

小振幅振荡圆柱域内部的 定常整流旋涡流动

浦 群 李 堃 王 玮

V21.15

中国科学院力学研究所, 北京(邮政编码 100080)

摘要 对充满静止不可压缩粘性流体的圆柱形, 当柱壁沿垂直于柱轴方向作小振幅简谐振荡时的内部流动进行了实验研究, 发现柱壁振荡在圆柱域内部也诱导形成旋涡形态的定常整流流动。流动图谱随不同的振荡参数组合呈现四涡形态、双涡形态以及足印状双涡和蝶状四涡的过渡形态, 并初步给出了不同整流图谱随参数变化的演化规律。

关键词 定常整流流动, 粘性流, 旋涡, 振荡流, 内部流动, 整流流动图谱。

引 言

不可压缩粘性流体与固体边界作相对小振幅简谐振动时, 由于流体粘性与惯性的非线性耦合作用, 会在流场中诱导出二阶量的定常流动, 称为定常整流流动。长期以来, 许多学者对柱体在静止不可压缩粘性流体中作与柱轴垂直方向的小振幅简谐振动时的整流流动问题进行了大量理论和实验研究, 包括无界域中圆柱振动、同心圆形边界域中心圆柱或方柱振动诱导的定常整流流动以及偏心圆柱间的定常整流流动研究^[1-4]。许多研究已指出, 当 Re 数和 Strouhal 数不同组合时, 可能出现三种不同的流动类型: 没有边界层性质的类型, 具有一层边界层的流动类型, 即非定常流动仅限于 Stokes 剪切波层内, 层外只有二阶的定常整流流动; 以及具有两层边界层的流动类型, 即非定常 Stokes 剪切波层外的二阶定常整流流动也具有边界层流动性质。研究还指出, 当定常整流流动的 Re 数 (即无量纲振幅与流动特征雷诺数的积) 较小时, 定常整流由 Stokes 方程控制, 而当 Re 数足够大时, 对流项的作用不可忽略, 故定常整流由 N-S 方程控制。

在实际上还常会遇到固壁振动的内部流动问题, 如海浪中的储油筒、管道的情况等。故我们考虑圆柱域内充满静止不可压缩粘性流体当柱壁沿垂直柱轴方向作小振幅简谐振动时的内部流动问题, 探讨在内部流动中是否也存在定常整流流动以及它会具有什么样的特性。

一、实验方案

采用两种方式进行实验。一种方式是机械振动台连接一个无底的圆柱形有机玻璃

筒, 使之产生沿柱轴方向的小振幅简谐振动, 将筒插入装有静止不可压缩流体的有机玻璃槽中, 为减少端部效应, 取入水的柱段的长细比大于 5。另一种方式是将充满静止不可压缩流体的圆柱形容器直接置于机械振动台上, 使之产生沿柱轴方向的小振幅简谐振动。圆柱形的长细比接近 2。为流动显示需要, 圆柱形有机玻璃容器外又套一个方柱形有机玻璃容器, 夹层内充满同样的粘性不可压缩静止流体。

为保证所产生振动的简谐振动特性, 采用振动传感器测定机械振动台的振动波形后确定实验采用的振动频率不小于 10Hz。采用光学显微镜测定振幅。在振动台上固定一粗糙表面, 用灯局部照亮粗糙表面后在光学显微镜中可观测到若干发亮的光点, 调节焦距使某一亮点特别清晰, 振动时从显微镜可观测到光点移动拉成的亮线, 显微镜的标尺刻度读得亮线长度, 标定后测得振幅。

流动显示采用直径约为 0.1mm 的聚氯乙烯粒子, 其比重为 1.055g/cm^3 。为使粒子很好悬浮, 配制浓度约为 8% 的盐水为实验液体。在垂直于柱轴方向放置片光源, 相机置于圆筒上方, 不随振动台振动, 俯视图拍摄流场, 曝光时间一般为 4~6s。

文献[7]对振动柱外部定常整流的显示实验表明, 在液体的自由表面上得到的流动图谱与中间截面上无自由表面时得到的图谱定性一致, 这表明整流旋涡流动具有柱状旋涡特性, 而在该实验中振动柱的长细比仅为 1.5。参考这一情况, 考虑到主要关注柱长为无限长的域内二维定常整流流动, 而实验中筒底和筒端会形成三维效应, 因此主要拍摄了自由液面的流动图谱, 并通过控制振动参数来保证实验过程中自由液面波动状态保持不破坏。在无底圆筒的实验中, 通过过柱轴的垂直片光源平面对内部流动的观察可以看到, 圆筒入水端端部引起的端部效应流动范围约为 2 倍的柱径长度。两种不同实验方式的实验结果表明自由液面上的流动图谱定性一致。根据以上分析, 认为所得自由液面的流动图谱可以定性反映柱长为无限情况下小振幅振荡圆柱域内部的二维定常整流流动。

