

基于 Fluent 的多圆柱体绕流场数值模拟

胡卫华

武汉科技大学理学院;冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室,武汉 430065

摘要 圆柱绕流一直是海洋工程研究热点,对海洋工程有重要意义。在海洋工程应用中,多圆柱间相互干扰现象普遍存在,多圆柱绕流特性一直是研究的热点和难点。为了分析多圆柱绕流场的形态结构,本文应用 Fluent 软件,采用数值求解 RANS 方程的黏性流方法,对典型的多圆柱黏性绕流场进行模拟。结果表明,串列双圆柱绕流场与圆柱间距有关;并列双圆柱尾流存在反向对称涡街;斜置双圆柱与 3 圆柱绕流场存在后柱抑制前柱涡的分离现象;方形排列 4 柱绕流场尾涡存在非对称性。同时表明 Fluent 软件对多圆柱体绕流场的数值模拟是有效的,本文采用的方法能定性正确地模拟多圆柱绕流的流动细节。

关键词 多圆柱;绕流场;Fluent;数值模拟

中图分类号 U661.3

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)24-0075-04

Simulation of Flow Around Multi-Circular-Cylinders Based on Fluent

HU Weihua

Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process; College of Sciences, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China

Abstract The flow around circular cylinders always is a problem of focus in ocean engineering, as related with platforms and oil pipelines. In this paper, the Fluent software is used to simulate the flow around multi-circular-cylinders, for several typical arrangements of multi-circular-cylinders. The simulation is based on the RANS equation and RNG turbulence model. It is shown that the flow around serial arrangements of two circular cylinders is related to the distance between the two cylinders. There is a symmetric and inverted vortex in the flow around two circular cylinders of the parallel arrangement. The flow around two circular cylinders of the staggered arrangement is similar to the flow around three cylinders of triangle-shaped arrangement or inverted triangle-shaped arrangement, and the fore circular cylinders restrain the vortex separation by the back circular cylinders. The vortex in the flow around four circular cylinders of square arrangement is unsymmetrical. The simulation results indicate that the simulation of multi-circular-cylinders viscous flow field using Fluent is effective, and the details of the flow around multi-circular-cylinders can be qualitatively simulated.

Keywords multi-circular cylinders; flow field; Fluent; simulation

0 引言

海洋工程中,圆柱形状十分常见,如平台的支撑桩柱、输油管道等均为圆柱形。圆柱绕流研究是海洋工程研究的热门课题。由于圆柱绕流属于钝体绕流,其绕流场易形成涡的脱落,且圆柱绕流场与雷诺数 Re 关系密切,圆柱绕流问题较为复杂。

目前对圆柱绕流的研究主要集中于单圆柱绕流的绕流场结构及其随雷诺数的变化等^[1]。如王亚玲^[2]运用 CFX 软件对雷诺数为亚临界区域的圆柱二维和三维绕流场进行了模拟分析,贾晓荷^[3]采用大涡模拟的方法模拟了单圆柱二维和三维绕流场随雷诺数的变化。对于多圆柱,由于其绕流场与圆柱的个数、圆柱排列方式、圆柱间距和雷诺数等多方面相关^[4-5],现有

收稿日期:2010-06-08;修回日期:2010-11-30

作者简介:胡卫华,讲师,研究方向为工程力学,电子信箱:whhuzcs@163.com

的研究工作并不完善。目前多圆柱绕流研究主要集中于串联或并列的双圆柱,如陈文曲等^[6]数值模拟分析了二维串、并列圆柱绕流的涡致振动,尹贻新^[7]采用有限元方法模拟计算了串联双桥墩阻力系数,贾晓荷^[3]也做了一些双圆柱斜置绕流场的研究工作。对于更多圆柱的绕流场的研究,相对较少,杨纪伟等^[8]对多圆柱绕流旋涡脱落和流场形态进行了概论性描述。本文运用 Fluent 软件,对雷诺数为亚临界区域的双圆柱、3 圆柱和 4 圆柱的二维黏性绕流场进行数值模拟,分析多圆柱绕流不同排列情况的流场结构。

