



山区涉河桥墩布设防撞装置对通航的影响*

余葵^{1,2}, 吴威力^{1,2}, 刘宪庆^{1,2}, 孟繁超^{1,2}, 张鑫^{1,2}, 刘涛^{1,2}, 毛德涵^{1,2}

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 重庆市桥梁通航安全与防撞工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 为研究山区河流桥梁布设防撞装置对于通航的影响, 采用二维物理模型试验的方法, 利用运动船舶受力偏离航线的原理, 通过对船舶艏向角 θ 、漂角 β 等船舶航行参数的分析, 研究桥梁与水流存在交角的情况下布设防撞装置对船舶航行的影响; 通过设置多条航线, 探究船舶航行时与桥墩的安全距离。试验结果表明: 山区河流涉河桥墩布设防撞装置对于船舶航行的影响远大于裸墩, 且尖艏型防撞装置对航行船舶的影响大于圆艏型; 山区河流涉河桥墩或防撞装置与水流的交角越大, 船舶的偏转幅度越大, 其中 $0^\circ \sim 10^\circ$ 变化趋势较为明显。通过多组航线航行试验发现, 航线越靠近桥墩, 船舶受到的影响越大, 当航线与桥墩的距离达到 $3W$ 时, 这一影响达到峰值。所得结果可以为山区河流桥梁通航安全的研究及防撞装置的研发提供参考。

关键词: 山区河流; 防撞装置; 模型试验; 艏向角; 漂角

中图分类号: U 61; TV 131. 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0119-08

Influence of anti-collision devices for skew bridge piers on navigation

YU Kui^{1,2}, WU Wei-li^{1,2}, LIU Xian-qing^{1,2}, MENG Fan-chao^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}, LIU Tao^{1,2}, MAO De-han^{1,2}

(1. National Inland Waterway Improvement Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Bridge Navigation Safety and Collision Engineering Technology Research Center,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to study the influence of anti-collision devices on the navigation of bridges in mountainous rivers, a two-dimensional physical model test was carried out to investigate the influence of anti-collision devices on the navigation of ships in the presence of intersection angles between bridges and water currents by analyzing ship navigation parameters such as the bow angle θ and drift angle β using the principle of deviation from the course of a moving ship. By setting up multiple routes, we explore the safe distance between a ship and a bridge pier when sailing. The experimental results show that the impact of anti-collision devices on navigation of river piers in mountainous areas is much greater than that of bare piers, and the impact of anti-collision devices on navigation of ships with pointed bow is greater than that with rounded bow. The larger the angle of intersection between the bridge pier or anti-collision device and current, the larger the deflection range of ship, especially when the angle is $0^\circ \sim 10^\circ$, the influence is the largest. Several sets of route navigation tests show that the closer the route is to the bridge pier, the greater the impact on the ship, with this impact peaking when the distance between the route and the pier reaches $3W$. The results may serve as reference for the study of safe navigation of mountain river bridges and the research and development of anti-collision devices.

Keywords: mountainous river; anti-collision device; model test; heading angle; drift angle

收稿日期: 2021-09-16

*基金项目: 重庆英才计划·创新创业示范项目(CQYC20193204)

作者简介: 余葵(1965—), 男, 研究员, 研究方向为水工结构防撞。

跨河桥梁宜布置在顺直稳定、河面宽阔的河段上^[1]。然而,对于丘陵地区或山区河流,受河势、地形等因素的制约,桥梁有时只能布置在微弯甚至弯曲河段上,如澧水石龟山大桥^[2]、重庆乌江三桥^[3]等。此时,由于桥墩与水流存在交角,在一定程度上扩大了建筑物的阻水面积,增加了桥墩壅水,给航行的船舶带来安全隐患。研究认为桥墩涉水会改变墩周的流场,导致侧面流速加快,产生横流并增加紊流宽度,一些通航河段的桥梁轴线法线方向与水流方向夹角较大,产生的横流影响了通航宽度^[4];同时,山区河流水流湍急,河道窄深,通航环境复杂,这些因素增加了船桥碰撞的几率^[5]。

