

文章编号: 1000-4874(2001)04-0435-07

旋转振荡圆柱绕流中的 频率耦合现象研究

赵宇, 王薇, 鄂学全
(中科院力学所, 北京 100080)

摘要: 通过分离解法数值求解原始变量的不可压二维 N-S 方程, 对在均匀来流中旋转振荡圆柱问题进行了数值模拟, 利用快速傅里叶变换 (FFT) 方法进行频谱分析, 得到了在低雷诺数下圆柱自然涡脱落频率同外部强迫振荡频率之间的耦合作用。进而说明了在不同频率耦合区域流场涡形成、发展和脱落的规律。

关键词: 旋转圆柱; 涡脱落; 振荡; 快速傅里叶变换; 频率耦合
中图分类号: O357.1 **文献标识码:** A

1 引言

在圆柱绕流中, 圆柱旋转振荡可以有效的控制涡的脱落, 在海洋工程, 航空工程中都有应用意义。它的旋涡形成、发展和脱落的规律比静止圆柱绕流复杂得多, 一些物理机制尚未完全认识清楚, 为许多研究者所瞩目。但是关于旋转振荡圆柱流场特性的数值和实验研究工作进行得还是比较少^[6-8], 文献[6]着重根据流线形状, 分析圆柱近尾迹的涡脱落模式, 给出了根据速度振幅和振荡频率确定涡脱落规律分区的定性示意图, 以及几个不同涡脱落规律的瞬时流线图。文献[7]主要是从力系数方面着手进行研究的, 给出了在雷诺数为 3000 的情况下不同振荡频率下的升力系数曲线以及相应的涡量图, 从等涡线的特性出发对升力曲线变化的规律给出了解释, 文献[7]主要是从实验方面对旋转振荡圆柱流场进行了可视化实验研究, 给出了涡脱落了几个模式。在圆柱旋转振荡的时候, 振荡频率将同涡的自然脱落频率一起对流场的演化规律产生影响, 在不同的振荡频率下, 这两种频率的偶合关系有很大的区别, 从而导致流场的发展规律也有相应的不同。本文通过数值模拟以及频谱分析结合研究了在低雷诺数的情况下, 圆柱在均匀来流中以不同振荡频率进行强迫振荡时振荡频率同自然涡脱落频率之间的耦合作用, 以及在不同耦合作用情况下的流场演化规律。

收稿日期: 2001-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19972068)

作者简介: 赵宇(1975~), 男, 硕士。

2 数值方法

2.1 物理模型及控制方程

本研究的物理模型是在均匀来流 U 中半径为 R 的无限长圆柱围绕自身轴线正弦规律 $U_\theta = \Omega R \sin(2\pi f_s t)$ 的旋转振荡运动。其中 Ω 为速度振幅, f_s 为振荡频率。如图 1 所示。数值模拟从二维原始变量 $N-S$ 方程出发, 采用分离解法求解。离散采用控制体积法, 网格采用无结构四边网格以简化几何模型和缩短网格生成时间。流场必须满足控制方程:

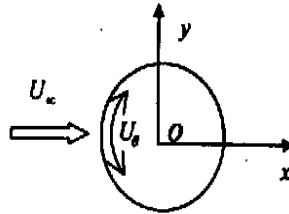


图 1 物理模型

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

通用微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S_\phi \quad (2)$$

2.2 方程离散化

- (1) 使用计算网格将求解域分割成离散的控制体。
- (2) 控制方程在不同的控制体上的积分构造求解离散相关的变量如速度、压力的代数方程。
- (3) 线性化离散方程, 求解合成的线性方程系统来得到相关变量的修正值。

对方程 (2) 在一个 P 为中心点的控制体上进行积分, 可得流量平衡方程:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + I_e - I_w + I_n - I_s = \sum_{\Delta V} S_\phi dV \quad (3)$$

