



受限水域船体区水流紊动特性 PIV 试验研究*

梁伟坤¹, 钟 亮^{1,2}, 汪贤瑶², 范欣然², 余江秀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, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 船舶在受限水域中航行时, 由于水深较浅、水面较窄, 水流结构十分复杂。基于粒子图像测速系统(PIV)水槽试验, 研究受限水域船体周围的紊动特性, 探讨纵向紊动强度 T_{ux} 、雷诺应力 τ 、紊动能 k 的分布特征以及随断面系数的变化规律。结果表明: 船首中剖面的纵向紊动强度 T_{ux} 和紊动能 k 均受船体边壁影响, 最大值集中在水槽底部及船底附近, 雷诺应力 τ 最大值出现在水槽近底处, 在船首水面及船底附近为负值; 船前区 T_{ux} 和 k 从水槽底部向水面递减, τ 沿垂向先增大后减小; 船尾回流区形成长椭圆形 T_{ux} 和 k 高值区及 τ 的负值区并向下游扩散。随断面系数增大, T_{ux} 、 τ 和 k 的高值范围及 τ 的负值范围均减小, k 的拐点位置上移; 增大断面系数可显著减弱船体对水流的挤压效应, 减小水流受船体形状的影响, 湍流动量传递与交换作用减弱, 局部高强度紊动降低, 增加流场稳定性。

关键词: 受限水域; 船体区水流; 紊动强度; 雷诺应力; 紊动能; PIV 水槽试验

中图分类号: U661.1; TV133

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0138-10

PIV experiment on turbulent characteristics of hull area flow in restricted waters

LIANG Weikun¹, ZHONG Liang^{1,2}, WANG Xian Yao², FAN Xinran², YU Jiangxiu²

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

2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: When ships navigate in restricted waters, the water flow structure is very complex due to shallow water depth and narrow water surface. The turbulent characteristics around the hull in restricted waters are studied on the basis of particle image velocimetry (PIV) flume experiment, and the distribution characteristics of longitudinal turbulence intensity T_{ux} , Reynolds stress τ , turbulence kinetic energy k , and their variation with cross-section coefficient are explored. The results show that the longitudinal turbulence intensity T_{ux} and turbulence kinetic energy k of the mid-section of the bow are both affected by the hull walls, with the maximum values concentrated at the bottom of the water flume and near the bottom of the ship. The maximum Reynolds stress τ occurs near the bottom of the flume, and is negative at the bow surface and near the bottom of the ship. T_{ux} and k in the front area of the ship decrease from the bottom of the water flume towards the water surface, and τ first increases and then decreases vertically. The stern reflux zone forms a long elliptical shape with high values of T_{ux} and k , as well as negative values of τ , and diffuses downstream. As the cross-section coefficient increases, the high and negative ranges of T_{ux} , τ , and k decrease, and the inflection point of k shifts upward. Increasing the cross-section coefficient can significantly reduce the squeezing effect of the hull on the flow, reduce the influence of the hull shape on the flow, weaken the turbulent momentum transfer and exchange, reduce local high-intensity turbulence, and increase the stability of the flow field.

Keywords: restricted waters; hull area flow; turbulence intensity; Reynolds stress; turbulence kinetic energy; PIV flume experiment

收稿日期: 2025-01-20

*基金项目: 广西科技计划项目(桂科 AA23062023)

作者简介: 梁伟坤(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

通信作者: 钟亮(1980—), 男, 博士, 教授, 研究方向为水力学及河流动力学。E-mail: zlcqjtu@163.com

受限水域包括人工运河、船闸闸室、引航道、通航隧洞和通航渡槽等。根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[1], 受限水域的断面系数不应小于 6, 流速较大的航道不应小于 7。船体绕流及水动力扰动作用改变局部水流结构, 形成涡旋、回流等非定常流动现象, 显著影响河床稳定性及船舶的操纵性能。随着船舶趋向大尺寸和高速化发展, 航行于受限水域中的船舶会挤压水体, 使得船底及周围空间变小, 船体周边水流也因挤压和扰动而变得更加紊乱, 流场的紊动特性愈发明显^[2]。因此, 深入探究受限水域船体周边水流的紊动特性, 对于航道工程的规划及保障船舶航行安全等方面都具有重要的意义。

紊动特性可以揭示流体内部能量交换、物质扩散等现象, 其统计参数主要包括紊动强度、雷诺应力和紊动能。随着研究方法的不断进步, 目前关于船体周围水流的紊动特性已经有了较多研究。在紊动强度方面, Zeng 等^[3]通过研究发现船舶在浅水航行时, 紊动强度的变化对摩擦阻力的影响大于船体前边界位置本身; Setiawan 等^[4]观察到不同船舶尾流在紊动强度的频率分布上存在显著差异; 王永强等^[5]分析船舶在连续弯道行驶时紊动强度的垂线分布规律, 紊动强度分布受弯道环流结构显著影响, 表现出与经典壁面湍流相似但更复杂的特征; Wei 等^[6]指出船舶航行时紊动强度的峰值大约是未受船舶干扰时的 6 倍。在雷诺应力方面, Gui 等^[7-8]通过粒子图像测速系统 (particle image velocimetry, PIV) 分析舰船尾流平面, 证明了 PIV 能够有效测量紊流特性, 雷诺应力表现出明显的各向异性; Longo 等^[9]对舰船尾流在规则波浪作用下的研究表明, 雷诺应力的相位与波浪相位基本一致, 但在某些区域可能存在相位差。在紊动能方面, Seo 等^[10]对超大型油轮 (KLVCC) 船体周围的二维湍流场进行研究, 发现紊动能的分布与速度场的非均匀性密切相关; Park 等^[11]通过对比紊动能的分布和壁面剪切应力的变化, 分析紊动能在艏柱区域的低值是导致壁面剪切应力降低的主要原因; 杨纪伟等^[12]发现紊

