

弯曲航道串列桥墩紊流宽度研究及应用

谭志荣^{1,2)} 陈彬¹⁾ 李青云³⁾ 陈维¹⁾ 林黎明⁴⁾

(武汉理工大学航运学院¹⁾ 武汉 430063) (内河航运技术湖北省重点实验室²⁾ 武汉 430063)
(交通运输部长江航务管理局³⁾ 武汉 430010) (中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室⁴⁾ 北京 100190)

摘要:为解决弯曲航道桥梁通航宽度计算中桥墩紊流宽度计算精度不足的问题,依据实际弯曲航道串列桥墩及其水流条件,进行模型简化,采用 DES 中的 SST $k-\omega$ 模型,利用 Fluent 软件对弯曲航道桥区流场进行二维模拟.通过对比弯曲航道不同弯曲半径、桥墩直径,以及来流速度的流场研究桥墩紊流宽度的变化规律.仿真结果表明:弯曲航道凸岸侧桥墩紊流宽度大于凹岸侧桥墩紊流宽度,紊流宽度随着弯曲半径的增大而减小,随着桥墩直径及来流速度的增大而增大.进而拟合得出紊流宽度的计算公式.并通过工程实例验证了改进后的紊流宽度经验公式的准确性.

关键词:弯曲航道;桥墩;紊流宽度;数值模拟

中图分类号:U611

doi:10.3963/j.issn.2095-3844.2022.01.033

0 引言

桥墩缩窄了航道宽度且产生阻水作用,改变了桥墩附近的水位、流速、水流挟沙力等^[1].弯曲航道水流除纵向运动外,还会产生表流指向凹岸侧、底流指向凸岸侧的横向环流^[2-4],严重影响船舶的航行安全.

在墩柱绕流紊动特性研究方面,Zdravkovich^[5]对双圆柱体周围流场的研究表明:在 $(1.0 < T/D < 1.1)$ 时(T 为两柱中心距, D 为柱径),两柱后面只有单一的涡街形成.在 T/D 大于 4.0 时绕两柱的流场完全相同,这时两柱可分别当作两根无相互干扰的孤立柱.Lin 等^[6]通过直接模拟的方式研究圆柱绕流,发现在雷诺数大于 200 时,墩后尾涡脱落逐渐由层流向湍流变化.在桥墩紊流范围研究方面,Zhuang 等^[7]采用白色膨胀性珍珠岩粉和紫红色高锰酸钾粉进行示踪分析,以墩两侧的涡旋体系所在区域来界定紊流宽度,结合不同来流流速、水深、墩型和墩宽下的试验数据,得到了紊流宽度公式.艾万政等^[8]运用 RNG $k-\omega$ 模型对顺直航道圆形桥墩进行二维数值模拟,拟合

得到了顺直航道圆形桥墩紊流范围计算公式.杨燕华等^[9]针对弯曲航道,采用理论、试验和数值模拟三种方法,分析了航道弯曲半径、宽度、流速和水深对弯曲航道水流特性的影响.上述关于紊流宽度研究大多针对于顺直航道的单个桥墩,弯曲航道研究较少,且拟合的紊流宽度公式较少对弯曲航道桥区凸岸侧与凹岸侧紊流宽度加以区分.

弯曲航道桥区水域作为船撞桥事故多发水域,由其带来的安全问题备受关注.如,桥墩周围流态复杂、船舶过桥操纵难度大和航行风险增加等.虽然文献^[10]中规定建桥选址应该远离控制航道、弯道、分流口、汇流口,然而受限于当地经济、政策等限制,桥梁的选址规划不能完全按照有关标准,并且已建桥梁中存在个别桥梁通航净宽不足的问题,需要开展桥区水域水上交通安全隐患排查治理工作.

文中针对弯曲航道,参照桥区水流条件,采用 SST $k-\omega$ 模型,借助流体计算软件 Fluent 进行二维数值模拟,通过比较不同工况下桥墩周围流向速度等值线图、速度流线图以及桥墩周围涡量场来分析得出桥墩紊流范围与墩柱直径、弯曲半径

收稿日期:2021-11-10

第一作者:谭志荣(1978—),男,博士,副教授,主要研究领域为载运工具运用工程与交通系统安全性评价
基金项目:国家自然科学基金(51809207)

和来流速度的关系,拟合得出串列桥墩紊流宽度的计算公式,并以忠州长江大桥为例进行实证分析.

