



高雷诺数下串列三圆柱绕流的大涡模拟*

谭志荣^{1,2}, 熊 劲¹, 王 洋¹, 陈 维¹, 林黎明³

(1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063;

2. 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063;

3. 中国科学院力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

摘要: 三维圆柱绕流的研究主要关注仿真精度, 且单圆柱尾涡结构的分析较多, 对于串列三圆柱绕流特征的研究较少。使用 FLUENT 软件对雷诺数为 2.25×10^6 在不同间距比下串列三圆柱的湍流模型进行三维模拟。运用 Gambit 软件对流场进行建模, 并对圆柱临近水域网格进行加密, 对串列三圆柱进行三维大涡模拟(LES); 取间距比 L/D (L 为两圆柱间的距离, D 为圆柱直径) 为 1.0、2.0 和 3.0, 选取三维模拟中 3 个不同切面高度(距离水面 0、2.25 和 4.40 m) 研究速度场、压力场和涡量场的湍流特性。结果表明: 三维模拟证实了表层的涡量变化显著, 在连续圆柱后存在回流区域与间距比有强相关性; 同时, 3 个不同切面的速度场变化较小, 压力场变化甚微。

关键词: 串列三圆柱; 三维数值模拟; LES; 高雷诺数

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0025-09

LES on flow past three tandem cylinders at high Reynolds number

TAN Zhi-rong^{1,2}, XIONG Mai¹, WANG Yang¹, CHEN Wei¹, LIN Li-ming³

(1.School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2.Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China;

3.Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The study of the three-dimensional cylinder flow mainly focuses on the degree of the simulation accuracy, and the analyses of the single-cylinder wake vortex structure. However, there are less research on characteristics of the three-dimensional three tandem cylinders flow. The simulation on three tandem cylinders turbulence model from three dimensions is carried out at the different spacing ratios by taking Reynold number as 2.25×10^6 by FLUENT software. Gambit software is used to model the flow field, and the grid of the water near the cylinder is densified, and a three-dimensional LES simulation is carried out for three tandem cylinders in series. Three different L/D (L is the spacing between the cylinders and D is the diameter of the cylinder) are selected as 1.0, 2.0 and 3.0, and three different heights of tangent planes (0 m, 2.25 m and 4.40 m from the water surface) are selected in the 3D simulation to study the turbulence of the velocity field, pressure field and vorticity field characteristics. The results show that the three-dimensional simulation confirms the significant changing of vorticity of the surface, and the backflow area behind the continuous cylinder is strongly correlated with the spacing ratio. At the same time, the velocity fields of the three different tangent planes have small changes, and the pressure field changes little.

Keywords: three tandem cylinders; three-dimensional numerical simulation; LES; high Reynolds number

收稿日期: 2022-04-13

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1407404)

作者简介: 谭志荣(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为载运工具运用工程与交通系统安全性评价。

圆柱绕流是流体力学领域的经典问题，近年来成为研究的热点。雷诺数对圆柱绕流问题起着决定性的作用，其可以揭示复杂流体现象。

武玉涛等^[1]对圆柱绕流问题进行综述。Chen 等^[2]用松弛模型下的格子玻尔兹曼方法和大涡模拟(LES)方法对层流状态下并且双圆柱不同间距比进行三维数值模拟，尾流和流体动力显示了不同间距比下的三维特性。在多圆柱绕流问题的试验分析方面，Bao 等^[3]运用二阶特征的方法，分析等边三角形圆柱绕流问题，其数值结果表明，在足够小和足够大的间距下，流动干扰分别以邻近效应和尾流效应为主；而间距在中间范围内，流型受两者的影响。Lam 等^[4-5]对 4 个方形排列的圆柱体上的层流进行二维和三维数值模拟，并且研究模型之间的流动模式和压力分布的差异。张志猛等^[6]、杨枭枭等^[7]基于嵌入式迭代浸入边界法对等边三角形排列的三圆柱绕流以及串列三圆柱绕流进行模拟分析，以了解不同间距比下的尾流情况。李鹤高等^[8]、海显盛等^[9]、魏彭林等^[10]分别运用 $k-\epsilon$ 紊流模型和格子玻尔兹曼方法分析桥墩周围紊流宽度。

现阶段对高雷诺数的数值模拟中，采用直接数值模型、离散涡模型、LES 模型等湍流模型求解高雷诺数条件下的圆柱绕流问题。其中 LES 方法比较通用，该方法能够较为精确地处理剪切层混合、尾迹分离区等紊流问题。

高洋洋等^[11]进行高雷诺数条件下倾斜柱扰流的三维数值模拟，结果发现随着圆柱倾角的增大，倾斜圆柱尾流产生较为明显的轴向流，尾流漩涡脱落受到明显抑制，细碎漩涡逐渐消失，尾流宽度随之减小。

武频等^[12]将 LES 与多弛豫时间格子玻尔兹曼方法相结合对高雷诺数下二维圆柱绕流进行数值模拟，并根据试验结果系统分析圆柱绕流涡的脱落形态。李燕玲等^[13]采用 LES 方法对雷诺数 $Re=10^4$ 时不同间距比的双圆柱绕流进行三维数值模拟，发现不同间距比下的各种紊流形态及流体动力情况。杜晓庆等^[14]使用 LES 方法进一步

