

单列圆柱流体诱导振动数值模拟研究

王沅浩¹, 姜歌东², 孟祥兆¹, 罗昔联¹

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 基于表面涡方法和流固耦合模型, 研究了雷诺数为 2.67×10^4 时的单列圆柱流体诱导振动问题, 并计算了涡云图、流体力、振动响应、涡脱落频率等. 计算模拟结果很好地重现了刚性单列圆柱在小间隙比(1.5)下以宽、窄尾涡交替和多频为特征的非均匀流态, 以及间隙比为 2.0 时的涡脱落现象. 此外, 还研究了单列自由振动的弹性圆柱在间隙比为 2.0 时的流体诱导振动问题, 结果表明: 在大振幅条件下, 流体诱导力在 x 方向和 y 方向有较强烈的耦合; 随着振幅的减小, x 方向振动对 y 方向振动的影响可以忽略, 可采用单自由度的动力学模型假设进行计算.

关键词: 表面涡方法; 圆柱列; 流体诱导振动

中图分类号: O357.1; O357.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0870-05

Numerical Simulation for Vortex Shedding Induced Vibration of Cylinder Array

Wang Fenghao¹, Jiang Gedong², Meng Xiangzhao¹, Luo Xilian¹

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The cross-flow induced vibration of a row of cylinders at sub-critical Reynolds number $Re = 2.67 \times 10^4$ is simulated based on surface vorticity method and a fluid-structure interaction model incorporating the effects of cylinder motions and displacements. The computational results of the vorticity map, fluid force, vibration response, and shedding frequency are presented. The non-uniform flow behind a rigid cylinder row with a small pitch ratio $T/D = 1.5$ is characterized by narrow and wide near wakes and multiple frequencies, and the vortex shedding behind a rigid cylinder row with $T/D = 2.0$ is replicated properly by the simulation results. Furthermore, the flow induced vibration of a flexible cylinder row with $T/D = 2.0$ is also investigated. The numerical results show that the coupling between x - and y -direction occurs obviously for large-amplitude vibration, and declines rapidly with the reduced vibration amplitude to be expected to choose single DOF dynamic model for the flow-induced vibration of a cylinder row.

Keywords: surface vorticity method; cylinder array; flow induced vibration

流体诱导振动(FIV)引起的热交换器管束损坏是核电站和汽轮发电机组发生事故的主要原因. 文献[1]对这一问题的研究作了全面的综述, 认为导致圆柱流体诱导振动的诱发机理有流体弹性不稳定、涡脱落激振、紊流冲击和声学激振等 4 种因素, 其中流体弹性不稳定是流体与柱体结构相互作用的结果, 反映了管束之间间隙流的非稳定本质, 是一种最重要的诱

发机理. 随着计算机技术和计算方法的发展, 利用计算流体力学手段研究多圆柱流体诱导振动和流体弹性不稳定问题逐渐成为可能, 如: 文献[2]用有限元方法(FEM)在 $Re = 200$ 时计算了 2 个并排圆柱的流体诱导振动问题; 文献[3]用 FEM 在 $Re = 160$ 时计算了 2 个圆柱前、后及成一定角度排列时的流体诱导振动问题; 文献[4]基于 Brinkman 罚函数流固耦合模型用

