

双柱振动诱导定常整流旋涡流动的 实验研究*

浦群 李坤

中国科学院力学研究所, 北京 100080

摘要 本文用流动显示实验研究圆形静止不可压缩粘性流体域内以圆心对称布置的双柱作同频同相小振幅振动时诱导的 Stokes 层外的定常整流旋涡流动。实验表明, 串列双柱当柱间距足够大时整流流谱呈八涡结构, 当间距很小或为零时呈四涡结构。双柱的斜置有利于整流旋涡的合并。当柱间距接近至一定范围时, 整流流动呈三维特征。振幅的减小和频率的降低使流动易出现三维现象。

关键词 整流流动; 粘性旋涡; 流动显示

中图分类号 V 211.7

0 引言

小振幅振荡柱体在静止粘性不可压缩流体中由于非线性雷诺应力的作用, 会诱导出二阶量的定常运动, 称之为定常整流流动(Steady streaming)。由于在海洋地理学、水动力学、大气动力学、生物流体力学、声学、近海结构动力学等众多领域中有着广泛的潜在应用背景, 一百多年来吸引了许多不同学科的专家、学者对它进行了研究。由于问题复杂, 研究尚待深入。对多个柱体诱导的定常整流流动, Zapryanov 等对无界域中串列和并列双柱诱导的整流流动进行了理论分析, Ingham 和 Yan 等研究了无界域中平板、方柱和圆柱栅列诱导的定常整流流动。外部边界对整流流动的影响, 双柱在有界域中不同柱间距、柱方位以及振幅和频率如何影响定常整流旋涡流动都有待进一步研究。本文以圆形域作外边界, 双柱对称置于圆中心, 作同频同相的高频小振幅振动, 实验研究有界域中柱间距、柱方位、柱形状等对流动的影响。

1 实验装置及测试

实验装置见图 1。所用圆柱形容器的内径为 28cm、高 20cm, 考虑到流动显示中片光源不产生折射, 在圆柱形容器外面套一方形柱体, 方柱与圆柱间充满水。实验所用粘性静止液体为软水和氯化钠溶液混合物, 其比重与流动显示所采用的粒子比重相同。粒子采用直径小于 0.2mm 的聚氯乙烯颗粒, 其比重为 $1.005\text{g}/\text{cm}^3$ 。

实验模型有直径分别为 10mm 和 15mm 的圆柱体以及边长为 18mm 的圆角方菱柱, 其圆

* 国家自然科学基金资助项目

本文于 1997 年 7 月 31 日收到, 1998 年 4 月 29 日收到修改稿。

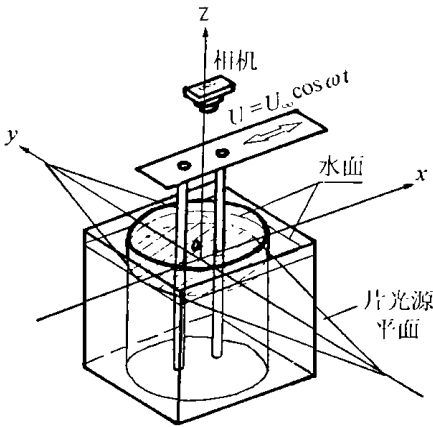


图 1 实验装置示意图
Fig 1 Schematic experimental set-up

角半径约为 2mm。双柱以容器圆柱中心对称放置并沿与柱轴垂直的 x 方向作同频同相的小振幅振动。为保证二维性,模型长度与容器底部间距小于 10mm。

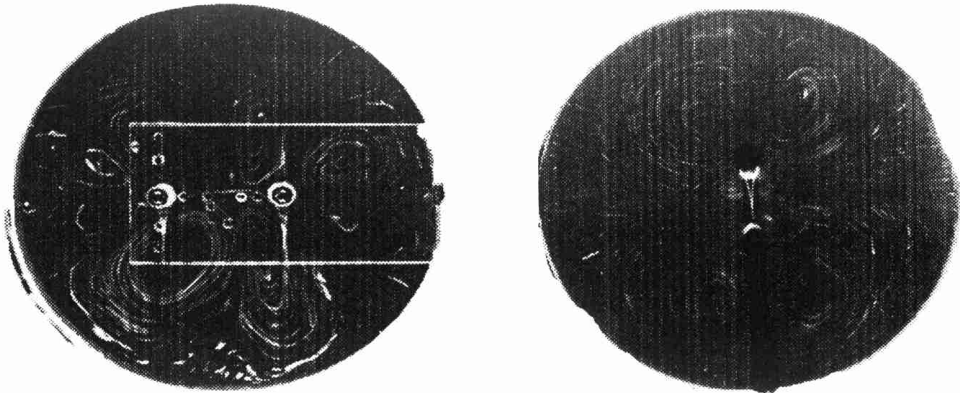
采用光学显微镜测定振幅,频率测定采用光电测速计或由机械振动台给出。光源为振镜扫描的氦氖激光片光源。相机置于容器上方,俯视拍摄,曝光时间 1m in,因而摄得 Stokes 层外的定常整流流场。

