

# 入射涡与圆柱相互作用的数值模拟<sup>1)</sup>

尹 协 远

陶 锋

(中国科学技术大学,合肥,230026)

(中国科学院力学研究所,北京,100080)

童 秉 纲

(中国科学技术大学北京研究生院,北京,100039)

**提要** 本文用快速涡方法对入射涡与圆柱的相互作用进行了数值模拟,观察到了入射涡在圆柱表面上诱导的二次分离和三次分离现象。二次涡的产生,与入射涡配对,改变了它们的运动轨迹。二次涡是入射涡“回跳”现象的主要原因。本文还对不同入射涡强度及相互位置作了计算,并分析了不同参数对涡运动轨迹的影响。这些现象与涡的无粘圆柱绕流有着本质的差异。

**关键词** 二次涡,非定常分离,涡诱导分离,圆柱

## 1. 引言

涡与物体相互作用的研究在许多领域内有着重要的应用背景。飞机前翼和体产生的脱体涡对平尾和垂尾的作用,直升机旋翼产生的涡对机身的作用,石油平台立柱产生的涡对其它立柱的作用,烟囱群和冷却塔群体间涡系的相互作用等等都是涡-物体相互作用的重要例子。涡与尖缘物体如簧片的相互作用还是发声的重要原因。因此涡与物体的相互作用是流致振动和流致噪音的重要原因之一。而流致振动和流致噪音是工业空气动力学和海洋工程等领域的主要研究课题。作为基础研究,人们还企图从涡对平板壁或圆柱的相互作用去研究非定常流动分离的机制和准则,以及研究近壁流场结构和可能存在的减阻机理。

Harvey 和 Perry<sup>[1]</sup> 首先从飞机尾涡与地面的相互干扰中发现了非定常二次分离涡。随后, Ho<sup>[2]</sup>, Didden 和 Ho<sup>[3]</sup> 等人用入射涡环垂直“撞击”平板的实验研究,证实了[1]中发现的现象。他们认为二次分离涡是导致入射涡“回跳”现象的原因。

Didden 和 Ho<sup>[3]</sup> 解释他们的撞击实验认为,在远离平板边界层的无粘区域内,初始入射涡环以较大速度接近平板,在壁面粘性区内产生一个非定常逆压梯度,它阻滞了粘性区内的流动。于是在粘性区和无粘区交界面上形成一个很强的剪切层,这个剪切层的不稳定性导致涡层的卷起,形成二次涡。他们发现,二次涡的“喷发”(ejection)总是伴随有一个负压力峰值出现。他们认为,这种现象是非定常分离发生的标志。

Yamada<sup>[4,5]</sup> 对涡-柱干扰现象做了流场显示实验,也观察到了二次涡。Homa et al.<sup>[6]</sup>

1) 863 高技术资助项目。

本文于 1990 年 7 月 16 日收到,1990 年 11 月 15 日收到修改稿。

更在不同的涡心距与圆柱直径之比的广泛范围内 ( $O(1) \sim O(10^{-2})$ ), 对涡与圆柱、涡与垂直平板的相互作用做了一系列流场显示实验。他们发现, 尽管圆柱直径可以很小, 但在入射涡扫掠过圆柱时, 圆柱表面将很快生长出二次涡, 其环量大小可与入射涡同样量级, 旋转方向相反, 二者以相同速度一道运动。

根据这些实验结果, 本文利用涡方法建立了一个数学模型, 进行了数值模拟, 得到了与实验相比满意的结果。

## 2. 数学模型和数值方法

数学模型如图 1 所示, 有一对强度相等, 旋转方向相反的涡对位于  $(-H, \pm D/2)$  处, 粘性涡核内涡量为 Gauss 分布, 环量为  $\Gamma_c$ , 在其相互诱导速度下向圆柱运动。取半径  $a$  和  $\Gamma_c/(2\pi D)$  为特征长度和速度, 则无量纲控制方程为

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega = \frac{2}{\text{Re}} \nabla^2 \omega \quad (1)$$

$$\nabla^2 \phi = -\omega \quad (2)$$

边界条件是: 柱面上,  $\partial \phi / \partial r = 0, \phi = 0$ ; 无穷远,  $\phi = 0, \omega = 0$ ; 对称轴线上,  $\phi = 0, \omega = 0$ 。

用涡方法解二维不可压 N-S 方程的方法详见文献[7,8]。其主要思想可概括如下:

(1) 把涡量方程 (1) 分裂成对流和扩散两部分。扩散部分是扩散方程的解, 可用大量点涡的随机走步来模拟。

(2) 对流部分是 Poisson 方程的解。本文采用 FFT 方法求解 Poisson 方程。为此

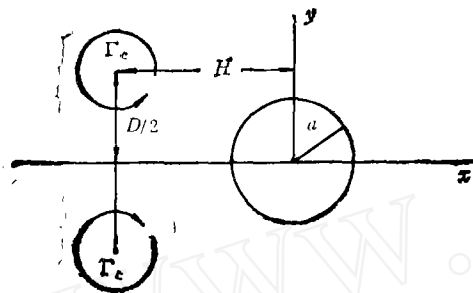
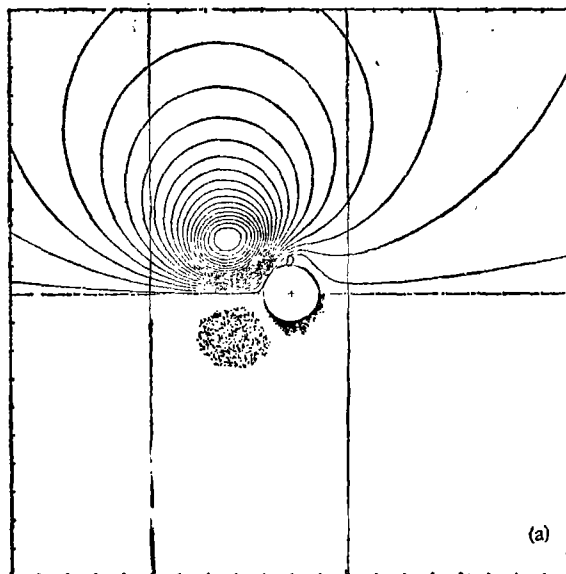
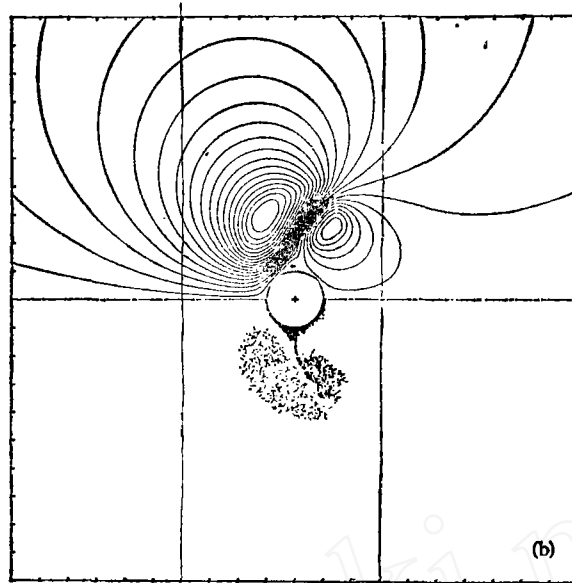


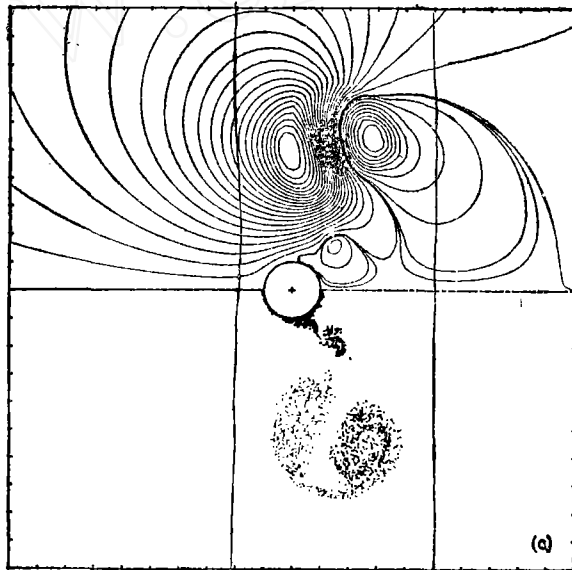
图 1



(a)  $r = 3.0$



(b)  $t = 5.0$



(c)  $t = 9.0$

图 2 涡运动演化及流线图  $Re = 3000, D/2a = 1.5$

● Incident primary vortices ● Secondary Vortices

须引入变换

$$z = a \exp(\pi \xi) \tag{3}$$

其中  $z = r \exp(i\theta), \zeta = \xi + i\eta$ , 该变换将  $r = a, r = r_\infty$  和  $\theta = 0, \theta = \pi$  的半圆环变换成矩形。(2)式变为