澄清了双圆柱之间的气动干扰机理。贺然^[15]利用计算流体动力学(CFD)软件 FLUENT 对阵列四圆柱绕流问题进行数值模拟，试验中 $Re=2.07\times 10^5$ ，其结果表明： $L/D=0.3$ 时(L 为圆柱的间距， D 为圆柱直径)时流动形态为单体模式， $L/D>0.3$ 时上游圆柱后形成不完整的涡脱结构， $L/D>0.6$ 时上下两排圆柱后逐渐形成独立的涡脱结构。端木玉等^[16]运用开源代码 OpenFOAM 进一步研究串列三圆柱扰流，结果表明圆柱后方约 1 倍直径的范围存在回流且剖面速度呈明显变化规律。刘闯等^[17]研究三维串联多圆柱绕流在不同圆柱间距比 L/D 情况下的尾涡结构，计算 $Re=3.0\times 10^4$ 下三维单圆柱及三维串联多圆柱在不同 L/D 情况下的尾涡流场，其数值结果表明：串联多圆柱绕流存在临界间距比 $L/D=4$ ，当圆柱间距比小于临界间距比时，圆柱间不会产生尾涡脱落；当圆柱间距比大于临界间距比时才会产生明显的涡脱落现象。

对于雷诺数更大的串列三圆柱绕流问题，临界间距比的特征与文献[16][17]所进行的数值仿真结果之间的联系是有待探索的问题。本文对 $Re=2.25\times 10^6$ 下三维串列三圆柱绕流的临界间距比进行研究，同时对此情形下的速度场、压力场和涡量场的湍流特性进行分析。采用 LES 方法在高雷诺数下串列三圆柱的绕流分析有助于掌握不同 L/D 工况下的涡量场特征，可为高桩海工结构设计提供技术参考。

1 计算方法

1.1 控制方程

三大守恒方程是液体在流动过程中必须遵循的规律，若流体为多种液体混合，该系统还须遵循组分守恒定律。假设流体不可压缩，此时流体的密度、黏度均为常数；假设当前流动情况下，所有体力有势，因此体力可以归并入压力计算中；假设不存在热量的输入输出，可以忽略能量守恒方程，仅考虑不可压缩流体连续性方程(质量守恒)及动量守恒方程。

1.2 湍流模型

在现有的条件下很难对紊流进行全尺度涡流研究, 因此 LES 模型将紊流流场划分为大小不一的湍流组合加以研究, 对于尺度不同的涡采用不同的方法进行模拟。由于需要同时计算大、小尺寸的脱落涡, 因此大涡模型的计算量较大, 但明显低于直接数值模型。该方法能够较为精确的处理剪切层混合、尾迹分离区等紊流问题, 因此大涡模型在实际生活中应用较多。

通过采用过滤 N-S 方程的方法, LES 模型可得到相应的控制方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}^{sgs}}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; \bar{u}_i 和 \bar{u}_j 为水流速度沿 x 、 y 方向上的大尺度分量; x_i 、 x_j 为坐标方向的分量; g_i 为重力加速度; $\frac{\partial \tau_{ij}^{sgs}}{\partial x_j}$ 为湍流中尺度较小的涡对尺度较大的涡的影响值; τ_{ij}^{sgs} 为亚网格

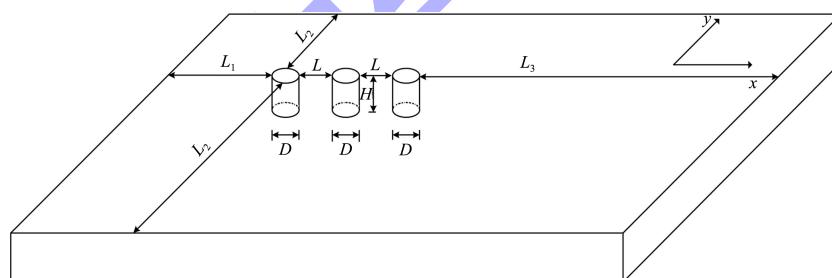


图 1 串列三圆柱桩绕流模型计算范围

2.2 边界条件

1) 入口设置为自由来流; 2) 出口设置为出口流动边界 (outflow); 3) 柱体表面设置为无滑移壁面边界 (wall); 4) 模型内部连接各个区域的交界面设置为内边界 (interior); 5) 柱柱的上顶面及左右面均设置为对称边界条件 (symmetry), 水底壁面设置为无滑移壁面边界 (wall)。

2.3 参数提取

本文针对山区航道高桩码头进行三维流场研究, 流体设置为水, 密度 ρ 为 0.998 t/m^3 (20°C), 来流速度方向与入口垂直, 来流速度 $v=1.5 \text{ m/s}$, 参

应力, 公式为:

$$\tau_{ij}^{sgs} - \frac{1}{3} \tau_{kk}^{sgs} \delta_{ij} = -2\mu_{sgs} \bar{s}_{ij} \quad (3)$$

式中: τ_{ij}^{sgs} 为 $i=j$ 时的亚网格应力; μ_{sgs} 为湍流黏性系数; δ_{ij} 为克罗内克函数; \bar{s}_{ij} 为应变速率张量。 \bar{s}_{ij} 和 u_{sgs} 的公式为:

$$\bar{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\mu_{sgs} = \rho L_s^2 \sqrt{2\bar{s}_{ij}\bar{s}_{ij}} \quad (5)$$

式中: L_s 为亚网格尺度的混合长度。

2 物理模型与计算工况

2.1 物理模型

本文无需考虑自由液面对流场的影响, 因此, 圆柱可以完全插入水中(即水深 h 等于桩柱高度 H)。串列三圆柱桩绕流模型计算范围见图 1, 其中 D 为圆柱桩直径, L 为圆柱桩之间距离, L_1 为来流入口距圆柱桩距离, L_2 为圆柱桩距侧边的距离, L_3 为圆柱桩距出口距离。