目前,针对桥区河段船舶航行的安全问题,常用的研究手段包括物理模型试验及有限元数值模拟 2 种。有限元数值模拟主要采用 RANS^[6]、LES^[7]等方法围绕柱体绕流问题开展。牛国杰等^[8-10]分别对桥墩周围流场影响航行船舶的受力特性展开研究,结果表明船墩间距是影响船舶艏摇力矩变化的主要因素:船舶越靠近桥墩,艏摇力矩的变化越大。对于物理模型试验,何小花等^[11]用 Micro ADV 流速仪测量墩周的三维瞬时流速,得到紊流强度的辐射范围;刘晓平等^[12]以船墩间距为控制条件,研究多种航线航行时船舶受到水流的影响情况,结果表明船墩间距不同,船舶受水流的影响也不同;庄元等^[13]通过水槽定床及动床试验对墩周流场的三维特点进行分析,指出随着桥墩与水流交角的增大,紊流宽度也在增大;曹民雄等^[14]通过自航船模航行试验研究横流对船舶航行的影响,结果表明横流对船舶航行的影响程度主要与紊流宽度成正比;许保华^[15]通过研究不同结构形式桥墩、不同水流方向对通航条件的影响,指出相比于锐形截面,圆形截面的绕流性能更好,其对于墩周流场的影响小于锐形截面。

综上所述,目前针对桥区通航安全的问题主要集中在墩周流场对通航安全的影响问题,少有涉及桥墩布设防撞装置后对通航安全的影响。本文通过物理模型试验的方法,从桥墩设防方式、

桥墩与水流交角等因素出发,研究船舶航迹线的变化规律;通过分析船舶艏向角、漂角等船舶航行参数的变化,研究山区桥梁布设防撞装置对于船舶航行的影响,成果可为山区河流桥梁通航安全的研究及防撞装置的研发提供参考。

1 物理模型试验

1.1 试验概况

船舶航行过程中,如果受到不同于航线方向的侧向水流的影响,船舶则会被推离航线,影响船舶航行安全(图 1)。山区河流具有河道窄深、水流湍急、河道弯曲等典型特征,桥区水流条件更加复杂,某些桥梁的轴线与水流流向存在交角,进一步扩大了横流的范围,这些横流时刻威胁着桥区船舶的航行安全,严重时将导致船桥碰撞事故。对桥梁设置防撞装置可使桥墩免受撞击,但防撞装置的加入增加了桥墩的截面积,阻水作用进一步增强,对船舶航行安全极为不利。本试验结合实际工程,利用运动船舶受力偏离航线的原理,通过对船舶艏向角 θ 、漂角 β 等船舶航行参数的分析,研究桥梁与水流存在交角时布设防撞装置对船舶航行的影响;通过设置多条航线,探究影响船舶航行的范围。

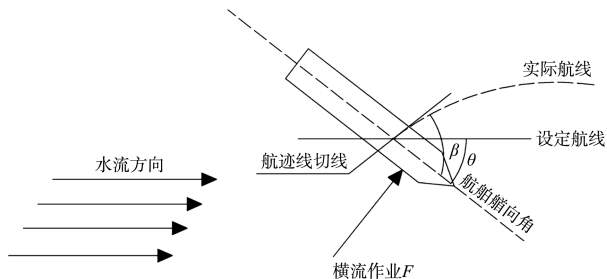


图 1 船舶受力偏离航线

1.2 试验设计

试验以嘉陵江某桥梁为依托,采用 1:100 概化模型试验方案研究防撞装置形式及桥墩-水流交角这 2 个因素对船舶航行的影响;通过设置多条航线试验,分析影响船舶航行的范围。该试验为顺水航行试验且预先设定好航线,通过顶置全景摄像获得船舶实时航迹影像,运用背景差分法获得船舶航行坐标,描点成线。试验共分为裸墩、布

设圆艏型防撞装置、布设尖艏型防撞装置 3 组。采取改变桥墩与水流流向角的方式, 模拟山区河道水流条件, 每一组角度分别取 0°、10°、20°、30°, 工况组合如表 1 所示。安装防撞装置后, 对通航的影响实际主要是对水流的影响, 紊流宽度是影响船舶航行的主要因素, 故试验开始前应首先对紊流宽度进行研究。通过观测示踪粒子分布的试验, 对各工况下的紊流宽度进行分析(图 2), 通过图像识别等手段得到各工况下的紊流宽度(桥墩两侧+桥墩宽度), 见表 2。分析数据可知, 桥墩设防前后, 桥墩对桥区紊流宽度变化较大。尖艏型防撞装置对桥区水流紊流宽度的影响与圆艏型防撞装置相当, 略小于后者。随着斜交角的增大, 紊流宽度随之增大, 其中 0°~10°过程变化趋势较为明显。交角超过 10°后, 桥墩两侧的紊流情况随之增大, 增大趋势有所减缓。

表 1 不同交角下的工况组合

工况	防撞装置	工况组合			
		$\alpha=0^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=30^\circ$
1	裸墩	S11	S12	S13	S14
2	圆艏型	S21	S22	S23	S24
3	尖艏型	S31	S32	S33	S34

