

文章编号:1673-9469(2009)02-0051-04

湍流模型下双柱绕流升阻力系数数值模拟

滕丽娟¹, 张志伟², 武燕蕾¹

(1. 河北工程大学 水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 承德市水文水资源勘测局, 河北 承德 068450)

摘要: 本文使用流体软件 FLUENT 在 RNG $\kappa-\epsilon$ 湍流模型下, 取雷诺数 Re 为 20 000, 间距比 s/d 等于 1.75, 模拟了双柱在串列、并列及两柱中心的连线与水流方向成 30° 和 60° 夹角错置这四种工况下的绕流升阻力系数。两圆柱阻力系数随夹角增大而增大, 以并列双稳态对应的阻力系数最大。双柱串列时, 下游圆柱阻力系数为负, 两柱升力合力为 0。双柱错置和并列时, 两圆柱阻力系数都为正值, 每个圆柱的升力合力都不为 0, 以并列发生双稳态流动时的升力合力最大。

关键词: 双柱; 升阻力系数

中图分类号: TV143

文献标识码: A

Simulation of drag and lift coefficients on two cylinders in flow field with turbulence model

TENG Li-juan¹, ZHANG Zhi-wei², WU Yan-lei¹

(1. Hydraulics and River Dynamics Major, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Hydrology and Water Resources Survey of Chengde City, Chengde 068450, China)

Abstract: Using software FLUENT in the RNG $\kappa-\epsilon$ turbulence model with Reynolds number 20000 and spacing ratio s/d equaling to 1.75, this article simulates two cylinders' drag and lift coefficients in four engineering conditions, as the two cylinders are set in serial, in parallel, as well as there are angles of 30° and 60° degrees between the line connecting column centers and the flow direction. The acquired conclusions are as follows: The drag coefficient increases with the increasing angles, which reaches maxim when the cylinders are in parallel, while it is minus with the cylinders in serial; as to the lift coefficient, the integral is not equal to 0 besides the two cylinders are in serial.

Key words: cylinders; lift coefficient

在多圆柱绕流研究中最多的的是双圆柱绕流, 双圆柱绕流按圆柱的不同排列方式可以分为三类: 串列, 两圆柱相对来流方向呈前后排列; 并列, 两圆柱相对来流方向呈并排排列; 错置, 两圆柱呈前后交叉排列。流体作用在圆柱上的绕流升阻力受圆柱相对位置和雷诺数影响, 随雷诺数增加升阻力系数减小, 排列方式不同升阻力变化规律不同。当前的双圆柱绕流升阻力研究, 主要在低雷诺数条件下, 围绕串并列绕流进行。而自然界的流动多为湍流, 且在大多数工程中, 双圆柱错置, 即两圆柱中心连线与水流方向存在一个夹角, 此时层流模型下^[1]的升阻力不能代表高雷诺数湍流

模型下的计算结果。

本文取雷诺数 $Re = \rho u d / \mu = 20\ 000$, 两柱中心间距与圆柱直径比 $S/d = 1.75$, 使用流体软件 FLUENT^[2]在 RNG $\kappa-\epsilon$ 湍流模型下, 模拟双柱串列、并列及两柱中心的连线与水流方向成 30° 和 60° 角错置的绕流升阻力系数。

1 数值模拟

1.1 控制方程及其离散

采用 RNG $\kappa-\epsilon$ 湍流模型^[3,4]来模拟双柱绕流二维流场, 将 RNG 方法应用于 N-S 方程并引入

湍动能 κ 及其耗散率 ϵ 便可得到如下控制方程。

连续方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - u_i u_i \right] \quad (2)$$

$\kappa - \epsilon$ 方程:

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + u_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a_k \nu \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + 2\nu_i S_{ij} S_{ij} - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a_k \nu \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - R + 2C_1 \frac{\epsilon}{\kappa} \nu_i S_{ij} S_{ij}$$

$$- C_2 \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (4)$$

式中 $\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} - \nu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$; u —流体的速度; $\nu = \nu_0 + \nu_t$ —流体的运动粘度; ν_t —湍流运动的粘性系数; $\nu_t = C_u \frac{\kappa^2}{\epsilon}$, $C_1 = 1.42$, $C_2 = 1.68$, $S_{ij} =$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, a_k = a_t = 1.39.$$