考压强 p 为 1 个标准大气压, D 取 1.5 m , H 取 4.5 m 。其他参数设置为: 1) 该模型的 $Re=2.25\times 10^6$, 属于高雷诺数条件, 而 LES 模型相较于其他两种模型, 其计算量适中且模拟精度较高, 可用于求解三维湍流模型, 拟采用 LES 模型作为湍流模型; 2) 动量及压力方程均设置为二阶离散格式; 3) 水的黏性系数可设置为 0.001, 时间导数可采用二阶离散, 步长设置为 0.05 s , 计算时长设置为 1000 s , 以确保流场能够形成稳定且充分发展的紊流; 4) 迭代算法设置为压力的隐式算子分割 (PISO) 算法。

2.4 模型校验

通过查阅文献资料, 参考其他学者在研究桩群流场时选取的计算域尺度, 本文通过比较不同计算区域范围对结果的影响选择合适的计算区域尺度。

为了验证数值模拟的正确性, 对柱体绕流进行模拟验证。柱体绕流模拟检验常用到的无量纲系数有: 斯特劳哈尔数 St , 阻力系数 C_D , 升力系数 C_L 。计算结果见表 1。

表 1 串列三圆柱不同计算域尺度计算结果对比

L_1	L_2	L_3	圆柱	St	C_D	C_L
10D	10D	30D	1	0.235	1.017	1.291
			2	0.121	0.463	1.375
			3	0.103	0.536	1.967
10D	10D	40D	1	0.248	0.983	1.125
			2	0.132	0.565	1.367
			3	0.126	0.587	1.675
10D	5D	30D	1	0.266	0.875	1.128
			2	0.133	0.712	1.412
			3	0.111	0.682	1.479
5D	10D	30D	1	0.267	0.756	1.235
			2	0.208	0.689	1.313
			3	0.148	0.675	1.412

由表 1 可知, 对于串列三圆柱在 $L_1=10D$ 、 $L_2=10D$ 、 $L_3=30D$ 时, 计算域尺度对数值模拟的计算结果影响较小, 可用于串列三圆柱的流场分析。

3 数值模拟与结果分析

3.1 模拟工况

为对串列三圆柱的三维特性进行定量化分析, 通过后处理软件 Tecplot, 依次选择水深为 0、2.25、4.40 m 的切面, 并对各个切面处的速度场、压力场与涡量场逐一进行分析比较。工况参数设置见表 2。

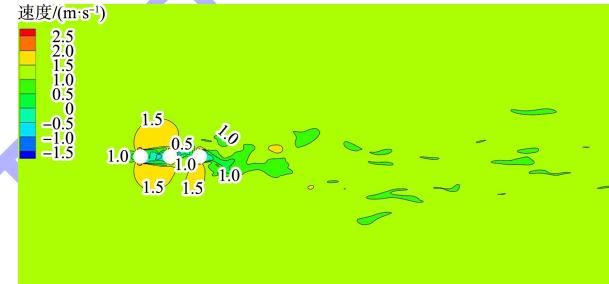
表 2 串列三圆柱模拟仿真工况参数

圆柱直径 D/m	圆柱间距比 L/D	流速/($m \cdot s^{-1}$)
1.5	1	1.5
1.5	2	1.5
1.5	3	1.5

3.2 速度场分析

不同水深串列三圆柱流向速度等值线分布云图见图 2~4。当柱间距较小时, 前一个柱形成紊流极易影响到后续的柱柱, 导致柱后水流速

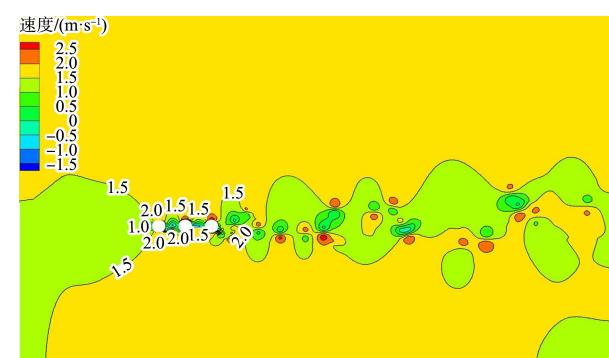
度场被破坏, 不再对称分布。当 $L/D=1$ 时, 由于柱柱距离较近, 各个柱柱的速度场不再关于柱柱横向轴线对称分布, 且受到前方柱柱的影响, 第 3 个柱柱产生的速度场较为混乱, 柱后水流影响范围显著扩大; 当 $L/D=2$ 时, 前一个柱柱产生的尾流仍在影响后续柱柱的流场, 后续柱柱后的水流速度场无法保持对称分布, 且柱柱间水流低速区域的影响范围显著扩大, 第 3 个柱柱产生的柱后水流速度场呈现碎片化分布; 当 $L/D=3$ 时, 串列三柱柱产生的尾流不再相互影响, 每个柱柱的柱后速度场与单柱柱速度场基本一致, 尾流影响范围进一步缩小。