1 弯曲航道水流模拟

1.1 研究对象

建立图 1 的经典圆柱(其直径为 D)绕流计算模型,其中均匀自由来流(其速度为 U_∞)由左至右绕过柱体;并且建立图 1 的直角坐标系(x, y),其中 x 轴沿着流动方向, y 轴则是与来流方向垂直,同时坐标原点放置于柱体对称中心.

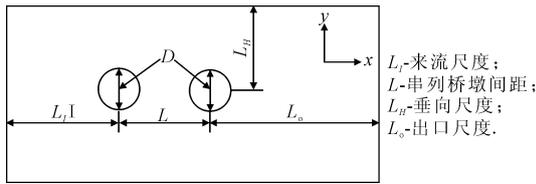


图 1 圆柱绕流及其计算区域示意图

1.2 控制方程

流体的运动都符合质量、动量及能量守恒三大定律.在当前研究条件下,河水密度 ρ 保持不变,且重力仅作用于深度方向,假设温度保持常数;在桥区流场研究中,流场水平尺度一般远大于垂向尺度,研究圆柱形桥墩紊流范围问题可用二维数值模拟方法来研究^[11-13];因此在当前二维流动条件下,建立如下的二维不可压缩连续性方程与 $N-S$ 方程.

质量守恒方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

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

式中: ∇ 为梯度算子; \mathbf{u} 为速度矢量,其包括两个速度分量 u 和 v ; p 为压力; μ 为流体动力黏度系数.

除了上述流速和压力之外,桥墩尾迹区中还特别关注的一个典型物理量是涡量,定义为速度矢量的旋度,即 $\Omega = \nabla \times \mathbf{u}$;特别地,在当前研究问题中,只有深度方向的涡量存在,即 $\Omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$.

1.3 湍流模型

采用 DES(离散涡模拟)湍流模型中的剪切应力运输(shear-stress transport, SST) $k-\omega$ 模型,其中: k 为湍动能(turbulence kinetic energy), ω 为比耗散率(specific dissipation rate);该

模型与标准的 $k-\omega$ 模型相比较,考虑了剪切应力的波动传播,更加准确可靠.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4)$$

式中: G_ω 为 ω 的产生项; G_k 为由于平均速度梯度导致的湍动能产生项; Γ_k, Γ_ω 为 k 与 ω 的有效扩散项; D_ω 为正交发散项; S_k 与 S_ω 为自定义参数.

有效扩散项方程:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (5)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (6)$$

式中: σ_k 与 σ_ω 为 k 与 ω 的湍流普朗特数; μ_t 为湍流粘度系数.

1.4 无关性检验

数值模拟的结果与湍流模型的选取、计算域的尺度,以及网格密度有关,然而目前针对流体的数值模拟研究中,没有一个固定的划分依据,因此需要开展无关性检验来验证数值模拟结果的准确性.为了验证模型计算结果与所选取计算域的尺度,以及网格的划分密度无关,以无界流动区域内单圆柱形桥墩绕流为例,选取若干尺度考察计算域及网格密度对数值模拟结果的影响,结果见图 2 和表 1.

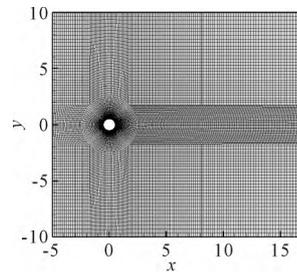


图 2 圆柱绕流计算域及网格密度示意图

表 1 不同计算域尺度计算结果对比

算例	S_r	\bar{C}_D	C'_L	
L_I	5	0.321	0.627	0.443
	10	0.331	0.614	0.432
L_{II}	5	0.345	0.373	0.458
	15	0.352	0.438	0.474
L_o	20	0.309	0.708	0.521
	40	0.299	0.565	0.478

注: S_r -斯特劳哈尔数; \bar{C}_D -平均阻力系数; C'_L -升力系数.

由表 1 可知,在本文所选取的的计算域尺度

和网格密度对数值模拟的计算结果影响较小,可以用于弯曲航道桥区的流场分析.

2 模拟结果对比与分析

为研究弯曲航道桥区流场分布状态,考虑到实际当中弯曲航道水域范围,同时由于 $L/D=2$ 时相对紊流宽度最大^[14],因此本文计算域边界为航道宽度 400 m,桥墩放置在航道中心线处,通航孔间距设置为 240 m. 以航道宽度 400 m、弯曲半径 R 为 800 m、串联双墩的单个桥墩直径 D 为 10 m、桥墩间距为 $L=2D$ 、流速 V 为 1 m/s 的工况为基础算例,以此来研究在不同弯曲半径、不同流速、不同桥墩半径条件下,桥墩布设对流场的影响. 设计 R 为 850,900,950 和 1 000 m; V 为 1.5, 2,2.5 和 3 m/s、 D 为 5,15 m 作为对比工况. 工况设置见表 2,计算域及边界条件示意图见图 3,基础算例流向速度等值线图见图 4.