注: α 为斜交角。

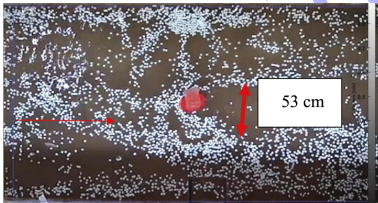


图 2 紊流宽度(水流自左向右)

表 2 各工况下紊流宽度

类别	紊流宽度/m			
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=30^\circ$
裸墩	0.24	0.39	0.44	0.52
圆艏型	0.35	0.56	0.62	0.70
尖艏型	0.32	0.54	0.64	0.72

本试验拟设置 5 条航线。根据紊流宽度试验分析, 测得的紊流宽度最小值 0.24 m, 最大值 0.72 m, 为覆盖真正影响船舶航行的区域, 可取防撞装置宽度方向的几何尺度为单位(取 0.18 m)

进行试验分析, 用 W 表示。

根据对嘉陵江某大桥桥区水文条件的分析, 结合实验室流量及尾门条件, 选取桥区常年水流条件作为试验参数, 按照几何比尺 1:100 进行换算, 试验条件与实际桥墩周围情况对应, 各物理量比尺及模型水流条件见表 3~4。

表 3 各物理量比尺

比尺名称	比尺	备注
几何比尺 λ	1:100	λ
流速比尺 λ_v	1:10	$\lambda_v = \lambda^{1/2}$
面积比尺 λ_A	1:10 000	$\lambda_A = \lambda^2$
流量比尺 λ_Q	100 000	$\lambda_Q = \lambda^{2.5}$

表 4 模型水流条件

试验水深/cm	试验流量/($L \cdot s^{-1}$)	试验流速/($cm \cdot s^{-1}$)	备注
26	120	23	常年

1.3 模型设计

根据近期嘉陵江航行船舶调查和有关规划, 工程河段通航船舶主要以 500~3 000 吨级驳船为主, 以 1 000 吨级船舶数量最多, 故选取 1 000 吨级驳船为研究对象, 其尺寸为 67.5 m×10.8 m×2.0 m(长×宽×吃水), 试验船舶为动船模型, 动力由电机马达(可正反转)、滑轮等对船模航行速度、方向进行调控。船首、船尾分别用细线连接, 保证船舶始发时船舶无偏角。在试验区段, 以桥墩位置为中心, 距离上下游 2.5 m 处布置滑轮轨道。电机转速可调节, 满足顺水船模试验时船速为 50 cm/s 的要求。模型选用双薄壁桥墩, 两薄壁尺寸为长 65.0 cm, 宽 14.5 cm, 高 3.0 cm, 根据原工程布置形式, 桥墩布置于试验段前 200 cm、后 300 cm 处。防撞装置选用内河通航桥梁防护中最常见的圆艏与尖艏 2 种形式。为比较 2 种防撞装置的水力特性以及对船舶航行的影响, 模型选择尺寸接近的 2 种形式(图 3)。试验水槽为矩形恒定流水槽, 长 31.0 m、宽 2.0 m、高 0.9 m, 水槽底部为缓坡, 比降为 1%, 试验水槽及试验段布置见图 4。本试验采用 HD-4B 型非恒定流旋桨流速仪测量流速。流速仪布置在试验段上游, 每间隔 30 cm 布置 1 台, 对各区域初始水流进行测定。

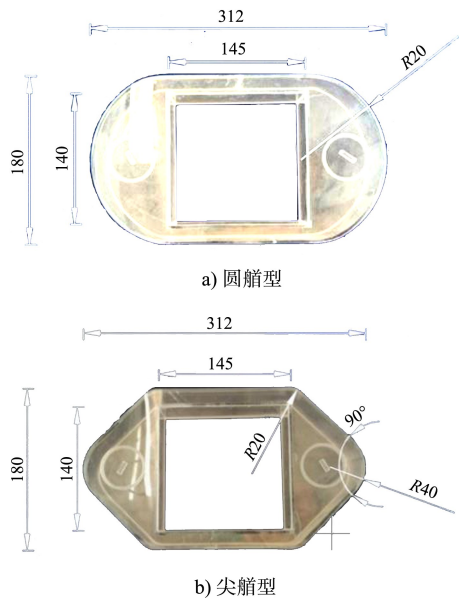


图 3 防撞装置模型及尺寸 (单位: mm)

