尤为重要。

影响台风预报精度的主要障碍就是其移动路径的突变, 这些突变的异常路径导致 72 小时的预报误差徘徊在 400~ 500 公里左右停止不前。有学者提出: 台风内部结构的非结称性是造成异常路径的原因之一。针对这个问题, 近年来许多学者^[1, 2, 3]分析了台风内部不对称结构的形成及其特征, 以及它对台风运动的影响, 并对斜压性与热力不对称结构的作用已进行了大量的研究工作。但是从力学的角度研究台风运动路径的工作还不多见。

为了研究台风内部的非结称结构会造成怎样的异常路径, 我们从涡动力学出发, 提出用 Rankine 涡模拟对称和非对称台风。我们从两方面着手, 首先讨论用 Rankine 涡模拟台风的合理性, 然后讨论用怎样的 Rankine 涡来代替一个真实台风。

§ 2. Rankine 涡模型

(a) 对称台风

我们知道, 台风的风速和气压场的径向分布等参数是描述台风结构的重要特征。下面我们主要考虑这两个气象要素。一般来说台风结构可用经验公式描述为:

* 国家科技攻关项目 85—906—07 资助课题

① 中国科学院力学研究所, 北京, 100080

② 清华大学力学系, 北京 100080

$$\text{物理} \quad V(r) = \begin{cases} V(R_0)r/R_0 & (0 \leq r \leq R_0) \\ V(R_0)(R_0/r)^x & (R_0 \leq r \leq R_{\max}) \end{cases} \quad (2.1a)$$

$$P = \exp(-A/r^B) \quad (0 \leq r \leq R_0) \quad (2.1b)$$

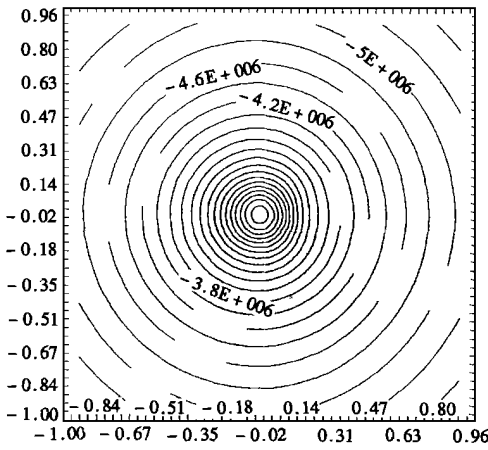
这里, R_0 代表最大风速半径, R_{\max} 为台风半径, $V(R_0)$ 为最大速, x 为一在 0.5 到 0.7 之间的常数, 在方程(2.1b) 中, $R_0 = A^{1/B}$, $A = R_0^B$, $A = 31.6 \sim 25.3$, $B = 1.0 \sim 2.5^{[4]}$.

而在流体力学中, Rankine 是涡度为常数的涡团, 其涡分布可表示为:

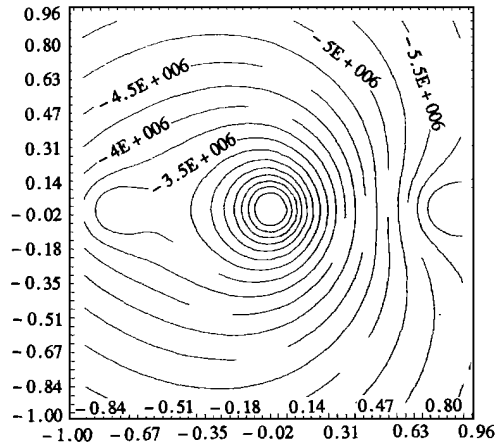
$$\Delta\phi = -\zeta = \begin{cases} -\Omega_z & (r \leq R_0) \\ 0 & (r > R_0) \end{cases} \quad (2.2)$$

其中, ϕ 为流函数, ζ 为涡度, R_0 为涡半径, 由此可得到切向速度及压力分布为:

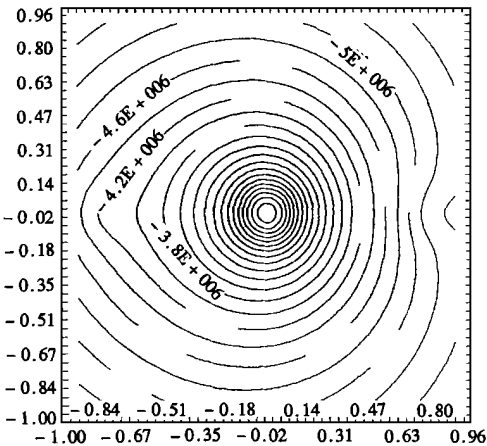
$$(a) \quad V(r) = \begin{cases} \Omega_z r / 2 & (r \leq R_0) \\ R_0^2 \Omega_z / 2r & (r > R_0) \end{cases} \quad (2.3a)$$



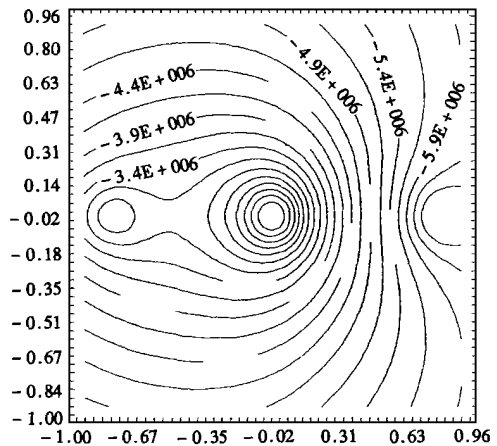
(a) $\xi_p = 50, \xi_s = 10, C = 0.1$



(b) $\xi_p = 50, \xi_s = 10, C = 0.8$



(c) $\xi_p = 50, \xi_s = 5, C = 0.8$



(d) $\xi_p = 50, \xi_s = 15, C = 0.8$

图 1 非对称结构流线图

$$P - P_{\infty} = \begin{cases} \rho R_0^2 \Omega_z^2 (r^2/R_0^2 - 2)/8 & (r \leq R_0) \\ -\rho R_0^4 \Omega_z^2/8 & (r > R_0) \end{cases} \quad (2.3b)$$

比较(2.1)式(2.3)式,我们可以清楚地看到, Rankine 涡的核内速度线性上升,核外速度逐步衰减,核中心有一低压区,这些性质同台风的定性行为十分相似,台风的最大风速半径可以认为和 Rankine 涡的核半径相对应,但两者在定量上仍然相差比较大,尤其是核外。

(b) 非对称台风

观察表明,初始对称的台风内部结构将发展出一对反向旋转的涡对,左边为气旋,右边为反气旋,人们称之为“Reta Gyre”,由此形成的通风流代表了台风运动的方向。因此我们认为,非对称台风可以用三个或三个以上的 Rankine 涡系来代替。在本文中我们仅考虑三涡系,即一个气旋主涡,两边对称地有两个旋转方向相反的次涡。

由方程(2.2),我们计算几种典型的三涡系流场(如图1所示)。图中所有的物理量都已无量纲化,无量纲参数为: $R_0 = 50\text{km}$, $T = 24$ 小时, $V = 10\text{m/s}$, $\rho = 12.5\text{kg/m}^3$ 。其主要特征是:

(1) 两个次涡距离十分接近时(图1(a), (b)),其相互作用近似于抵消,整个流场相当于单涡的结果,和对称台风的情况十分接近;当两个次涡的距离增大时,它们对流场的不对称性的影响逐渐显露出来。

(2) 次涡强度大小亦对流场的非对称性有明显的影响,次涡强度愈大,非对称性愈明显(图1(c), (d))。

这些计算结果表明,它们同观察的不对称结构台风十分相似,所以,我们认为如果选择合适的 Rankine 涡参数,模拟台风结构是可能的。

§ 3. 选择合适的 Rankine 涡系参数

以 Yancy 台风为例,我们分别讨论对称和非对称台风结构。

(a) 对称台风

正如上一节所提到的那样,在台风最大风速半径以内,实际台风的切向分量和 Rankine 涡的非常接近,而在最大风速半径以外,真实台风风速的切向分量要比 Rankine 涡的大许多。因此,为了改进在最大风速半径以外两切向风速的拟合程度,我们选两个旋转方向相同、半径不同的同心涡块:

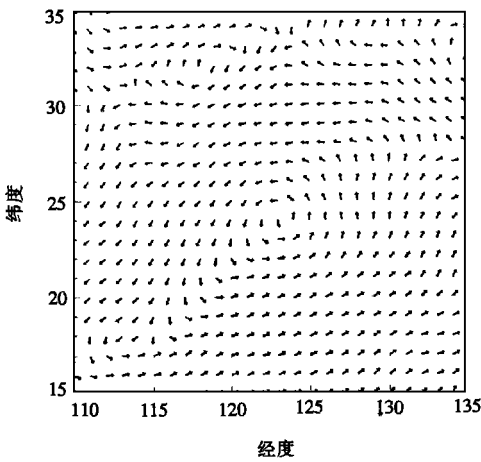
$$\begin{array}{l} \text{Rankine 涡 I} \\ \text{Rankine 涡 II} \end{array} \quad \xi = \begin{cases} \xi_1 & (0 \leq r \leq R_{01}) \\ 0 & (r > R_{01}) \\ \xi_2 & (0 \leq r \leq R_{02}) \\ 0 & (r > R_{02}) \end{cases} \quad \text{庆 交}$$

这里, $R_{02} < R_0 < R_{01}$, R_0 实际台风的最大风速半径, ξ_1 与 ξ_2 之和为所求台风的实际涡度,并且涡参数必须满足最小二乘法,即整个流场的速度应该满足:

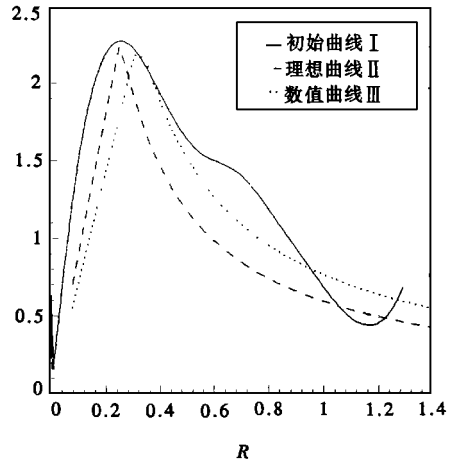
$$\sum (V_{1i} + V_{2i} - V_{0i})^2 = \min \quad (3.1)$$

其中, V_{1i} 和 V_{2i} 是由方程(2.3)得到的涡 I、涡 II 切向分量, V_{0i} 为实际观测数据。这样如果给出一个近似地对称台风,我们就可以由(3.1)式得到恰当的涡参数。下面以 Yancy 台风为例,进行实际模拟。

参照 8 月 18 日零时的观测数据, 由此时的速度矢量图(如图 2(a))可以看出有一近似的对称气旋, 其中心位置在北纬 123.7° 、东经 24.5° 。我们以该中心为原点在 360° 范围内向外辐射八条直线, 并作一系列不同半径的同心圆, 由差值方法可以确定各个节点上的速度, 得到该台风风速的切向分布 $V(r)$ 和涡度。因此根据(3.1)式, 用数值逼近的方法可以得到两涡叠加之后的速度分布。在图 2(b)中我们绘出了该台风实际风速的切向分布(曲线 I)和用一个 Rankine 涡模拟时的速度分布(曲线 II)以及两涡叠加之后的速度分布(曲线 III), 可以看出在最大风速半径以外, 曲线 I 和曲线 II 的相差较远, 而曲线 I 和曲线 III 比较接近。也就是说, 采用两涡叠加模型以后, 模拟流场的速度分布更接近实际流场。

