

离散涡法模拟不同直径串列圆柱绕流

王聪, 陈斌, 郭烈锦, 王智伟

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 通过在势流场中嵌入有限数目的点涡来代表局部有旋区域连续分布的涡量, 在拉格朗日框架下应用离散涡方法求解非定常涡量方程, 从而有效模拟了高雷诺数下不同直径串列圆柱绕流脱落旋涡的动态演化过程, 并分析了流场中大尺度旋涡相干结构对前后圆柱受力的影响. 结果表明, 流场中的小尺度旋涡会被大尺度旋涡卷吸, 形成涡量强度更大的旋涡. 当大圆柱在前、小圆柱在后布置时, 大圆柱的升、阻力系数受影响较小, 大圆柱阻力系数基本保持不变, 小圆柱阻力系数平均值较小但振幅波动较大, 大圆柱的升力系数波动较大, 大、小圆柱的升力系数的平均值都基本为 0; 当小圆柱在前、大圆柱在后布置时, 大圆柱阻力系数振幅增大而平均值降低, 小圆柱阻力系数振幅减小而平均值增大, 大、小圆柱的升力系数趋向于一致, 平均值仍然都基本为 0.

关键词: 离散涡; 圆柱绕流; 串列

中图分类号: TB126 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1340-05

Simulation of Flow Across Two Tandem Cylinders with Different Diameter by Discrete Vortex Method

WANG Cong, CHEN Bin, GUO Liejin, WANG Zhiwei

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A discrete vortex model has been developed to solve the unsteady vortex dynamics equation under the Lagrangian frame, in which the point vortex was used to represent the location where vorticity concentrated. The transient evolution of vortex shedding process behind two tandem cylinders with different diameters was simulated effectively and the influence of large-scale coherent structure in the flow field on the two cylinders was analyzed. It is found that small vortices will be entrained by the large-scale coherent structure to form larger vortices with higher vorticity. When the front cylinder is big and the rear one is small, there is little change on the drag and lift coefficients of the big cylinder compared with the case of single cylinder. The drag coefficient amplitude of the big cylinder will nearly keep constant. The drag coefficient amplitude of the small one will increase while the average value will be close to zero. The lift coefficient amplitude of the big one will increase and the average value of both cylinders will be close to zero. When the front cylinder is small and the rear one is big, the amplitude of drag coefficient of the big one will increase and the average value will decrease while the amplitude of the small one will decrease and the average value will increase. The lift coefficients of the two cylinders tend to be the same with each other and the average values are close to zero.

Keywords: discrete vortex; flow across cylinder; tandem arrangement

过去 30 年来,应用离散涡方法(Discrete Vortex Method, DVM)模拟瞬态高雷诺数剪切流动已

经引起了人们的广泛关注.该方法将涡动力学与瞬时大尺度湍流相干结构紧密联系起来,在求解无黏势流流场的基础上,用涡元的随机运动来模拟湍流运动.离散涡方法已经成功应用于平面混合层^[1-4]、轴对称射流^[5-6]、单圆柱绕流尾迹^[7-11]的研究中,对于复杂几何结构中的分离流动研究较少.吴文权^[12]、廖俊^[13]、陈斌^[14]、周志勇^[15]等分别用离散涡法研究了相同尺度的多圆柱绕流,王沅浩等^[16]用表面涡方法研究了串列和并列双圆柱绕流诱发振动,Lam等^[17]在 $Re=2.67 \times 10^4$ 的条件下使用离散涡方法研究了更为复杂的叉排管束流致振动,但对于不同直径的多圆柱绕流,仅有 Zhao等^[18-19]使用有限元方法研究了不同倾角排列的大小两圆柱绕流情况下的受力,尚无人使用离散涡方法对不同直径串列圆柱绕流进行研究.