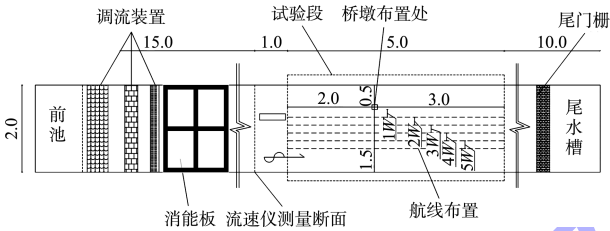


图 4 试验水槽及试验段布置 (单位: m)

1.4 数据处理

试验开始前,对模型船舶首尾作反光片示踪处理,实物见图 5。试验中,通过顶置高清摄像机对全试验段船舶航行状态进行摄录,运用背景差分法读取摄录的视频像素点,从而得到各时段船

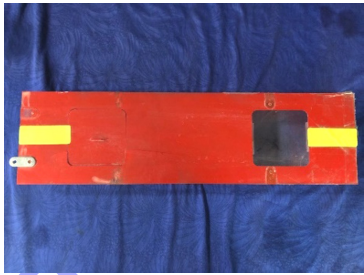


图 5 试验船舶模型

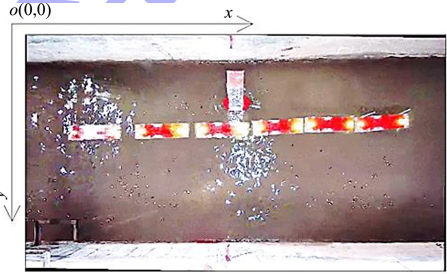
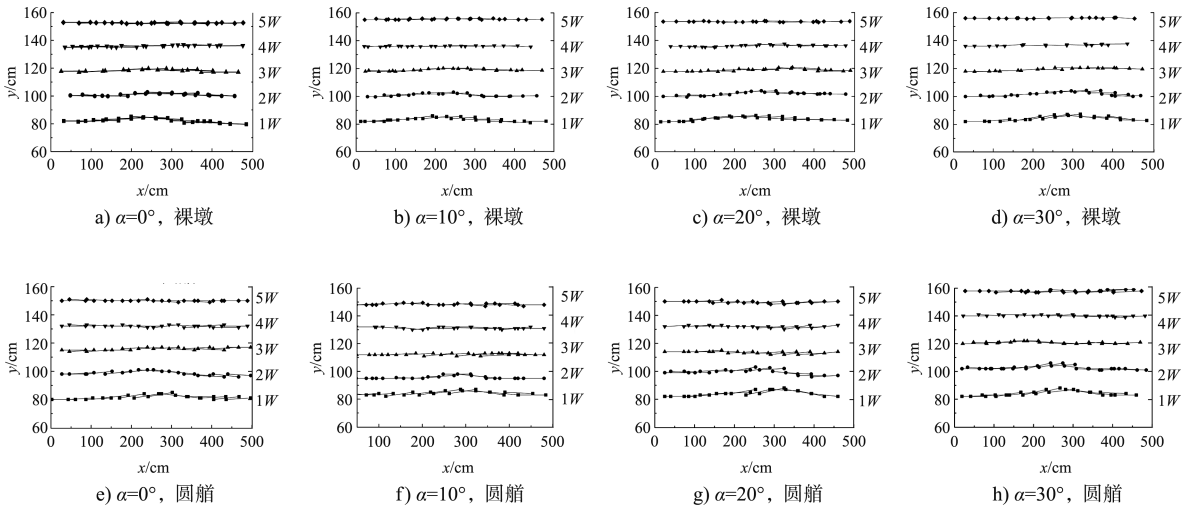


图 6 背景差分法

2 试验结果分析

试验结果见图 7。其中,坐标原点 O 为试验段起始位置,横坐标 x 表示试验段 $0 \sim 500$ cm 距离,上游 200 cm 处放置桥墩,纵坐标表示各条航线。



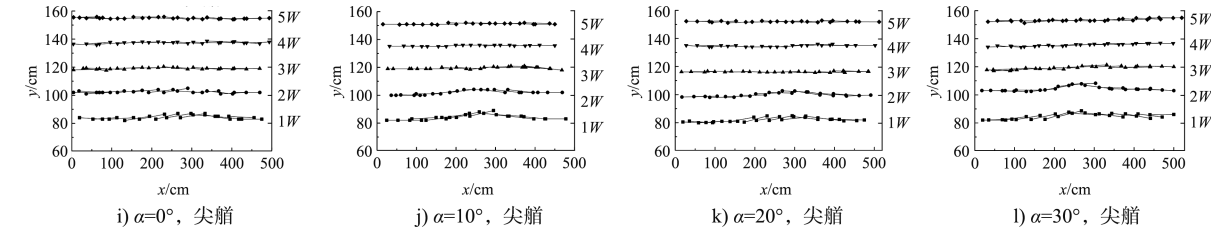


图 7 裸墩、圆艏、尖艏船舶航迹线

2.1 桥墩设防方式对船舶航行的影响

图 8 是桥墩交角为 0°、船墩间距 1W 时 3 种防撞装置的艏向角变化历程。从图 8 可以看出，桥墩布设防撞装置对船舶航行轨迹的影响与未布设防撞装置裸墩时(简称裸墩)有显著的差异。在裸墩时，船舶艏向角变化最大不超过 1°；布设防撞装置后，艏向角最大值超过 3°，接近桥墩设防前的 3 倍。