二、实验结果和讨论

定义振幅 A 与圆柱半径 r 之比为无量纲振幅 ε 、无量纲参数 $M^2 = Re/\varepsilon = \omega r^2/\nu$, 这里 ω 是振动的圆频率、 ν 为流体的运动粘性系数。在 $\varepsilon = 0.001 \sim 0.00325$ 、 $M^2 \approx 0.6 \times 10^5 \sim 1.25 \times 10^5$ 范围内进行了一系列实验。实验参数范围的选择考虑到便于同将要进行的理论分析比较, 参考前人对振荡圆柱外部整流流动的分析, 尽量满足定常整流流动由 Stokes 方程控制的参数范围。

从实验可见, 小振幅振荡的圆柱域内同样诱导形成定常整流流动, 因此静止的相机摄得了定常 Stokes 剪切波层以外的清晰的整流流动图谱。

从实验结果可见, 与振荡圆柱外部的定常整流流动类似, 小振幅振荡圆柱域内部的定常流流动在一定的 ε 和 M^2 组合条件下也呈现以振动方向和垂直于振动方向为对称轴的四涡结构图谱, 典型结果参见图 1。所不同的是四涡的旋转方向发生了变化, 在外部流动中, Stokes 层外的定常整流旋涡流动沿振动轴方向离开圆柱中心, 沿垂直于振动方向流向圆柱中心; 而在内部流动中, Stokes 层外的定常整流旋涡流动沿振轴方向流向圆域中心, 即旋涡的旋转方向与外部流动相反。

与振荡圆柱外部的定常整流流动不同,小振幅振荡圆柱域内部的定常整流流动有时呈现的是以振动轴方向为对称轴的双涡结构流谱,双涡的旋转方向相反,如图2所示。

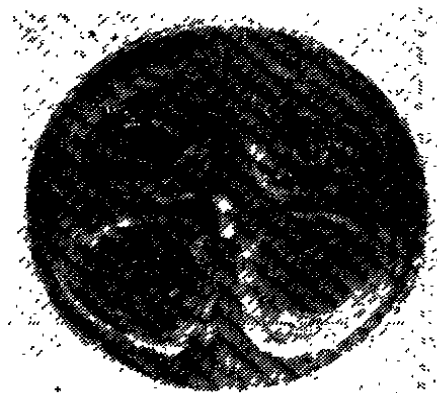


图1 典型的四涡结构整流流谱

Fig. 1 Typical four-vortices streaming flow pattern

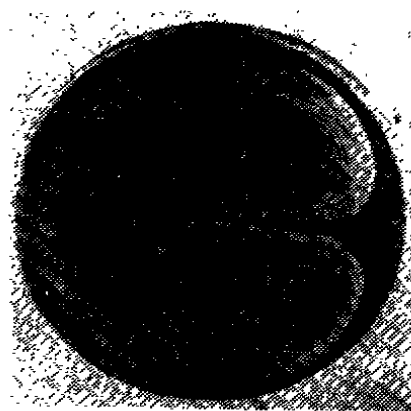


图2 双涡结构整流流谱

Fig. 2 Couple-vortices streaming flow pattern

上述两种不同旋涡结构整流流谱随振幅、频率的不同而不同, $\varepsilon = 0.001 \sim 0.00325$, $M^2 = 0.6 \times 10^6 \sim 1.25 \times 10^6$ 范围内的实验结果示图3。由图可见实验的参数范围 $\varepsilon^2 M^2 \approx 1 \sim 5$ 。每次实验都保持以表面波不破坏为极限条件。为取得稳定的整流流谱,

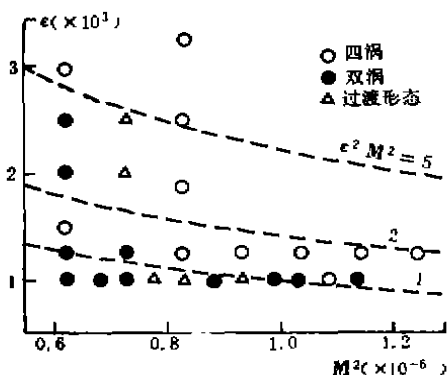


图3 整流流谱随振动参数的变化

Fig. 3 Streaming flow pattern with different oscillating parameters

当从一组振动参数改变到另一组振动参数时,一般要等待10~20分钟左右,使显示流谱充分稳定。我们做了固定振幅增加频率,然后再降低频率以及固定频率增加或减少振幅的实验对不同流谱的演化进行了考察。以 $\varepsilon = 0.00125$ 的情况为例,当频率为10Hz时,流动图谱为双涡结构,当频率增加到大于13.3Hz时,流动图谱演化为四涡结构,再降低频率,不同的涡结构流动图谱在相应参数下基本能重复。固定频率,当振幅增加时,流动图谱由双涡结构向四涡结构变化;反之,减少振幅,