本文以空气绕不同尺度障碍物流动为研究对象,在初步的研究中将这些不规则障碍物简化为不同尺度的圆柱,深入研究串列排列的不同直径圆柱的受力以及圆柱尾迹中流体旋涡结构的细节,分析不同排列方式下两圆柱尾迹相互干扰时旋涡结构和圆柱间相互作用的规律.

1 离散涡方法的原理与实施

对于高雷诺数、具有分离流动的二维不可压缩流动,离散涡方法将 N-S 方程两边取旋度,求解等价的涡量方程

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

式中: ω 表示涡量; ν 表示流体的运动黏性系数.首先,在势流场中的局部区域嵌入有限数目的点涡,用来代表局部有旋区域连续分布的涡量,通过涡动力学方法追踪这些旋涡单元随时间的运动,从而计算出离散涡元的成长、卷起及脱落的复杂演化过程随时间变化的详细信息.求解多圆柱绕流时,首先采用面元法求解多圆柱绕流势流场^[20],然后使用 Pohlhausen 近似解进行边界层计算确定分离点、涡量脱落频率及涡元强度,引入涡元后再通过随机走步模拟涡量的黏性扩散.算法的具体实现过程中,在面元法中用中心差分代替迎风差分求解流场中单个点涡的运动以提高计算精度,涡元用 Lamb-Oseen 模型克服无黏点涡的奇异性并实现黏性效应的模拟,采用净环量修正方法修正点涡靠近圆柱表面时引起的误差^[21],并使用涡元合并消去技术有效控制涡元数目的迅速增加.在此基础上,本文开发了应用 DVM

计算任意配置不同尺度多圆柱绕流的计算程序.

2 数值解验证与比较

为了验证程序的精度,首先将单圆柱绕流势流场的数值解和精确解进行了比较.初始条件是无穷远处来流速度为 1 m/s、圆柱半径为 0.5 m.将圆柱的表面划分成 64 个面元时,所得的表面速度结果与精确解的比较示于表 1,两者的偏差在 $\pm 0.01\%$ 以内,精度完全令人满意.对于水平来流绕单圆柱的黏性流动,当来流速度为 0.1 m/s、圆柱半径为 0.05 m、雷诺数为 1×10^4 时,模拟结果显示涡街脱落的 Strouhal 数 ($Sr = nD/V$) 为 0.224,与实验值 0.202 基本吻合.从图 1 的升力、阻力系数曲线可以看出,阻力系数 C_d 小幅振

表 1 面元法求解的圆柱绕流势流解与精确解的比较

涡元编号	表面速度/ $m \cdot s^{-1}$	
	计算值	精确解
1,33	0.000 1	0.000 0
2,34	0.196 0	0.196 0
3,35	0.390 1	0.390 2
4,36	0.580 5	0.580 6
5,37	0.765 3	0.765 4
6,38	0.942 7	0.942 8
7,39	1.111 1	1.111 1
8,40	1.268 7	1.268 8
9,41	1.414 1	1.414 2
10,42	1.546 0	1.546 0
11,43	1.662 9	1.662 9
12,44	1.763 8	1.763 8
13,45	1.847 7	1.847 8
14,46	1.913 8	1.913 9
15,47	1.961 5	1.961 6
16,48	1.990 3	1.990 4
17,49	1.999 9	2.000 0
18,50	1.990 3	1.990 4
19,51	1.961 5	1.961 6
20,52	1.913 8	1.913 9
21,53	1.847 7	1.847 8
22,54	1.763 8	1.763 8
23,55	1.662 9	1.662 9
24,56	1.546 0	1.546 0
25,57	1.414 1	1.414 2
26,58	1.268 7	1.268 8
27,59	1.111 1	1.111 1
28,60	0.942 7	0.942 8
29,61	0.765 3	0.765 4
30,62	0.580 5	0.580 6
31,63	0.390 1	0.390 2
32,64	0.196 0	0.196 0