其中, I_f ($f = e, w, n, s$) 表示通过控制体四个单元面 ϕ 的总流量, 都包含了一个对流成分和一个扩散成分。

时间项的近似采用三阶全隐 (TLFD) 格式, 其二阶精度格式为:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} = \frac{3(\rho \phi^n) - 4(\rho \phi^{n-1}) + (\rho \phi^{n-2})}{2\Delta t} \quad (4)$$

方程 (3) 的最后离散格式为:

$$A_P \phi = \sum_{nb} A_{nb} \phi_{nb} + S_U \quad (5)$$

其中: nb 为与 P 单元相邻的单元, A 为线性系数, $A_P = \sum_{nb} A_{nb} - S_P$, $S_P = S_{P-1} \Delta t$

$\frac{\partial \rho \Delta V}{\partial t}$, $S_U = S_U + S_U^{CD} \frac{\partial \Delta V}{\partial t} (2\phi^1 - 0.5\phi^2)$, S_U 和 S_P 是物理源项。

2.3 速度—压力耦合

在不可压流中, 动量方程联系着速度和各自的压力梯度。连续方程看起来与压力无关, 却正是对速度场的一个附加限制。在分离解法中, 动量方程和连续方程分别求解, 在求解过程中

连续方程被用作压力方程, 但是对于不可压流压力 P 在方程 (1) 中没有显示出现, 既然密度不是跟压力直接相关, 因此利用 SMPL E (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 方法来引入压力, 给定一个假象压力场, 计算出速度场, 然后求解压力修正方程得到压力场。

2.4 边界条件

边界条件指定物理模型边界上的流动变量, 它们在数值模拟中是关键性的分量, 能否被正确的指定是非常重要的问题。在本问题中, 主要涉及到 3 种边界条件, 即固壁无滑移边界条件, 速度入流边界条件和速度出流边界条件。

3 计算结果和讨论

圆柱做旋转振荡, 壁面速度发生周期性变化, 当壁面速度方向与来流相同时, 推迟流动分离, 反之, 则促进流动分离。本文计算模拟了雷诺数 $Re (= 2PRU / \mu)$ 为 100, 200, 500, 1000 的圆柱绕流。在本文中着重给出了雷诺数 $Re = 200$ 的计算模拟结果。在 $Re = 200$ 的情况下, 计算了振荡频率 f_s 分别等于 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 3.0 等不同情况下的圆柱绕流。计算网格数均为 81×81 , 时间步长为 0.05。在下文中主要对 f_s 分别为 0.2, 0.5, 1.5 三种比较有代表性的结果进行讨论分析, 其他振荡频率下的结果在图 6 中给出。

图 2(a)、图 2(b)、图 2(c) 分别为 f_s 等于 0.2, 0.5 以及 1.5 的升力曲线以及相应的频谱图。可以看到这三种情况下的升力曲线和频谱图有很大的区别。在图 2(a) 中可以看到, 升力曲线系数是单纯的正弦模式, 这一点也可以从频谱图中定量的得到。在频谱图中, 只有一个频率的峰值占主导地位, 这个频率等于圆柱的振荡频率 f_s 。自然涡脱落频率被同步, 振荡频率控制流场演变规律, 自然涡脱落频率指的是在均匀来流中静止圆柱绕流涡的脱落频率。这一点可以从图 3(a)、图 3(b) 瞬时流线图中得到验证。从瞬时流线图可以看出, 漩涡的脱落周期同振荡周期相同。另外, 在 $\tau = 25 = 5T$ 以及 $\tau = 27.5 = 5.5T$ (T 为振荡周期) 的两个瞬时流线图中可以看出, 在每次圆柱振荡速度改变方向的时候, 将因为剪切作用力方向的改变搓出一个涡来, 这时的自然脱落频率被振荡频率同步, 我们可以说在振荡频率较小的时候, 流场变化处于同步区。

