

地形对洋流影响的初步实验模拟

柳绮年 贾复 王平生

(中国科学院力学研究所)

我国具有特别宽阔的大陆架,大陆架经过比较陡峭的陆坡连接到海底。世界著名的太平洋西边界强流——黑潮,即从我国台湾岛以南基本沿陆坡走向北上达日本九州,再向东沿伸。它对我国近海流系的水文特征,沿海气候、降雨及水产资源等起着重要作用。因此陆架、海脊、岛屿等地形对西边界流的影响,是我国近海洋流动力学研究中很感兴趣的课题。管秉贤^[1,2]曾对这类问题从水文观测资料的分析上作了不少工作。本文仅就上述近海地形流动问题进行了实验模拟,并得到了与观测资料比较相近的结果。

一、实验装置

可控硅、直流电机闭环系统驱动的高精度旋转平台,是装置的核心,它可提供 Coriolis 力场。平台直径为 1.0 米,其上置以顶角 60° 、半径 30cm 的扇形容器。扇形顶角处(北,可代表极地)与转台中心轴重合;圆弧面(南)可表示半球的赤道;两侧皆可表示区域性海洋(如太平洋)的东西边界。在中心轴处的液面下通过小管注入或吸出液体,以驱动容器中液体流动,这就是所谓“源汇法”模拟风生洋流。用轨迹示踪法在暗场中使底片长时间曝光,可获得定常流动的流场照片,示踪粒子的轨迹即代表了流线。

二、实验结果与动力学解释

用源汇法模拟风生洋流首先由 Stommel 等^[3]提出,继而由 Kuo 和 Veronis^[4]进行了细致的研究。如图 1 示系统以常角速度 Ω 旋转,直角坐标系 Z 轴与旋转轴重合并以向上为正。这里引入流动系统诸特征量: L 、 D 、 U 、 ν 和 P 分别使水平、垂直长度、速度、时间和压力无量纲化,并得到下述无量纲参考:

$$\begin{aligned} s &= \frac{R_o}{2}, \\ R_o &= \frac{U}{\Omega L}, \quad \text{—— Rossby 数,} \\ \delta &= D/L \quad \text{—— 纵横比,} \\ E_v &= \frac{\nu}{D^2 \Omega} \quad \text{—— 垂直 Ekman 数,} \\ E_H &= \frac{\nu}{L^2 \Omega} \quad \text{—— 水平 Ekman 数.} \end{aligned}$$

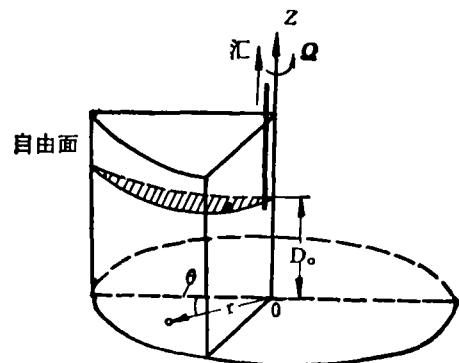


图 1 旋转流动系统图

本文 1981 年 1 月 13 日收到。

我们知道在图 1 中地转关系为·

$$\begin{aligned} -v_0 &= -\frac{\partial p_0}{\partial r}, \\ +u_0 &= -\frac{1}{r} \frac{\partial p_0}{\partial \theta}, \\ \omega_0 &= 0(E^{\frac{1}{2}}). \end{aligned} \quad (1)$$

在所考虑的流动系统中,容器在定常旋转下自由面静力平衡形状为

$$h' = D_0 \left[1 + \frac{\Omega^2 L^2}{2gD_0} (x^2 + y^2) \right], \quad (2)$$

其中 D_0 为 Z 轴处自由面高度, g 为重力加速度,带“'”为有量纲量.

当自由面下置以源汇时,自由面可写成

$$h_T = h'(x, y) + \xi'(x, y, t). \quad (3)$$

在 $z = h$ 处(设 $\xi \ll h$),自由面运动学条件线性化后可写为

$$\omega_0(r, \theta, h_T) = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u_0 \frac{\partial \xi}{\partial r} = \dot{\xi} + \frac{F}{\delta} r u_0, \quad (4)$$

其中 $F = \Omega^2 L/g$ 为 Froude 数.

在底边界上根据 Ekman 关系式

$$Z = 0, \quad \omega_0(r, \theta, 0) = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{2} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_0) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} u_0 \right], \quad (5)$$

由于 ω_0 与 Z 无关以及地转关系得到

$$\frac{\partial E^{\frac{1}{2}}}{2F} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} p_0 \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p_0}{\partial \theta^2} \right] + \frac{\partial p_0}{\partial \theta} = \frac{\dot{\xi} \delta}{F}. \quad (6)$$

当 $E^{\frac{1}{2}} \ll F \ll 1$, 则方程(6)为描述现在考虑系统的基本方程,它可满足在诸边界上的法向速度条件,若要满足侧边界条件,(6)式则尚需考虑侧边界层.值得注意的是,方程(6)与 Stommel 风生洋流底摩擦模式的基本方程^[5]完全一样,这就是“源汇法”模拟风生洋流的动力学基础.