谱元法(SEM)计算了单列圆柱的紊流场。

多圆柱流体诱导振动的数值模拟需要大量的计算网格,圆柱振动时还需要进行非常耗时的网格重新划分,因此目前大多数数值研究工作都是在工作站或小型机上完成的,而且研究也仅限于圆柱小幅振动的情况。如果同时考虑计算精度和计算费用,目前大多数有限差分法(FDM)、有限元法和近来提出的谱元法都不能满足在工程实际的 Re 范围内模拟圆柱的流体诱导振动的要求。在高雷诺数下,流体流动主要是旋涡运动和涡面变化,而作为无网格法的涡方法(SVM)主要针对涡量场的研究,因而直接抓住了流体绕过钝体的物理特征。另外,由于没有网格的限制,固体可以在很大范围内自由运动,因而近年来涡方法在流体诱导振动的研究中越来越受到人们的重视,从理论到应用都得到了迅速发展^[5-6]。文献[6]提出了一种基于表面涡方法的圆柱绕流计算模型,并用这一模型分别模拟了 $Re=2.67 \times 10^4$ 时单个刚性圆柱和弹性圆柱的流体诱导振动问题。文献[7]研究了不同间隙比及归一化阻尼参数下串列和并列双圆柱的流体诱导振动问题,并计算了圆柱的振动响应、流体力、振动频率等,所得计算模拟结果与实验结果吻合良好。

工程上常用的换热器间隙比通常在 1.1 至 2.5 之间。流体流过小间隙比($T/D=1.1 \sim 1.5$)圆柱列后,其流态主要由宽和窄的尾涡构成,随着间隙比的增大,尾流中的这一特点不再明显,当间隙比大于 2.0 以后,尾流的流态接近流过单圆柱的流态。为了进一步验证现有的计算模型,本文首先计算了流体绕过 $T/D=1.5$ 和 $T/D=2.0$ 的刚性圆柱列的情况,由于前人对刚性圆柱列绕流的实验研究开展得较为充分,因此通过对刚性圆柱列的数值计算可以验证所建模型的正确性。在此基础上,本文研究了单列自由振动弹性圆柱的流体诱导振动问题。

1 计算方法

在表面涡方法中,表面涡元的强度可以由考虑自由涡耦合影响的 Martensen 势流方法来计算^[6]。表面涡在分离点后,从垂直于固体表面一个微小距离的位置脱落成为自由涡,并在传导速度、表面涡、其他自由涡以及自由涡的黏性扩散等共同影响下在流场中运动。涡传导对自由涡的影响由 Biot-Savart 诱导原理决定^[7],分离点位置采用文献[6]提出的分离点计算模型进行计算,刚性圆柱列的力系数、涡脱落频率等参数的计算也参照文献[6]进行。

计算中假定流体是二维流动,非稳态力将沿 x 方

向(阻力方向)和 y 方向(升力方向)作用在圆柱上,因此可以用一个二维的弹簧-阻尼-质量系统来代表圆柱运动,这样圆柱的运动就可以由下列二维归一化运动方程表述

$$\ddot{X} + \frac{4\pi\zeta_s}{U_r} \dot{X} + \left(\frac{2\pi}{U_r}\right)^2 X = \frac{C_D}{2M} \quad (1)$$

$$\ddot{Y} + \frac{4\pi\zeta_s}{U_r} \dot{Y} + \left(\frac{2\pi}{U_r}\right)^2 Y = \frac{C_L}{2M} \quad (2)$$

式中: $X=x/D$, $Y=y/D$, 其中 x 和 y 分别是圆柱在 x 和 y 方向的瞬时位置, D 是圆柱的直径; $\zeta_s = c/(2(km)^{1/2})$ 是归一化结构阻尼系数,其中 c 是阻尼系数, k 是等效刚度系数, m 是单位长度圆柱的质量; $U_r = U/(f_N D)$ 是归一化速度,其中 f_N 是刚性圆柱的固有频率; $M = m/(\rho D^2)$ 是质量比,其中 ρ 是流体密度。

圆柱位于具有无限远边界的涡量场中,当弹性圆柱在流体力作用下移动时,包含在连续流体介质中的涡随着介质一起移动,涡的数目和强度不改变。本文假设当圆柱移动时,自由涡的位移反比于自由涡到圆柱距离的 n 次方。

