

高雷诺数下双圆柱绕流诱发振动的数值模拟

王沅浩¹, 姜歌东², 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; 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 基于表面涡方法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. 结果表明: 圆柱为刚性时的计算模拟结果与相关文献的实验结果吻合良好; 在文中的研究条件下, 串列双弹性圆柱具有屏蔽流的特征, 涡脱落频率比刚性圆柱的大, 其值主要取决于归一化阻尼而非间隙比; 流体从并列双弹性圆柱分离的涡是对称的, 与并列双刚性圆柱相比其平均力系数略小, 但由于流体诱导振动造成的脉动力系数较大, 故流体诱导振动对并列圆柱的动态响应有重要的影响. 研究结果为亚临界雷诺数范围内热交换器管束的复杂流体诱导振动等问题提供了一种可能的计算方法.

关键词: 表面涡方法; 圆柱绕流; 流体诱导振动; 热交换器; 数值模拟

中图分类号: O357.1; O357.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)01-0101-05

Numerical Simulation for Flow Around Two Cylinders at High Reynolds Number by Surface Vorticity Method

Wang Fenghao¹, Jiang Gedong², 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 flow-induced vibration of two independently moving tandem cylinders and two independently moving side-by-side cylinders is simulated by surface vorticity method with different spacing and reduced damping parameters. The computational results of the cylinder response, the fluid force and the vibration frequency are presented. The simulation results of the flow around rigid cylinders well coincide with the experimental ones in the literatures. The tandem case shows that the two flexible cylinders exhibit the characteristics of a shielded flow and a higher shedding frequency than that of rigid cylinders, which primarily depends on the damping parameter rather than spacing ratio. The side-by-side results indicate that the vortices shed from the two flexible cylinders are symmetrical and the average forces of flexible cylinders are slightly smaller than that of rigid cylinders while the fluctuation forces caused by flow-induced vibration are larger, hence the flow-induced vibration exerts significant influence on the dynamic response of the cylinders. The proposed method enables to simulate complex flow induced vibration occurring in heat exchanger tube bundles at sub-critical Reynolds number.

Keywords: surface vorticity method; flow around cylinder; flow induced vibration; heat exchanger; numerical simulation

多圆柱绕流在工程领域非常多见, 结构上交替性的涡脱落会导致垂直于来流方向剧烈振荡的升

力, 引起结构的振动及噪声, 甚至导致失效. 在流体力学中, 这类问题的研究已成为理论和工程领域中

重要的课题之一. 由于多弹性圆柱间相互耦合作用的存在, 其流体诱导振动问题比单个弹性圆柱更加复杂, 因此对多圆柱绕流产生的流体诱导振动问题进行研究在工程上更具有实际意义.

一般而言, 研究流体诱导振动问题所用的数值计算方法可分为两大类: 一类是基于网格的方法, 如有限差分法、有限元法和近来提出的谱元法等; 另一类是无网格方法, 如离散涡方法(DVM)和表面涡方法(SVM)等. 在低雷诺数下, 基于网格的计算结果与实验结果符合得很好; 在高雷诺数下, 由于紊流的发展和边界层变薄及分离, 需要新的紊流模型及更细的网格, 而到目前为止, 在工程实用的雷诺数范围内, 这类新计算方法的应用还处于起步阶段. 在高雷诺数下的流体流动主要是旋涡运动和涡面变化, 无网格涡方法抓住流体绕过钝体的物理特征, 主要集中于对涡量场的研究, 而且由于没有网格的限制, 固体可以在很大范围内自由运动. 近年来涡方法越来越受到人们的重视, 从理论到应用都得到了迅速发展^[1-3]. 文献[4-5]采用 DVM 和格子涡(VIC)技术研究了单个弹性圆柱的流体诱导振动问题. VIC 技术节省了计算时间, 但由于需要用到贴体坐标, 因此限制了将 DVM 从单圆柱流体诱导振动问题向多圆柱流体诱导振动问题的推广. 具有移动分离点的 SVM 已经成功地应用于高亚临界雷诺数范围的圆柱绕流问题^[6-7], 然而由于缺乏流体-圆柱相互作用模型, SVM 至今还不能用于多圆柱流体诱导振动问题的求解. 针对此问题, 作者曾基于 SVM 提出了一种分离点计算模型和流-固耦合模型^[3], 该模型不但反映了涡量场和振动圆柱体之间的相互耦合, 而且还发挥了 SVM 的无网格约束特点. 本文将在此模型的基础上, 进一步研究不同间隙比和归一化阻尼参数下, 多圆柱阵列最基本的两种单元结构(串列和并列双圆柱)的流体诱导振动问题.