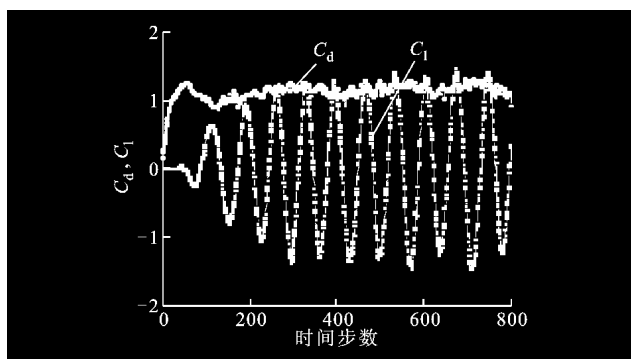
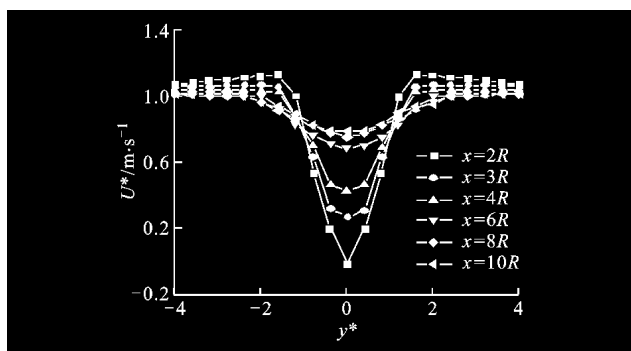


图1 单圆柱绕流阻力、升力系数随时间的变化

荡,平均值为1.15,而升力系数 C_l 的峰值在1附近,此结果与文献[20]的结果非常接近.圆柱后不同截面处的平均速度 U^* 分布如图2所示,与文献[22]中的实验结果相比,从定性和定量上全都十分吻合.



(a) 本文模拟结果

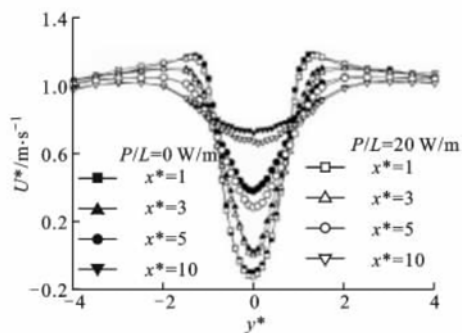
(b) Lourenco 和 Shih 的模拟结果^[22]

图2 圆柱后部不同截面处的平均速度分布

通过以上分析比较,证明采用本文编写的程序模拟非定常圆柱绕流问题的数值计算结果有效可靠,精度令人满意,可用来研究不同尺度多圆柱绕流流场的动态特性以及大尺度旋涡结构的相互作用.

3 结果与分析

本文在单圆柱绕流模拟的基础上,对不同尺度圆柱绕流展开深入研究,分析不同尺度圆柱尾迹相互干扰时流场的局部特征和各圆柱的受力.本文计算了如图3所示的两种典型方式布置的流场,水平

来流速度为0.1 m/s,大圆柱半径为0.05 m,小圆柱半径为0.025 m,间距为0.025 m.大小圆柱表面的面元分别取64和32,时间步长取为0.125 s,计算2000个时间步.

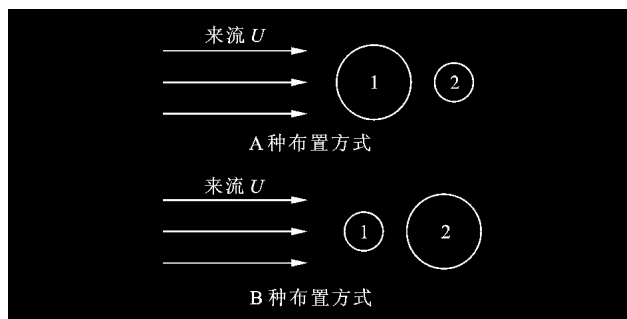
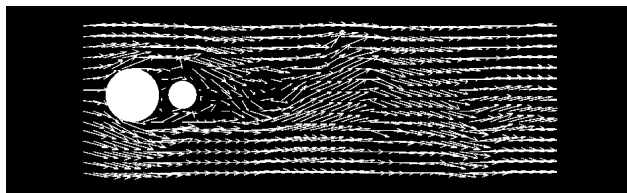


