

doi: 10.7690/bgzd.2023.08.017

# 新型双体式水面垃圾清理船

马 越, 李海鑫, 倪玺杰, 张志远, 张启民

(合肥工业大学机械工程学院, 合肥 230009)

**摘要:**为解决中小型景观湖的水面垃圾收集和水体污染防治问题,提出一种新型双体式小型清污船的设计方案。搭载基于卷积神经网络开发(convolutional neural networks, CNN)的水面垃圾视觉定位系统,用于识别、定位水面漂浮垃圾;采用双体式、剪刀门设计,采用复合材料真空固化工艺提高船体结构强度。对清污船强度、刚度进行建模和仿真分析,结果表明:该船结构强度高,航行情况良好,可在最大航速稳定、持续作业。

**关键词:**双体式;视觉定位;复合材料;水域清污;结构强度

**中图分类号:** TP15 **文献标志码:** A

## A New Type of Two-body Surface Garbage Cleaning Vessel

Ma Yue, Li Haixin, Ni Xijie, Zhang Zhiyuan, Zhang Qimin

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of water surface garbage collection and water pollution prevention in small and medium-sized landscape lakes, a design scheme of a new type of two-body small decontamination boat was proposed. It is equipped with a visual positioning system for surface garbage based on convolutional neural network (convolutional neural networks, CNN), which is used to identify and locate the floating garbage on the water surface. It adopts a two-body and scissor door design, and uses a composite vacuum curing process to improve the structural strength of the hull. The modeling and simulation analysis of the strength and stiffness of the decontamination ship are carried out, and the results show that the ship has high structural strength, good navigation condition, and can operate stably and continuously at the maximum speed.

**Keywords:** two-body; visual positioning; composite material; water area decontamination; structural strength

## 0 引言

目前,世界各国都十分重视智能化垃圾清洁、水面垃圾智能打捞技术的研究和应用<sup>[1-3]</sup>。在垃圾的回收分类处理上,芬兰等北欧国家通过智能机器人系统进行回收分类处理;上述系统包含8~10个传感器,可实时向计算机传送数据,筛选不同的垃圾,并进行后续处理。在水面垃圾智能打捞上,荷兰RanMarine公司的“垃圾鲨鱼”1天可运作16h,收集塑料颗粒、外来植物、漂浮的固体碎片等,1个航程最大可清理200L垃圾<sup>[4]</sup>。

目前,国内水面垃圾清理仍然以清污船人工打捞为主,响应慢、智能化程度低,不适用于学校、小区中小型景观湖的水体污染防控和垃圾清理工作。笔者提出一种新型双体式小型清污船的设计方案,用于解决中小型景观湖的水面垃圾收集和水体污染防治问题。

## 1 船型设计与制作

### 1.1 船型的选择

双体船归属排水量船型,以其特殊的船体结构求取最大的排水量(水浮力)。双体船含左右两侧船体,横摇时其回复力矩是同排水量单体船的若干倍,稳定性能良好。双体船的甲板面积宽敞,面积较同排水量的单体船大出许多,船上设备布置方便,吃水较浅,经济效益高,制造技术要求较低,还具备使用可靠、维修方便等优点。就水面垃圾清理而言,双体船体积大、稳定性强,吃水较浅,对小体积清污船设计而言该船体优势显著<sup>[5]</sup>。

### 1.2 船体设计

经计算,船体整体质量控制在3~4kg较合适,保证船体载重能力的同时,使动力处于富裕状态,使船体可保持高航速巡航。基于上述数据并结合国内外研究现状,笔者最终确定船体由1个600mm×

收稿日期:2023-04-26;修回日期:2023-05-25

基金项目:国家级大学生创新训练项目计划(202110359004)

作者简介:马越(2001—),男,甘肃人。

80 mm×40 mm(长×宽×高)的长方体和 1 个半径 40 mm、长 60 mm 的半圆柱组合成 1 个单船体, 如图 1 所示。在标准吃水线条件下, 1 对船体最大可提供 68 N 浮力(正常吃水深度约为 40~50 cm)。吃水深度对清污船的航速和适航性有较大影响, 在其他条件相同时, 吃水深度越大, 船体重心越低, 稳定性越高, 即风浪对船的影响越小(不容易发生摇摆或摇摆的幅度很小); 但吃水深度增大会增大水流对船的阻力, 进而降低船速。因此, 考虑综合性能, 船体吃水深度维持  $45^{+5}_{-5}$  mm 较为合适。