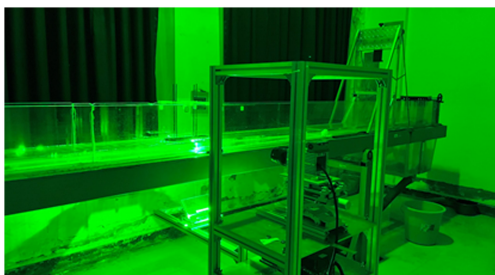
动能随水深的增加而减小; 肖潇等^[13]的试验表明, 紊动能在低雷诺数下受回流区的影响很小。尽管目前对船舶周围的紊动特性进行了一定探究, 但针对受限水域内, 特别是船舶在复杂条件下水流的紊动特性变化研究相对匮乏。

因此, 本文基于 PIV 水槽试验, 研究受限水域船体周围水流的紊动特性, 探讨不同断面系数下船体周围紊流结构的垂线变化及沿程变化。研究成果对于优化航道设计、保护河床稳定以及船舶航行安全具有重要的意义, 并为揭示受限水域船舶-航道相互作用提供科技支撑。

1 试验概况

1.1 试验资料

试验在长 12 m、宽 0.25 m、高 0.25 m 的 PIV 变坡水槽中进行。水槽进口段长 6 m、试验段长 1 m、出口段长 3 m, 入口处预留 2 m 安装整流格栅以平顺水流, 出口处安装合页式尾门, 试验流量采用电磁流量计测量, 采样频率 10 Hz, 测量精度 0.4%, 水深采用水位测针测量, 测针精度 0.1 mm。根据 GB 50139—2014《内河通航标准》, 确定以 IV 级限制性航道 500 吨级干散货船作为试验的代表船型, 船型主尺度为 47.0 m×8.8 m×1.9 m (长×宽×设计吃水)。结合本文采用的高精度整体变坡水槽, IV 级限制性航道宽 40 m, 试验水槽宽 0.25 m, 模型比尺为 1:160。船舶模型制作采用 3D 打印技术, 尺度为 0.294 m×0.055 m (长×宽), 根据原型吃水计算, 理论模型吃水约为 0.011 9 m, 然而, 由于实际航行中载货量变动、水面波动、重心偏移以及船舶“深蹲”等因素, 实际吃水深度可能超过设计吃水。为反映船舶对水流影响最不利工况, 加深吃水深度, 将其调整为 0.02 m。在水力学试验中, 高雷诺数下可以忽略尺度效应, 即当雷诺数大于 3 000 时, 流体黏度所引起的黏滞效应可忽略不计^[14], 本文试验中模型雷诺数 Re_m 为 6.58 万, 远高于该临界值, 可忽略黏滞效应。为避免激光反射的干扰, 船舶模型表面涂黑。水槽试验布置及船舶模型见图 1。



a) 水槽试验布置



b) 船舶模型

图 1 水槽试验布置及船舶模型

Fig. 1 Flume experiment layout and ship model

表 1 水槽试验各工况的参数取值

Tab. 1 Parameter values for each condition of flume experiment

工况	流量 $Q/$ ($L \cdot s^{-1}$)	断面平均流速 $u_c/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	水深 h/cm	船舶吃水深度 T/cm	吃水比 h/T	断面过水面积 A/cm^2	船舶浸水面积 A_c/cm^2	断面系数 n	底坡 i
1	1.8	20	3.5	2.0	1.75	87.5	11	7.95	0.001
2	2.5	20	5.0	2.0	2.50	125.0	11	11.36	0.001
3	3.3	20	6.5	2.0	3.25	162.5	11	14.77	0.001

试验船舶区中船首和船尾由于受到船体形状的影响,水流发生显著的绕流、分离和回流,导致紊动特性更加明显,而船体中部流场相对平稳,对整体紊动特性影响较小。因此,流场采集主要针对船首和船尾,选取船舶中心剖面为典型剖面进行研究,观察水流遇船体时的变化。采集断面长 12 cm,断面同时覆盖船体变形区域 8 cm 以及船体前方和后方 4 cm 的部分水域,见图 2。剖面分别位于水槽内的船首和船尾,分别为船首区 T-LS1 和船尾区 W-LS1 剖面。

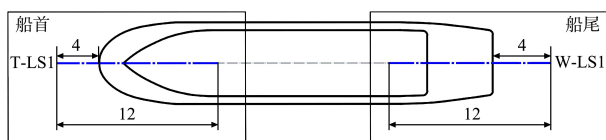


图 2 船舶区流场采集断面布置 (单位: cm)

Fig. 2 Profile zoning layout of flow field around ship (unit: cm)

本文共进行 3 组试验,在流量 Q 为 1.8~3.3 L/s 范围内进行试验,试验工况参数见表 1,断面系数 n 分别取 7.95、11.36、14.77,反映断面过水面积与船舶浸水面积之比,通过调整试验水深实现,各工况的船舶吃水均为 0.02 m。相关设置满足 GB 50139—2014《内河通航标准》关于受限水域的断面系数要求。

通过流量、水位调节达到预设试验条件,待水流稳定后,应用 PIV 沿水槽纵向中轴剖面进行流场采样。PIV 量测设备主要包括高速摄像机系统、激光器、光路系统以及相关的软件系统;高速摄像机分辨率 2 560 px×1 920 px,采样频率 400 Hz,感光度 ISO3000,满足图像采集要求;激光器及光路系统选用 8 W 半导体连续激光,激光片厚度 1 mm。采用多级网格迭代图像变形算法和傅里叶变换等方法进行 PIV 互相关计算,最终得到网格尺寸为 24 px×24 px、50%网格重叠率的重构流场。

