

闸墩绕流影响因素及其作用规律分析

王志飞, 杨贝宁, 王思莹

(武汉理工大学新材料力学理论与应用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要:为探究某水利工程渡槽附近不平稳水面的形成原因并为制定消除措施提供参考,使用COMSOL Multiphysics 软件对高雷诺数($Re=5\times10^6$)条件下,不同宽度的顺直流道、收缩渐变段和弯曲流道下游的圆柱绕流和不同形态的闸墩绕流进行了数值模拟研究,分析了流道布局和闸墩形状尺寸等因素对绕流流场和结构受力特性的影响。圆柱绕流分析结果表明:在计算参数范围内,随着顺直流道宽度的减小,圆柱的升阻力系数均逐渐增大;流道渐变段的截面收缩对圆柱绕流产生的影响不大;流道弯曲导致的来流偏流系数越大,圆柱受力的非对称性越明显,升阻力系数均值越大。闸墩绕流计算结果表明:无墩尾闸墩的绕流流场和受力特性与圆柱绕流类似,随着墩身长度增加,闸墩的平均阻力系数减小;带墩尾的闸墩呈流线型,其升阻力系数与尺寸相当的圆柱和无墩尾闸墩相比均显著减小;给闸墩设置合适的墩尾是解决闸墩绕流脱涡的有效措施。

关键词:闸墩;高雷诺数;流道布局;墩尾;数值模拟

中图分类号:TV672⁺.3;O352 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)06-0045-07

Study on influence factors and function rules on flow around a gate pier//WANG Zhifei, YANG Beining, WANG Siying(*Hubei Key Laboratory of Theory and Application of Advanced Materials Mechanics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

Abstract: To study the unstable water surface near an aqueduct and to provide eliminating measures in a water conservancy project, numerical simulations on flows around circular cylinders and gate piers in various channels, including straight channels with different width values, transition channels with gradient contraction sections and curved channels were performed under the condition of high Reynolds number ($Re = 5 \times 10^6$) through COMSOL Multiphysics software. The influences of channel layout and blunt body shape on the surrounding flow field morphology and forces acting on the structures were analyzed. The results show that, in the range of the calculation parameters, as the width of the straight channel decreases, the lift and drag coefficients of the cylinder increase with the blockage ratio. The gradient section of transition channel has little effect on flow around a cylinder. For curved channels, a deflection coefficient is adopted to indicate the asymmetry flow distribution. In flow with a greater deflection coefficient, the structure may suffer lift and drag coefficients with greater asymmetry and larger average values. The results of flow around piers show that, the flow fields and force characteristics of piers without pier tail are similar with those of a cylinder. The increase of pier length can reduce the resistance coefficient. The lift and drag coefficients are greatly reduced by the streamlined body shape of piers with tails. Adding an appropriate pier tail is an effective measure to solve the vortex shedding for flow around a gate pier.

Key words: gate pier; high Reynolds number; channel layout; pier tail; numerical simulation

2018年某调水工程运行巡检中发现在某渡槽下游水面有异样起伏,随之产生的非定常力可能给工程运行带来安全隐患。经检测分析,初步推测这种水面起伏与闸墩绕流脱涡有关。为了进一步探明原因并为制定整改措施提供基础支撑,本文开展了针对闸墩绕流影响因素及其作用规律的研究工作。

水利和海洋工程中普遍存在钝体绕流现象。在

特定条件下,流体流过钝体时会在其表面发生边界层分离,产生周期性脱落的漩涡,导致钝体受到周期性的非定常力作用,甚至让水中结构产生流激、涡激振动,带来安全隐患。作为钝体绕流问题的典型研究模型,无穷宽流道中的理想圆柱绕流已被广泛研究。该问题的主要控制参数为雷诺数 Re 。目前科研界对不同雷诺数条件下圆柱绕流的流态和升阻力

基金项目:长江流域水库群科学调度关键技术研究项目(第三阶段 0704178);长江科学院开放研究基金(CKWV2018459/KY);武汉理工大学国家级大学生创新创业训练计划(S202110497145)