弹性圆柱上的表面涡不但受来流速度 U 的影响,而且还受到圆柱运动速度的影响。为了计算圆柱振动时的表面涡强度,必须在 Martensen 势流方法计算公式中增加相应的附加项^[7]。这样,圆柱表面第 m 个表面涡的强度可以由下式求出

$$\sum_{n=1}^M \gamma(s_n) K(s_n, s_m) \Delta s_n = \left[(-U + v_x) \frac{dx_m}{ds_m} \cos \alpha + v_y \frac{dy_m}{ds_m} \sin \alpha \right] + \sum_{i=1}^I \Delta \Gamma_i L(i, m) \quad (3)$$

式中: v_x 和 v_y 分别是圆柱在 x 和 y 方向的振动速度。

在本文的计算中,涡脱落频率 f_s 取为多圆柱升力系数 C_L 的波动频率,来流速度 U 取为常数,圆柱直径 D 在满足 Re 条件下的变化正比于动力学黏度系数 ν 。在 Re 一定时,归一化涡脱落频率(即斯德鲁哈尔频率) $St = f_s D/U$ 。

2 流体绕单列刚性圆柱的流动

圆柱的排列方式如图 1 所示,图 2 给出了采用上述计算方法计算出的流体涡云图,图中小圆圈的半径代表某一特定位置上自由涡的强度,通过圆圈的直线代表自由涡的瞬时速度矢量。

从图中可以看出:在间隙比 $T/D=1.5$ 时(见图 2a),尾流中出现了交替的宽、窄尾涡,圆柱间形成了

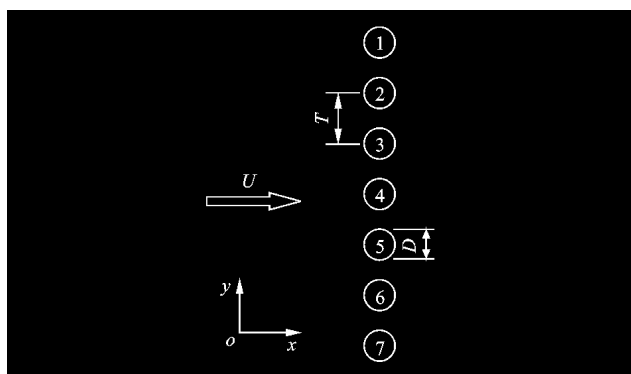


图1 单列圆柱在均匀来流中的排布

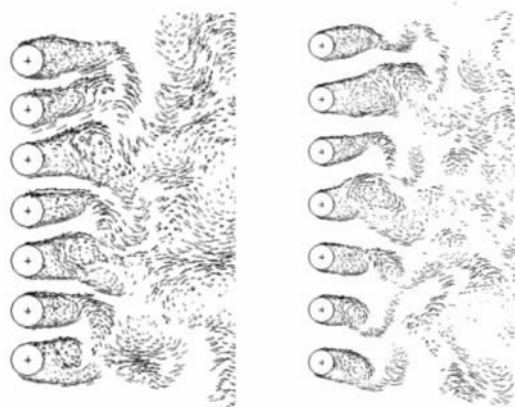
(a) $T/D=1.5$ (b) $T/D=2.0$

图2 不同间隙比条件下圆柱列的涡云图

喷射流;随着间隙比的增大,在 $T/D=2.0$ 时(见图 2b)这种现象不再明显.这一结果与 Zdravkovich 等人^[8]关于流体绕刚性圆柱列的研究结论完全一致.他们还基于平均间隙流速,对 $T/D=1.5$ 和 $Re=5.8 \times 10^4$ 条件下单列 11 个圆柱中心相邻 4 个圆柱的非稳定流体力系数进行了实验研究,4 个圆柱的 $\bar{C}_L$ 分别为 0.07、0.00、0.01 和 0.08,其升力波动范围为 ± 0.08 ,而 4 个圆柱的 $\bar{C}_D$ 分别为 0.99、0.75、0.81 和 0.37,其波动范围为 ± 0.07 .在本文的计算中(参数见表 1),当 $T/D=1.5$ 时,单列圆柱中心 5 个相邻圆柱的 $\bar{C}_L$ 在 -0.04 到 0.05 间变化,脉动力 C'_L 在 0.05 到 0.06 间变化, $\bar{C}_D$ 在 0.35 到 0.54 间变化, C'_D 在 0.04 到 0.07 间变化.值得说明的是,为了便于比较,表 1 中的流体力系数是基于间隙流速 $U_g = U \frac{T/D}{T/D-1}$ 进行计算的,而归一化涡脱落频率 f 是基于自由流速 U 计算得出的.可以看出,除了计算出的 $\bar{C}_D$ 比实验值偏小以外,其他计算结果与实验结果具有较好的一致性.计算结果与实验结果产生偏差的原因,除了二维计算假设外,计算中无限边界流场与风洞实验中壁面影响的差异也是一个重要的因素.