1 计算方法

不可压二维 N-S 方程可以表示为涡量形式

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \omega = \nu \nabla^2 \omega \quad (1)$$

因而流场可以认为由涡量的产生(涡的脱落) $\frac{\partial \omega}{\partial t}$ 、涡量的传导 $\mathbf{V} \cdot \nabla \omega$ 和涡量的扩散 $\nu \nabla^2 \omega$ 三部分构成, 其中 ω 是涡量, $\mathbf{V}$ 是速度, t 是时间, ν 是流体动力学黏度.

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^[8]. 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. 自由涡在传导速度、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^[8], 自由涡的黏性扩散影响由 Ogami 等^[9]提出的速度扩散方法决定. 分离点位置采用文献[3]提出的分离点计算模型进行计算.

由于我们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述二维归一化运动方程表述

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

$$\ddot{Y} + \frac{4\pi\zeta_s}{U_r} \dot{Y} + \left(\frac{2\pi}{U_r}\right)^2 Y = \frac{C_L}{2M} \quad (3)$$

式中: $X=x/D$, $Y=y/D$, 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, 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, U 为来流速度, f_N 是刚性圆柱的固有频率; $M=m/(\rho D^2)$ 是归一化质量, 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. 因此, 对于多个弹性圆柱, 流场中任一自由涡的位移应该是每个运动圆柱对此自由涡作用的累加, 即

$$X_{vj} = \sum_i X_{Ti} \frac{1}{d_{ij}^n} \quad (4)$$

$$Y_{vj} = \sum_i Y_{Ti} \frac{1}{d_{ij}^n} \quad (5)$$

式中: X_{vj} 和 Y_{vj} 是第 j 个自由涡的位移; X_{Ti} 和 Y_{Ti} 是第 i 个圆柱的位移; d_{ij} 是第 j 个自由涡与第 i 个圆柱间的位移; 本文的计算中, 取 $n=1$.

弹性圆柱上的表面涡不但受来流速度的影响, 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^[3]. 这样, 圆柱表面第 m 个表面涡的强度可以由下式求出

$$\sum_{n=1}^N \gamma(s_n) K(s_n, s_m) \Delta s_n =$$

$$\left[(-U + v_x) \frac{dx_m}{ds_m} \cos \alpha + v_y \frac{dy_m}{ds_m} \sin \alpha \right] + \sum_{i=1}^I \Delta \Gamma_i L(i, m) \quad (6)$$

式中: v_x 和 v_y 为圆柱在 x 和 y 方向的振动速度。

2 串列双圆柱绕流结果分析

在双圆柱静止绕流中,根据不同的排列方式及动力学特性,会产生多种不同的流体流动模式,例如屏蔽流态和双稳流态等。当允许 2 个圆柱自由振动时,流动模式和流体圆柱相互作用会使问题变得更加复杂。本文的计算条件为:间隙比 $L/D=1.5$, 2.0 ; 归一化阻尼 $S_G = 8\pi^2 (St^*)^2 M \zeta_s = 1.29$, 0.645 ; 归一化质量 $M=10$; 归一化固有频率 $f_N/f_0=1.0$; 雷诺数 $Re=2.67 \times 10^4$ 。

表 1 为 $L/D=1.5, 2.0$ 时 2 个串列刚性圆柱的力系数以及斯德鲁哈尔频率 St^* 。从表中可以看出,除了下游圆柱脉动升力计算结果较小外,本文的计算结果与 Alam 等人^[10]的实验结果基本吻合。造成下游圆柱脉动升力较小的可能原因是:在计算压力分布时,我们仅考虑了分离的影响,没有考虑上游圆柱形成的涡在下游圆柱上重新附着所产生的附加脉动力。