作者简介:王志飞(1999—),男,主要从事流体力学研究。E-mail:2030074772@qq.com

通信作者:王思莹(1983—),女,教授,博士,主要从事流体力学、工程水力学研究。E-mail:sywang@whut.edu.cn

系数变化规律已达成了一定的共识^[1-2]。

实际工程中的钝体绕流现象多为高雷诺数流动,涉及非线性湍流方程的求解,理论分析和数值模拟方法面临一定的挑战。工程结构的大尺度和流动的复杂性使得试验观测也具有一定难度,制约了高雷诺数条件下圆柱绕流研究的发展。随着计算机硬件和数值仿真技术的发展,直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)、大涡模拟(large eddy simulation, LES)、Reynolds 平均(Reynolds average Navier-Stokes, RANS)、格子玻尔兹曼(lattice Boltzmann method, LBM)等方法逐渐应用于圆柱绕流问题的研究中,研究成果加深了人们对圆柱绕流机理的认识,推动了类似问题的仿真计算研究。试验和仿真^[3-13]结果表明,临界区和超临界区的二维圆柱绕流边界层会产生分离泡现象,流动转捩后产生湍流分离,阻力系数随雷诺数增加显著增加;高超临界区的圆柱绕流边界分离过程差不多,但是无分离泡现象,阻力系数具有雷诺数无关性。但总体而言,对于高超临界雷诺数($Re>3.5\times10^5$)条件下的圆柱绕流研究工作少且不系统,不同的研究成果尚存在一些差异。

除了涉及高雷诺数流动条件,现实工程中的钝体绕流还大多发生在有限宽流道内,流道壁面的存在不仅会影响圆柱周围流场的发展,对剪切层失稳和尾迹动力学都有较大影响^[14-22]。除此之外,由于实际条件的限制或者工程布置的需要,现实中的桥墩、闸墩等涉水结构可能处于各种各样的流道中。弯曲流道、变截面流道的存在,使得结构面临的不再是均匀剪切流,绕流产生的流场和受力势必也有所不同。下游弯道对钝体尾涡的影响已有一些研究成果^[23-26],但对非顺直流道中钝体绕流相关的研究还很缺乏,流道布局对绕流流场和结构受力的影响规律还有待进一步研究。从工程应用需求出发,除了圆柱绕流,目前国内外对方柱、椭圆柱的绕流也有一定的研究^[27-36],如考察了方柱导角、椭圆柱展长比等参数对其绕流流场和受力特性的影响。但针对其他形状的钝体绕流研究相对较少,目前尚未形成一致的结论。

本文在 $Re=5\times10^6$ 的条件下,对布置在各种形式流道中的圆柱绕流和不同形态的闸墩绕流进行了数值仿真研究,分析了流道布局和闸墩形状尺寸等因素对绕流流场和结构受力特性的影响规律。

1 数值模型

1.1 计算模型

本文计算模型参照某水利工程的渡槽建立。该

水利工程主渠道宽 60 m,渡槽长 60 m,宽 30 m。上下游分别由长 40 m 和 60 m 的渐变段与主渠道相接。闸室采用双闸室设计,中间闸墩厚度为 5 m。参照工程布置方案和建筑物尺寸,本文选取圆柱直径 $D=5$ m,基础流道宽度 $W=6D$ 来建立模型开展分析。

文章主要对顺直流道、渐变段、弯曲流道中的圆柱绕流和不同体型的闸墩绕流进行了计算分析,各种流道布局的计算域和模型尺寸如图 1 所示。为了考察流道宽度对圆柱绕流的影响,定义圆柱直径 D 与流道宽度 W 的比值为占空比 β ,并分析 $\beta=0.17\sim0.50$ 时壁面对圆柱绕流的影响。渐变段影响下的圆柱绕流计算模型(图 1(b))是在图 1(a)模型的上游添加不同角度的斜直壁面形成。根据工程布置将渐变段的长度取为 $8D$ 。定义渐变段末端和始端截面宽度的比值为收缩比 $\Delta=W/W_1$,用以表征渐变段截面收缩的程度。为对比分析,计算中保证圆柱面临的来流雷诺数一致,即该模型的入口速度根据流量守恒定理 $U_1=UW/W_1$ 计算,其中 U 为来流速度。利用图 1(b)的模型分析了收缩比 $\Delta=0.4\sim1.0$ 的渐变段对圆柱绕流的影响。在图 1(a)模型前端加上转弯内径为 R 、转弯角度为 φ 的弯道即为图 1(c)所示的弯道影响下的圆柱绕流计算模型。采用此模型对 $R=(3\sim15)D$ 、 $\varphi=30^\circ\sim150^\circ$ 的弯道对下游流场和圆柱绕流的影响进行了对比分析。图 1(d)为闸墩绕流的计算模型,其中闸墩由墩头、墩身和墩尾三部分组成。墩头为直径为 D 的半圆形;墩身为宽度为 D 、长度为 L 的矩形;墩尾由 2 条半径为 R_1 的对称圆弧线组成,长度 $L_w=\sqrt{R_1D-D^2/4}$ 。为了考察闸墩形状和尺寸对其绕流流场和受力的影响,对墩身长度 $L=(1\sim5)D$ 的无墩尾闸墩和墩尾半径 $R_1=D$ 、 $1.71D$ 、 $2.25D$ 的带墩尾闸墩绕流都进行了分析。