陆架地形流动 观测资料表明,黑潮的路径非常规律地紧贴我国大陆架的陆坡蜿蜒北向而行.我们在 $\Omega = 0.21/\text{秒}$ 、 $R_0 = 5 \times 10^{-2}$ 条件下得到的图 2 表明,西边界流不是越上陆架(三角形 abc),而是紧贴陆架边缘北上,强边界流明显形成;陆架上流动明显缓慢,这在动力学特征上与观测十分相似.把具有地形的 Ekman 关系式及自由表面条件代入涡度形式的准地转关系有:

$$\frac{d}{dt} (\zeta_0 - G\eta_0 + \eta_B) = \frac{\gamma}{2} \zeta_0 + \frac{1}{R_e} \nabla_H^2 \zeta_0, \quad (7)$$

其中 $\zeta_0 = \left(\frac{\partial v_0}{\partial x} - \frac{\partial u_0}{\partial y} \right)$, $\nabla_H^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$, $R_e = \frac{2\varepsilon}{E_H}$, h'_B 为底边界地形, $h_B = h'_B/D$,

$\eta_B = h'_B/D\varepsilon$, $\gamma = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\delta}$, $G = 4\Omega^2 L^2/gD$, 而 $G\eta_0 = (h_T - 1)/\varepsilon$, h_T 为自由面无量纲坐标.

在远离侧边界的内区,可略去粘性影响,对于图 2 地形有 $h_B = O(1)$,因而 $\eta_B \gg O(1)$. 则方程(7)成为

$$u_0 \frac{\partial \eta_B}{\partial x} + v_0 \frac{\partial \eta_B}{\partial y} = 0, \quad (8)$$

这说明对于 $O(1)$ 级流动元流线必与地形等高线重合,即在远离陆架区流动呈地转, 流线为不同半径的一系列弧,到达陆架边缘 abc 这些流线受到阻挡,在一个狭窄的边界层地转关系受到破坏,而使流线向北折转形成惯性边界层,这解释了图 2 流型中的强流。

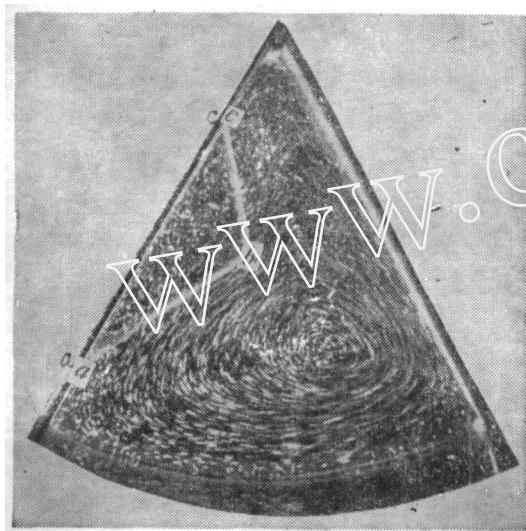


图 2 绕陆架地形流



图 3 绕脊状物流(一)

越过脊状物的流动 台湾岛北端至琉球群岛之间的海底,有一大致为纬向的海脊。海脊以南水深约为 3000—4000 米,以北水深约为 2000 米,而海脊处水深仅 500 米。黑潮自南向北越过海脊,路径向右偏斜。为了研究海脊地形对黑潮路径的影响,我们在扇形容器的西边界处置一脊状物模型,并在 $\Omega = 0.21/\text{秒}$, $R_0 = 1.52 \times 10^{-2}$ 条件下进行实验,由图 3 明显可见,环流以反气旋方向旋转,西边界流自南向北(顶角处),由于自由面弯曲,水深是南深北浅,流线越过脊状物有明显的净右偏量。

这一流型的动力学机制可考虑为位涡度守恒原则。在不受边界粘性直接影响的“内区”,可有位涡守恒关系式成立

$$\frac{d}{dt} \Pi' = \frac{d}{dt} \left(\frac{\zeta' + 2\Omega}{H'} \right) = 0, \quad (9)$$

其中带“'”号仍表示有量纲量, ζ' 为相对涡度, H' 为水深。

设在脊状物以南来流为均匀且该处相对涡度为 0, 则来流无量纲位涡度与脊状物上任一点处位涡度守恒有

$$\frac{1}{1 + \varepsilon G \eta^*} = \frac{1 + \varepsilon \zeta}{1 + \varepsilon(G \eta - \eta_B)}.$$