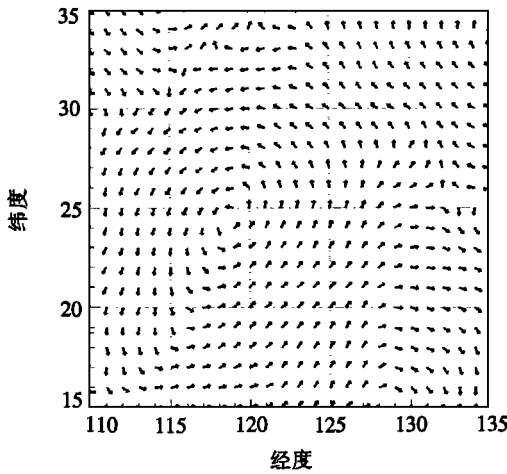


(a) 实际速度矢量场

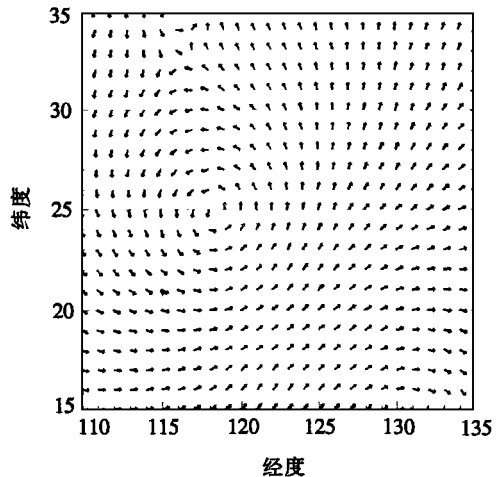


(b) 切向速度分布

图 2



(a) 实际速度矢量场



(b) 计算结果

图 3 Yancy 台风 8 月 20 日零时

(b) 非对称台风

由上一节分析可知非对称结构的台风可以用三个或三个以上的 Rankine 涡来模拟。由于

几个 Rankine 涡之间存在相互作用, 不能完全用解决对称台风的方法。我们提出采用“筛选法”来确定 Rankine 涡系的涡参数。

以 Yancy 台风 8 月 20 日的观测数据为例。由此时的速度矢量图(图 3(a))可以看出有两个气旋一个反气旋, 用差值方法我们粗略地定出这三个涡的涡度及最大风速半径, 以此三组数据为中心, 以 ± 0.1 为间隔, 左右分别给出四到五组数据。对全流场来说, 利用 (3.1) 式对每一组数据进行筛选, 其中 \min 值最小的那组数据即为我们所求。图 3(b) 给出模拟后的速度矢量场, 比较图 3(a) 和图 3(b), 每一个涡中心的模拟情况比较理想。

§ 4. 结果分析及讨论

总而言之, 用 Rankine 涡系代替一个实际台风(正问题)以及已知一个真实台风, 确实可以模拟该台风的 Rankine 涡系的涡参数(反问题)的方法具有较为简捷, 便于预测的优点, 也能从物理上解释所发生现象的机理。本文的研究表明, 用一个或数个 Rankine 涡模拟对称、不对称台风在物理上是合理的, 相应的速度场在定量上也十分一致, 为采用等值线动力学方法研究台风的运动奠定了基础。关于模拟台风异常路径的问题我们将在第二部分讨论。

参 考 文 献

- 1 Chen Lianshou and Xu Xiangde, An overview on typhoon disaster and preliminary study on "SPECTRUM_90", ICSU/WMO International Symposium on Typhoon Disasters, Oct. 12-16, Beijing (1992), 31-44.
- 2 Zhu Yongti, Recent advances in numerical simulation of typhoon activities in China, ICSU/WMO International Symposium on Typhoon Disasters, Oct. 12-16, Beijing (1992), 207-219.
- 3 H. Ohnishi, A study on the tropical cyclone motion caused by its asymmetric structure, Collected Papers Issued at the Conference of Meteorological Research Institute (1989), 38-50.
- 4 G. Holland, An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricane, Monthly Weather Review, **108** (1980), 1212-1218.
- 5 李家春、林緬, 用 Rankine 涡模型模拟对称和非对称台风, 第九届热带气旋讨论会, 南京 (1994), 19-20.

Simulation of Typhoon's Anomalous Track(I) ——Rankine Vortex Model

Lin Mian Li Jiachun

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, P. R. China)

Li Li

(Department of Mechanics, Qinghua University, Beijing 100080, P. R. China)

Abstract

This paper proposes a method for simulating symmetric and asymmetric typhoon by using Rankine vortex model. Considering similarity between tropical cyclone and the Rankine vortex, the paper has qualitatively discussed the feasibility of the methods. In order to decide quantitatively Rankine vortex's parameters to simulate typhoon's structure, the paper has dealt with TCM data for Yancy Typhoon (9012) as initial fields. These results are considered as a foundation for further studying typhoon motion by CD approach.

Key words typhoon, Rankine vortex, least square method