1.2 分析方法

紊动强度 T_{ux} 、雷诺应力 τ 和紊动能 k 的计算公式分别为:

$$T_{ux} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u'^2} \quad (1)$$

$$\tau = -\rho \overline{u'v'} \quad (2)$$

$$k = \frac{\overline{u'^2 + v'^2}}{2} \quad (3)$$

式中: u' 、 v' 分别为纵向、垂向脉动流速; $\overline{u'}$ 、 $\overline{v'}$ 分别为平均纵向、垂向脉动流速; n 为样本容量; ρ 为水的密度。

2 结果与讨论

2.1 紊动强度

2.1.1 沿程变化

由于船首中剖面具有代表性,限于篇幅,以

船首中剖面 T-LS1、船尾中剖面 W-LS1 为例, 其纵向紊动强度 T_{ux} 云图分布情况见图 3, 可得出如下结果。

1) 在船首中剖面 T-LS1 处, 纵向紊动强度 T_{ux} 峰值出现在船底及水槽底部。在船前区, T_{ux} 从水槽底部向水面逐渐递减, 这种分布规律符合一般明渠流动的特性, 表明这部分水流受船舶影响较小, 与文献[2]得出的紊动强度在船前区的变化一致。在船体底部区域, 由于流动处于水槽底壁和船体的双重边界效应下, 湍流的能量传播与相关结构发展受限。因此, 同水深处的紊动强度相比船前区有所降低。随着断面系数增大, 水槽过流能力增强、流速分布更均匀, 底部剪切作用相对减弱, 使得流场趋于稳定, T_{ux} 峰值范围逐渐收缩。

2) 在船尾中剖面 W-LS1 处, T_{ux} 峰值主要集中在水槽底部及船尾流区域, 并呈现出向下游方向扩散的趋势。水槽底部的紊动强度随远离船舶呈上升趋势, 这是因为船舶对紊流中相关结构的抑制效应降低。而在船尾后方, 水流通过船舶底部向上方填充, 在这个过程中伴随大量涡旋脱落、剪切层失稳及湍流掺混现象, 因而导致了该处的高湍流强度。随着断面系数增大, 船体尾部 T_{ux} 峰值范围逐渐缩窄, 这是因为当断面过水能力增强时, 船体对水流的约束作用相对减弱, 从而使得水流波动降低。与此同时, 贴近船体尾部区域, 由于受到船体特殊形态的影响, 该区域内的水流波动较小, 脉动速度也相对较小, 因此形成了 T_{ux} 较低值的一块区域, 且随断面系数增大, T_{ux} 低值区域范围扩大, 表明尾流更易恢复至自由流状态, 局部扰动减少。

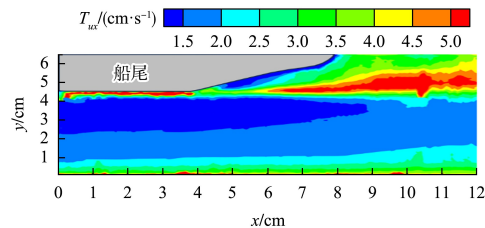
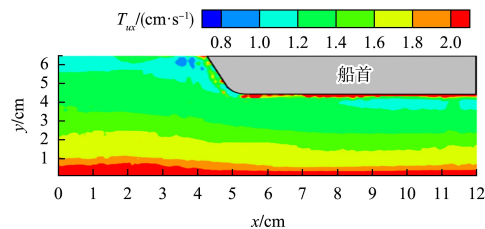
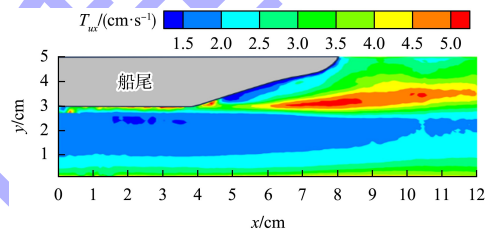
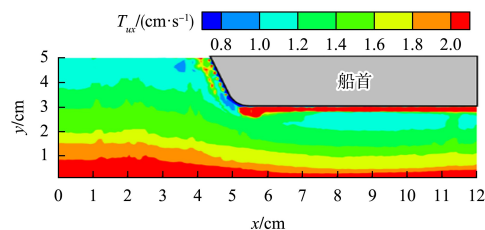
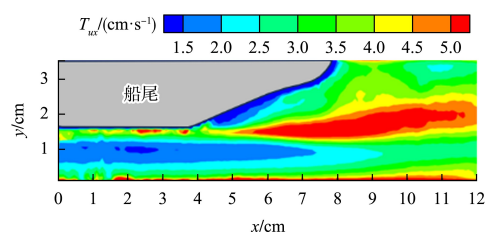
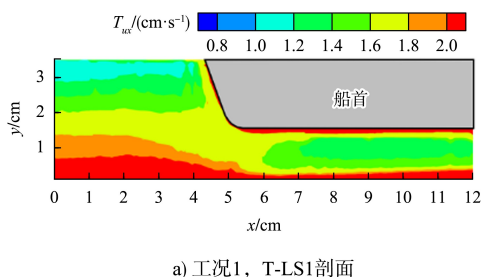