a) $d=4.40\text{ m}$

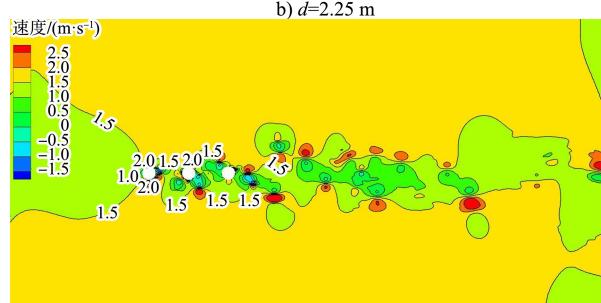
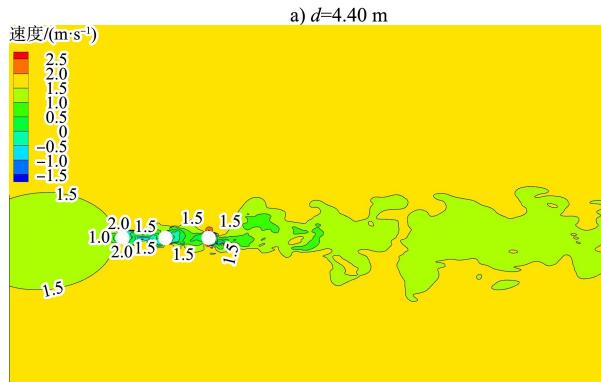
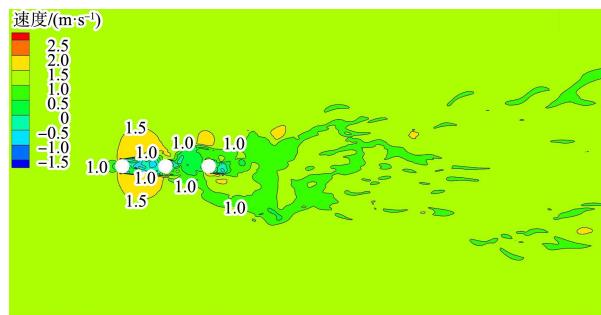
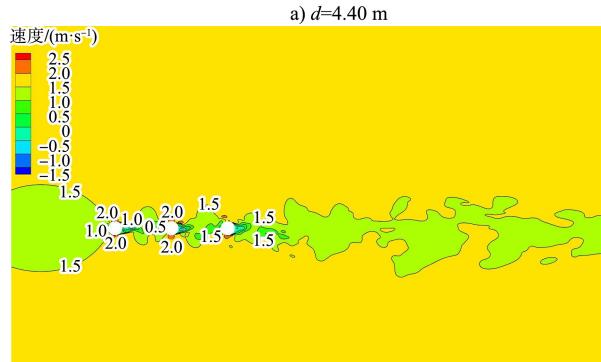
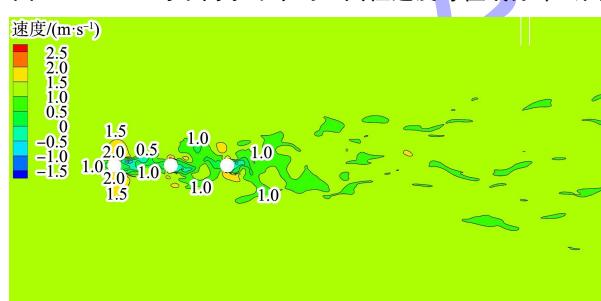
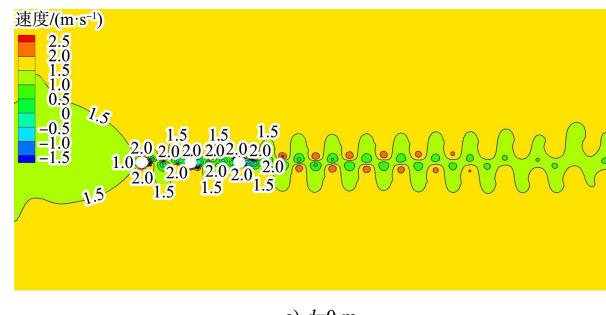


b) $d=2.25\text{ m}$

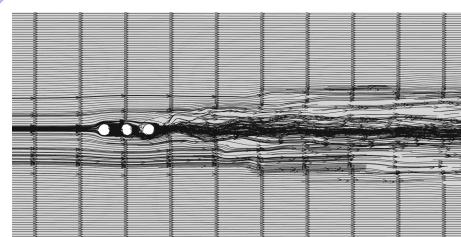
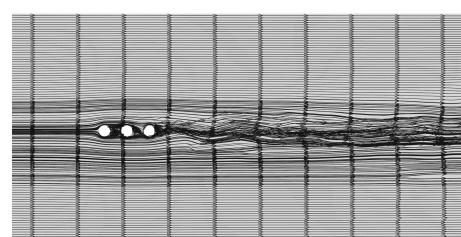
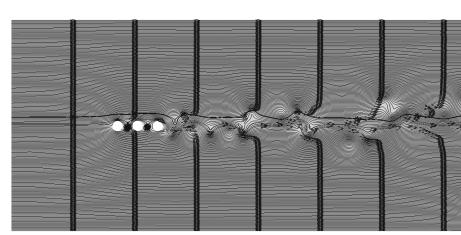