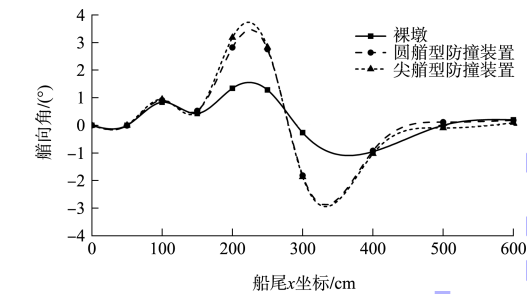


图 8 设防前后船舶艏向角变化历程

对比分析 2 种布设防撞装置时的船舶艏向角，发现 2 种防撞装置对于船舶艏向角的影响相差不大，最大值在 2.8°~3.0°之间，航行过程中船舶航迹线及艏向角的变化规律始终保持一致，无法准确地比较出哪一种形式的防撞装置对于航行船舶的影响最大。

为进一步探究何种形式的防撞装置对于船舶航行的影响最大，对设防前后的船舶漂角进行分析，如图 9 所示。由图 9 可以看出，3 种情况下的漂角变化规律基本保持一致，船舶在接近桥墩时(桥墩位于试验段前 200 cm 处)，漂角开始向负值变化，最终在桥墩附近达到最大值，设防与未设防的最大值分别为 -1.5°和 -3.0°，两者基本呈 2 倍关系。随后船舶漂角开始向正值变化，最终在 400 cm 处恢复平衡，这是因为船舶是由马达牵引

的。尖艏型防撞装置在 500 cm 处才恢复到 0°附近，可以认为尖艏型防撞装置对于船舶通航的影响比圆艏型防撞装置大。

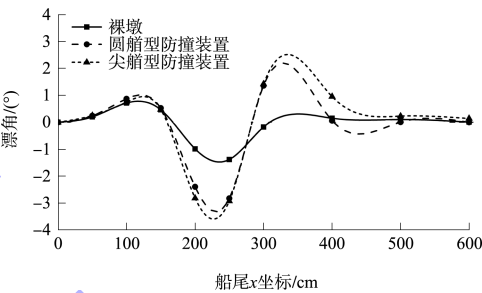


图 9 设防前后船舶漂角变化

结合以上分析及数值模拟可知，桥墩布设防撞装置后墩周的流场形态会产生变化。图 10 为桥墩设防与裸墩时墩周流场的数值模拟(横向流速)。裸墩时产生的横向流速最大为 0.70 m/s，而布设 2 种防撞装置时产生的横向流速最大处分别可达 1.86 m/s 及 1.75 m/s，这些横流推动驶过桥墩的船舶发生偏转。经研究，当船舶驶过桥墩时船首会受到远离桥墩的力的作用而被推离桥墩，而防撞装置的加入增大了这一作用。由图 10 可知，以 3W 处为界限，裸墩时 3W 处横流速度仅为 0.17 m/s，而布设圆艏型及尖艏型防撞装置时分别为 0.47 m/s 和 0.43 m/s，前后两者呈 2.5 倍关系。产生差异的原因在于防撞装置扩大了桥墩的几何尺度，使得迎水面壅水效应更加显著。同时，侧向及下游水位降低，出现明显的水位落差，改变了桥墩附近的水流流动模式；桥墩中部位置的流速加快，呈现更大范围的紊流，导致船舶横漂，船舶的艏向角及漂角增大；桥墩后部的水流相较于布设防撞装置前水流结构的变化更加剧烈，涡流形态更