1.2 计算方程和参数设置

本文采用 COMSOL Multiphysics 中的计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模块来模拟各种流场环境下的钝体绕流。该模块采用有限元法求解二维或三维流体力学问题。本文选用该模块的 $k-\omega$ 湍流模型进行计算分析。

本文求解的流体力学方程为不可压缩流体的连续性方程和 N-S 方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为流体的速度矢量; p 为流体压强; ρ 为流体密度; μ 为流体的动力黏度; t 为时间。

在特定的边界条件下求解式(1)(2),即可得到流体域的压力场和速度场,继而对圆柱和闸墩绕流

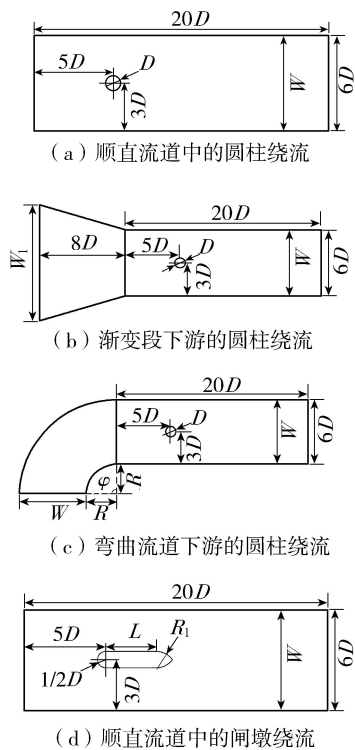


图1 计算模型

产生的流场和结构受力特性进行分析。高雷诺数条件下,钝体绕流流场主要分析脱涡频率,定义表征钝体脱涡频率的斯坦顿数 St 为

$$St = \frac{fD}{U} \quad (3)$$

式中: f 为脱涡频率; D 为钝体的特征尺寸,圆柱绕流中为圆柱直径,闸墩绕流中为闸墩的宽度。

流体中钝体结构受到的流体作用力为

$$\mathbf{F}_j = \int_{\tau} (-p\mathbf{I} + \mathbf{K}) \mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_j ds \quad (j = 1, 2) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{F}_1$ 、 $\mathbf{F}_2$ 分别为钝体受到的来流方向的合力(阻力)和垂直来流方向的合力(侧向力); $-p\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{K}$ 分别为流体应力中的压力项和黏性力项; τ 为钝体结构的外表面; $\mathbf{n}$ 为边界处的外法线单位向量; $\mathbf{e}_j$ 为坐标轴方向的单位向量。

以 ρ 、 U 、 D 为特征值,定义钝体的阻力系数 C_d 和升力系数 C_l 为

$$C_d = \frac{\mathbf{F}_1}{\frac{1}{2}\rho U^2 D} \quad (5)$$

$$C_l = \frac{\mathbf{F}_2}{\frac{1}{2}\rho U^2 D} \quad (6)$$

计算时将计算域左侧设定为速度入口边界,根据工程运行情况设置入口平均速度 $U=1$ m/s。计算域右侧设定为压力出口边界。圆柱、闸墩和流道壁面设置为无滑移壁面条件。流体介质定义为水,密度

$\rho=10^3$ kg/m³,动力黏性系数为 0.001 kg/(m·s)。该流动对应的雷诺数 $Re=5\times 10^6$,湍流参数的初始值设置为湍流强度为 0.05,湍流长度为 0.35 m,湍动能 8.12×10^{-4} m²/s²,比耗散速率为 0.15 s⁻¹。

1.3 模型验证

基于图 1(a)的圆柱绕流计算模型,采取图 2 所示的 4 种不同网格设置进行计算,分析网格无关性。4 种方案的流体计算域都使用结构化网格,设置 20 层边界层网格,单元增长率为 1.1。方案 M1 最大单元尺寸为 1 m,总计 237 个三角形网格,30 010 个四边形网格,共 30 247 个单元;方案 M2 的最大单元尺寸为 0.5 m,总计 432 个三角形网格,48 608 个四边形网格,共 49 040 个单元;方案 M3 最大单元为 0.4 m,总计 542 个三角形网格,64 146 个四边形网格,共 64 688 个单元;方案 M4 最大单元为 0.3 m,总计 630 个三角形网格,80 482 个四边形网格,共 81 112 个单元。