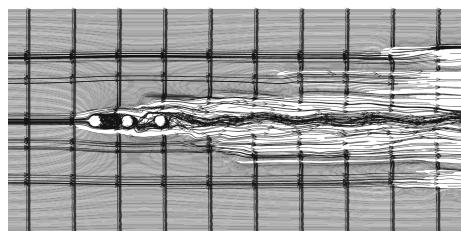
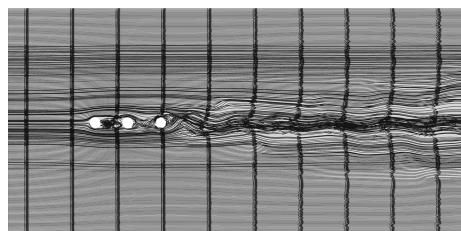
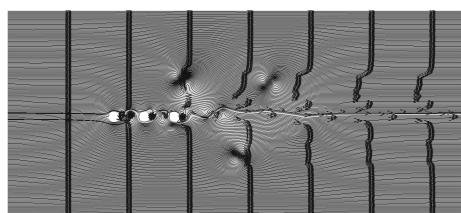
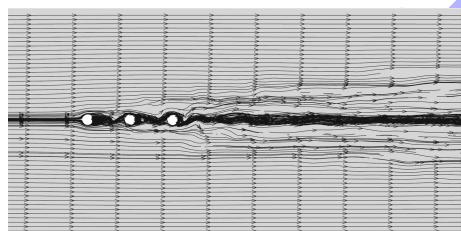
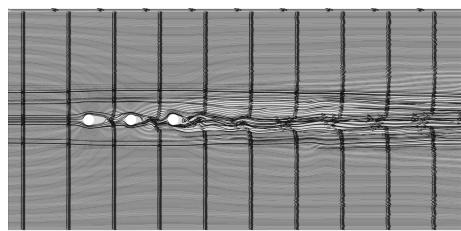
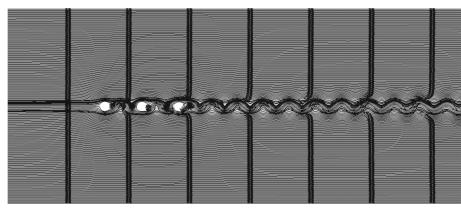
c) $d=0\text{ m}$

图 2 $L/D=1$ 时不同水深串列三圆柱流向速度等值线分布云图

图 3 $L/D=2$ 时不同水深串列三圆柱速度等值线分布云图b) $d=2.25 \text{ m}$ c) $d=0 \text{ m}$ 图 4 $L/D=3$ 时不同水深串列三圆柱速度等值线分布云图

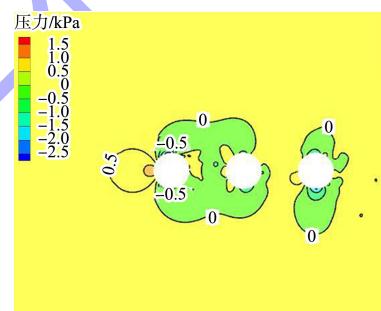
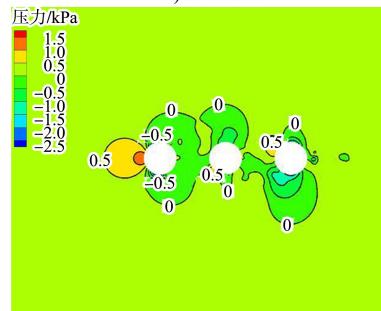
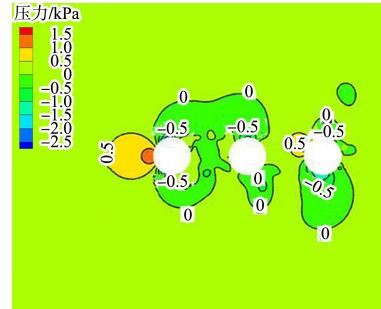
不同水深串列三圆柱流场流线分布见图 5~7。当水深 $d = 4.40 \text{ m}$ 时, 水流受到河底壁面及柱柱的影响, 水流由柱前的二维流动在柱柱后方变为上下波动的三维流动, 且随着水流变浅, 水流的三维扰动逐步削弱。在不同的间距比下, 圆柱尾流区流体质点的运动情况有所差别, 当 $L/D \leq 2$ 时, 流体质点的波动轨迹较短, 波动影响较小; 当 $L/D=3$ 时, 圆柱尾流区域流体质点波动加剧, 但波动影响范围有所减弱。

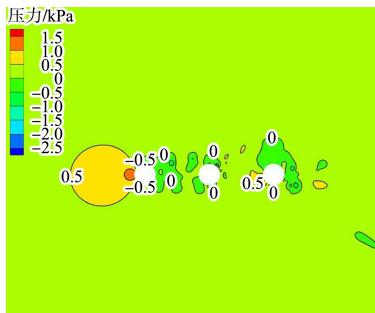
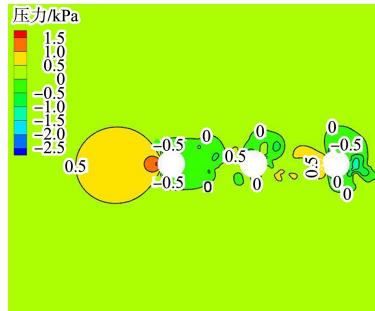
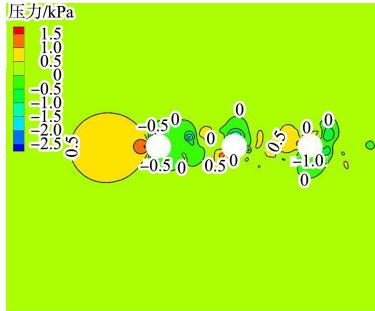
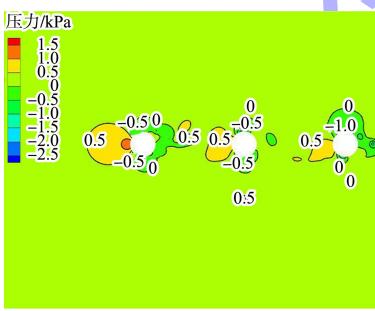
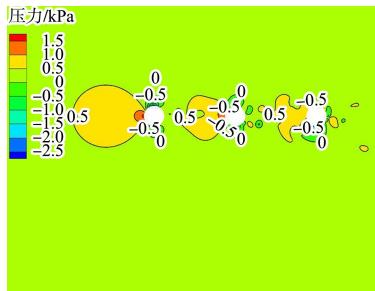
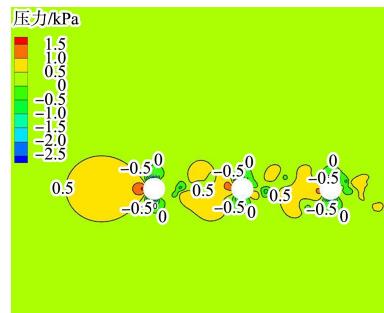
a) $d=4.40 \text{ m}$ b) $d=2.25 \text{ m}$ c) $d=0 \text{ m}$ 图 5 $L/D=1$ 时不同水深串列三圆柱流线分布