图3 不同直径圆柱绕流的串列布置方式

图4显示了A种布置方式下圆柱的阻力、升力系数随时间的变化,图中显示第600个时间步时小圆柱正处于大圆柱脱落的剪切层所形成的涡街结构的中心区域,其周围速度场变化十分剧烈,大圆柱尾迹脱落的涡团较大,而小圆柱产生的涡团较小,当大小圆柱各自产生的涡团相遇时,小涡团被卷入大涡团,融合为一个涡量强度更大的涡团,在尾迹中形成统一的涡街结构.



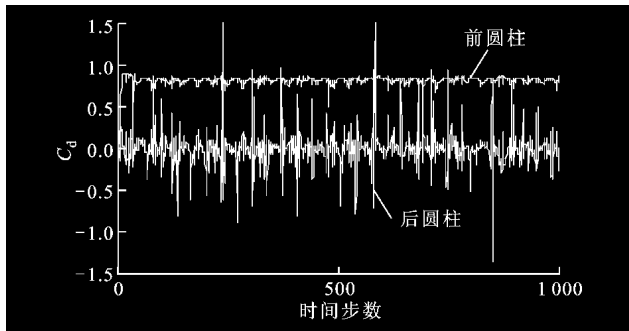
(a) 涡元分布



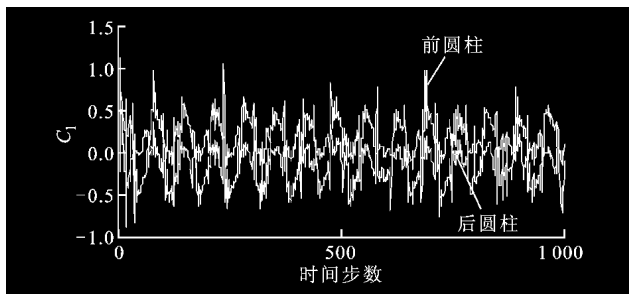
(b) 瞬时速度场

图4 A种布置方式下两圆柱绕流涡元分布及瞬时速度场

A种布置方式下两圆柱的升力、阻力系数随时间的变化如图5所示.由于小圆柱处于大圆柱尾迹中心,速度场强烈振荡非常不稳定,小圆柱阻力系数的振幅远大于相同初始条件下等直径双圆柱绕流的情形,波形很不规则,而大圆柱的阻力系数受到小圆柱一定程度的干扰,小幅脉动增强,幅值基本没有发生偏移.由于两圆柱间截面上的速度远小于来流的平均值,因此位于后部的小圆柱的升力系数振荡的幅值较小,并且更不规则.由于是基于 x 轴对称布置,升力系数的平均值基本为0.



(a)阻力系数



(b)升力系数

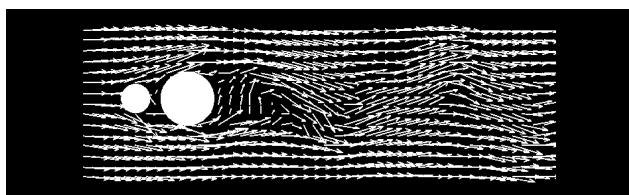
图 5 A 种布置方式下两圆柱阻力、升力系数
随时间的变化

对于 B 种布置方式,第 600 个时间步时的涡元分布及速度矢量场如图 6 所示.此时小圆柱不能形成完整的旋涡结构,脱落的涡量遇到大圆柱时从两侧向下游运动,重新附着于大圆柱的剪切层,涡团根据自身的旋转方向要么全部流向大圆柱的上方,要么全部流向大圆柱的下方,与大圆柱自身脱落的涡元一起形成尾迹涡团结构,表现为涡街结构不断向下游运动的形态.两圆柱间截面上的中心区域,平均速度同样远小于来流速度,脉动依然十分强烈.