加复杂。所以，布设防撞装置会扩大桥墩周围的横流区，增加影响船舶航行安全的风险；对比流速等值线图区域面积可发现尖艏型装置产生的紊

流区大于圆艏型防撞装置，综合物理模型试验的结果可以理解为尖艏型装置对于船舶运动形态的影响大于圆艏型装置。

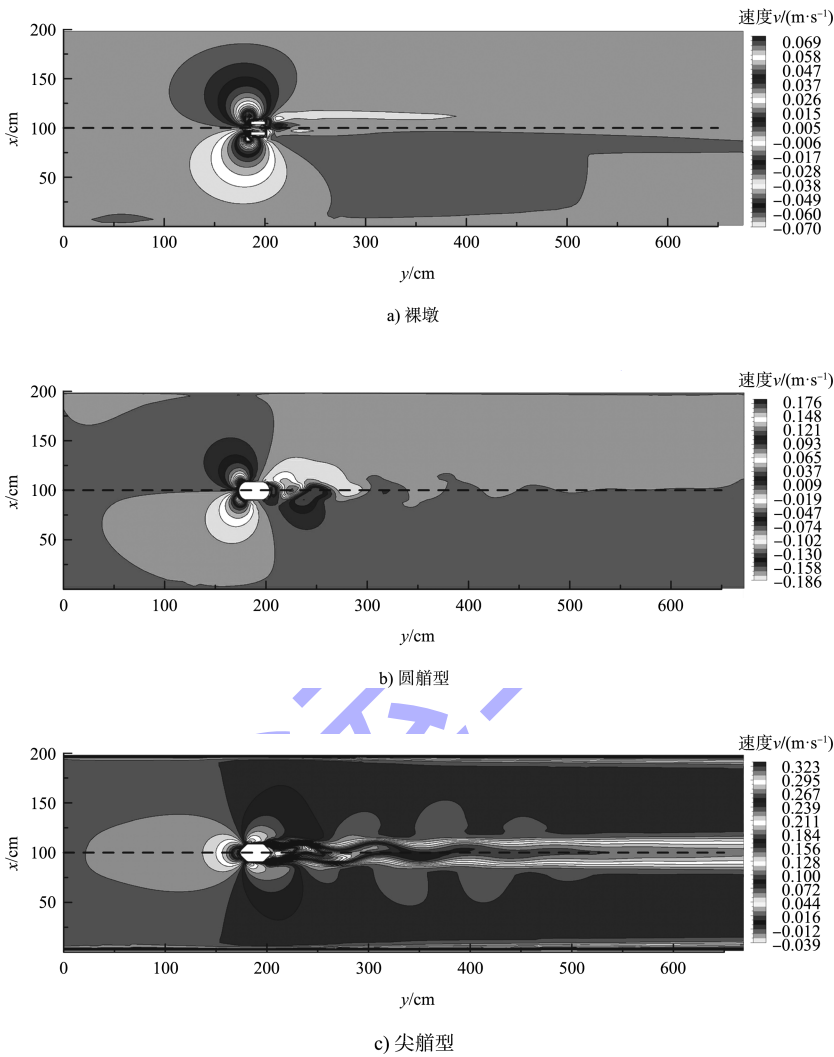


图 10 不同防撞装置下流速等值线

2.2 桥墩与水流交角对船舶航行的影响

分析桥墩与水流交角对船舶航行的影响，前文已得出布设尖艏型防撞装置对船舶航行的影响最大，故以桥墩设防尖艏型防撞装置为例进行墩-水交角不同时船舶漂角、艏向角的分析。图 11 为桥墩不同斜交角对船舶艏向角的影响历程，图 12 为漂角影响历程图。可以看出，斜交角越大，船舶的艏向角越大，其中斜交角在 0°~10°变化时，船舶艏向角变化较为显著。当斜交角从 10°向 30°变化时，变化相对较小。不

同斜交角下，各工况的图像走势相同，变化规律一致，漂角随斜交角的增大略有变化。将表 2 中的紊流宽度数据制成图 13，根据图像的斜率可以分析出墩-水交角在 0°~10°之间时紊流宽度变化较为激烈，这是由于交角的变化扩大了阻水面积，导致紊流宽度激增，与艏向角变化保持一致；当交角大于 10°时，紊流宽度的变化率下降。综合艏向角规律分析可知，在交角为 10°以内时对于船舶航行的影响较大，交角大于 10°时对于航行的影响不大。