则从四涡结构演化为双涡结构。

在四涡结构和双涡结构流动图谱之间,还观察到足印状双涡结构(见图4)和蝶状四涡结构(见图5)这两类整流旋涡流动流谱,我们称之为过渡形态。仔细观察,可以看到在足印状双涡的足印凹陷处还存在两个速度极慢的小涡。当振动参数改变时,观察到从四涡结构流谱向双涡结构流谱的演化过程:四涡向不对称发展成为蝶状四涡,大涡不断发展把小涡推向壁面并压扁成为足印状双涡,凹陷区不断缩小,由足印状双涡变成双涡结构流谱。

在两种不同方式的实验中,观察到的流谱类型及其演化规律,定性上是一致的。

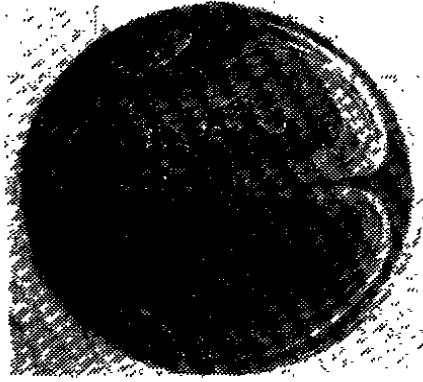


图 4 足印状双涡结构流谱
Fig. 4 Footprint-shaped couple-vortices streaming flow pattern

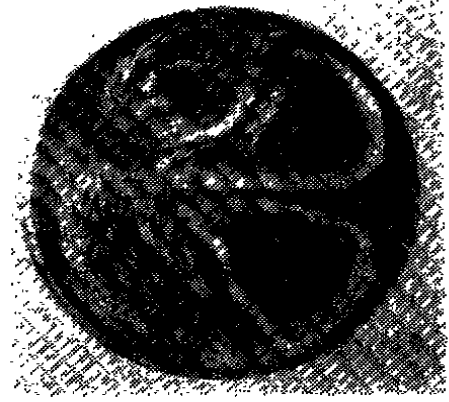


图 6 蝶状四涡结构流谱
Fig. 6 Butterfly-shaped four-vortices streaming flow pattern

我们分析在内部流动中出现多种整流流谱与中心点处的流动情况有关, 从四涡结构流谱可见中心处为流线的鞍点, 而振荡圆柱外部剪切波层外的定常整流旋涡流动没有这样的鞍点出现。观察液体自由表面的波动情况, 在振荡圆柱外部只有沿半径 r 方向的驻波, 而在振荡圆柱域内部不仅有 r 方向的驻波, 还有沿周向 θ 的驻波存在。

三、结 论

柱壁作垂直柱轴小振幅振荡的圆柱域内部也会诱导生成定常整流旋涡流动, 其流动图谱有四涡结构和双涡结构形态以及足印状双涡的过渡形态。实验给出了不同定常整流旋涡流谱随振动参数变化的演化规律。

参 考 文 献

- 1 Schlichting H. *Phys. Z.*, 1932, 33, 327
- 2 Stuart J T. *J. Fluid Mech.*, 1966, 24, 673
- 3 Wang C Y. *J. Fluid Mech.*, 1968, 32, 55
- 4 Davidson B J, Riley N. *J. Fluid Mech.*, 1972, 53, 287
- 5 Bertelsen A F. *J. Fluid Mech.*, 1974, 64, 589
- 6 Haddon E W, Riley N. *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 1979, 32, 263
- 7 Kim S K, Troesch A W. *Phys. Fluids A*, 1989, 1(6), 975
- 8 王 玮, 浦 群, 林同斌. 水动力学研究与进展 A 辑, 1993, 8(2), 172~175

Steady Streaming Vortex Flow Inside an Oscillating Circular Cylinder

Pu Qun Li Kun Wang Wei

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract This paper presents the experimental study of the flow inside a circular cylinder filled with an incompressible viscous fluid at rest, when the circular cylinder performs a small amplitude harmonic oscillation perpendicular to its axis. It has been found that a steady streaming vortex flow exists inside an oscillating circular cylinder. Four streaming flow patterns: the four-vortices, the couple-vortices, the footprint-shaped and the butterfly-shaped appears with different oscillating parameters. The evolution trend of the flow pattern from one to the other with the different oscillating parameters is revealed.

Key words steady streaming flow, viscous flow, vortex, oscillating flow, internal flow, streaming flow pattern.