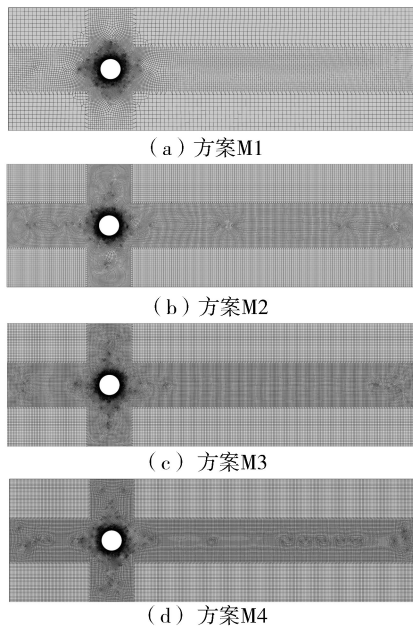


图2 计算网格

采用 4 种网格分别对同一算例进行仿真计算,得到圆柱的平均阻力系数分别为 0.68、0.67、0.65 和 0.66, St 均约等于 0.31。Ong 等^[36]的试验结果表明,与本算例条件相当的圆柱平均阻力系数范围是 0.36~0.75, St 范围是 0.18~0.50。本文用 4 种网格计算得到的结果均在此范围之内,验证了本文计算结果的可靠性。综合计算结果精度和计算资源消耗情况,选定方案 M3 作为本文数值计算的网格划分方案。

基于网格划分方案 M3,选取 0.02 s、0.05 s、0.1 s、0.2 s 这 4 种时间步长,对图 1(a)圆柱绕流算例进行了时间步长的影响分析。对比结果表明,4 种时间步长设置下计算得到的圆柱周围流场结构和圆柱受力

都基本一致。综合计算结果精度与计算资源耗费情况,选择 0.05 s 为时间步长开展后续的计算分析。

2 结果与分析

2.1 流道布局对圆柱绕流的影响

计算得到的流场分布显示,流道壁面靠圆柱越近,壁面对圆柱周围以及尾迹流态产生的影响也越大。从表 1 可以明确看到,随着流道宽度变窄,圆柱占空比增大,圆柱的平均阻力系数、最大升力系数以及 St 均有所增大,且增大的趋势越来越明显。这个计算结果的规律性与前人在不同雷诺数条件下得到的结论是一致的^[14-22]。

表 1 不同宽度流道中的圆柱绕流计算结果

β	$C_{d,ave}$	$C_{l,max}$	f/Hz	St
0.17	0.65	1.00	0.063	0.315
0.20	0.69	1.10	0.064	0.322
0.25	0.73	1.13	0.065	0.326
0.33	0.89	1.45	0.067	0.334
0.50	1.56	2.69	0.075	0.373

注:下标 ave 和 max 分别表示一个脱涡周期内的平均值和最大值。

由表 2 可知,在本文计算参数范围内,渐变收缩段下游流道中的圆柱脱涡频率略微降低,圆柱的最大升力系数、平均阻力系数受到的影响不明显。这与本文计算模型中圆柱所处位置与渐变段之间存在一定长度的顺直流道相关。渐变收缩段让流动产生往流道中间汇聚的分布趋势,但是经过顺直流道的平顺过渡之后,该集中效应减弱,因此圆柱面临的来流与顺直流道中差别不大。实际工程中,渐变段的布置位置一般也会与闸墩等结构隔开一定距离。但根据具体工程布置的需求,闸墩等涉水结构不一定处于流道正中间。因此今后可考虑针对圆柱所处横向位置的变化对其绕流情况的影响开展进一步研究。

表 2 不同渐变段下游的圆柱绕流计算结果

Δ	$C_{d,ave}$	$C_{l,max}$	f/Hz	St
1.00	0.65	1.00	0.063	0.315
1.47	0.63	1.01	0.060	0.302
1.97	0.64	0.95	0.059	0.297
2.54	0.65	0.99	0.059	0.295

从图 3 可见弯道使其下游顺直流道各截面的流速分布发生了变化,呈明显的非对称性。靠弯道外侧流速增加,靠弯道内侧流速减小。为了表征流道截面流速分布的非对称程度,定义流道横截面上下两部分平均流速的相对差值为偏流系数 α :

$$\alpha = (U_{上} - U_{下}) / U \tag{7}$$

式中: $U_{上}$ 为横截面靠外侧一半流道的平均速度; $U_{下}$ 为横截面靠内侧一半流道的平均速度。

图 4 给出了不同弯道下游流道中偏流系数。由

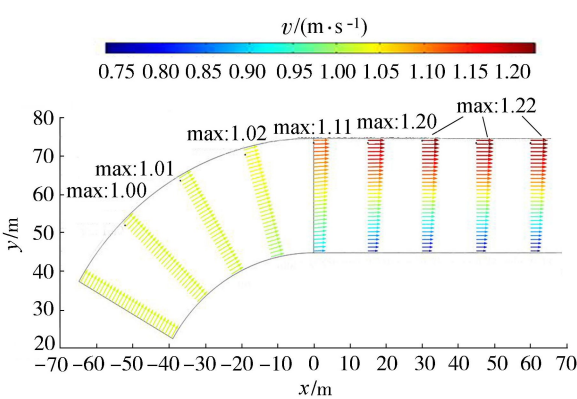


图 3 典型弯道中的流速分布 ($R=9D, \varphi=60^\circ$)