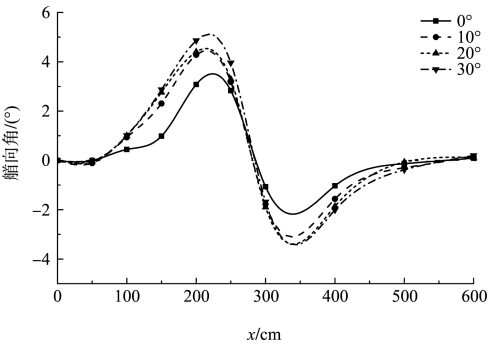


图 11 斜交角对船舶艏向角

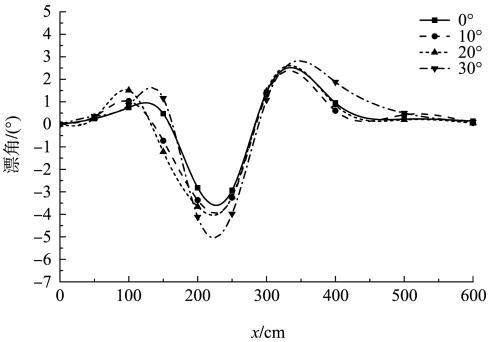


图 12 斜交角对船舶漂角的影响

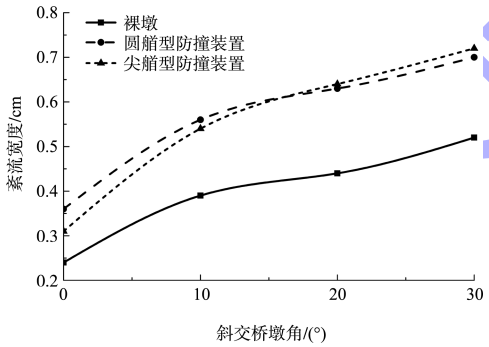


图 13 斜交角-紊流宽度变化关系

2.3 船墩间距对于船舶航行的影响

研究每一个工况下的 5 条航迹线，发现船墩间距由 1W 向 5W 变化时，航迹线变化幅度逐渐减小，这一规律可解读为船舶航线越靠近桥墩，航迹线变化幅度越大；反之，航线离桥墩越远，航行船舶受到的影响越小，航迹线越平稳。经比较发现，当船墩间距超过 3W 时，航迹线趋于水平，船墩间距为 4W 及 5W 时船舶偏转角度趋于 0°，航迹线呈水平线形变化。以桥墩与水流夹角为 30°（最不利工况）时为例，分别对设防前后的船舶航

迹线变化较明显的 1W~3W 的船舶艏向角历程变化进行分析比较，如图 14 所示。

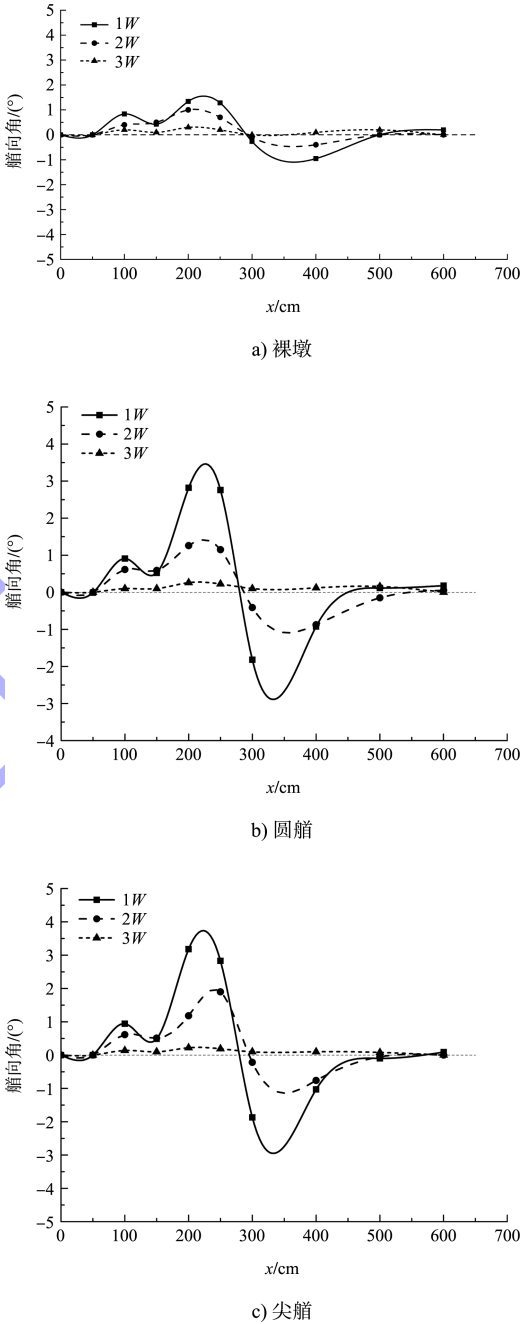


图 14 桥墩设防前后船舶艏向角变化历程

由图 14 可以看出，船模出发时未出现艏向角，当航行到桥墩附近时开始偏转，随后由于马达的牵引，船舶慢慢回正，在船舶驶过桥墩的过程中共经历 3 个阶段，分别为靠近桥墩、经过桥墩及驶离桥墩，设防与不设防时船舶艏向角的变化分别出现在对应的阶段，变化规律基本相同。比较艏向角的大小可知，桥墩设防后艏向角峰值