$$\psi_{\xi\xi} + \psi_{\eta\eta} = -E\omega, E = \pi^2 \exp(2\pi\xi) \tag{4}$$

相应的边界条件为  $\xi = 0, 0 \leq \eta \leq 1: \phi = 0; \xi = \xi_\infty, 0 \leq \eta \leq 1: \phi = 2 \sinh(\pi \xi) \sin(\pi \eta); \eta = 0, \eta = 1, 0 \leq \xi \leq \xi_\infty: \phi = 0$ .

求解时, 先由 VIC (Vortex-in-cell) 方法, 将离散涡的涡量由面积加权平均分配到所在网格的节点上. 求得  $\phi$  值后, 再由 Lagrange 格式追踪点涡的运动. 点涡速度也是由面积加权平均得到, 即

$$\omega_i = \frac{A_i \Gamma_k}{A} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

$$u_k = \sum_{i=1}^4 u_i A_i / A, \quad v_k = \sum_{i=1}^4 v_i A_i / A \quad (6)$$

其中  $\Gamma_k$  为第  $k$  个涡环量,  $u_k, v_k$  分别为第  $k$  个点涡速度分量.

(3) 在经过一、二步后, 不满足壁面上无滑移边界条件, 必须在壁面上新生涡, 满足无滑移条件.

重复以上三个步骤, 得到非定常 N-S 方程的解.

### 3. 计算结果分析和讨论

#### 1) 涡的配对过程及轨迹

图 2 是点涡运动演化及相应的流函数图. 流动大致可分为三个阶段. 初始阶段, 入射涡位于  $(-4, 1.5)$  处, 涡对运动基本上与无粘点涡运动差不多, 涡心轨迹平行于对称轴线. 在  $t = 3.0$  (图 2a) 时, 圆柱肩部  $80^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  附近, 边界层增厚, 点涡堆积, 流线上有一小分离泡形成. 以后, 柱面上分离区迅速长大. 有分离剪切层从柱面拖出, 并在另一端卷起成二次涡. 第二阶段的主要特征是二次涡增强并脱落(图 2b), 入射涡与二次涡配对, 它们一道向上方运动, 两个涡强度差不多, 但环量符号相反, 有点象一对涡偶极子. 第三阶段, 以第三个涡在圆柱面上生成为主要特征. 在  $t = 7.0$  时, 壁面上又形成一个小分离泡, 并继续增大, 在  $t = 9.0$  时(图 2c) 第三个涡已十分明显. 有意思的是, 我们是先数值模拟出了第三个涡的出现, 以后才见到了 Yamada 等人<sup>[9]</sup>发表的实验结果, 证实了第三个涡的存在. 图 3 是 Yamada 等人的一组流动显示照片, 从中可见, 本文数

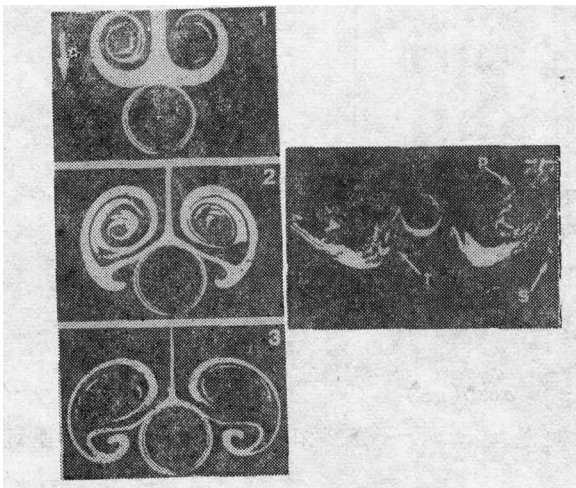


图 3

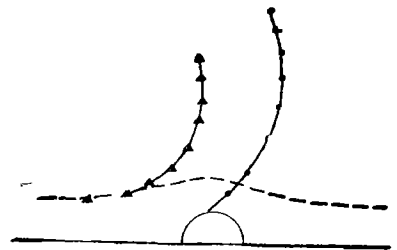


图 4

值结果与实验结果是相当符合的。

图 4 是入射涡、二次涡的运动轨迹。虚线是入射涡无粘运动轨迹。从图 4 可见,入射涡与二次涡配对以后,明显地改变运动方向,被折向上方,很象一个皮球打在障碍物上被弹向上方。这就是所谓的“回跳”现象,已为很多研究者在涡-壁干扰实验中所证实。与无粘涡轨迹相比,它们有本质的差别。数值模拟证实,圆柱面上二次涡分离并与入射涡配对是“回跳”现象的主要原因。