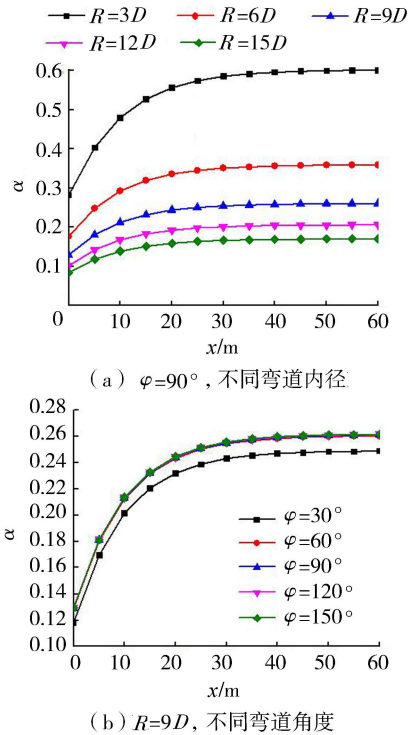


图 4 弯道影响下的偏流系数

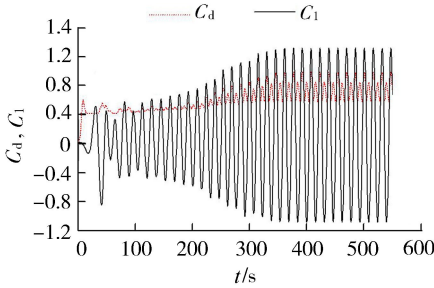
图 4 可知,在各种弯道作用下,从弯道末端截面开始,下游流道横截面的偏流系数逐渐增加并趋于稳定。对于固定位置截面,上游弯道内径 R 越小,偏流系数越大,即转弯半径小的弯道会导致下游流道流速分布呈更强的非对称性。由图 4(b)可知,对于固定截面,只有弯道转弯角度为 30° 时,偏流系数偏小,当角度达到 60° 以上时,转弯角度的增大对下游顺直流道的偏流系数没有明显影响。

在弯道导致的非对称流场影响下,流道中圆柱脱涡也呈现出非对称的形态。这种非对称特性在图 5 所示的升阻力时程曲线中表现得更为直观。与顺直流道中圆柱绕流的升阻力曲线一样,弯道影响下的圆柱升阻力曲线仍然呈周期性变化。但由于弯道的偏流效应,阻力系数的峰值在 2 个不同的数值之间交替变化,同时升力系数的均值也不再为零。不同弯道布置下,圆柱绕流的受力特征参数如表 3 所示。

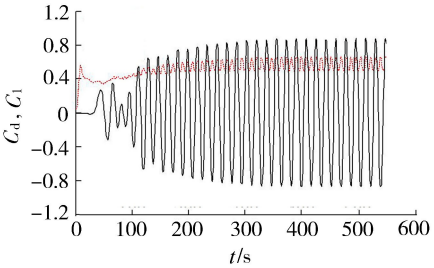
表 3 弯道对圆柱绕流的影响

φ	R	α_{15}	$C_{d,ave}$	C_{d,max_1}	C_{d,max_2}	$C_{l,ave}$	$C_{l,max}$	$C_{l,min}$	f/Hz	St
90°	6D	0.340	0.70	0.87	0.75	0.129	1.19	-0.99	0.063	0.315
90°	9D	0.248	0.69	0.85	0.77	0.111	1.15	-0.97	0.064	0.319
90°	12D	0.195	0.70	0.84	0.77	0.064	1.14	-1.02	0.062	0.311
30°	6D	0.235	0.65	0.78	0.71	0.064	1.06	-0.92	0.064	0.321
60°	6D	0.246	0.67	0.82	0.73	0.088	1.11	-0.95	0.064	0.318
180°	∞	0	0.65	0.89	0.89	0	1.00	-1.00	0.063	0.315

注： C_{d,max_1} 和 C_{d,max_2} 为阻力系数曲线的2个特征峰值， $C_{l,max}$ 和 $C_{l,min}$ 分别为升力系数曲线的波峰和波谷值， α_{15} 为距离弯道末端15 m处流道横截面的偏流系数，最后一行数据对应顺直流道中的情况。



(a) 弯道影响下



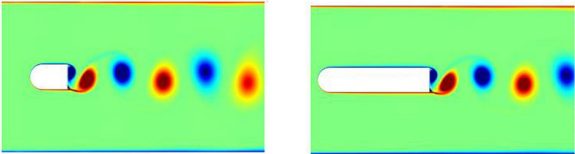
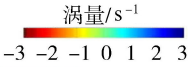
(b) 顺直流道中