表1 不同间隙比条件下单列刚性圆柱的力系数和 St 值

间隙比	参数	圆柱 2	圆柱 3	圆柱 4	圆柱 5	圆柱 6
$T/D=1.5$	$\bar{C}_L$	0.05	-0.01	-0.04	-0.02	-0.03
	C'_L	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
	$\bar{C}_D$	0.54	0.53	0.48	0.41	0.35
	C'_D	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04
	St	0.06, 0.27, 0.39				
$T/D=2.0$	$\bar{C}_L$	-0.06	-0.03	0.01	0.04	0.02
	C'_L	0.10	0.11	0.10	0.11	0.11
	$\bar{C}_D$	0.45	0.46	0.39	0.48	0.52
	C'_D	0.06	0.05	0.03	0.04	0.04
	St	0.20, 0.27				

通常情况下,流体流过单列小间隙比的圆柱时会出现 2 个以上的涡脱落频率.例如,文献^[8]在 $T/D=1.5$ 和 $Re=4.11 \times 10^4 \sim 4.90 \times 10^4$ 条件下,测量了由 11 个圆柱组成的单列圆柱的频率,发现尾流中共出现了 3 个归一化涡脱落频率, St 值分别为 0.05、0.28 和 0.40.在本文的计算结果中(见表 1),也出现了多频现象,在 $T/D=1.5$ 时,5 个中心圆柱的 St 值在 0.06、0.27 和 0.39 间变化.随着 T/D 的增加(从 1.5 到 2.0), St 从 $T/D=1.5$ 时的 3 个值,变为 $T/D=2.0$ 时的 2 个近似值(0.20 和 0.27),这说明在 $T/D=2.0$ 时非均匀流现象不再明显,由涡脱落引起的流体诱导力逐渐处于主导地位.这一结论也可由脉动升力的变化得出:当间隙比增加后,5 个中心圆柱的 C'_L 显著增加(从 0.06 到 0.11),而 C'_D 变化较小.

3 单列自由振动弹性圆柱的流体诱导振动

表面涡方法由于没有网格的限制,圆柱可以在大范围内自由运动,因此适合于模拟大振幅下的流体诱导振动问题.本文以 $T/D=2.0$ 为例,研究了大间隙条件下流体绕单列自由振动弹性圆柱的流固耦合问题.计算中取 $M=10$, $\zeta=0.0317$,归一化阻尼参数 $S_\zeta = 8\pi^2 S^2 M \zeta = 1.29$.

图 3 为 $f_N/f_0=1.0$ (其中 f_N 是圆柱固有频率, f_0 是流体流过单个刚性圆柱时的涡脱落频率)时,单列弹性圆柱流体诱导振动的涡云图.当 $f_N/f_0=1.0$ 时,涡脱落频率和圆柱的固有频率相等,即出现了共振现象.由图 3 可以看出,圆柱在 x 和 y 方向的振动幅值较大,频谱分析结果也显示,涡脱落频率和圆柱

的振动频率都接近于圆柱的固有频率,即位于共振区.与刚性圆柱列相比,此时圆柱的尾涡发生了剧烈的变化,流态更不规则,当 2 个圆柱相互靠近时,出现了喷射流态.