随着振荡频率的升高, 在图 2(b) 中我们可以看到, 升力系数曲线不再呈现单纯的正弦模式, 而是由两个正弦曲线相互叠加组成的周期性曲线。频率图中也出现了两个峰值, 一个是涡的自然脱落频率 f_e , 另一个是振荡频率 f_s 。这时涡的脱落模式变得复杂起来, 涡的脱落频率不再同振荡频率相同。涡的自然脱落频率在流场演变过程中的作用逐步增强。这时的几个瞬时流线图如图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)、图 4(d) 所示。可以看到, 这时的涡脱落不再那么有规律性, 这是由于两个频率对流场演变的规律都起影响造成的。我们可以说这时流场变化处于竞争区。涡的脱落频率同外部振荡频率互相竞争, 控制流场演化规律。

进一步增加振荡频率 f_s , 如图 2(c) 所示, 升力系数曲线由很多小锯齿组成近似的正弦曲线。进行 FFT 变化, 从频谱图中也可以看出, 相比较于涡的自然脱落频率对应的峰值, 振荡频率所对应的峰值已经很低。对瞬时流线图图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)、图 5(d) 进行分析可以得出结论, 这时的涡脱落周期等于涡的自然脱落周期, 而且涡的脱落规律同经典的卡门涡脱落规律基本相同。可以得出结论, 此时在涡脱落规律中, 起主要作用的是涡的自然脱落频率, 振荡频率所起的影响已经被大大的削弱。可以说现在流场处于卡门涡街区。这点也可以从边界层理论得出合理的解释。当振荡频率比较高的时候, 在圆柱附近的边界层变厚, 相当于加大了圆柱

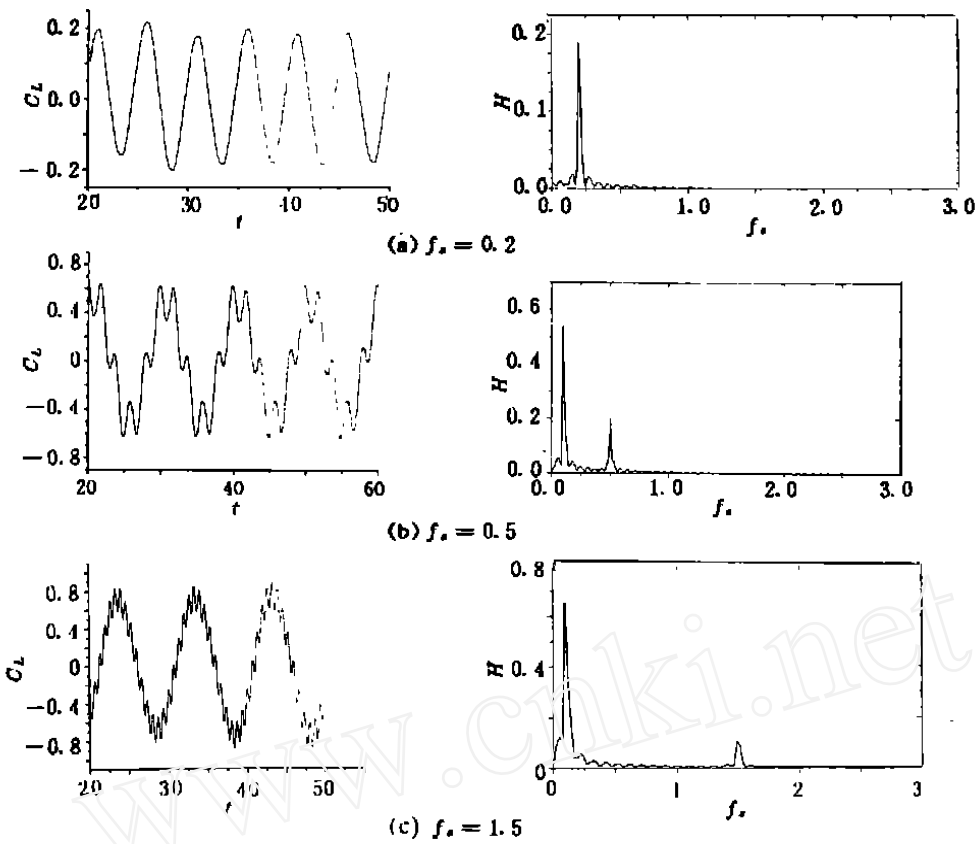


图2 不同振荡频率下的升力系数曲线(左)及相应频谱图(右)