图 5 弯道影响下圆柱的升阻力系数

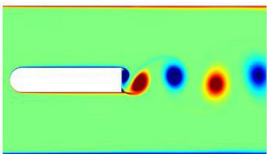
可以看出,弯道的存在对圆柱的脱涡频率和阻力系数平均值影响不是很大。但随着弯道产生的偏流效应增加,圆柱的升阻力系数峰值差异和升力系数平均值都有所增加。

2.2 形状尺寸对闸墩绕流的影响

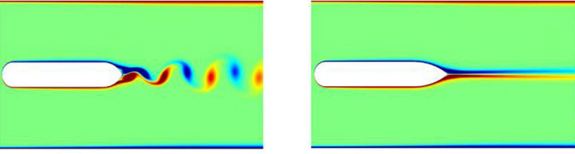
无墩尾的闸墩绕流产生的涡量场和受力情况与圆柱绕流类似。如图 6(a)和图 6(b)所示,闸墩后端交替脱落方向相反的旋涡,在下游形成周期性的



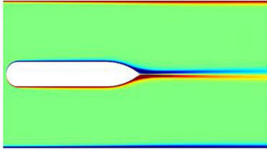
(a) $L=D$



(b) $L=4D$



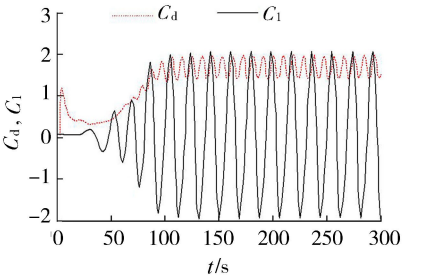
(c) $L=4D, R_1=D$



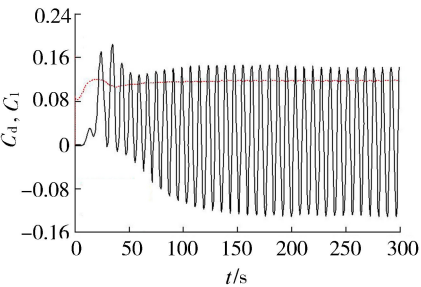
(d) $L=4D, R_1=2.25D$

图 6 不同闸墩绕流的涡量场

卡门涡街结构。如图 7(a)所示,闸墩受到的升力和阻力呈周期性变化,阻力系数变化的周期是升力系数的 2 倍。



(a) 无墩尾 ($L=4D$)



(b) 带墩尾 ($L=4D, R_1=1.71D$)

图 7 典型闸墩的升阻力系数

带墩尾的闸墩整体呈流线型,其绕流产生的旋涡强度和尺寸均明显小于无墩尾闸墩和圆柱绕流所产生的旋涡强度和尺寸。对于墩尾 $R_1=2.25D$ 的闸墩(图 6(d)),其绕流产生的边界层甚至不再分离,墩后不再脱涡。阻力系数趋近于一个常数,升力系数变化的幅值也明显变小(图 7(b))。

由表 4 可知,随着墩身长度变长,无墩尾闸墩的平均阻力系数减小,最大升力系数增大,脱涡频率和 St 几乎不变。与无墩尾闸墩相比,带墩尾闸墩的平均阻力系数和最大升力系数都明显减小,脱涡频率和 St 明显变大。与无墩尾闸墩绕流相同,带墩尾闸墩的升力系数幅值与墩体长度仍然呈线性正相关关系。但不同的是,带墩尾闸墩的平均阻力系数并没有随着墩体长度的增加而减小,反而是呈逐渐增大的趋势,且与墩体长度基本线性相关。这是由于带墩尾闸墩呈流线型,其阻力以摩擦阻力为主,而无墩尾闸墩受到的阻力却是边界层分离引起的压差阻力

起主导作用。而摩擦阻力的大小与绕流物体的长度成正比,压差阻力随物体长度增加而产生的变化不明显。

表 4 各种闸墩绕流的计算结果

L	R_1	L_w	$C_{d,ave}$	$C_{l,max}$	f/Hz	St
0.5D			1.94	0.98	0.053	0.267
D			1.79	1.13	0.053	0.266
2D			1.71	1.42	0.053	0.265
3D			1.69	1.74	0.053	0.266
4D			1.69	2.06	0.053	0.267
4D	D	D	0.18	0.37	0.091	0.453
4D	1.71D	1.21D	0.12	0.15	0.124	0.620
4D	2.25D	1.41D	0.09	0.0083		
D	1.71D	1.21D	0.09	0.067	0.131	0.655
2D	1.71D	1.21D	0.10	0.93	0.130	0.652
3D	1.71D	1.21D	0.11	0.12	0.126	0.628