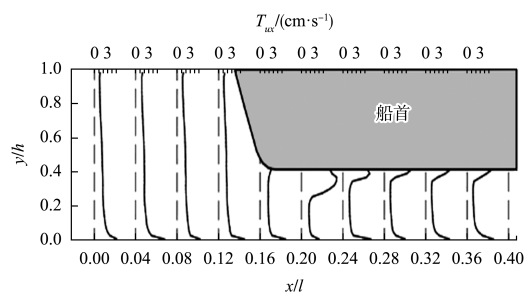
图 3 各工况的纵向紊动强度云图

Fig. 3 Cloud maps of longitudinal turbulence intensity of each condition

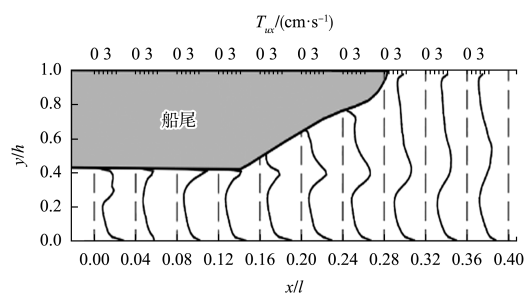
2.1.2 垂线变化

纵向紊动强度 T_{ux} 随断面系数变化的垂线分布见图 4。通过选取垂线(即 x/l 为 $0 \sim 0.40$, 其中 l 为

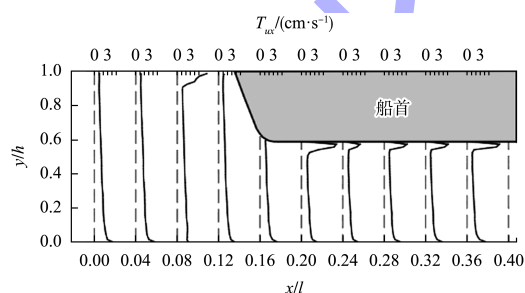
船长)分析其纵向(沿水流方向,即 x 轴方向)上紊动强度的变化情况。船首 x/l 为 $0\sim 0.12$ 垂线位于船首上游的船前区, x/l 为 $0.16\sim 0.40$ 垂线位于船首头部及底部;船尾 x/l 为 $0\sim 0.28$ 垂线位于船尾底部及尾部, x/l 为 $0.32\sim 0.40$ 位于船尾下游的船后区。



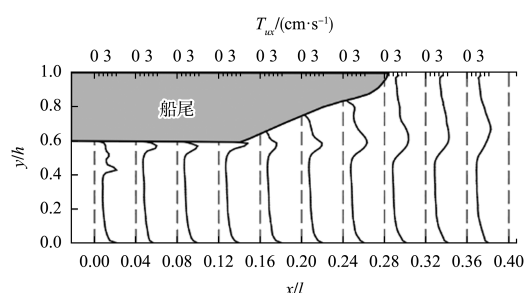
a) 工况1, T-LS1剖面



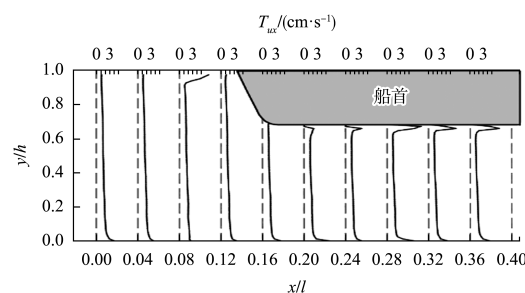
b) 工况1, W-LS1剖面



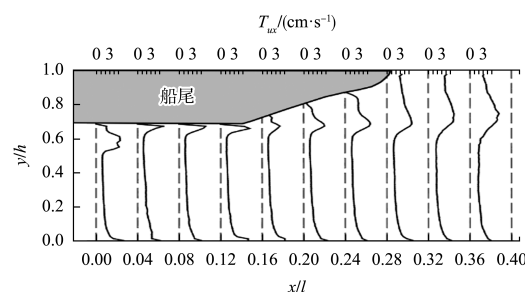
c) 工况2, T-LS1剖面



d) 工况2, W-LS1剖面



e) 工况3, T-LS1剖面



f) 工况3, W-LS1剖面

图4 各工况的纵向紊动强度垂线分布

Fig. 4 Vertical distribution of longitudinal turbulence intensity of each condition

由图4可知: 1) 对于船首 T-LS1 剖面, 船前区 T_{ux} 沿程变化相对稳定, 随着断面系数增大, 水流纵向进行了调整, 脉动流速减小, 导致 T_{ux} 降低。在船底与水槽中间区域, 即吃水深度 0.02 m 以下位置, T_{ux} 变化尤为明显且波动较大。这是水流遇船首阻碍产生绕流及向下流速分量, 对这个区域的流速造成较大扰动, 致使该区域紊动活动极为剧烈, 局部的 T_{ux} 随之增大。2) 在船尾 W-LS1 剖面, T_{ux} 的变化特性更显著。船尾后形成一个 T_{ux} 高度集中的长椭圆形区域, 其紊动强度远大于周围区域。这是因为当水流经过船底并遭受挤压后, 过流断面突然增宽, 引发向上环流, 使该区域内的流速极度不稳定, 局部压强骤降, 进而产生了较大的脉动流速, 导致 T_{ux} 显著增强。同样, 随着断面系数的增加, 这个强紊动区域垂线波动幅度减小。尽管船体底部未出现上述典型的高紊动强度集中区, 但仍较大, 与船首区域的船底分布规律相似, 这也反映出船体形态及断面变化对 T_{ux} 分布的影响。

2.2 雷诺应力

2.2.1 沿程变化

雷诺应力 τ 的云图见图 5。可以看出: 1) 船首 T-LS1 剖面, 不同工况下观察到船体周围雷诺应力 τ 的分布规律具有一定的相似性。在接近船首水面和底部的位置, τ 呈现出负值特征, 这表示 $u'v' > 0$, 即两个脉动速度分量之间存在正相关性, 同时湍流脉动将动量从高动量区域向低动量区域传输, 减缓平均流动。随着断面系数的增大, τ 的负值范围有所缩小, 并且整体的 τ 值也有一定程度下降。这表明在更大断面系数条件下, 船体周围的流速更加平稳, 紊动程度及剪切力相对减小, 从而影响 τ 的整体分布及强度。2) 船尾 W-LS1 剖面出现 τ 负值的集中区域, 此区域表示水流因船体形态变化及过流断面面积逐渐增加, 形成向上的上升回流, 且船体两侧绕流在船尾区域向内侧挤压, 船尾后受船体阻碍形成回流。随着断面系数的增加, τ 值逐渐减小, 表明断面过流能力增大, 船体限制作用减弱, 回流范围缩小。