表 2 模拟工况设置表

R/m	D/m	网格数
800	10	268 324
	5	255 321
850	10	246 621
	5	285 236
900	10	278 536
	5	226 753
950	10	294 588
	5	
1 000	10	
	5	

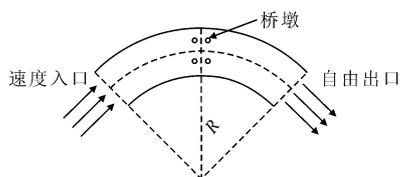


图 3 计算区域及边界条件

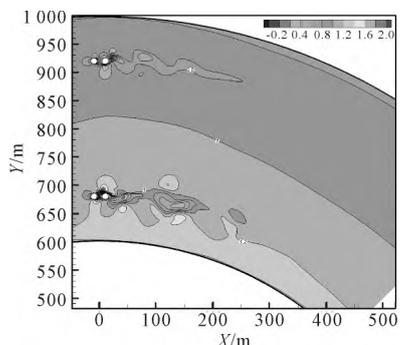


图 4 基础算例速度等值线图

2.1 航道弯曲半径的影响

以 R 为单一变量, D 为 10 m, V 为 1 m/s,对 R 分别为 850,900,950 和 1 000 m 进行数值模

拟,见图 5.

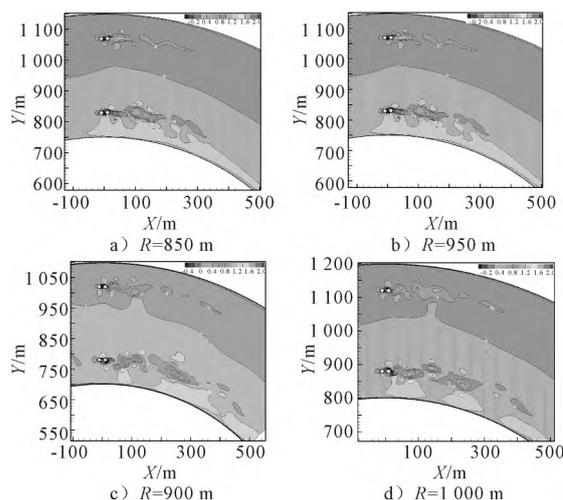


图 5 不同弯曲半径速度等值线图

由图 5 可知:随着航道弯曲半径增大,即曲率减小,中高速流动区域逐渐向凸岸扩展,这是由于水平面内的离心力逐渐削弱,导致具有向凹岸一侧流动趋势的流速逐渐减缓,从而增大了凸岸一侧的流速;即使如此,凹岸一侧桥墩的平均来流速度仍然总体高于凸岸一侧桥墩的平均来流速度;正是上述流速分布特征,导致高速凹岸一侧桥墩尾迹中流速脉动范围显著收窄;而低速凸岸一侧桥墩尾迹中流速脉动范围则相对扩大,且随着航道弯曲半径增大,而逐渐收窄.

2.2 航道墩型尺寸的影响

以 D 为单一变量, V 为 1 m/s, R 为 800 m,对 D 分别为 5,15 m 时进行数值模拟,见图 6.

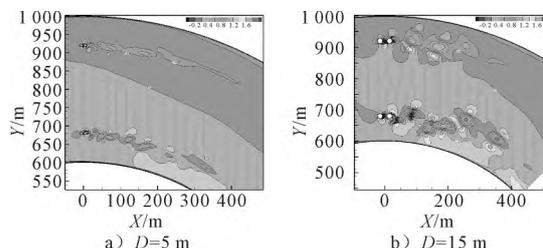


图 6 不同桥墩直径速度等值线图

由图 6 可知:高速流动区域与低速流动区域分布没有明显改变,但随着桥墩直径增大,桥墩的阻水宽度增大,从而同时增大了两侧桥墩的流速脉动范围;随着桥墩直径增大,两侧桥墩中间不受脉动的范围减小,对于水面航行船舶而言,适航水域范围减小;同样的凸岸一侧桥墩尾迹中的漩涡脱落及其波动显著较凹岸一侧桥墩尾迹中的强烈,并且向下游延伸的范围变大,表明随着桥墩直径的增大向下游影响范围也将更广,对船舶正常航行产生的影响也就越久.