1 多圆柱的相对位置

本文对一些典型的多圆柱排列方式的黏性绕流场进行数值模拟,如双圆柱串联、并列、45°错置,3 圆柱等边品字和倒品字排列,以及 4 圆柱正方形排列。圆柱排列方式如图 1 所示,其中 S 为圆柱间的距离。

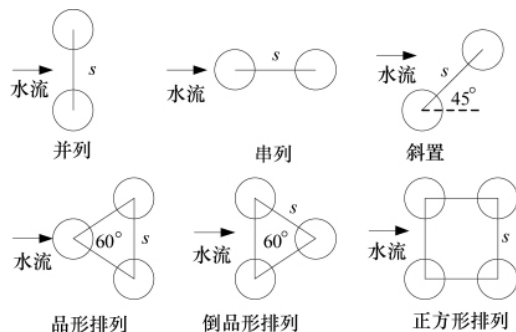


图 1 多圆柱绕流排列

Fig. 1 Arrangements of multi-circular-cylinders

2 计算模型

2.1 控制方程和湍流模型

计算控制方程采用 RANS 方程和连续性方程。考虑圆柱绕流场易形成涡的分离,本文选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型,近壁面采用非均衡壁面函数进行处理。

采用 SIMPLEC 算法进行速度和压力的耦合求解,动量方程、湍动能和耗散率方程采用二阶迎风差分格式进行离散。

2.2 计算域和计算网格

本文采用的二维圆柱绕流计算域如图 2 所示(以串联双圆柱为例)。

对于二维圆柱绕流计算,计算域可尽量取大以消除外边界对流场的影响,本文采用的计算域范围为:入流边界距离迎流前圆柱轴线 $10D$ (D 为圆柱直径);出流边界距离迎流后圆柱轴线 $20D$;侧面外边界距离靠近边界的柱体轴线 $10D$ 。生成的网格如图 3 所示:靠近柱体表面生成加密的 O 型结构化网格,其他区域生成 H 型结构化网格,网格结点总数约为 5.7 万。圆柱近壁面网格 $y^+ \approx 1$ 。

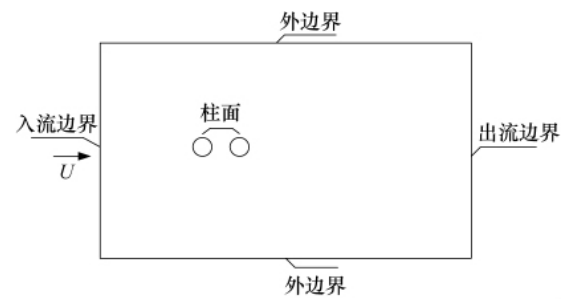


图 2 计算域

Fig. 2 Calculation domain

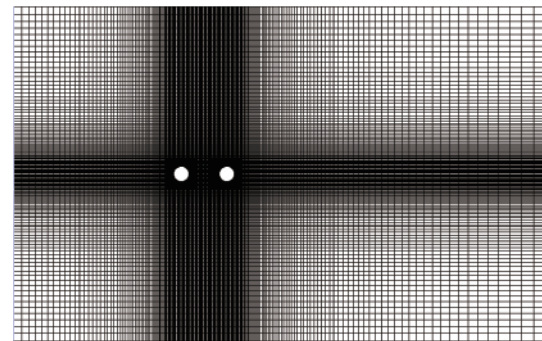


图 3 计算域结构化网格

Fig. 3 Structured grids of calculation domain

2.3 边界条件

入流边界为速度入口,设为均匀来流,给定湍动能 k 和耗散率 ε ;出流边界为自由出流;流体外边界为固壁,满足对速度和湍动能 k 的无滑移边界条件;圆柱体表面为静止固壁。