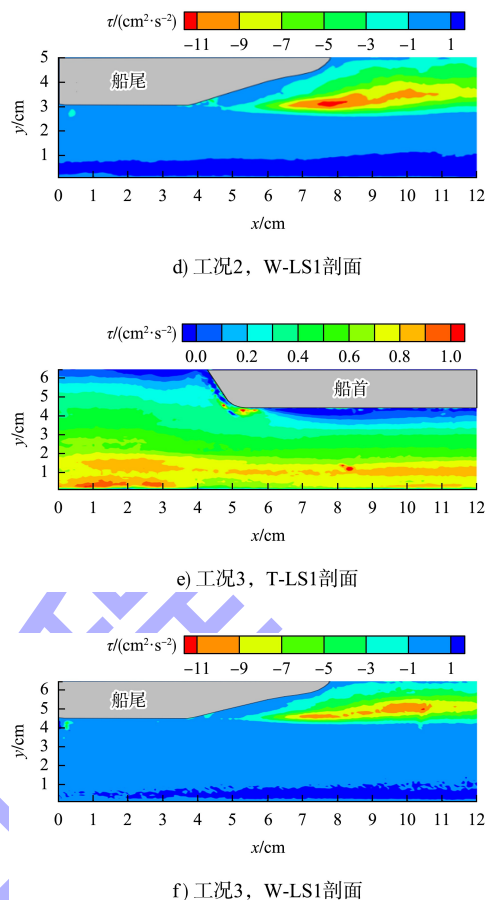
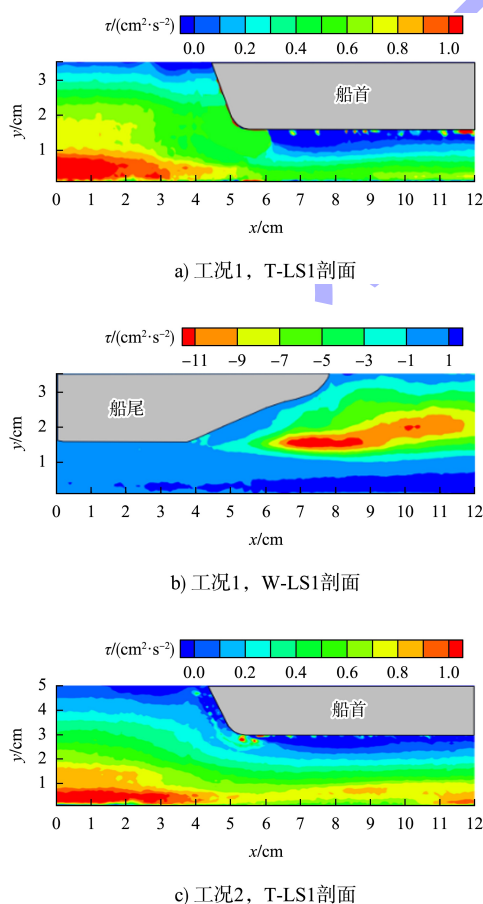


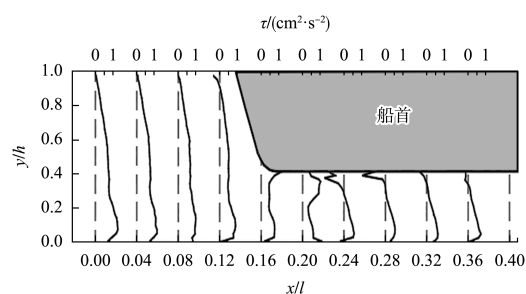
图 5 各工况的雷诺应力云图

Fig. 5 Cloud maps of Reynolds stress of each condition

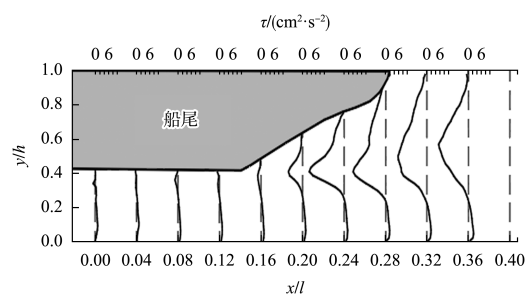
2.2.2 垂线变化

雷诺应力 τ 随断面系数变化的垂线分布见图 6。可以看出: 1) 船首 T-LS1 剖面垂线 x/l 为 $0 \sim 0.12$ 的结果显示, 由于受到水面及底部水槽边壁限制, 雷诺应力 τ 从水槽底部向水面先增大后减小, τ 最大值出现在相对水深为 $0.1 \sim 0.2$ 的范围内。随着断面系数增加, 垂线雷诺应力 τ 及最大值有所减小。垂线 x/l 为 $0.16 \sim 0.40$ 位于船首头部及底部范围内, 与无船时相比存在较大的差异。靠近船体吃水 $h = 0.02$ m 附近, 出现 τ 的负值区域, 该区域随着断面系数的增加而减小, 接近于 0, 表明断面系数的增大改善了湍流结构的流速, 湍流脉动对动量传输的影响减弱。2) 在船尾 W-LS1 剖面处垂线 x/l 为 $0 \sim 0.12$ 的结果表明, 此处雷诺应力分布与船首区底部相似, τ 的最大值也出现在靠近船底区域与水槽底部。垂线 x/l 为 $0.16 \sim 0.40$ 处的