#### 2) 入射涡对相对位置的影响

我们曾计算了  $h/a = 0.5, h/a = 1.0$  及  $h/a = 1.5$  三种不同相对位置情形,图 5 是  $h/a = 0.5$  时的涡位置,与  $h/a = 1.5$  相比,此时入射涡更靠近对称轴线,入射涡与二次涡较长时间滞留在圆柱附近,而且没有发现三次涡形成。

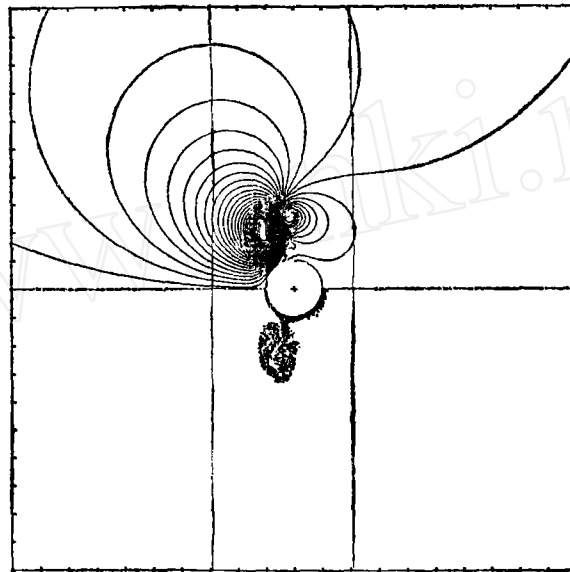


图 5

#### 4. 小结与讨论

用涡方法研究涡与物体的相互作用是一种行之有效、方便、形象的数值方法,可以清楚地表现流场的细致结构和涡的演化过程。入射涡撞击圆柱引起圆柱表面流动分离,形成二次涡,二次涡与入射涡相互诱导作用,改变了入射涡的轨迹,形成“回跳”现象。这个方法还可用于研究非定常分离,也可方便地推广到涡与尖缘物体或与自由表面的相互作用,也可方便地计及背景流场的影响,因此这项研究无论在实际上还是在理论上都是有价值的,值得进一步深入进行。

#### 参 考 文 献

- [1] Harrey J K & Perry F J. *AIAA J.*, 1977, 9: 1659—1660
- [2] Ho C-M *Unsteady Separated Flows* (Francis M S and Luttges M W. Eds.), 1983
- [3] Didden N & Ho C-M. *J. Fluid Mech.*, 1985, 160: 235—256
- [4] Yamada H. et al. *IUTAM Symp. on Fundamental Aspects of Vortex Motion* 1987: 17—20

- [5] 山田日出夫, 伊藤 淳, 山辺春雄, 後藤俊幸, 流れの可視化, 増刊号1989, 9  
[6] Homa J. et al., *J. Fluid Mech.*, 1988, 197: 571—594  
[7] 尹协远, 李 平, 童秉纲, 容量矩阵法在涡方法中的应用. 力学学报, 1992 24(1)  
[8] Chorin A J. *J. Fluid Mech.*, 1973, 57: 785—796

## NUMERICAL SIMULATION OF THE INTERACTION BETWEEN A PAIR OF INCIDENT VORTICES AND A CIRCULAR CYLINDER

Yin Xieyuan

(*University of Sciences and Technology of China, Hefei, 230026 China*)

Tao Fong

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, 100080 China*)

Tong Binggang

(*Graduate School USTC, Beijing, 100039 China*)

**Abstract** The interaction between a pair of incident vortices and a circular cylinder has been simulated numerically by using a fast vortex method in present paper. A secondary and a tertiary vortices separated from the cylinder surface are, induced by the incident vortex, observed. Because of pairing with the secondary one, the incident vortex changes its trajectory. The 'rebounding' phenomenon of the incident vortex is attributed to the effect of secondary vortex. This phenomenon has been verified by flow visualization reported recently.

**Key words** secondary vortex, unsteady separation, vortex-induced separation, circular cylinder