在 FLUENT 中对控制方程采用有限体积法 (FVM) 进行离散, 压力采用二阶离散格式, 动量、湍动能和湍动耗散率均采用二阶迎风格式, 压力与速度耦合采用 SIMPLEC 算法, 同时为防止迭代过程数值的发散和不稳定, 对动量方程和标量输运方程采用欠松弛技术。计算时间步长取 0.0625 s, 在每个时间步长内设置迭代次数为 20。

1.2 物理模型和特征参数

取双柱中心连线与流向夹角分别为 0° (串联)、 30° 、 60° 、 90° (并列), 在计算区域内, 上游前方圆柱中心距进口边界 $10d$, 下游后方圆柱中心距出口边界 $25d$, 两柱中心距相应上下远边界 $8d$, 双柱错置时的物理模型如图 1 所示。

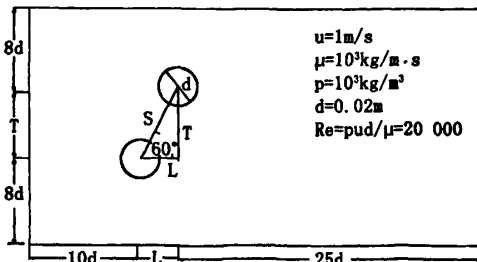


图1 双柱错置绕流物理模型

Fig.1 Physic model of two cylinders in staggered arrangements

特征参数: 均匀来流 $u = 1\text{m/s}$, 流体为水, 密度 $\rho = 10^3\text{kg/m}^3$, 动力粘性系数 $\mu = 10^{-3}\text{kg/m}\cdot\text{s}$, 圆柱直径 $d = 0.02\text{m}$, 雷诺数 $Re = \rho u d / \mu = 20\ 000$ 。

1.3 网格划分

本文在 RNG $\kappa - \epsilon$ 湍流模型下模拟双柱绕流采用三角形网格单元, 在圆周周围采用正六边形结构^[5], 第一层网格中心到柱面的距离为 $0.006\ 3\text{cm}$, 同时再将圆周分成 400 份, 从而使所划分的网格节点在圆柱周围既保证质量又满足以上两个必备条件; 在产生涡街的前后区域内也使用连续的密集正六边形蜂窝划分, 保证域内生成的网格基本为正三角形, 以满足较好的质量; 而在流场边缘的区域, 参数梯度小, 采用较稀疏化的网格, 避免 CPU 运算累赘。错置双柱绕流计算区域分块及圆柱周围网格如图 2 所示。

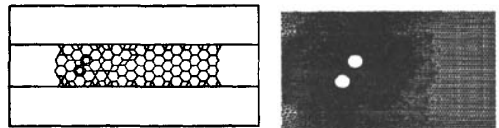


图2 错置双柱绕流计算区域分块及圆柱周围网格

Fig.2 Division of computational area and the grids around two cylinders

1.4 边界条件和初始条件

两圆柱表面: 采用壁面边界条件, 即无滑移条件, 近壁处用加强壁面函数法处理;

上下远边界处: 采用速度进口边界条件, $u = 1\text{m/s}$, $v = 0\text{m/s}$, 再指定湍流强度和水利直径;

出口处: 设为流量出口条件;

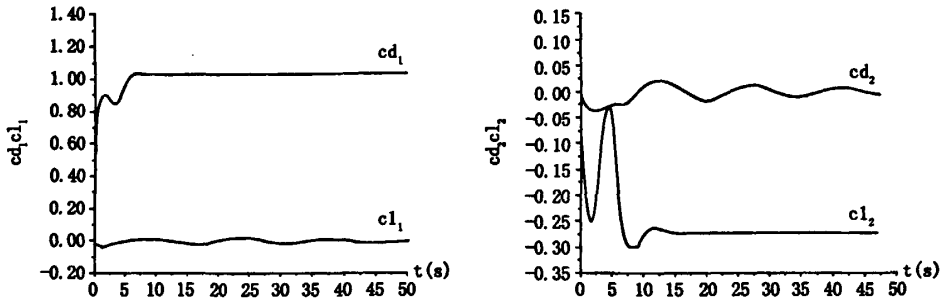
进口处: 采用速度进口边界条件, $u = 1\text{m/s}$, $v = 0\text{m/s}$, 同时指定湍动能和湍动耗散率。