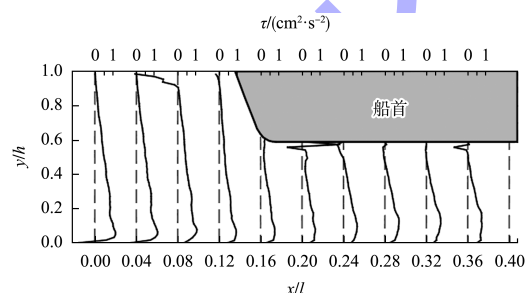
τ 相较于船首区更大, 靠近船体吃水 $h = 0.02 \text{ m}$ 附近, 此处水流因船尾形状变化紊乱, 出现了很强的紊动回流, 随着断面系数的增加, 紊动程度减小, 受船体影响随着与船尾距离的增加而减弱。



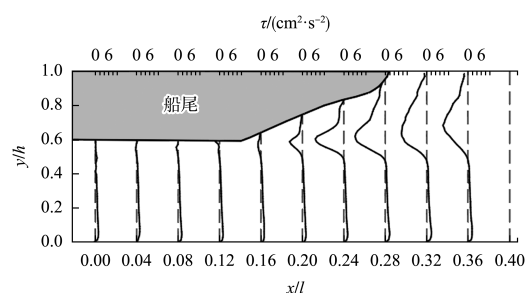
a) 工况1, T-LS1剖面



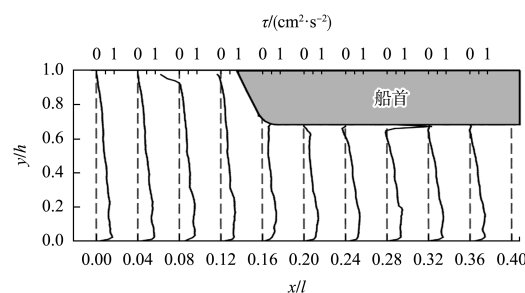
b) 工况1, W-LS1剖面



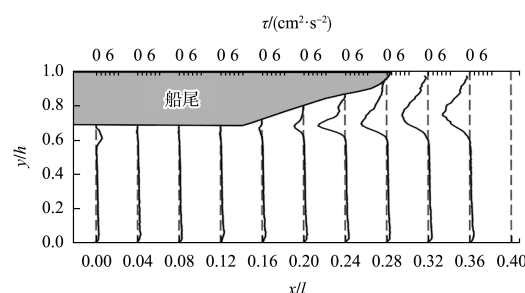
c) 工况2, T-LS1剖面



d) 工况2, W-LS1剖面



e) 工况3, T-LS1剖面



f) 工况3, W-LS1剖面

图6 各工况的雷诺应力垂线分布

Fig.6 Vertical distribution of Reynolds stress of each condition

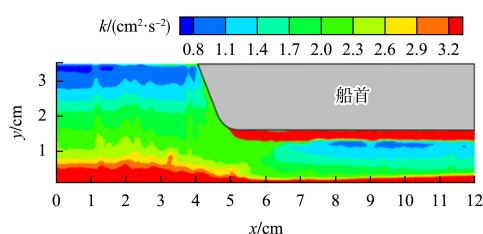
2.3 紊动能

2.3.1 沿程变化

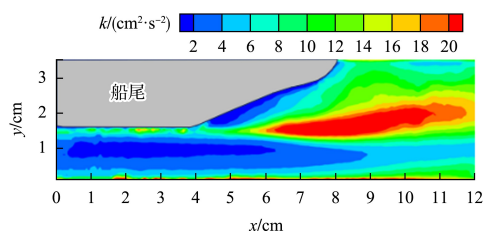
船首 T-LS1 剖面、船尾 W-LS1 剖面的紊动能 k 随断面系数的变化云图见图 7。可以看出:

- 1) 与紊动强度和雷诺应力相似, 船体对紊动能 k 的主要影响集中在船体周围。船首 T-LS1 剖面, k 在靠近水槽底壁与贴近船底处最大。断面系数较小时, 船底与水槽底部之间的狭窄区域因船体挤压作用, 导致该范围内的 k 显著增强。但随着断面系数的增加, 船体对水流的限制减弱, 水流内部的能量交换及湍流强度相应减少, 从而使得原本在船底与水槽底部间 k 的较大值随之降低。船首区水流相对复杂, 船首前部水流受到阻碍, 一部分水流形成方向向下流动的下潜流, 另一部分更多向船外侧绕流, 该区域附近纵向流速本身较小, 脉动流速也较小, 因此 k 较小, 随断面系数的增加, k 的低值范围扩大。
- 2) 船尾 W-LS1 剖面区域与船首截然不同, 船体尾后出现 k 的高值集中区, 该区域的 k 显著高于船体周围区域, 主要是由于该区域存在回流现象; 在回流区, 流体

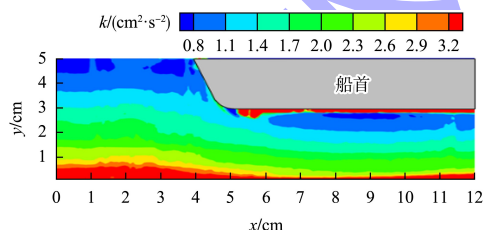
的脉动速度增加, 使得 k 的值升高。随着距离船体越远, k 的高值集中区向水面方向移动并逐渐减弱。在贴近船体尾后区域及整个水槽中下部为 k 的低值区域, 此处水流相对于回流区的脉动速度小。当断面系数增大时, 水体流动有更宽的空间进行调整和能量分散, 船体对水流的影响得到一定的缓冲和削弱, 从而减少了局部的高强度紊动, 整体上的 k 值相对减小。