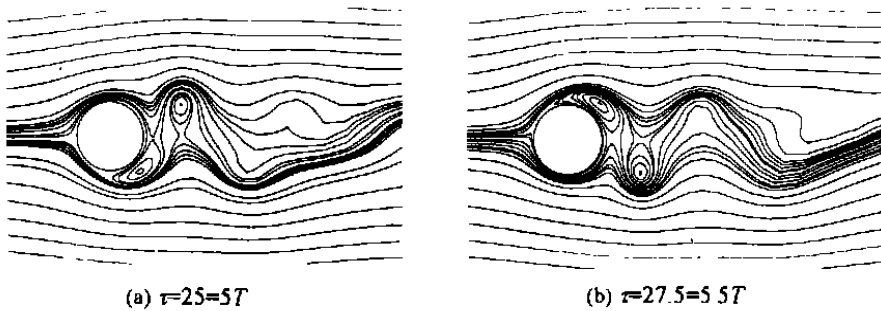
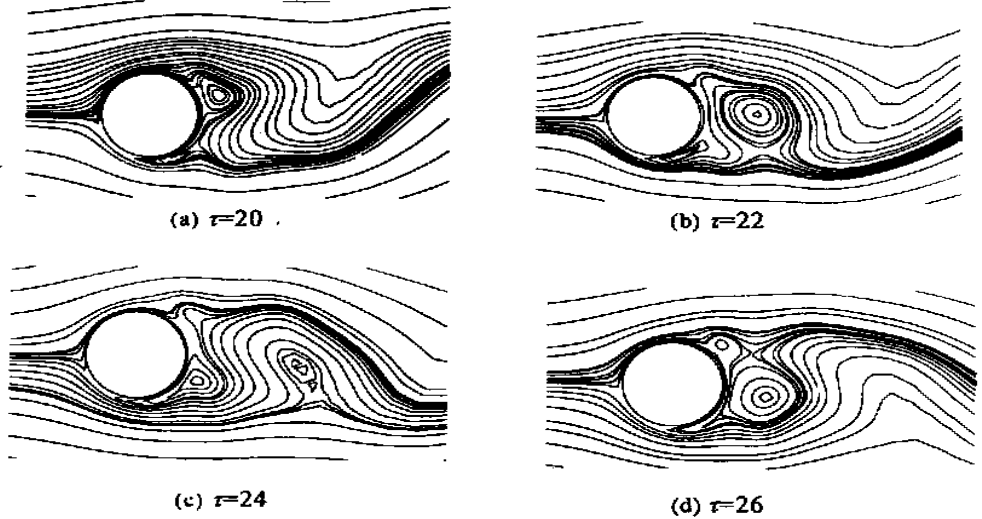
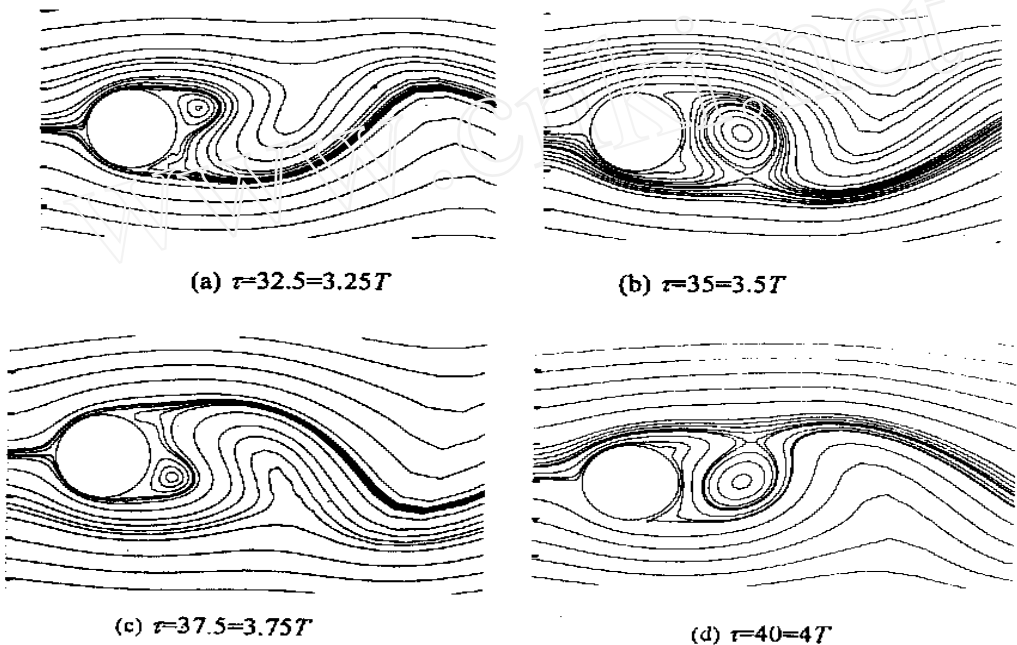