3 结 论

随着流道宽度变窄,圆柱在流道中的占空比增加,圆柱的平均阻力系数、最大升力系数及脱涡的 St 数都逐渐增大。本文参数范围内的渐变段流道的截面收缩对圆柱绕流的脱涡频率、升阻力均不会产生明显影响。流道的弯曲布局会让流道中的流速分布呈非对称性,偏流系数随截面与弯道距离的增加而增加至稳定值。固定位置截面的偏流程度与上游弯道的转弯半径关系密切,转弯半径越小,偏流系数越大。截面流速分布的偏流系数随转弯角度增加也有所增加,但超过 60° 以后,角度增加对流动偏流程度的影响不大。弯道导致的偏流效应使得圆柱脱涡和受到的升阻力都不再对称。偏流系数增加,圆柱的升阻力系数峰值差异、升力系数平均值都有所增加。无墩尾闸墩绕流的流场和受力均与圆柱绕流类似,平均阻力系数随墩体长度增加略有降低。带墩尾的闸墩呈流线型,相比于无墩尾闸墩,其升阻力系数都明显减小。因此闸墩设计安装合适的墩尾是改变绕流流态、消除旋涡的有效措施。

参考文献:

[1] SINGH S P, MITTAL S. Flow past a cylinder: shear layer instability and drag crisis [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2010, 47(1) : 75-98.

[2] JIANG H, CHENG L. Strouhal-Reynolds number relationship for flow past a circular cylinder [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 832(10) : 170-188.

[3] BREUER M. A challenging test case for large eddy simulation: high Reynolds number circular cylinder flow [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2000, 21: 648-654.

[4] KRAVCHENKO A G, MOIN P. Numerical studies of flow

over a circular cylinder at $Re = 3\,900$ [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(2) : 403-417.

[5] CATALANO P, MENG W, IACCARINO G, et al. Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds numbers [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24: 463-469.

[6] DONG S, KARNIADAKIS G E, EKMEKCI A, et al. A combined direct numerical simulation-particle image velocimetry study of the turbulent near wake [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 569: 185-207.

[7] PERRIN R, MOCKETT C, BRAZA M, et al. Joint numerical and experimental investigation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds number [J]. Particle Image Velocimetry, 2008, 112: 223-244.

[8] SQUIRE S K D, KRISHNAN V, FORSYTHE J R. Prediction of the flow over a circular cylinder at high Reynolds number using detached-eddy simulation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96: 1528-1536.

[9] 杜磊, 宁方飞. 高亚临界雷诺数圆柱绕流的尺度自适应模拟 [J]. 力学学报, 2014, 46(4) : 487-496. (DU Lei, NING Fangfei. Scale adaptive simulation of flows around a circular cylinder at high sub-critical Reynolds number [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014 46(4) : 487-496. (in Chinese))

[10] 胡彬, 水庆象, 王大国, 等. 特征线算子分裂有限元的圆柱绕流大涡模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2) : 27-32. (HU Bin, SHUI Qingxiang, WANG Daguo, et al. Large eddy simulation of flow around circular cylinder combined with characteristic-based operator-splitting finite element method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(2) : 27-32. (in Chinese))

[11] 程宵翔, 赵林, 葛耀君. 高超临界雷诺数区间内二维圆柱绕流的实测研究 [J]. 物理学报, 2016, 65(21) : 214701. (CHENG Xiaoxiang, ZHAO Lin, GE Yaojun. Field measurements on flow past a circular cylinder in transcritical Reynolds number regime [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(21) : 214701. (in Chinese))

[12] 雷娟棉, 谭朝明. 基于 Transition SST 模型的高雷诺数圆柱绕流数值研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(2) : 207-217. (LEI Juanmian, TAN Chaoming. Numerical simulation for flow around circular cylinder at high Reynolds number based on Transition SST model [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(2) : 207-217. (in Chinese))

[13] 陆程. 基于格子玻尔兹曼法的圆柱尾涡流控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.

[14] BLACKBURN H M. Effect of blockage on spanwise correlation in a circular wake [J]. Experiments in Fluids, 1994, 18(1/2) : 134-136.