表 1 串列双圆柱绕流计算与实验结果的比较

参数	$L \cdot D^{-1}=2.0$		$L \cdot D^{-1}=1.5$	
	实验结果 ^[10]	计算结果	实验结果 ^[10]	计算结果
$\bar{C}_D$ (上游)	1.05	0.866	1.10	1.161
$\bar{C}_D$ (下游)	-0.25	-0.411	-0.40	-0.559
C'_D (上游)	0.024	0.036	0.024	0.027
C'_D (下游)	0.130	0.072	0.147	0.121
$\bar{C}_L$ (上游)		-0.025		-0.122
$\bar{C}_L$ (下游)		-0.044		0.071
C'_L (上游)	0.11	0.126	0.28	0.181
C'_L (下游)	0.64	0.182	0.48	0.252
St^*	0.139	0.144	0.140	0.142

表 2 为不同间隙比和归一化阻尼参数下,串列双圆柱在流体中自由振动时的计算结果,可以看出在所研究的 4 种条件下,下游圆柱的平均阻力系数 $\bar{C}_D$ 或者是负值,或者约等于 0,说明串列双弹性圆柱在所研究的条件下仍具有屏蔽流的特征。

表 2 串列双弹性圆柱绕流的计算结果

参数	$L \cdot D^{-1}=2.0$		$L \cdot D^{-1}=1.5$	
	$S_G=1.29$	$S_G=0.645$	$S_G=1.29$	$S_G=0.645$
$\bar{C}_D$ (上游)	1.355	1.065	1.265	0.984
$\bar{C}_D$ (下游)	-0.350	-0.080	-0.231	0.010
C'_D (上游)	0.204	0.459	0.403	0.493
C'_D (下游)	0.155	0.630	0.296	0.530
$\bar{C}_L$ (上游)	-0.158	-0.140	-0.011	-0.013
$\bar{C}_L$ (下游)	-0.057	-0.016	0.028	0.009
C'_L (上游)	0.435	0.969	0.927	0.961
C'_L (下游)	0.283	0.552	0.374	0.487
St^* (上游)	0.198	0.165	0.192	0.177
St^* (下游)	0.198	0.165	0.192	0.162

对比表 1 和表 2 可以发现:串列双弹性圆柱的脉动力以及上游圆柱的平均阻力都比刚性圆柱的脉动力大。这是由于圆柱的振动加强了上游圆柱的涡脱落,使得上游圆柱的平均力增加,也造成 2 个圆柱的脉动力同时增加。另外,从表 2 可以看出:当 $S_G=1.29$ 、间隙比由 2.0 减小到 1.5 时,圆柱的脉动力幅度增加很大;当 $S_G=0.645$ 时,脉动力随间隙比的减小变化较小,说明在此情况下, S_G 是影响脉动力的主要因素。同样,弹性圆柱的涡脱落频率比刚性圆柱的大,其值也取决于 S_G 而不是间隙比。

串列双弹性圆柱的振动波形随时间的变化关系如图 1 所示。从图中可以清楚地看到,升力方向(y)的振幅远大于阻力方向(x)的振幅,而且上游圆柱的振幅大于下游圆柱的振幅,这与文献[11]的实验结果相同。当 S_G 由 1.29 减小到 0.645 时,上游圆柱的振幅进一步增加,而下游圆柱的振幅无明显变化,说明上游圆柱的振动破坏了下流圆柱的涡脱落,因此最大振动幅值出现在上游圆柱。

3 并列双圆柱绕流结果分析

表 3 示出了在间隙比为 1.5 和 2.0 时,流体绕过 2 个并列刚性圆柱的计算结果。在 $L/D=1.5$ 时,计算结果中出现了多频现象。计算结果中的力系数和斯德鲁哈尔频率与文献[12]的实验结果基本吻合。由表 4 可见:与刚性圆柱相比,弹性圆柱的平均力系数略小,而脉动力系数则显著增加;当 $L/D=1.5$ 、 $S_G=1.29$ 时,流场出现了双稳态现象,其斯德鲁哈尔频率为双频。