其中 $\eta = h'/D\varepsilon$, η^* 为来流处 η 值。为简单地阐明物理现象,设 $h_B = O(1)$, 而 $\varepsilon G \eta \ll 1$, $\varepsilon G \eta^* \ll 1$, 而且在脊状物附近局部地设有 $\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$, 这样近似地就有

$$\zeta = \frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r} \approx -\eta_B. \quad (10)$$

把(10)式沿 r 从脊以南的 r_1 积分到脊以北的 r_2 处可有

$$rv \Big|_{r_1}^{r_2} = - \int_{r_1}^{r_2} r \eta_B dr,$$

如果在 r_1 处 $v = 0$ (沿径向流向脊), 则有

$$r_2 v_2 = - \int_{r_1}^{r_2} r \eta_B dr = r_* A, \quad (11)$$

其中 r_* 为脊状物边缘的两个 r 值之间的某一值, 而 A 为表示脊状物剖面面积的一个量, $r_* A$ 总是一正量, 因此在上述简化的分析条件下, 流线有向右净偏转量是必然的。但实验中同时还得到了如图 4 的流型, 即流动在越过脊后流线无明显的净右偏量, 估计可能是某种非定常波动所致。

绕岛状物流动 海洋观测资料似表明, 在台湾岛以北有气旋式涡旋出现, 管秉贤^[2]曾对此作过讨论。我们用一圆柱体置于西边界附近, 以模拟黑潮、我国海岸及台湾岛这一流动系统。海岸弯曲及海深变化的复杂情况当然不能计及。图 5 中的流线轨迹可显示出圆柱尾流区

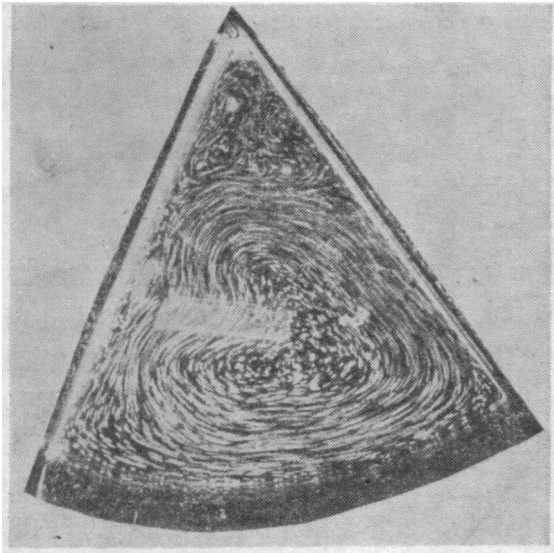


图 4 绕脊状物流(二)

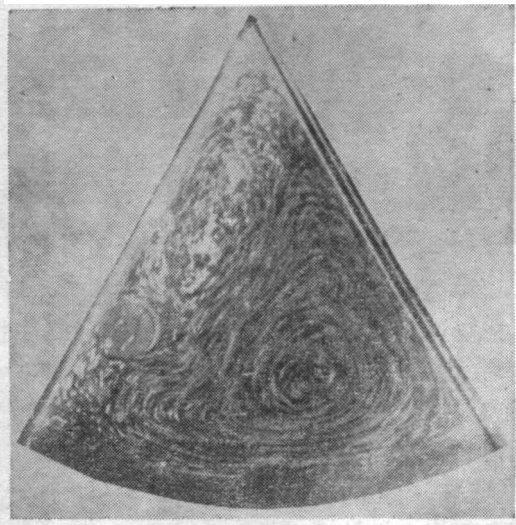


图 5 绕岛状物流

确有排列成一直线的涡旋出现, 在圆柱与侧壁之间的流动缓慢。这与实际观测情况存在相似之处, 由于目前测试方法所限, 涡旋的型式(气旋或反气旋)不能断定。实验结果的动力学解释不很简单, 有待进一步的理论及实验工作。但值得注意的是, 如果模拟实验在某种程度上可以反映真实流动系统的特点, 则涡旋可能出现在台湾岛以北很远处, 而这在观察中尚未证实。

参 考 文 献

- [1] 管秉贤, 海洋与湖沼, 6 (1964), 3: 229—251.
- [2] 管秉贤, 海洋科学集刊, 1978, 14: 1—21.
- [3] Stommel, H., Arons, A. B. & Faller, A. J., *Tellus*, 10 (1958), 2: 179—187.
- [4] Kuo, H. H., Veronis, G., *J. Fluid Mech.*, 45 (1971), 441—464.
- [5] Pedlosky, J., *Geophysical Fluid Dynamics*, Chap. 3—5, Springer-Verlag, 1979, 57—313.