2 实验结果和讨论

对双圆柱在振动柱直径为特征长度的无量纲振幅 $\epsilon = 0.005 \sim 0.05$ 、无量纲参数 $M^2 = \frac{\omega l^2}{\nu} = 2.6 \times 10^3 \sim 4.2 \times 10^3$ 以及双柱无量纲柱间距 $L = 0 \sim 4$ 、双柱的柱轴平面与振动平面(与 $X-Z$ 平面平行)的夹角 $\varphi = 0 \sim 90^\circ$ 的范围内进行了一系列实验。

串列双柱在基本相同的振幅和频率下考察柱间距对整流流动图谱的影响,实验结果指出,当柱间距足够大时,因每个振动柱诱导生成四个旋涡,双柱振动在 Stokes 层外共诱导生成八个旋涡的流谱,说明此时双柱间诱导生成的旋涡间相互作用不强。对并列双柱同样可见当柱间距足够大时流谱呈八涡结构。典型的八涡结构流谱示于图 2(a)、(b)。对串列双柱,外边界的影响是振柱两边的旋涡发展受到限制,这与我们在偏心圆柱诱导整流流动研究中情况类似^[7]。随双柱间距减小,柱间旋涡发展受限,而柱外旋涡占据较大空间。当柱间距为零或很接近时,双柱类似于一个双圆截面的单柱,当 Stokes 层不破裂时在层外诱导生成四涡结构的流谱,见图 3 所示。串列双菱柱柱间距为零时亦为四涡结构流谱。

$\varphi = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 的斜置双柱诱导的整流流谱随 φ 的不同在实验条件下没有本质不同,典型结果示于图 4。可见斜置使诱导生成的旋涡发生合并。



(a) $\epsilon = 0.014, M^2 = 9.33 \times 10^3, L = 4$

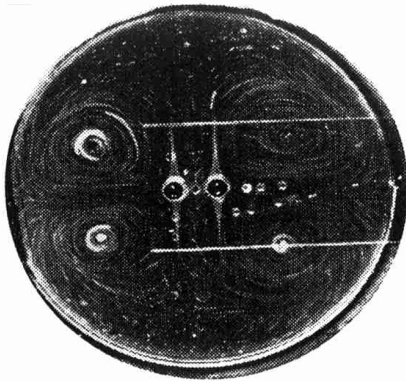
(b) $\epsilon = 0.025, M^2 = 3.89 \times 10^3, L = 2.5$

图 2 八涡整流图谱 (a) 串列双柱 (b) 并列双柱

Fig 2 eight-vortices streaming flow pattern

值得注意的是实验发现当双柱的柱间距处于一定的范围时,长时间曝光在片光源平面中

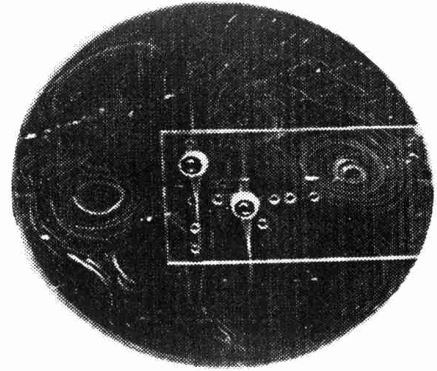
摄得的流谱是示踪粒子穿越片光源平面的迹线, 表明整流流动已是三维流动了(见图 5 所示)。