- [15] SAHIN M, OWENS R G. A numerical investigation of wall effects up to high blockage ratios on two-dimensional flow past a confined circular cylinder[J]. *Physics of Fluids*, 2004, 16(5): 1305-1320.
- [16] SARKAR S, SARKAR S. Vortex dynamics of a cylinder wake in proximity to a wall[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2010, 26(1): 19-40.
- [17] GRIFFITH M D, LEONTINI J, THOMPSON M C, et al. Vortex shedding and three-dimensional behavior of flow past a cylinder confined in a channel[J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2011, 27(5/6): 855-860.
- [18] RAO A, THOMPSON M C, LEWEKE T, et al. The flow past a circular cylinder translating at different heights above a wall[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2013, 41(1): 9-21.
- [19] 蒋赞, 孙志强, 周子民. 占空比对平行壁面间圆柱绕流尾迹演化的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(11): 4355-4362. (JIANG Yun, SUN Zhiqiang, ZHOU Jiemin. Effect of blockage ratio on circular cylinder wake evolution between parallel walls [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(11): 4355-4362. (in Chinese))
- [20] 王晨旭. 近壁面圆柱绕流的漩涡脱落及水动力特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [21] 花阳. 近壁面圆柱绕流和涡激振动的三维数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [22] 孙壮, 张大鹏, 刘璐, 等. 海底管道悬跨段的近壁圆柱绕流分析[J]. *船舶工程*, 2018, 40(6): 106-111. (SUN Zhuang, ZHANG Dapeng, LIU Lu, et al. Analysis of flow around a near wall cylinder of submarine pipeline suspended span[J]. *Ship Engineering*, 2018, 40(6): 106-111. (in Chinese))
- [23] RAMJEE V, NEELAKANDAN D. Development of wake of a rectangular cylinder in a curved stream[J]. *Experiments in Fluids*, 1989, 7(6): 395-399.
- [24] TULAPURKARA E G, RAMJEE V, GEORGE J. Development of a bluff body wake under the combined influence of curvature and pressure gradient [J]. *Experiments in Fluids*, 1995, 18(5): 311-318.
- [25] STARKE A R, HENKES R A W M, TUMMERS M J. Effects of curvature and pressure gradient on a turbulent near wake[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1999, 19(1): 49-56.
- [26] 王丽燕, 周天, 孙志强, 等. 流道弯曲对圆柱绕流尾迹流场的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(9): 2520-2528. (WANG Liyan, ZHOU Tian, SUN Zhiqiang, et al. Effect of pipe bends on evolution of circular cylinder wake [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(9): 2520-2528. (in Chinese))
- [27] TAMURA T, MIYAGI T, KITAGISHI T. Numerical prediction of unsteady pressures on a square cylinder with various corner shapes [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74/75/76: 531-542.
- [28] HU J C, ZHOU Y, DALTON C. Effects of the corner radius on the near wake of a square prism [J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 40: 106-118.
- [29] KUMAR R A, SOHN C H, LAKSHMANA G B H. Influence of corner radius on the near wake structure of a transversely oscillating square cylinder [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009, 23: 2390-2416.
- [30] CARASSALE L, FREDA A, MARRE-BRUNENGHI M. Experimental investigation on the aerodynamic behavior of square cylinders with rounded corners [J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2014, 44: 195-204.
- [31] 周强, 廖海黎, 曹曙阳. 高雷诺数下方柱绕流特性的数值模拟[J]. *西南交通大学学报*, 2018, 53(3): 533-539. (ZHOU Qiang, LIAO Haili, CAO Shuyang. Numerical study of flow characteristics around square cylinder at high Reynolds number [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2018, 53(3): 533-539. (in Chinese))
- [32] 吴晓笛, 刘华坪, 陈浮. 基于浸入边界-格子 Boltzmann 通量求解法的椭圆柱流动特性分析[J]. *计算力学学报*, 2018, 35(3): 283-290. (WU Xiaodi, LIU Huaping, CHEN Fu. Numerical simulations of flow over isolated and two tandem elliptical cylinders by immersed boundary-lattice Boltzmann flux solver [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, 35(3): 283-290. (in Chinese))
- [33] 于定勇, 赵建豪, 黄东燕, 等. 不同倒角半径柱体绕流数值模拟及水动力特性分析[J]. *海洋工程*, 2018, 36(5): 1-11. (YU Dingyong, ZHAO Jianhao, HUANG Dongyan, et al. Numerical simulation of flow past a cylinder with different rounded radius and analysis of hydrodynamic characteristics [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 36(5): 1-11. (in Chinese))
- [34] 张雪娇, 刘官厅. 椭圆柱绕流的相关问题研究[J]. *内蒙古师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 50(1): 15-24. (ZHANG Xuejiao, LIU Guanting. Study on the related problems of the flow around elliptic cylinder [J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 50(1): 15-24. (in Chinese))
- [35] 刘二朋, 陈威, 林永水, 等. 不同雷诺数下二维椭圆柱绕流的数值模拟研究[J]. *应用力学学报*, 2021, 38(5): 2025-2031. (LIU Erpeng, CHEN Wei, LIN Yongshui, et al. Numerical simulation of flow around a two-dimensional elliptical cylinder with different Reynolds numbers [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(5): 2025-2031. (in Chinese))
- [36] ONG M C, UTNES T, HOLMEDAL L E, et al. Numerical simulation of flow around a smooth circular cylinder at very high Reynolds numbers [J]. *Marine Structures*, 2009, 22(2): 142-153.

(收稿日期: 2021-10-19 编辑: 刘晓艳)