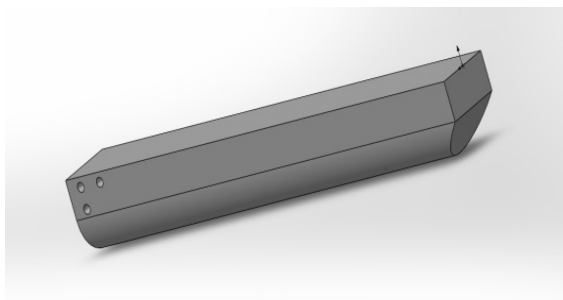


图 1 单船体物理模型

上图中, 船体前方拟切出一定弧度用以破开水面。有别于常见矩形船体和圆柱形船体, 笔者采用的是矩形和圆弧形相结合的船体设计。双体船固然有诸多优点, 但仍存在一定缺陷, 如在船体处于纵向摇摆和横向摇摆耦合时, 船舶的耐波性不佳; 因此, 笔者在船体底部设计了部分圆弧船体以增强耐波性, 上方采取矩形设计便于其他结构的设计与安装。

### 1.3 主体框架设计

该双体船的显著优势是提供了较大的甲板面积。考虑到甲板面积、船体强度及控制质量, 笔者选择碳管和 3D 打印连接件作为甲板的主体架构, 并且选择尺寸合适的防水装置用于安置电子设备。整体模型和线架分别如图 2 和 3 所示。

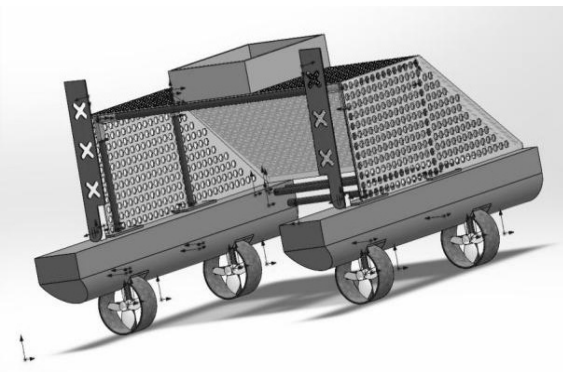


图 2 整船模型

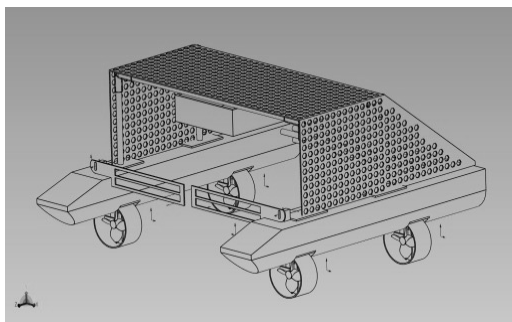


图 3 整船线架

电机的安装位置并未囿于简单的对称结构, 而是在安装于船体 1/5 和 3/5 处, 使整体重心前移, 以避免船体在快速巡航时由于受水流阻力使船体前端翘起而导致前侧电机空转的情况。

综合结构强度考虑, 实际航行中, 单体船左右舷浮力存在差异; 因此, 双体船左右船体所受浮力必然不同, 连接桥处会产生剪切应力和力矩。由于双体船较单体船更宽, 应力的力矩相应比单体船更大。为降低同等海况下船体的扭曲变形和解体风险, 双体船必须设计承载力更强的结构, 仅凭主体框架连接是远远达不到结构力学标准的, 因此采用了 3 根外径 12 mm 的碳管进行尾部加固连接, 如图 4 所示。此外, 为贯彻船体轻质和实用的主旨<sup>[6]</sup>, 并进一步降低水流阻力, 拟采用六角网眼渔网布来制作船体侧面、底面和后面。

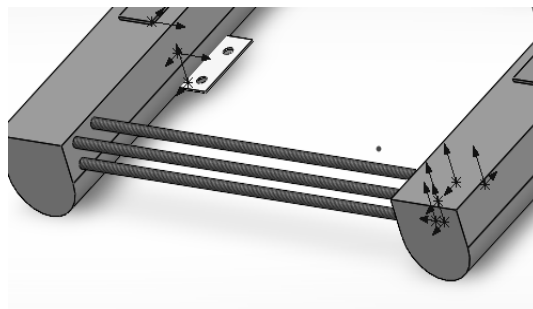


图 4 尾部碳管

垃圾收取装置安装于船体下方、后方、侧方, 采用网孔直径为 4 mm 的一体化装配网用于兜盛垃圾, 最大程度减小水流对船体的阻力。由于使用双船体船型, 1 次垃圾收集量可达 5 kg, 同时垃圾可与船体快速分离, 垃圾转运便利性较高。而在船体前侧, 安装由 1 对舵机连接两侧防漏装置, 采用剪刀门型设计<sup>[7]</sup>, 充分利用船体有限的空间, 提高船体开合的响应速度; 门叶的镂空设计减小了开闭门时的阻力, 具备防止垃圾收取后的飘出作用和风阻过大影响清污船航行或对门叶造成损伤的功能<sup>[8]</sup>。剪刀门模型如图 5 所示