由于初始条件与最终稳态解无关, 计算开始时给流向速度加以一定的扰动, 因而初始条件如下:

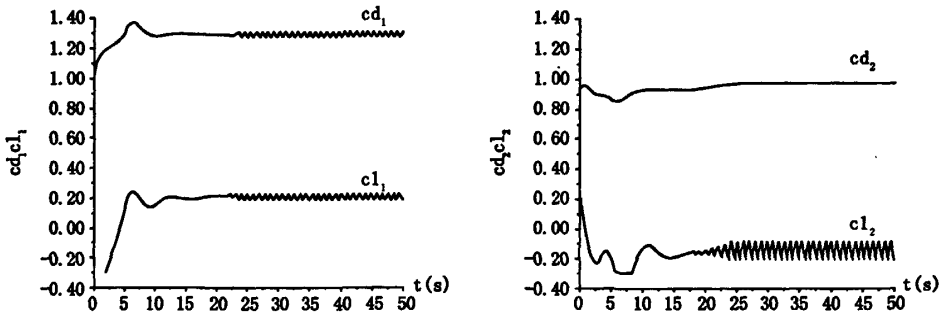
$$\begin{aligned} u(x, y) \Big|_{t=0} &= \begin{cases} 1\text{m/s} & 0 < y < 8d \\ 0.9\text{m/s} & -8d < y < 0 \end{cases} \\ v(x, y) \Big|_{t=0} &= 0, p(x, y) \Big|_{t=0} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

2 升阻力系数计算结果

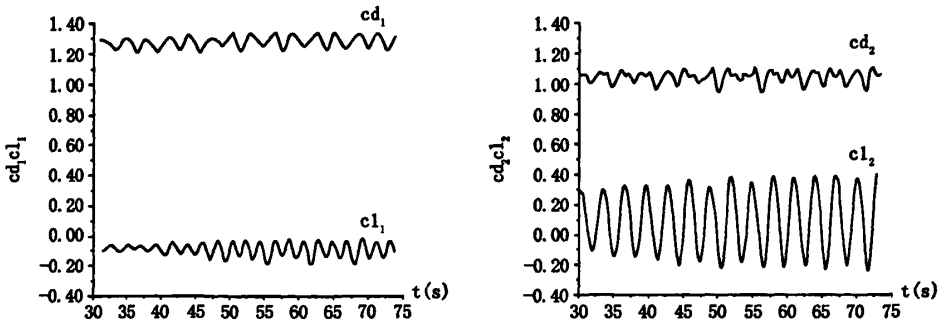
采用 RNG $\kappa - \epsilon$ 湍流模型计算 $S/d = 1.75$ 相应各工况的双柱绕流升阻力系数随时间变化, 如图 3 所示 (图中 cd_1 cl_1 是上游前方和上方圆柱的升阻力系数, cd_2 cl_2 是下游后方和下方圆柱的升阻力系数)。