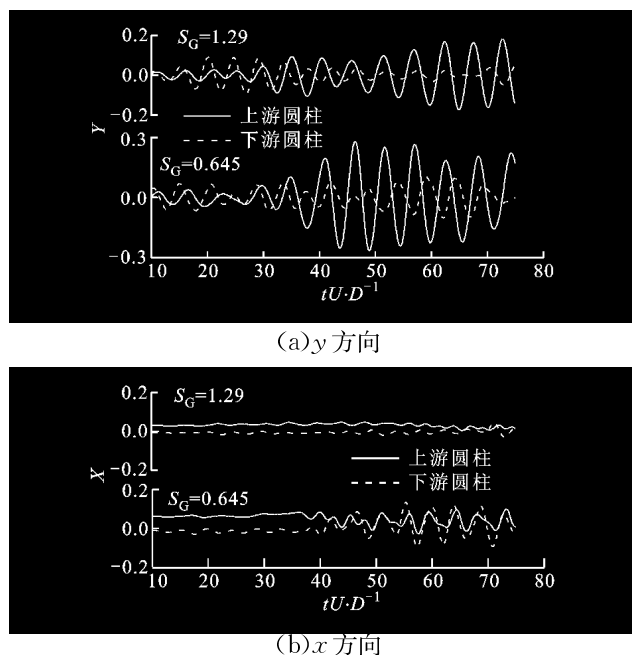


图1 $L/D=1.5$ 时串联双圆柱流体诱导振动振幅随时间的变化关系

表3 并列双刚性圆柱绕流计算结果

参数	$L \cdot D^{-1}=2.0$		$L \cdot D^{-1}=1.5$	
	实验结果 ^[12]	计算结果	实验结果 ^[12]	计算结果
$\bar{C}_D$	1.40	1.313	1.29	1.885
$\bar{C}'_L$	0.22	0.417	0.34	0.320
St^*	0.21	0.224	0.11	0.136
			0.34	0.288

表4 并列双弹性圆柱绕流计算结果

参数	$L \cdot D^{-1}=2.0$		$L \cdot D^{-1}=1.5$
	$S_G=1.29$	$S_G=0.645$	$S_G=1.29$
$\bar{C}_D(\text{上})$	1.322	1.070	1.796
$\bar{C}_D(\text{下})$	1.227	0.935	1.657
$\bar{C}'_D(\text{上})$	0.916	1.073	0.884
$\bar{C}'_D(\text{下})$	0.823	0.923	0.821
$\bar{C}_L(\text{上})$	0.256	0.152	0.111
$\bar{C}_L(\text{下})$	-0.046	0.244	-0.166
$\bar{C}'_L(\text{上})$	1.109	1.163	0.854
$\bar{C}'_L(\text{下})$	1.171	0.780	0.672
$St^*(\text{上})$	0.196	0.196	0.192
			0.385
$St^*(\text{下})$	0.196	0.196	0.192
			0.385

并列双弹性圆柱在间隙比为2.0时的振动波形如图2所示.在 $S_G=1.29$ 的情况下,上、下游圆柱的 y 方向振幅均大于 x 方向振幅,当 S_G 减小到0.645时,上游圆柱在 y 方向的振幅仍大于 x 方向的振幅,但下游圆柱的情况正好相反,说明随着归一化阻尼参数的减小,2个圆柱在 x 和 y 方向振动耦合相应增加,造成 y 方向的振幅不再总大于 x 方向的振幅.从图2还可以看出,上、下游圆柱在 y 方向的振动反相,而在 x 方向的振动同相,说明在此情况下,从2个弹性圆柱脱落的涡处于对称状态.