3 数值模拟结果和分析

采用同一计算条件进行绕流计算:入流速度为 0.4m/s ,圆柱直径为 0.1m , $Re=3.90 \times 10^4$ 。由于圆柱为光滑钝体,其绕流易形成涡的分离,采用非定常计算方法,计算时间步长取为 $\Delta t=0.001\text{s}$ 。

3.1 双圆柱绕流场模拟

1) 双圆柱串联

双圆柱串联的涡量和迹线图如图 4 所示。可以看出,当串联双圆柱间距较小时,如 $S/D=2$ 时,前柱剪切层附着于后柱而不形成涡的脱落,呈现准定常状态。涡的脱落只在后柱发生。增大串联双圆柱间距,如 $S/D=3$ 时,附着于后柱的剪切层从一侧脱落并卷成漩涡向下游传播,前后圆柱均形成涡的分离。根据文献资料^[4-5],双圆柱间距 $S/D=2$ 为串联双圆柱前柱涡分离临界值。 $S/D < 2$ 时,前柱剪切层附着于后柱而不形成涡的脱落。 $S/D > 2$ 时,前柱发生涡的分离,本文的数值模拟结果验证了这一现象。

2) 双圆柱并列

双圆柱并列的涡量和迹线如图 5 所示。可以看出,并列

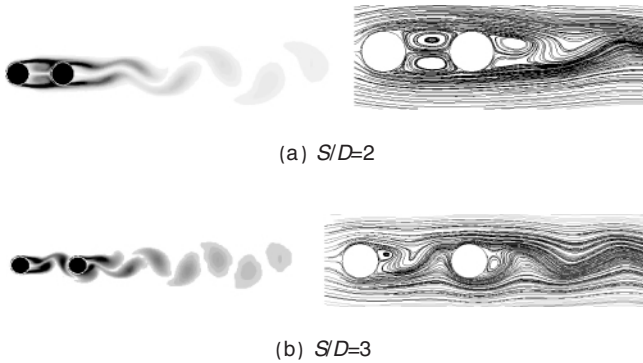


图 4 串列双圆柱涡量和迹线
Fig. 4 Path lines and vorticity of two-cylinders of serial arrangement

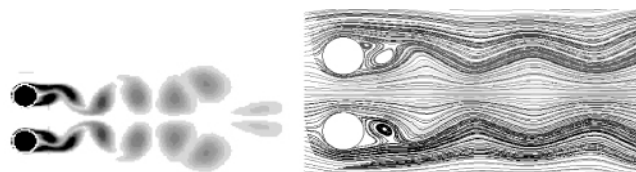


图 5 并列双圆柱涡量和迹线 ($S/D=2$)
Fig. 5 Path lines and vorticity of two-cylinders of parallel arrangement ($S/D=2$)

双圆柱后形成涡的分离,在两圆柱后形成对称反向的涡街。两柱间流线密集,流速减小,两柱存在堵塞效应。

3) 45°斜置

两个圆柱呈 45°斜置时的涡量和迹线如图 6 所示,可以看出,后柱抑制了前柱的流动分离。前柱后形成一对反向对称的稳定涡,前柱的尾迹比后柱的尾迹窄,后柱仍形成涡的分离。

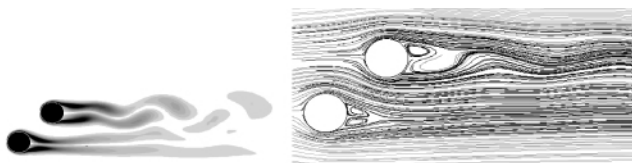


图 6 45°斜置双圆柱涡量和迹线 ($S/D=2$)
Fig. 6 Path lines and vorticity of two-cylinder of staggered arrangement ($S/D=2$)