$\varepsilon = 0.02, M^2 = 9.45 \times 10^3, L = 1$

图 3 四涡整流图谱

Fig 3 four-vortices streaming flow pattern



$\varepsilon = 0.013, M^2 = 9.47 \times 10^3, L = 2$

图 4 斜置双柱整流流谱

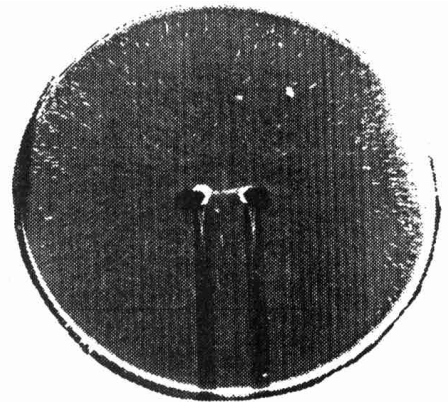
Fig 4 streaming flow pattern of the plane containing two cylinder axes is tilted to the oscillating plane

研究表明, 振动柱诱导的整流流动沿振动方向在轴上一定距离处有峰值存在^[6], 对串列和并列双柱中心点又是流场中的鞍点, 易产生不稳定, 导致流场变成三维流动。实验结果还表明振幅的减小和频率的降低使流动容易出现三维现象, 我们认为, 这与驱动速度减小, 流动易受扰动有关。

3 结 论

串列和并列双柱作小振幅振动诱导的整流流谱当柱间距足够大时呈八涡结构, 当柱间距很小或为零时呈四涡结构, 柱体截面形状为圆形或圆角方菱形对流谱结构无本质影响。斜列双柱有利于引起整流旋涡的合并。

不论双柱方位布置如何, 当柱间距减小至一定范围时, 整流流谱的二维性受到破坏, 流动呈明显的三维特征。



$\varepsilon = 0.025, M^2 = 3.89 \times 10^3, L = 1.5$

图 5 三维整流流动

Fig 5 3-D streaming flow

振幅的减小和频率的降低使流动容易出现三维特征。

参 考 文 献

- 1 Rayleigh L. On the Circulations of Air Observed in Kundt's Tubes and on Some Allied Acoustical Problems 1883, Phil Trans A 175, 1~ 21.
- 2 Riley N. The Steady Streaming Induced by a Vibrating Cylinder J. Fluid Mech. 1975, 68(4): 801~ 812
- 3 Zapryanov Z, Kozhoukno-rova Zh, Jordanova A. On the Hydrodynamic Interaction of Two Circular Cylinders Oscillating in a Viscous Fluid J. Appl Maths phys 1988, (ZAMP) 39, 204~ 220

- 4 Yan B, Ingham D B, Morton B R. Streaming Flow Induced by an Oscillating Cascade of Circular Cylinders. *J. Fluid Mech.* 1993, 252, 147~ 171.
- 5 Tatsuno M, Beam P W. A Visual Study of the Flow around an Oscillating Circular Cylinder at Low Keulegan-Carpenter Numbers and Low Stokes Numbers. *J. Fluid Mech.* 1990, 211, 157~ 182
- 6 林同骥, 浦群, 李坤, 刘振环. 小振幅振动圆柱在偏心圆域中诱导的二次定常旋涡流动. 空气动力学学报, 1992, 10(1), 69~ 75.
- 7 浦群, 王玮. 小振幅振动圆柱在偏心圆域中诱导的二次定常旋涡流动. 空气动力学学报, 1997, 15(1).

Experimental Study of the Steady Streaming Vortex Flow induced by two oscillating circular cylinders

Pu Qun Li Kun

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080)

Abstract The steady streaming vortex flow induced by two oscillating circular cylinders in an incompressible viscous fluid which is otherwise at rest is studied experimentally by flow visualization. These two cylinders, arranged in a center-symmetrical manner relative to the container, oscillate in the same phase and with the same frequency and with small amplitude. For two cylinders in tandem arrangement, the flow pattern of the steady streaming outside the Stokes layer is an eight-vortices structure in the case of large distance between the cylinders, but is a four-vortices structure in the case of a very small or vanishing distance. When the plane containing the two cylinder axes is tilted to the oscillating plane, the combination of the streaming vortices can be seen. Three-dimensional features of the streaming flow take place if two cylinders approach each other within a certain distance. The smaller amplitude or frequency of oscillation, the more obvious the 3-D features are.

Key words streaming flow; viscous vortex; flow visualization