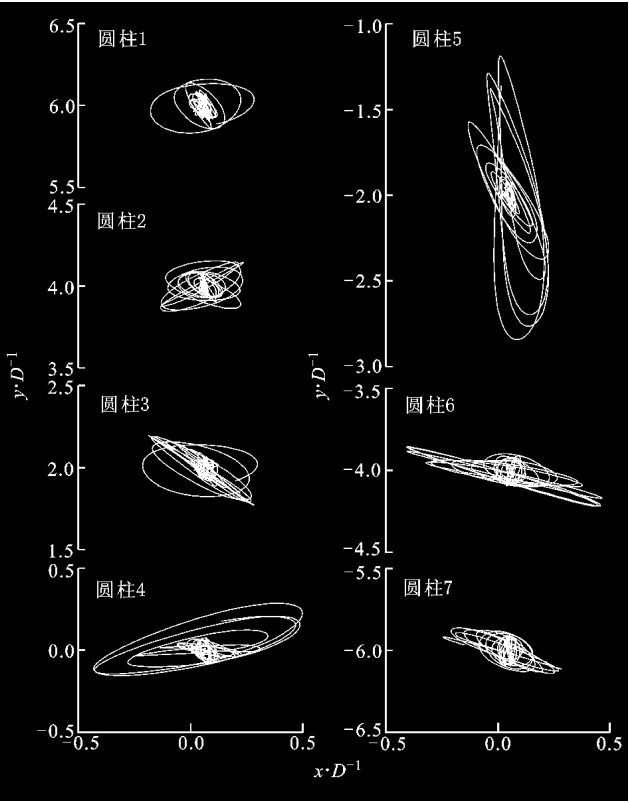


图 3 流体流过单列弹性圆柱的涡云图

流体诱导圆柱振动的中心轨迹如图 4 所示,可以看出除了圆柱 5 外,其他圆柱在 x 方向(即均匀来流方向)的振动响应幅值都大于 y 方向(即升力方向)的幅值.圆柱 5 在 y 方向的最大振幅大约为 $0.85D$.这一结论说明,在大振幅下 x 方向和 y 方向的流体诱导振动相互耦合非常强烈.为了验证这一现象,本文计算了圆柱的升力均值和脉动值,并与圆柱仅在 y 方向振动条件下(即单自由度)的结果进行了比较,结果如表 2 所示.

由表 2 可以看出:当圆柱在 x, y 方向 2 个自由度振动时, $\bar{C}_L$ 在 -0.15 到 0.08 之间变化, C'_L 在 0.26 到 0.55 间变化;当圆柱仅在 y 方向振动时, $\bar{C}_L$ 在 -0.07 到 0.02 间变化, C'_L 在 0.14 到 0.47 间变化.两者相比有较大的差别,说明单列自由振动的圆柱在 x 方向的振动对 y 方向的振动产生了较大的影响.注意到这一结论是在共振时,即圆柱处于大幅振动条件下得出的,那么这一结论是否同样也适合小振幅的情况?为了回答这个问题,本文在 $f_N/f_0=0.5$ 的情况下进行了单列圆柱流体诱导振动的计算模拟,结果见表 2.此时处于非共振区,圆柱的振动响应较小.当 $f_N/f_0=0.5$ 时,不论是圆柱在 2 个方向的自由振动还是仅在升力方向的振动,其升力的均值 $\bar{C}_L$ 都在 0 ± 0.02 间变化,而脉动力 C'_L 都在 0.10 到 0.12 间波动,两者的计算结果非常接近.这说明,当圆柱处于小振幅时,流体在 x 方向的诱导力与在 y 方向的诱

导力耦合较弱,此时采用单自由度的计算模型可以完全满足计算单列圆柱流体诱导振动的需要.这一结论对于流体诱导振动研究非常重要,因为采用单自由度的计算模型,可以大为简化复杂排布下多圆柱的流体诱导振动模拟计算.