图3 $f_s = 0.2$ 时的瞬时流线图

的半径尺度, 从而对边界层外的涡脱落规律不起主要作用。同文献[8]中给出的实验结果对比来看, 本文的计算结果在定性上完全符合给出的流场演变规律同振荡频率之间的关系。根据 S_r 的定义 $S_r = 2Rf/U$, 由自然脱落频率可以得出 $S_r = 0.189$ 符合文献[10]中给出的静止圆柱绕流的 $S_r \sim Re$ 关系曲线, 更进一步验证了程序的正确性。

定义系数 $\beta = A(f_e)/A(f_s)$, 其中 $A(f_e)$ 为自然脱落频率 f_e 所对应的频谱图中的峰值, $A(f_s)$ 为外部振荡频率 f_s 所对应的峰值。 β 的物理含义为频率竞争强度。本研究进行的所有在 $Re = 200, \Omega = 2$ 的计算结果的频谱分析结果如图6所示。图6为 $\beta - f_s$ 曲线。从曲线关系上来看, 当振荡频率小于 0.2 的时候, 在自然脱落频率处没有出现峰值, 自然脱落频率被同步。

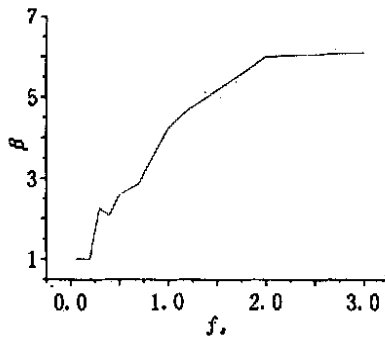


图4 $f_s = 0.5$ 时的瞬时流线图图5 $f_s = 1.5$ 时的瞬时流线图

当振荡频率大于 0.2 小于 1.0 的时候, 迅速出现的自然脱落频率的峰值。但是 β 数比较小, 一般小于 3。这时的流场处于频率竞争区域。当振荡频率大于 1 的时候, β 数也升高, 意味着自然脱落频率逐渐对流场的演变规律起了主导作用。一般 β 数大于 6, 流场处于卡门涡街区。由此也可以定性的看出在振荡圆柱绕流中的频率耦合作用。