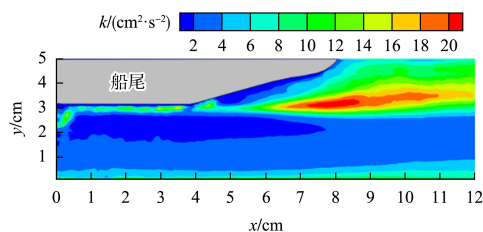
a) 工况1, T-LS1剖面



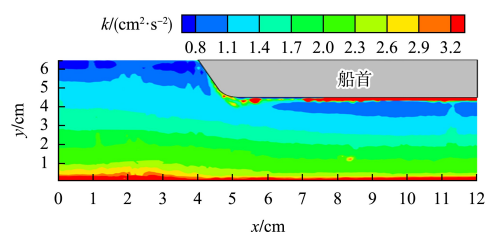
b) 工况1, W-LS1剖面



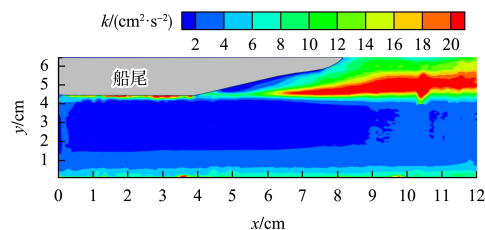
c) 工况2, T-LS1剖面



d) 工况2, W-LS1剖面



e) 工况3, T-LS1剖面



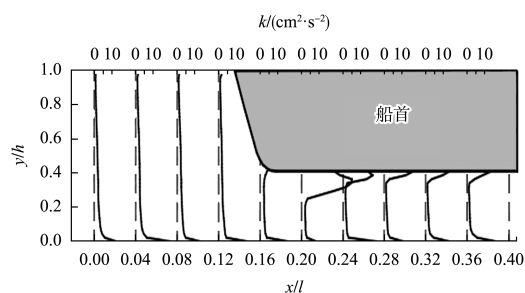
f) 工况3, W-LS1剖面

图7 各工况的紊动能云图

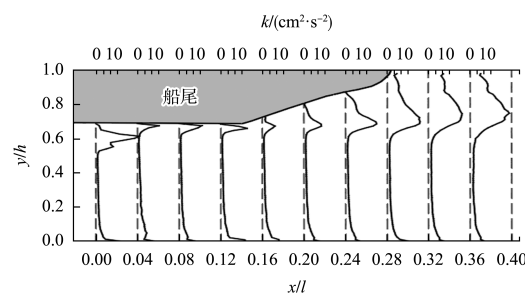
Fig.7 Cloud maps of turbulent kinetic energy of each condition

2.3.2 垂线变化

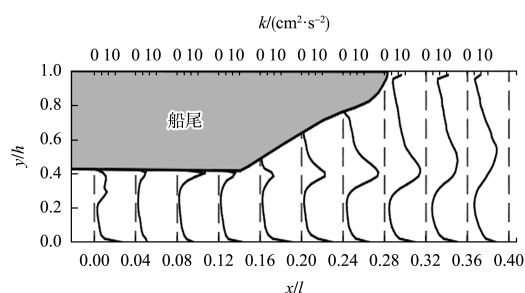
紊动能 k 随断面系数变化的垂线分布见图 8。可以看出: 1) 船首 T-LS1 剖面船前区垂线 x/l 为 0~0.12 的 k 最大值出现在水槽底, 向相对水深 0.05 处急速减小, 随后向水面处缓慢减小, 在断面系数较大时, 减小了船体对于水流的限制作用, 这种差异性变化有所减弱。船首区垂线 x/l 为 0.16~0.40 则受船体边壁影响, 在船体底部出现 k 的较大值, 垂线分布呈“C”形, 在相对水深 0.05~0.60 时 k 分布与船前区一致。2) 船尾 W-LS1 剖面垂线 x/l 为 0~0.12, 紊动能垂线分布与船首区底部相似, k 最大值出现在靠近船底区域与水槽底部, 且随着断面系数的变化, k 的垂线变幅减小。船后垂线 x/l 为 0.16~0.40 的变化幅度明显, 相对水深 0.4~0.6 处, 水流出现强紊动, k 突变达到峰值, 随着断面系数的增加, k 的拐点上移, 表明在更大空间范围内船体周围湍流能量分布更均匀, 局部高强度紊动减弱。