$T/D=2.0; f_N/f_0=1.0; S_G=1.29$

图 4 单列圆柱的振动轨迹

表 2 单列弹性圆柱 $T/D=2.0$ 时的升力系数计算值

条件		参数	圆柱 2	圆柱 3	圆柱 4	圆柱 5	圆柱 6
$f_N/f_0=1.0$	x, y 方	$\bar{C}_L$	-0.02	-0.02	0.08	0.02	-0.15
	向振动	C'_L	0.29	0.26	0.38	0.55	0.39
	仅 y 方	$\bar{C}_L$	0.02	-0.07	-0.03	-0.02	-0.01
	向振动	C'_L	0.39	0.47	0.33	0.14	0.18
$f_N/f_0=0.5$	x, y 方	$\bar{C}_L$	-0.03	-0.03	-0.05	0.00	0.02
	向振动	C'_L	0.11	0.12	0.11	0.11	0.10
	仅 y 方	$\bar{C}_L$	-0.03	-0.04	-0.02	-0.04	-0.05
	向振动	C'_L	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11

4 结 论

- (1)刚性单列圆柱在间隙比 $T/D=1.5$ 时,尾流中呈现宽、窄尾涡交替出现的非均匀流态.
- (2)刚性单列圆柱在间隙比 $T/D=1.5$ 时,尾流中具有多频现象,5 个中心圆柱的 St 值在 0.06 、 0.27 和 0.39 间变化;随着 T/D 的增加,在 $T/D=$

2.0时, St 值为0.20和0.27,说明随着间隙比的增大,流体绕刚性单列圆柱的非均匀流现象不再明显.

(3)在大振幅条件下,流体绕单列自由振动的圆柱流动时,产生的流体诱导力在 x 方向和 y 方向有较强烈的耦合,但这种耦合作用在小振幅情况下较小,因此在分析圆柱列的小振幅特性时, x 方向振动对 y 方向振动的影响可以忽略,即在计算中可以采用单自由度的动力学模型假设.

参考文献:

- [1] Pettigrew M J, Taylor C E. Vibration analysis of shell-and-tube heat exchangers: an overview— part 1: flow, damping, fluidelastic instability [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2003, 18(5): 469-483.
- [2] Liu Y, So R M C, Lau Y L, et al. Numerical studies of two side-by-side elastic cylinders in a cross-flow [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2001, 15(7): 1009-1030.
- [3] Mittal S, Kumar V. Flow-induced oscillations of two cylinders in tandem and staggered arrangements [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2001, 15(5): 717-736.
- [4] Kevlahan N, Ghidaglia J M. Computation of turbulent flow past an array of cylinders using a spectral method with Brinkman penalization [J]. *European Journal of Mechanics: B*, 2001, 20(3): 333-350.
- [5] 王沅浩,张联英,罗昔联. 流体横掠波状圆柱的动特性研究[J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(3): 360-364.
Wang Fenghao, Zhang Lianying, Luo Xilian. Experimental investigation to dynamics of wavy cylinders in cross flow [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(3): 360-364.
- [6] 王沅浩,姜歌东,罗昔联. 一种基于表面涡方法的流体诱导管束振动计算模型[J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(9): 1109-1113.
Wang Fenghao, Jiang Gedong, Luo Xilian. A flow induced vibration model based on grid-free surface vorticity method [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(9): 1109-1113.
- [7] 王沅浩,姜歌东,罗昔联. 高雷诺数下双圆柱绕流诱发振动的数值模拟[J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(1): 101-105.
Wang Fenghao, Jiang Gedong, Luo Xilian. Numerical simulation for flow around two cylinders at high Reynolds number by surface vorticity method [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(1): 101-105.
- [8] Zdravkovich M M. Flow around circular cylinders—a comprehensive guide through flow phenomena, experiments, applications, mathematical models, and computer simulations: Vol 2 [M]. New York: Oxford University Press Inc., 2003.

(编辑 葛赵青)