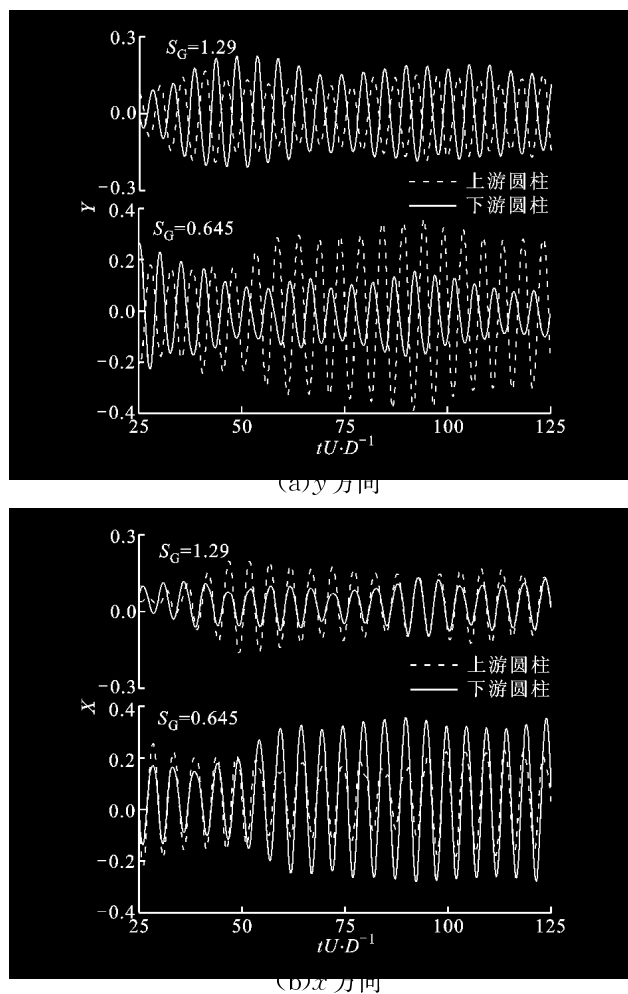


图2 $L/D=2.0$ 时并列双圆柱流体诱导振动振幅随时间的变化关系

4 结 论

(1)在本文的研究条件下,串联双弹性圆柱具有屏蔽流的特征,并列双弹性圆柱的分离涡是对称的.

(2)串联双弹性圆柱的涡脱落频率比刚性圆柱的大,其值主要取决于阻尼参数 S_G 而不是间隙比.

(3)与刚性圆柱相比,并列双弹性圆柱的平均力系数略小,但流体诱导振动造成其脉动力系数较大,说明流体诱导振动对圆柱的动态响应有较大影响.

(4)本文所采用的计算模型为亚临界雷诺数下热交换器管束中复杂流体诱导振动等问题的正确计算提供了一种新的方法。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Slaouti A, Stansby P K. Forced oscillation and dynamics response of a cylinder in a current investigated by the vortex method[C]//*Proceedings of BOSS'94 Conference*. Cambridge, USA: MIT, 1994: 645-654.
- [5] Zhou C Y, So R M C, Lam K. Vortex-induced vibrations of an elastic circular cylinder[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1999, 13(2): 165-189.
- [6] Lam K, Chan Y F. A refined surface vorticity modeling of separated flow around a circular cylinder[C]//*Proceedings of the 1998 ASME Fluid Engineering Division Summer Meeting, FED-Vol. 245*. Washington: ASME, 1998: 21-23.
- [7] Lam K, So R M C, Li J Y. Flow around four cylinders in a square configuration using surface vorticity method[C]//*Proceedings of the Second International Conference on Vortex Methods*. New York: Academic Press, 2001: 115-122.
- [8] Lewis R I. Vortex element methods for fluid dynamic analysis of engineering system[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 113-178.
- [9] Ogami Y, Akamatsu T. Viscous flow simulation using the discrete vortex method — the diffusion velocity method[J]. *Computers and Fluids*, 1991, 9(3/4): 433-441.
- [10] Alam M M, Moriya M, Takai K, et al. Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(1/2): 139-154.
- [11] Jendrzejczyk J A, Chen S S, Wambsganss M W. Dynamic response of a pair of circular cylinders subjected to liquid cross flow[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1979, 67(2): 263-273.
- [12] Bearman P W, Wadcock A J. The interaction between a pair of circular cylinders normal to a stream[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1973, 61(3): 499-511.

(编辑 葛赵青)