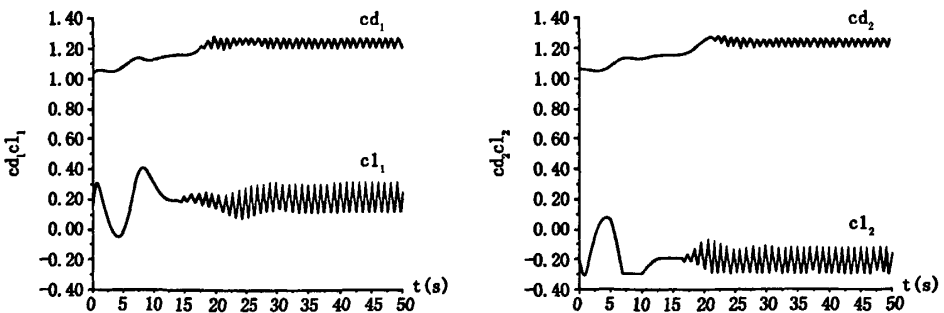
(a) 双柱串联升阻力系数随时间变化过程



(b) 30° 度角时升阻力系数随时间变化过程



(c) 60° 度角时升阻力系数随时间变化过程



(d) 并列升阻力系数随时间变化过程

图3 $S/d=1.75$ 时双柱绕流升阻力系数变化曲线

Fig.3 Drag and lift coefficients curve of two cylinders with spacing ration 1.75

表 1 各工况下双柱升阻力系数对比
Tab. 1 Drag and lift coefficients comparison of respective work status

角 α	cd_1 / cd_2 (均)	cl_1 (幅)	cl_2 (幅)	cl_1 / cl_2 (均)	cd_1 / cd_2 (均) ^[6]	cl_1 / cl_2 (幅) ^[6]
0°	1.03/-0.27	± 0.04	± 0.01	0/0	1.13/-0.25	± 0.05
30°	1.3/0.97	0.2~0.22	-0.2~-0.08	0.21/-0.21	/	/
60°	1.29/1.05	-0.19~-0.02	-0.24~0.4	-0.1/0.08	/	/
90°	1.36/1.32	0.08~0.31	-0.31~-0.11	0.21/-0.21	1.43/1.4	/

由图 3 看到 $S/d = 1.75$ 时, 两圆柱阻力系数随夹角增大而增大, 以并列双稳态对应的两圆柱阻力系数最大, 30° 夹角对应的两柱阻力系数也比较大; 双柱串列时上游圆柱阻力系数为正, 下游圆柱阻力系数在间隙流影响下为负, 两柱升力系数围绕 0 在正负之间振动, 两柱升力合力均为 0; 双柱错置和并列时, 两圆柱阻力系数都为正值, 但由于偏斜流影响严重, 每个圆柱的升力合力都不为 0, 以 30° 夹角和并列状态对应的升力合力最大, 且这两种工况下, 上方圆柱升力为正, 下方圆柱升力为负, 而 60° 角时刚好相反。各工况下圆柱的平均阻力系数、升力振幅和平均升力系数对比如表 1 所示。

3 结论

1) 在间距比 $s/d = 1.75$ 时, 两圆柱阻力系数随双柱连线与流向夹角增大而增大, 以并列双稳态对应的两圆柱阻力系数最大, 30° 夹角对应的两柱阻力系数也比较大。

2) 在间距比 $s/d = 1.75$, 且双柱串列时, 下游圆柱阻力系数为负, 两柱升力合力为 0; 双柱错置和并列时, 两圆柱阻力系数都为正值, 每个圆柱的升力合力都不为 0, 以并列发生双稳态流动时的升力合力最大。

参考文献:

- [1] 邓见, 黄钰期, 任安禄. 分块法研究圆柱绕流升阻力[J]. 力学与实践, 2004, 26(1): 24-26.
- [2] 费宝玲, 郑庭辉, 杨骏六. 数值分析串列双圆柱绕流[J]. 西南民族大学学报, 2007, 33(2): 376-380.
- [3] 潘小强, 袁璟. CFD 软件在工程流体数值模拟中的应用[J]. 南京工程学院学报, 2004, 3(1): 61-65.
- [4] 杨纪伟, 李书芳. 水电站越坝气流及雾流降雨实验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2007, 24(2): 55-58.
- [5] 顾昱. 二维单圆柱、双圆柱绕流问题和三维垂荡板运动的数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [6] 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, 2001, 3(1): 101-111.