对于在旋转振荡扰流中的频率耦合现象, 耦合作用的主要依据是根据流场瞬时流线图的变化规律来做出判断, 因此只能给出大致的分区点。在进行频谱分析的时候, 也要考虑到可能由于频谱的泄漏问题所引起的精度问题。

在圆柱旋转振荡绕流中, 雷诺数, 速度振幅对于频率耦合现象都有很大的影响。对于在不

图6 β - f_s 图

同雷诺数以及速度振幅下的频率偶合现象,将在下一篇文献中给出的结果及讨论。

4 结论

(1) 在低雷诺数的情况下, 流场结构在不同的振荡频率、速度振幅的综合影响下, 呈现三种分区结构(同步区, 竞争区, 卡门区)。

(2) 在不同的分区中, 自然涡脱落频率与振荡频率的偶合关系各不相同。在同步区, 自然涡脱落被同步, 在竞争区, 两个频率互相竞争, 但是 β 数比较小, 两个频率都对流场规律起作用。在卡门区, β 数升高, 振荡频率所起的作用被抑制, 主要的涡自然脱落频率对流场规律起作用。

(3) 在雷诺数为 200, 速度振幅为 2 的情况下, 振荡频率的两个临界点为 0.3 和 1.0。小于 0.3, 两种频率之间的耦合作用为同步作用; 0.2 和 1.0 之间, 两个频率之间的耦合作用为竞争关系; 大于 1.0, 涡的自然脱落频率占主导地位。

致谢:

感谢上海交通大学海洋工程国家重点实验室对本项目的支持。

参 考 文 献:

- [1] BADR H M, DENNIS S C R & MENARD C. Unsteady flow past a rotating circular cylinder at Reynolds number 10^3 and 10^4 [J]. J. Fluid Mech., 1990, 220: 459-484
- [2] BADR H M & DENNIS S C R. Time-dependent viscous flow past an impulsively started rotating and translating circular cylinder [J]. J. Fluid Mech., 1985, 158: 447-488
- [3] CHEW Y T, M CHENG and S C LUO. A numerical study of flow past a rotating circular cylinder using a hybrid vortex scheme [J]. Journal Fluid Mech., 1995, 299: 35-71
- [4] C M WANG and J C WU. Numerical solution of steady Navier-Stokes problem using integral representations [J]. AIAA Journal, 1986, 24(8): 1305
- [5] C M RHIE and W I CHOW. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation [J]. AIAA Journal, 1983, 21(11): 1525-1532
- [6] 陆夕云, 庄礼贤. 均匀来流中旋转圆柱粘性绕流的数值模拟 [J]. 力学学报, 1994, 26(2): 233-238
- [7] 贾志刚, 吕志咏, 邓小刚. 均匀来流中旋转振荡圆柱绕流的数值研究 [J]. 航空学报, 1999, 20(5): 389-

393

- [8] TOKUMAKU P T, DMOTAKIS P E. Rotary oscillation control of a cylinder wake [J]. *J Fluid Mech*, 1991, 224: 77-90
- [9] WU J, MO J, VATLIA. On the wake of a cylinder with rotational oscillation [R]. AIAA paper 89-1024, 1989
- [10] BRAZAM, CHASSANG P and M NH H H. Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder [J]. *J. Fluid Mech*, 1986, 165: 79-130

Frequency coupling effect in flows around rotational oscillating circular cylinder

ZHAO Yu, WANG Wei, E Xue-quan

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

Abstract This paper presents numerical results of the flows around the rotationally oscillating circular cylinder by solving two-dimensional N-S equations using FFT (fast Fourier transfer) to study the frequency coupling effect, we get the results about coupling effects of the frequency of vorticity naturally shedding and the frequency of circular cylinder rotationally oscillating at low Reynold number. And we also show the regular patterns of vortex forming, developing and shedding

Key words: rotationally cylinder; vorticity shedding; oscillate; FFT; frequency coupling

www.cnki.net