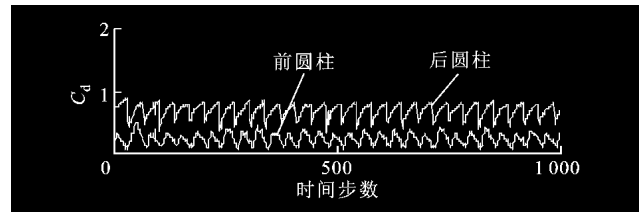
B 种布置方式下两圆柱的升力、阻力系数随时间的变化如图 7 所示.由于前面圆柱的存在使得后



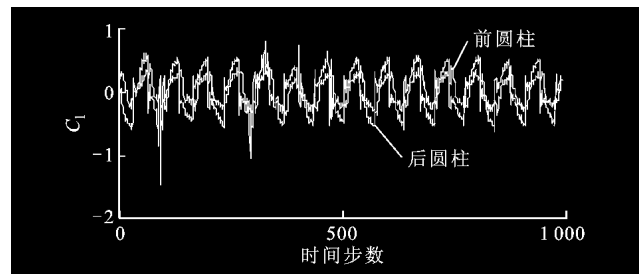
(a)涡元分布



(b)瞬时速度场

图 6 B 种布置方式下两圆柱绕流涡元分布及
瞬时速度场

(a)阻力系数



(b)升力系数

图 7 B 种布置方式下两圆柱阻力、升力系数
随时间的变化

面大圆柱的阻力系数振动幅值增大,平均值有所下降,而小圆柱处在稳定的来流流场中,尾迹被大圆柱破坏,小圆柱阻力系数平均值降低.小圆柱的存在相当于给大圆柱的来流增加了扰动,使得大圆柱涡团的分离点向下游移动,导致大圆柱阻力的平均值有所减小.两圆柱的升力系数仍保持脉动,小圆柱升力系数脉动的幅值要小于大圆柱,波形更加不规则,但脉动的周期基本一致,平均值仍基本为 0.

4 结 论

本文应用离散涡方法模拟了高雷诺数下不同直径串列圆柱的绕流,获得了流场随时间变化的详细信息及尾迹剪切层分离流动的动态过程.由此对大小两圆柱不同串列方式布置时的受力进行分析,得到边界层分离时,流场中旋涡的相干结构对前后圆柱受力的影响如下.

(1)在圆柱绕流流场中如果有两种不同尺度的旋涡同时存在,小尺度旋涡会被大尺度旋涡卷吸,融合成涡量强度更大的旋涡,在尾迹中形成统一的涡街结构.

(2)大圆柱在前、小圆柱在后时,小圆柱的阻力系数振幅增大,平均值较小,大圆柱的升、阻力系数受影响较小;小圆柱在前、大圆柱在后时,大圆柱的阻力系数振幅增大,平均值降低,小圆柱的阻力系数平均值降低.两圆柱的升力系数平均值基本为 0.

参考文献:

- [1] CHEIN R, CHUNG J N. Simulation of particle dis-

- persion in a two-dimensional mixing layer[J]. American Institute of Chemical Engineering Journal, 1988, 34(6): 946-954.
- [2] WEN F, KAMALU N, CHUNG J N, et al. Particle dispersion by vortex structures in plane mixing layers[J]. ASME J Fluids Engr, 1992, 114(4): 657-666.
- [3] YAGAMI H, UCHIYAMA T. Numerical simulation of particle-laden plane mixing layer by three-dimensional vortex method[J]. JSME Int J Series B: Fluids and Thermal Eng, 2006, 49 (4): 1027-1035.
- [4] YANG Xiaogang, CHRIS R, LI Li, et al. Modelling of heavy and buoyant particle dispersion in a two-dimensional turbulent mixing layer[J]. Powder Technology, 2007, 178(3): 153-168.
- [5] MOHAMED A K, BOISSON H C, ANDRE G, et al. Study of a plane-free jet exhausting from a channel by vortex-in-cell method[J]. Int J Numer Meth Fluids, 2006, 52(5): 529-543.
- [6] TOMOMI U. Three-dimensional vortex simulation of bubble dispersion in excited round jet[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(7): 1403-1413.
- [7] SARPKEYA T, SCHOAFF R L. Inviscid model of two-dimensional vortex shedding by a circular cylinder[J]. AIAA J, 1979, 17(11): 1193-1200.
- [8] LEWIS R I. Surface vorticity modeling of separated flows from two-dimensional bluff bodies of arbitrary shape[J]. J Mechanical Engr, 1981, 3(1): 1-12.
- [9] STANSBY P K, SLAOUTI A. Simulation of vortex shedding including blockage by the random-vortex and other methods[J]. Int J Numerical Methods in Fluids, 1993, 17(11): 1003-1013.
- [10] UCHIYAMA T, DEGAWA T. Numerical simulation for gas-liquid two-phase free turbulent flow based on vortex-in-cell method[J]. JSME Int J Series B: Fluids and Thermal Eng, 2006, 49(4): 1008-1015.
- [11] 吴文权, 居江宁. 圆柱绕流远场旋涡结构的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(6): 17-20.
WU Wenquan, JU Jiangning. Numerical simulation for the vortex structure in the far wake behind the cylinder[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22 (6): 17-20.
- [12] 吴文权. 流体绕多个钝体不稳定分离流动数值仿真[J]. 华东工业大学学报, 1997, 19(3): 1-8.
WU Wenquan. Numerical simulation for unstable separated flow past multi blunts[J]. Journal of East China University of Technology, 1997, 19(3): 1-8.
- [13] 廖俊, 景思睿. 高雷诺数下双圆柱绕流的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2001, 16(1): 101-110.
- LIAO Jun, JING Sirui. Numerical simulation of flow around two cylinders at high Reynolds number[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser A, 2001, 16(1): 101-110.
- [14] CHEN Bin, GUO Liejin, YANG Xiaogang. Simulation of flow across complicated domain between tube bundles by discrete vortex method[J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(3): 213-218.
- [15] 周志勇, 陈艾荣, 项海帆. 涡方法分析并列圆柱的旋涡脱落现象[J]. 空气动力学学报, 2003, 21(1): 38-46.
ZHOU Zhiyong, CHEN Airong, XIANG Haifan. Numerical analysis of interactive vortex-shedding from a pair of circular cylinders in a transverse arrangement by random vortex method[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2003, 21(1): 38-46.
- [16] 王泮浩, 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.
- [17] LAM K, JIANG G D, LIU Y, et al. Simulation of cross-flow-induced vibration of cylinder arrays by surface vorticity method[J]. J Fluids and Structures, 2006, 22(8): 1113-1131.
- [18] ZHAO Ming, CHENG Liang, TENG Bin, et al. Numerical simulation of viscous flow past two circular cylinders of different diameters[J]. Applied Ocean Research, 2005, 27 (1): 39-55.
- [19] ZHAO Ming, CHENG Liang, TENG Bin, et al. Hydrodynamic forces on dual cylinders of different diameters in steady currents[J]. Journal of Fluids and Structures, 2007, 23(1): 59-83.
- [20] 陈斌. 管束间气液两相流动特性研究[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2002.
- [21] LEWIS R I. Vortex element methods for fluid dynamic analysis of engineering systems[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1991.
- [22] LOURENCO L M, SHIH C. Characteristics of the plane turbulent near wake of a circular cylinder: a particle image velocimetry study[EB/OL]. [2003-03-18]. <http://citeseerx.ist.psu.edu>.

(编辑 荆树蓉)