a) $d=4.40\text{ m}$ b) $d=2.25\text{ m}$ c) $d=0\text{ m}$ 图 6 $L/D=2$ 时不同水深串列三圆柱流线分布a) $d=4.40\text{ m}$ b) $d=2.25\text{ m}$ c) $d=0\text{ m}$ 图 7 $L/D=3$ 时不同水深串列三圆柱流线分布

3.3 压力场分析

不同水深串列三圆柱压力场等值线分布云图见图 8~10。桩柱距离对串列三圆柱的压力场有较大的影响，即桩柱以串列形式布置时会破坏桩柱后压力场结构，使其不再对称布置。由图 8 可知，当 $L/D=1$ 时，由于桩柱距离过近，第 1 个桩柱的柱后负压区会破坏第 2 个桩柱的柱前正压区，并影响柱后负压区；由图 9 可知，当 $L/D=2$ 时，串列三桩柱之间的压力场仍存在一定干扰，除第 1 个桩柱外，其余桩柱的柱前正压区均被破坏，柱后负压区的对称结构被破坏，负压区呈碎片化分布；由图 10 可知，当 $L/D=3$ 时，第 1 个桩柱的压力场能保持正常的结构，而其余桩柱由于第 1 个柱体的影响，其压力场结构均有不同程度的破坏，但仍保持柱前正压、柱后负压的形式，即此时桩柱压力场受到的影响较小。

a) $d=4.40\text{ m}$ b) $d=2.25\text{ m}$ c) $d=0\text{ m}$ 图 8 $L/D=1$ 时不同水深串列三圆柱压力场等值线分布云图