(责任编辑 闫纯有)

湍流模型下双柱绕流升阻力系数数值模拟

作者: [滕丽娟](#), [张志伟](#), [武燕蕾](#), [TENG Li-juan](#), [ZHANG Zhi-wei](#), [WU Yan-lei](#)
 作者单位: [滕丽娟, 武燕蕾, TENG Li-juan, WU Yan-lei \(河北工程大学水电学院, 河北, 邯郸, 056038\)](#),
[张志伟, ZHANG Zhi-wei \(承德市水文水资源勘测局, 河北, 承德, 068450\)](#)
 刊名: [河北工程大学学报 \(自然科学版\)](#) 
 英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
 年, 卷(期): 2009, 26 (2)
 被引用次数: 2次

参考文献(6条)

1. 邓见;黄钰期;任安禄 分块法研究圆柱绕流升阻力[期刊论文]-[力学与实践](#) 2004(01)
2. 费宝玲;郑庭辉;杨骏六 数值分析串列双圆柱绕流[期刊论文]-[西南民族大学学报\(自然科学版\)](#) 2007(02)
3. 潘小强;袁璟 CFD软件在工程流体数值模拟中的应用[期刊论文]-[南京工程学院学报\(自然科学版\)](#) 2004(01)
4. 杨纪伟;李书芳 水电站越坝气流及雾流降雨实验研究[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2007(02)
5. 顾罡 二维单圆柱、双圆柱绕流问题和三维垂荡板运动的数值模拟[学位论文] 2007
6. 廖俊;景思睿 高雷诺数下双圆柱绕流的数值模拟[期刊论文]-[水动力学研究与进展a辑](#) 2001(01)

本文读者也读过(10条)

1. [刘君](#). [王振国](#). [吴桂馥](#). [LIU Jun](#). [WANG Zhen-guo](#). [WU Gui-fu](#) 类客车体绕流场的数值模拟[期刊论文]-[长沙交通学院学报](#)2000, 16(2)
2. [王远成](#). [吴文权](#) 基于RNG $k-\epsilon$ 湍流模型钝体绕流的数值模拟[期刊论文]-[上海理工大学学报](#)2004, 26(6)
3. [陆华剑](#). [张慧生](#) 轴对称Stokes绕流的计算[期刊论文]-[复旦学报\(自然科学版\)](#)2004, 43(3)
4. [施卫平](#). [祖迎庆](#). [SHI Wei-ping](#). [ZU Ying-qing](#) 用Lattice Boltzmann方法计算流体对曲线边界的作用力[期刊论文]-[吉林大学学报\(理学版\)](#) 2005, 43(2)
5. [鞠玉涛](#). [周省长](#) 弹丸湍流流场数值计算研究[期刊论文]-[南京理工大学学报](#)2001, 25(6)
6. [祝成民](#). [忻鼎定](#). [庄逢甘](#) 两种湍流模式对绕椭球体三维分离流计算的比较[期刊论文]-[航空学报](#)2003, 24(6)
7. [邹建锋](#). [任安禄](#). [ZOU Jian-feng](#). [REN An-lu](#) 串列双圆球的流场转换研究[期刊论文]-[浙江大学学报\(工学版\)](#) 2006, 40(1)
8. [刘传超](#). [张彬乾](#). [孙静](#). [李杰](#). [郭友利](#). [蒋光福](#). [LIU Chuan-chao](#). [ZHANG Bin-qian](#). [SUN Jing](#). [LI Jie](#). [GUO You-li](#). [JIANG Guang-fu](#) 大型载货车气动阻力计算与流场分析[期刊论文]-[汽车科技](#)2005(4)
9. [于雷](#). [滕鹏](#). [鲁艺](#). [周志刚](#). [YU Lei](#). [TENG Peng](#). [LU Yi](#). [ZHOU Zhigang](#) 跨音速大攻角电视制导炸弹绕流流场数值分析[期刊论文]-[电光与控制](#)2010, 17(1)
10. [袁湘江](#). [周恒](#). [赵耕夫](#). [Yuan Xiangjiang](#). [Zhou Heng](#). [Hao Gengfu](#) 超声速高超声速球锥绕流的边界层稳定性特点初探[期刊论文]-[空气动力学学报](#)1999(1)

引证文献(2条)

1. [道奕光](#) 二维翼型节能减阻效果的研究[期刊论文]-[六盘水师范学院学报](#) 2013(5)
2. [董星](#). [郝婷婷](#). [陈少云](#). [段雄](#) 前混合水射流喷丸喷嘴内流数值模拟[期刊论文]-[黑龙江科技学院学报](#) 2010(3)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200902015.aspx