3.2 3 圆柱绕流场模拟

3 圆柱呈品形和倒品形排列时的涡量和迹线如图 7 所示,可以看出,后柱抑制了前柱涡的分离。品形排列的后面两圆柱存在对称反向的分离涡街,后柱间存在堵塞效应。倒品形排列的后面的单个圆柱形成涡的分离,且后柱尾迹变窄,前面两柱间存在堵塞效应。

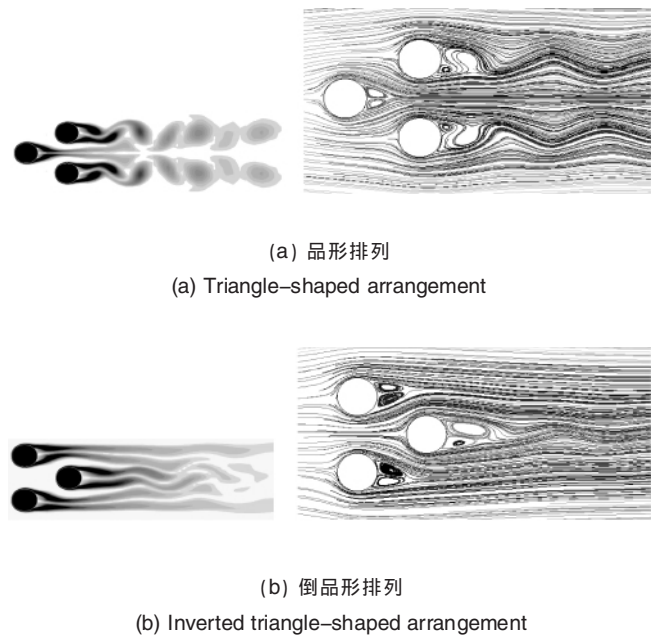


图 7 3 圆柱涡量和迹线 ($S/D=2$)
Fig. 7 Path lines and vorticity of three-cylinders ($S/D=2$)

以上圆柱绕流场的数值模拟结果与相关实验及文献[8]结果比较,均在定性上是一致的。双圆柱和三圆柱各种典型排列绕流场的形态均被定性正确地得到模拟,表明本文采用的多圆柱绕流场数值模拟模型是有效的,采用的网格和湍流模型是合适的。

3.3 4 圆柱绕流场模拟

正方形排列的 4 圆柱可看作两组并列双圆柱或两组串列双圆柱的组合,但其流动特性较双圆柱绕流更为复杂。目前,关于 4 圆柱绕流的研究非常少,流场测量数据缺乏。现有的实验和数值模拟大都是在低雷诺数下研究 4 个圆柱的涡间干扰,且数值模拟流场与实验所得的流动图谱差别很大。数值模拟与实验图谱主要差别在前柱,实验中前柱后没有涡的脱落,而数值模拟中前柱后有明显的涡的脱落^[2]。

本文对正方形排列的 4 圆柱的绕流场采用前述得到验证的网格和湍流模型进行数值模拟。模拟结果如图 8 所示,可以看出,前柱和后柱均存在涡的脱落,且两组串列圆柱间存在干扰,尾涡的脱落存在非对称性,即上下两组串列圆柱涡的分离存在相位差。

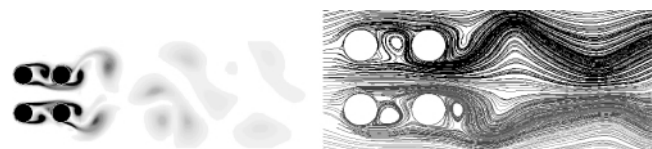


图 8 正方形排列 4 圆柱涡量和迹线 ($S/D=2$)
Fig. 8 Path lines and vorticity of four-cylinders of square arrangement ($S/D=2$)

4 结论

1) 本文应用 Fluent 软件对多圆柱黏性绕流场进行数值模拟,所采用的数值模拟方法是可行的,模拟结果定性上是正确的。

2) 多圆柱绕流场与圆柱个数、排列方式有关,流场的结构复杂。目前对多圆柱体绕流的研究尚不完善,对不同雷诺数、不同间距以及不同流向的圆柱绕流问题需还进一步深入研究。