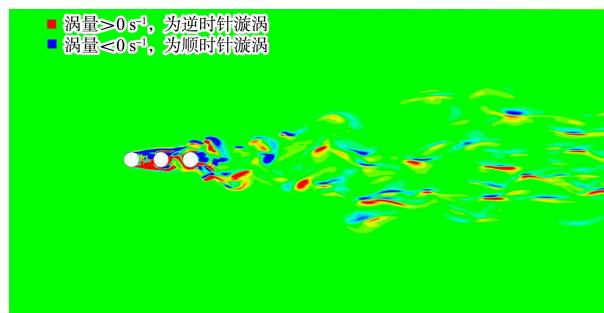
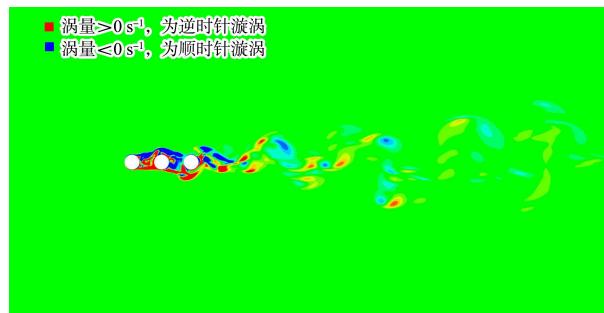
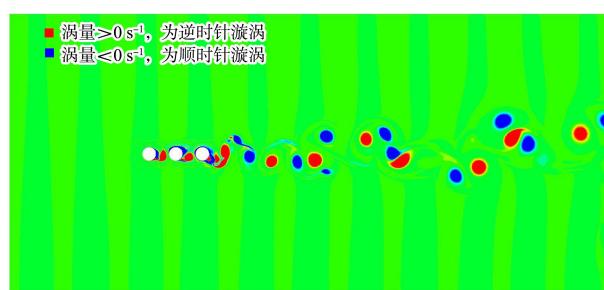
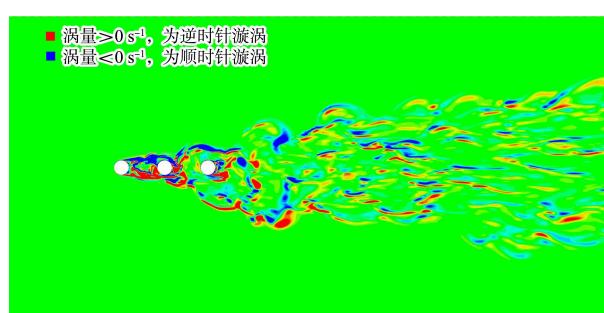
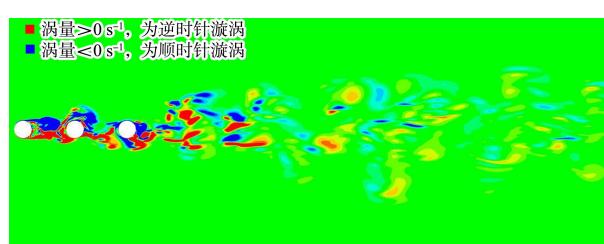
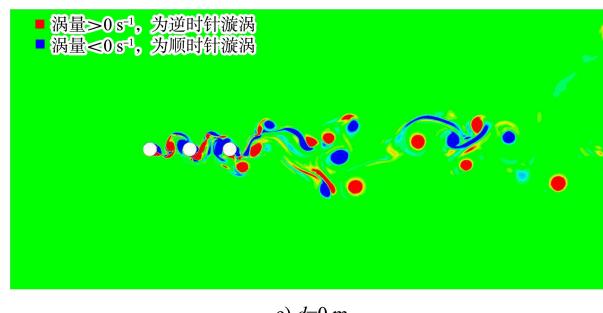
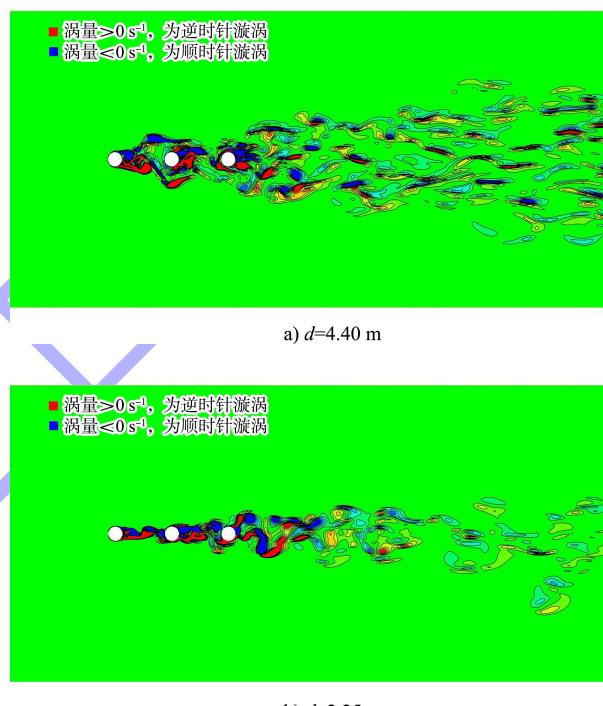
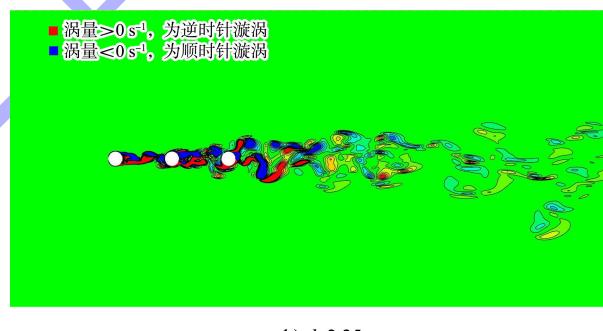
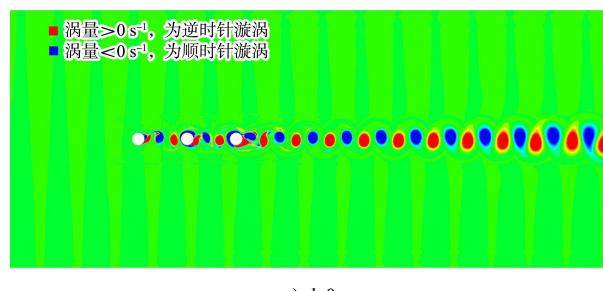
a) $d=4.40\text{ m}$ b) $d=2.25\text{ m}$ c) $d=0\text{ m}$ 图 9 $L/D=2$ 时不同水深串列三圆柱压力场等值线分布云图a) $d=4.40\text{ m}$ b) $d=2.25\text{ m}$ c) $d=0\text{ m}$ 图 10 $L/D=3$ 时不同水深串列三圆柱压力场

等值线分布云图

综合图 8~10 可知, 不论桩柱间距为多少, 在不同水深处, 桩柱之间的压力场结构基本维持不变。对于串列三桩柱而言, 桩柱后方及两侧均存在低压区域, 船舶进行靠泊作业, 在低压区域行驶时, 往往会使船舶受到水流压差的作用, 容易发生岸吸现象, 造成船舶失控撞向码头。但随着桩柱间距离(L/D)的增大, 桩柱引起的低压区范围有所衰减, 桩柱与周围水域的压差逐步减少, 对靠泊船舶的影响逐渐降低, 证明适当扩大桩柱间距离有利于船舶靠泊。