增大 3 倍, 设防后对通航的影响较大。第一阶段为船舶向桥墩靠近(坐标轴 100~180 cm 处), 过程中由于船速大于水流速度而不断地挤压水流, 将水流推向墩周的同时, 反作用力将船舶向外推, 这时出现了第 1 次较为明显的偏转。从图 14 可知, 无论是否布设防撞装置, 船舶的偏转角都在 0.8° 附近, 进一步说明防撞装置的加入并没有增加桥墩前部的紊流宽度; 第 2 阶段为船舶经过桥墩, 此时船舶位于紊流区(180~220 cm 处), 船舶受到横流的影响再度被推向远墩侧, 受马达牵引船舶回正; 第 3 阶段为驶离桥墩(220~300 cm 处), 在经历上一阶段船舶回正的同时, 船首到达墩尾, 根据数值模拟及耿艳芬的研究, 墩后存在负压涡流区域, 这将导致船舶出现扫尾的现象。当船墩间距增大时, 布设防撞装置前后的偏转规律不变, 且偏转角度在船墩间距为 $3W$ 时基本保持一致, 说明无论是否设置这 2 种防撞装置, 船舶在经过桥墩时间距保持在 $3W$ 以上时受到横流的影响均较小。

3 结论

1) 桥墩设防前后, 船舶的航行轨迹线在船墩间距 $1W \sim 3W$ 之间所受影响较为显著, 对船墩间距 $4W \sim 5W$ 的航行轨迹影响不明显, 可将其规律概括为船舶离桥墩越远, 船舶航行轨迹变化幅度越小, 航行越平稳; 船舶越靠近桥墩, 船舶的航行轨迹线变化幅度越大, 航行受到的影响也越大。

2) 桥墩设防后与设防前相比较, 布设防撞装置对船舶航行轨迹线的影响较大。对比尖艏型与圆艏型防撞装置对船舶航行轨迹线的影响, 发现两者对航行轨迹线的影响相差不大; 对比艏向角漂角及轨迹线切线角度, 发现尖艏型防撞装置相对于圆艏型对船舶航行轨迹线的影响更大。

3) 桥墩设防前后, 当船墩间距一定时, 船舶航行受斜交角的影响: 斜交角越大, 对船舶航行

的影响越大, 其中 $0^\circ \sim 10^\circ$ 变化较为明显。

参考文献:

- [1] 叶玉康, 刘晓平, 张宇, 等. 弯曲河段船闸口门区通航水流条件探讨[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 72-75, 87.
- [2] 许足怀, 赵志舟, 陈健强, 等. 弯曲河道桥区河段航道整治研究[J]. 水运工程, 2004(9): 53-55.
- [3] 冯朝勇. 重庆武隆乌江三桥主桥设计[J]. 公路交通技术, 2003(4): 47-49.
- [4] 魏彭林. 山区河流桥墩紊流宽度确定及横流取值研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [5] 张星星, 陈明栋, 陈明. 山区通航桥梁船撞概率合理性研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(13): 284-288.
- [6] 詹昊, 李万平, 方秦汉, 等. 不同雷诺数下圆柱绕流仿真计算[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(12): 129-132.
- [7] LIEN R C, SANFORD T B. Vorticity and turbulence in the wake of a bridge pier[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2009, 34(3): 307-314.
- [8] 牛国杰, 刘晓平, 叶玉康, 等. 串列桥墩绕流对行进船舶受力的影响研究[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(3): 46-52.
- [9] 耿艳芬, 郭华强, 柯兴, 等. 桥墩绕流特性对船舶运动受力的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 153-160.
- [10] BHATTACHARYYA S, MAITI D K. Shear flow past a square cylinder near a wall[J]. International journal of engineering science, 2004, 42(19-20): 2119-2134.
- [11] 何小花, 陈立, 王鑫, 等. 桥墩紊流宽度的试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2006(3): 49-53.
- [12] 刘晓平, 李明, 方松森, 等. 桥区河段横流对船舶航行的影响[J]. 水利水运工程学报, 2012(2): 21-26.
- [13] 庄元, 刘祖源. 桥墩紊流宽度的试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007(10): 846-849.
- [14] 曹民雄, 马爱兴, 王秀红, 等. 内河航道横流对船舶航行的影响[J]. 交通运输工程学报, 2008(1): 61-67.
- [15] 许保华. 桥墩周围通航宽度影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.