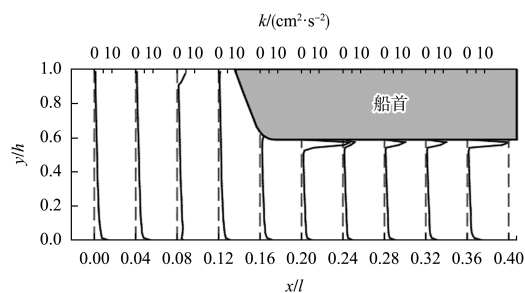
a) 工况1, T-LS1剖面



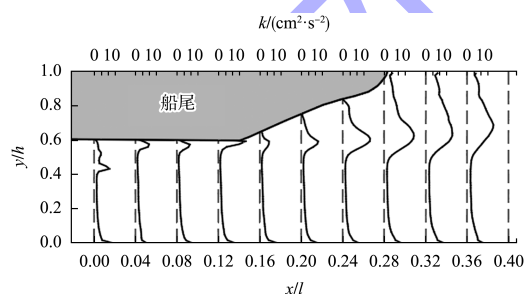
f) 工况3, W-LS1剖面



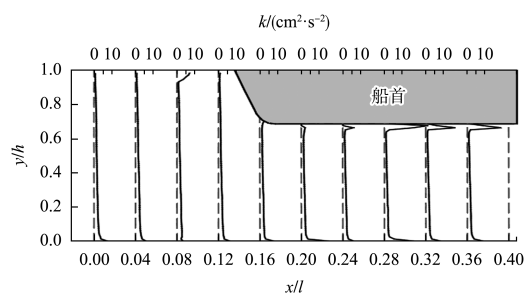
b) 工况1, W-LS1剖面



c) 工况2, T-LS1剖面



d) 工况2, W-LS1剖面



e) 工况3, T-LS1剖面

图8 各工况的紊动能垂线分布

Fig. 8 Vertical distribution of turbulent kinetic energy of each condition

3 结论

1) 船首中剖面的纵向紊动强度 T_{ux} 受边壁强剪切效应影响, 最大值集中在水槽底部及贴近船体底部的位置, 船前区的 T_{ux} 沿水槽底部向水面呈递减分布趋势; 船尾后部因船体阻碍形成的回流区出现长椭圆形的 T_{ux} 高值区, 并向下游扩散; T_{ux} 整体水平随断面系数增大而减小, 表明断面系数的增大使船舶周围的水流阻碍变小, 湍流的脉动减弱, 从而纵向紊动强度减小。

2) 船首中剖面的雷诺应力 τ 最大值集中在船前区的水槽近底处, 垂向方向上沿水槽底部至水面先增大后减小, 反映近壁区的剪切作用强烈; τ 在船首水面位置及贴近船体底部出现负值, 表明该区域纵向和垂向的脉动流速呈正相关性; 船尾后部也出现 τ 的负值区域, 此时水流受船尾形状影响形成回流。随断面系数的增大, τ 在船首的高值范围及船尾的负值范围均减小, 表明湍流动量传递和交换作用减弱, 水流更加稳定。

3) 船首中剖面的紊动能 k 在水槽底部及贴近船体底部最大, 船前区的 k 沿水槽底部向水面呈递减分布趋势, 船首底部垂线方向呈“C”形, 反映了壁面强剪切效应下湍流能量的集中与耗散特性; 船尾回流区因流动分离, 伴随强烈湍流活动形成大紊动能集中区; 随断面系数的增加, k 在船首的高值范围减小及船尾的低值范围扩大, k 最大值拐点上移, 表明在更大空间范围内船体周围湍流能量分布更均匀, 局部高强度紊动减弱。

参考文献:

- [1] 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- Navigation standard of inlandwaterway: GB 50139-2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [2] 程弘宇, 张首元, 赵根生, 等. 通航隧洞船舶航行阻力试验研究[J]. 水运工程, 2023(9): 101-105, 125.
- CHENG H Y, ZHANG S Y, ZHAO G S, et al. Test of sailing resistance of ship in navigable tunnel[J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 101-105, 125.
- [3] ZENG Q S, HEKKENBERG R, THILL C. On the viscous resistance of ships sailing in shallow water [J]. Ocean engineering, 2019, 190: 106434.
- [4] SETIAWAN H, KEVIN, PHILIP J, et al. Turbulence characteristics of the ship air-wake with two different topside arrangements and inflow conditions [J]. Ocean engineering, 2022, 260: 111931.
- [5] 王永强, 胡春宏, 张鹏, 等. 三峡库区黄花城河段环流结构与涡尺度特征初探[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 253-263.
- WANG Y Q, HU C H, ZHNAG P, et al. Primary study on circulation structures and vortex-scale characteristics of Huanghuacheng reach in the Three Gorges Reservoir area [J]. Advances in water science, 2022, 33(2): 253-263.
- [6] WEI J, LI Y P, CHEN D, et al. The influence of ship wave on turbulent structures and sediment exchange in large shallow Lake Taihu, China [J]. Journal of hydrology, 2020, 586: 124853.
- [7] GUI L, LONGO J, STERN F. Towing tank PIV measurement system data and uncertainty assessment for DTMB Model 5512 [J]. Experiments in fluids, 2001, 31(3): 336-346.
- [8] GUI L, LONGO J, STERN F. Biases of PIV measurement of turbulent flow and the masked correlation-based interrogation algorithm [J]. Experiments in fluids, 2001, 30(1): 27-35.
- [9] LONGO J, SHAO J, IRVINE M, et al. Phase-averaged PIV for the nominal wake of a surface ship in regular head waves[J]. Journal of fluids engineering, 2007, 129(5): 524-540.
- [10] SEO J H, SEOL D M, LIM T G, et al. A stereo PIV measurement of a model ship wake in a towing flume with uncertainty assessment[C]//Delft University of Technology. Proceedings of 10th International Symposium on Particle Image Velocimetry. Delft: Delft University of Technology, 2013: 1-12.
- [11] PARK D W, LEE S B. The sensitivity of ship resistance to wall-adjacent grids and near-wall treatments [J]. International journal of naval architecture and ocean engineering, 2018, 10(6): 683-691.
- [12] 杨纪伟, 胥战海, 李书芳, 等. 基于 FLUENT 的明渠紊流边界层数值模拟[J]. 人民黄河, 2009, 31(1): 30-31.
- YANG J W, XU Z H, LI S F, et al. Numerical simulation of turbulent boundary layer in open channel based on FLUENT[J]. Yellow River, 2009, 31(1): 30-31.
- [13] 肖潇, 樊新建, 吴时强. 基于 $k-\varepsilon$ 紊流模型的后台阶流动特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(3): 25-31.
- XIAO X, FAN X J, WU S Q. Hydraulic characteristics of backward-facing step flow based on $k-\varepsilon$ turbulence model [J]. Hydro-science and engineering, 2013(3): 25-31.
- [14] 崔永刚. 船舶双螺旋桨冲刷模型及尾流结构预测研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- CUI Y G. Study on scour model and jet structure prediction of ship twin-propeller [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.

(本文编辑 王璁)