3.4 涡量场分析

串列三圆柱三维涡量场和不同水深展向涡量定性分布见图 11~13。在 3 种不同桩柱距离下, 串列三圆柱也有较为显著的三维特性, 即随着水流变浅, 桩柱尾涡区域的影响范围有所减少, 但脱落涡能量有所增强。在不同间距比条件下, 串列三圆柱尾流区域均出现涡脱现象, 但是尾涡的形态、影响范围有所不同。当 $L/D \leq 2$ 时, 上游桩柱产生的尾涡会直接碰撞到下游的桩柱, 尾涡形态明显受到挤压, 涡街结构被破坏, 此时下游桩柱受其影响, 柱后尾涡不再保持对称分布, 尾涡开始发生偏移, 影响范围显著扩大; 当 $L/D = 3$ 时, 串列桩柱脱落涡的涡街结构保持稳定, 桩柱对尾涡的影响消失, 下游桩柱尾流区域产生一系列规则分布的脱落涡, 此时桩柱尾涡的影响最小。

a) $d=4.40 \text{ m}$ b) $d=2.25 \text{ m}$ c) $d=0 \text{ m}$ 图 11 $L/D=1$ 时串列三圆柱三维涡量场和不同水深展向涡量定性分布a) $d=4.40 \text{ m}$ b) $d=2.25 \text{ m}$ c) $d=0 \text{ m}$ 图 12 $L/D=2$ 时串列三圆柱三维涡量场和不同水深展向涡量定性分布a) $d=4.40 \text{ m}$ b) $d=2.25 \text{ m}$ c) $d=0 \text{ m}$ 图 13 $L/D=3$ 时串列三圆柱三维涡量场和不同水深展向涡量定性分布

4 结论

1) 当间距较小时($L/D \leq 2$)，由于上游桩柱产生的尾流仍在影响后续桩柱的流场，下游桩柱后的水流速度场无法保持对称分布，桩柱间水流低速区域的影响范围显著扩大，第3个桩柱产生的

柱后水流速度场呈现碎片化分布; 且上游桩柱产生的尾涡会直接碰撞到下游的桩柱, 尾涡形态明显受到挤压, 涡街结构被破坏, 此时下游桩柱受其影响, 柱后尾涡不再保持对称分布, 尾涡开始发生偏移, 影响范围显著扩大。

2) 当桩柱间距 $L/D=3$ 时, 串列桩柱脱落涡的涡街结构保持稳定, 桩柱对尾涡的影响消失, 下游桩柱尾流区域产生一系列规则分布的脱落涡, 桩柱脱落涡影响范围与单桩柱产生的脱落涡影响范围基本一致, 此时桩柱尾涡的影响最小。

3) 不同雷诺数下的仿真分析可得到临界 L/D 为 3 或者 4, 后续可以通过试验方法结合具体工程进一步论证其最佳间距比。

参考文献:

- [1] 武玉涛, 任华堂, 夏建新. 圆柱绕流研究进展及展望[J]. 水运工程, 2017(2): 19-26, 56.
- [2] CHEN L, TU J Y, YEOH G H. Numerical simulation of turbulent wake flows behind two side-by-side cylinders[J]. Journal of fluids and structures, 2003, 18(3): 387-403.
- [3] BAO Y, ZHOU D, HUANG C H. Numerical simulation of flow over three circular cylinders in equilateral arrangements at low Reynolds number by a second-order characteristic-based split finite element method[J]. Computers & fluids, 2010, 39(5): 882-899.
- [4] LAM K, GONG W Q, SO R M C. Numerical simulation of cross-flow around four cylinders in an in-line square configuration[J]. Journal of fluids and structures, 2008, 24(1): 34-57.
- [5] LAM K, ZOU L. Three-dimensional numerical simulations of cross-flow around four cylinders in an in-line square configuration[J]. Journal of fluids and structures, 2010, 26(3): 482-502.
- [6] 张志猛, 及春宁, 许栋, 等. 上游圆柱固定条件下串列三圆柱涡激振动响应和尾流特性[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2019, 34(2): 174-183.
- [7] 杨枭枭, 及春宁, 陈威霖, 等. 三角形排列圆柱绕流尾流模式及其流体力学特性[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2019, 34(1): 69-76.
- [8] 李鹤高, 林钢. 桥墩周围紊流区宽度研究[J]. 水运工程, 2009(8): 102-106.
- [9] 海显盛, 魏彭林. 弯曲河道方形桥墩紊流宽度数值模拟[J]. 水运工程, 2018(1): 134-141.
- [10] 魏彭林, 陈明栋, 陈明. 超临界雷诺数下桥墩紊流宽度的计算方法[J]. 水运工程, 2017(4): 131-138.
- [11] 高洋洋, 张演明, 刘彩, 等. 不同雷诺数下倾斜圆柱绕流三维数值模拟研究[J]. 海洋工程, 2020, 38(1): 86-100.
- [12] 武频, 高升. 高雷诺数下圆柱绕流数值模拟与分析[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(11): 139-142, 147.
- [13] 李燕玲, 苏中地, 李雪健. 高雷诺数下并列双圆柱绕流的 DES 法三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2014, 29(4): 412-420.
- [14] 杜晓庆, 王玉梁, 赵燕, 等. 高雷诺数下错列双圆柱气动干扰的机理研究[J]. 工程力学, 2018, 35(9): 223-231.
- [15] 贺然. 高雷诺数下阵列四圆柱绕流流动形态数值模拟[J]. 四川建材, 2016, 42(1): 57-59.
- [16] 端木玉, 万德成. 雷诺数为 3900 时三维圆柱绕流的大涡模拟[J]. 海洋工程, 2016, 34(6): 11-20.
- [17] 刘闯, 黄剑峰, 邵晨. 基于 LBM-LES 的三维串列多圆柱绕流尾涡结构研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(1): 186-194.

(本文编辑 王璁)

征订通知

2023 年《水运工程》杂志征订工作已经开始, 请登录《水运工程》杂志社官方网站 www.sygc.com.cn 首页下载中心下载“2023 年《水运工程》征订通知单”, 有关要求和反馈信息一应俱全。