2.3 流速的影响

设置 V 为单一变量, D 为 10 m, R 为 800 m, 对 V 分别为 1.5, 2, 2.5 和 3 m/s 进行数值模拟, 见图 7。

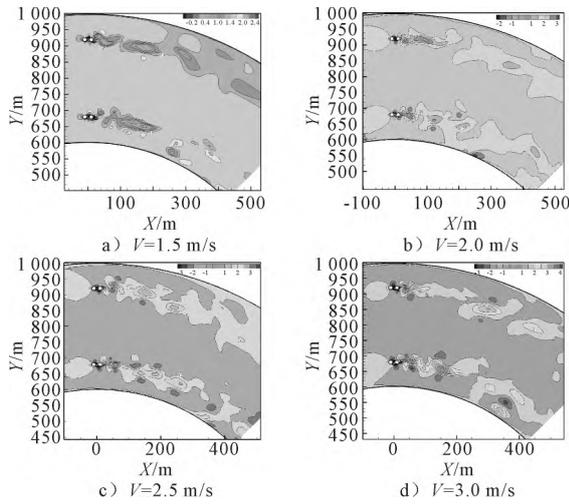


图 7 不同来流速度等值线图

由图 7 可知, 随着来流速度增大, 整体流动区域趋向于高速流动, 增大了两侧桥墩的流速脉动范围; 双桥墩中不受脉动影响的范围增加, 但不如增加桥墩直径增加明显; 增加来流速度, 延伸下游区域明显增加, 桥墩下游较远处流态依然比较复杂。

3 紊流宽度经验公式及应用

3.1 紊流宽度经验公式

桥墩紊流是一种非常复杂的水流运动形式, 桥墩两侧的流线较其他地方密集, 流速更大, 在桥墩尾部出现紊流^[15], 桥墩紊流区存在“墩吸流”, 船舶在桥区航行时容易受到紊流区水流的影响, 容易发生船桥碰撞事故。表 3 为不同工况紊流宽度汇总表。

表 3 不同工况紊流宽度汇总表

R/m	D/m	$V/(m \cdot s^{-1})$	凹岸桥墩紊流宽度/m	凸岸桥墩紊流宽度/m	备注
800	10	1	18	29	基础算例
850	10	1	17	28	不同 R
900	10	1	16	23	
950	10	1	16	22	
1 000	10	1	15	19	
800	5	1	9	14	不同 D
800	15	1	28	46	
800	10	1.5	23	40	不同 V
800	10	2	26	42	
800	10	2.5	28	49	
800	10	3	30	51	

通过拟合表 3 中的数据, 得到弯曲航道圆形桥墩凸岸侧与凹岸侧最大紊流宽度表达式:

$$\frac{B_{q_1}}{1.22D} = 0.863 \ln V - 0.002R + 3.112 \quad (7)$$

$$B_{q_2} = \frac{1.400}{R} B_{q_1} \quad (8)$$

式中: B_{q_1} , B_{q_2} 分别为凹岸侧和凸岸侧桥墩紊流宽度。

3.2 工程实例验证

忠州长江大桥位于长江上游忠县水道的弯曲航道(长江上游航道里程约为 428.8 km), 跨径组合为 205 m+460 m+205 m, 桥面宽 26.5 m。该航道位于三峡库区回水变动区, 航路航法为上、下行船舶各自靠右航行, 大桥上游右岸存在浅滩, 汛期时流态复杂。

主航道布置在 10# 及 11# 桥墩之间, 主桥墩宽度约为 12 m, 流速选为 3.5 m/s, 弯曲半径约为 1 000 m, 墩柱附近水深取 25 m。利用本研究弯曲航道紊流宽度式(7)~式(8), 计算得出凹岸与凸岸侧紊流宽度分别为 32, 45 m, 大于文献[16]中的计算结果 29.8 m, 这是因为弯曲航道的紊流宽度相较于顺直航道紊流宽度有所增加。

4 结 论

1) 文中采用 SST $k-\omega$ 模型, 借助流体计算软件 Fluent 进行二维模拟, 对比分析航道弯曲半径、来流速度以及桥墩直径对桥墩紊流宽度的影响, 进而总结出圆柱形桥墩紊流宽度计算公式。