3) 4 圆柱方形排列绕流场的研究较少,数值模拟结果与实验图谱有一定差异,对 4 圆柱的绕流场的数值模拟需进行算法的改进以得到较好的模拟结果。

参考文献 (References)

- [1] 杨纪伟,付晓丽.圆柱绕流研究进展[J].中国水运,2008,8(5):156-158.
Yang Jiwei, Fu Xiaoli. *China Water Transport*, 2008, 8(5): 156-158.
- [2] 王亚玲,刘应中,缪国平.圆柱绕流的三维数值模拟[J].上海交通大学学报,2001,35(10):1464-1469.
Wang Yaling, Liu Yingzhong, Miao Guoping. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2001, 35(10): 1464-1469.
- [3] 贾晓荷.单圆柱及双圆柱绕流的大涡模拟[D].上海:上海交通大学,2008.
Jia Xiaohe. Large eddy simulation of flow around one and tow circular cylinders[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [4] Zdra Vkcich M M. Flow induced oscillations of two interfering circular cylinders[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1985, 101: 511-521.
- [5] Zdravkovich M M. Review of interference-induced oscillations in flow past two parallel circular cylinders in various arrangements[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 28 (1-3): 183-199.
- [6] 陈文曲,任安禄,李广望.串列双圆柱绕流下游圆柱两自由度涡致振动研究[J].力学学报,2004,36(6):732-738.
Cheng Wenqu, Ren Anlu, Li Guangwang. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 36(6): 732-738.
- [7] 尹贻新.串列桥墩阻力系数研究[D].成都:西南交通大学,2007.
Yin Yixin. Study on drag coefficient of cylinders in tandem arrangement [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [8] 杨纪伟,滕丽娟,胥战海.多圆柱绕流旋涡脱落和流场形态概论[J].人民长江,2009,40(3):66-68.
Yang Jiwei, Teng Lijuan, Xu Zhanhai. *Yangtze River*, 2009, 40(3): 66-68.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·

“第十五届中国国际非开挖技术研讨会暨展览会”征文



中国地质学会将于 2011 年 4 月 16—17 日在武汉市召开“第十五届中国国际非开挖技术研讨会暨展览会”。

征文内容:定(导)向钻进、微型盾构(顶管)、夯管及气动矛、管道修复与更换技术、相关设备仪器以及管线检测技术等。

征文截止时间:2011 年 3 月 10 日。

联系方式:北京市百万庄大街 26 号中国地质科学院中国地质学会非开挖专业委员会秘书处(100037)朱文鉴;电话:010-68992605;传真:010-68992605;电子信箱:zhwj@csstt.org。

会议网站:www.csstt.org。

“第三届中国信息融合学术年会”征稿



中国航空学会将于 2011 年 8 月 4—7 日在西安市召开“第三届中国信息融合学术年会”。

征文内容:① 信息融合基础理论:概率统计理论,模糊与灰色理论,粗糙集理论,证据理论,本体论,随机集理论,可能性理论,认知理论等;② 信息融合方法与技术:目标检测与跟踪,目标识别,状态估计与决策,态势与威胁估计,图像融合,融合性能评估及优化,基于数据的信息融合方法,基于网络的信息融合技术,传感器管理,融合系统结构设计及方法等;③ 信息融合应用:航空(海)电子综合系统,航空(海)交通管制,机器人信息融合,自主导航系统,生物医学信息融合及处理,无线传感器网络,视频跟踪与监控,遥感测绘,智能交通,金融、经济等;④ 与信息融合相关的其他方面。

全文截稿日期:2011 年 3 月 31 日。

联系方式:西安市西北工业大学自动化学院(710072)赵春晖;电话:029-88431306;传真:029-88431306;电子信箱:cifc2011@nwpu.edu.cn。

会议网站:http://www.csa.org.cn。