2) 弯曲航道凸岸侧桥墩紊流宽度大于凹岸侧桥墩紊流宽度, 同时凸岸一侧流场相较于凹岸一侧长度更长, 随着航道弯曲半径的增加, 桥墩紊流宽度有所减小; 相同条件下, 随着来流速度以及桥墩直径的增大, 紊流宽度有所增加。

3) 依据数值模拟结果分别拟合得出串联圆形桥墩凸岸侧与凹岸侧的紊流宽度计算公式, 选取长江上游典型弯曲河段的工程实例验证了改进后的紊流宽度的准确性, 可为后续弯曲航道桥梁通航宽度确定提供理论支持。

4) 实际上桥墩紊流应该是复杂的三维流场, 但是受限于流场的复杂性和研究时间等因素的限制, 仅选择圆形串联桥墩进行二维紊流计算研究。后续研究中为更全面地研究桥区三维紊流特性, 可进行三维流场模拟仿真以及选择更多的墩形(如方形、水滴形等)做更进一步的研究。

参考文献

- [1] 张丹,黄立文,陈立家,等.桥区航道整治工程对大型船队过桥影响的数值分析[J].水运工程,2012(3):115-118,153.
- [2] 谭志荣.长江干线船撞桥事件机理及风险评估方法集成研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
- [3] 吴昌胜,甘浪雄,孙敬东,范健宇,周春辉,张磊.数据驱动下桥群水域船舶路径规划[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(6):1085-1090.
- [4] 甘浪雄,彭家敏,谭志荣.弯曲航道的设计[J].上海海事大学学报,2007(1):111-114.
- [5] ZDRAVKOVICH M M. Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements[J]. Journal of Fluids Engineering, 1977, 99(4):618-633.
- [6] LIN L M, TAN Z R. DNS in evolution of vorticity and sign relationship in wake transition of a circular cylinder; (pure) mode A[J]. Acta Mechanica Sinica, 2019(2):456-463.
- [7] ZHUANG Y, LIU Z Y. Experimental study on the width of the turbulent area around bridge pier[J]. Journal of Marine Science & Application, 2007(3):678-682.
- [8] 艾万政,刘虎,丁天明.圆形桥墩紊流范围数值研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2013,37(5):1003-1006.
- [9] 杨燕华,白玉川.连续弯道水流运动的三维数值模拟[J].泥沙研究,2011(6):46-49.
- [10] 中华人民共和国交通部.内河通航标准:GB50139—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [11] 范平易.桥区流场数值模拟及建桥对通航的影响研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [12] 周春辉,黄弘逊,易晚霞,等.桥区河段原油船队航行仿真方法研究[J].系统仿真学报,2021(1):1-8.
- [13] HONG Y M, KAN Y C, ZENG J R, et al. Multiphysics coupling model for computing pier scour upon simulation and experiment[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 32(1):67-72.
- [14] 叶玉康.串列桥墩与船舶间水动力相互作用研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.
- [15] 林姗,陈明栋,陈明.桥墩紊流宽度研究综述[J].水利水运工程学报,2011(2):105-110.
- [16] 长江航道勘察设计院有限公司.长江干线通航标准:JTS+180-4—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.

Study and Application of Turbulent Width of Crossbridge Piers in Curving Channel

TAN Zhirong^{1,2)} CHEN Bin¹⁾ LI Qingyun³⁾ CHEN Wei¹⁾ LIN Liming⁴⁾

(School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)¹⁾

(Hubei Inland Shipping Technology Key Laboratory, Wuhan 430063, China)²⁾

(Changjiang River Administration of Navigational Affairs, Wuhan 430010, China)³⁾

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)⁴⁾

Abstract: In order to solve the problem that the calculation accuracy of turbulent width of piers is insufficient in the calculation of navigation width of bridges in curved channel, the model was simplified according to the actual tandem piers in curved channel and their flow conditions. The SST $k-\omega$ model in DES was used to simulate the flow field in curved channel bridge area in two dimensions by using Fluent software. By comparing the flow fields of different bending radius, pier diameter and incoming flow velocity of curved channel, the variation law of turbulent width of pier was studied. The simulation results show that the turbulent width of piers on the convex bank side of curved channel is larger than that on the concave bank side, and the turbulent width decreases with the increase of bending radius, but increases with the increase of pier diameter and incoming velocity. Then, the formula of turbulent width is obtained by fitting. Finally, the accuracy of the improved empirical formula of turbulent width is verified by an engineering example.

Key words: curved reach; bridge pier; turbulence width; numerical simulation