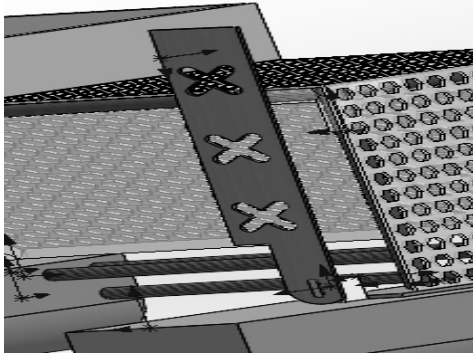


图 5 剪刀门模型

#### 1.4 船体的制作

笔者选择 XPS 泡沫板作为船体主材料, XPS 泡沫板性能优良, 具有以下优点:

1) 由于其特殊的闭孔蜂窝结构而具有卓越的高强度抗压性。根据 XPS 的不同型号及厚度, 其抗压强度可达 150~500 kPa。

2) 优秀的防水性。由于聚苯乙烯分子结构本身不吸水, 板材分子结构稳定, 无间隙, 解决材料漏水、渗透、结霜、冷凝等问题。

3) 质地轻便。XPS 板的完全闭孔式发泡化学结构与其蜂窝状物理结构使其具有轻质、高强度的特性<sup>[9]</sup>。

船体船型的切割过程首先使用数控车床切割出模板, 再使用热切割工艺切出船体部件, 最后使用泡沫胶进行各部件间的连接。同时, 考虑到船体本身硬度不足、易磨损的特点, 笔者在一些关键部位(如尾部与碳管相连接的部分船体)使用玻璃纤维和 YT-CC302Q 双组分环氧树脂胶混合并在真空环境下加压 8 h 的工艺制作了部分复合材料船身, 关键部位使用率可达 42%<sup>[10]</sup>, 达到保证关键部位强度的同时尽可能减轻船体自重的目的, 从而使该部分船体坚硬不易磨损, 延长了船体的使用寿命<sup>[11]</sup>。在碳管与船体、碳管与部件连接处, 为提高连接刚度和强度, 使用超细二氧化硅粉末和 YT-CC302Q 双组分环氧树脂混合的方法, 对制作过程中出现的缝隙进行填充, 使得碳管牢牢固定的同时满足轻质高强要求<sup>[12]</sup>。超细二氧化硅是无定型的微粒粉末或粒状, 具有很好的绝缘性, 不溶于水及常规酸。使用纳米二氧化硅改性的环氧树脂可增刚、增强和增韧, 而且耐高温性能、耐老化性能均可大幅度提高<sup>[13]</sup>。

对于电机的安装, 考虑到单纯使用螺丝连接稳定性不足, 笔者采用 CNC 制造的玻纤板并在考虑强度和防水性的情况下使用泡沫胶连接玻纤板和泡

沫。对于防漏装置采取镂空处理, 在垃圾无漏出的前提下尽可能减小受力, 其次在连接处设计了插销结构, 该结构可不影响防漏装置转动并能在水平状态下与船体产生相互作用增强连接处强度<sup>[14]</sup>。

## 2 动力控制

### 2.1 能源配置

为提高能量效率并增强清污船续航能力, 在船上同时装有锂电池和 8 片 N 型单晶硅太阳能板, 通过利用太阳能和电池电能, 实现了混合动力的输出, 经过充放电测试、模型验证机测试等, 发现待机和工作时长可达 6 h, 最大连续工作时长 130 min。采用的 N 型太阳能板具有无光衰、弱光效应好、温度系数低、高转化效率、对金属杂质容忍度高、使用寿命长等优势, 可在充足太阳光照下稳定输出 4.4 A 电流, 光电效率最大可达 22%。由于内部不含蓄电池, 可做到电量即发即用, 实用性极强。此外, 电池片上方还贴有极薄的钢化玻璃, 具有防水防腐蚀、保护电池片安全、延长使用寿命等作用。

### 2.2 动力控制

清污船使用 4 个 T60 推进器, 电机动力强劲, 在 3 s 锂电池下单个推力可达 1.65 kg, 4 s 锂电池下单个推力可达 2.1 kg。笔者在测试后决定采取 1 对正反桨和 4 s, 3 300 mh 锂电池, 推力最高可达 8.4 kg。4 个推进器可通过调节转速差和旋转方向来实现转向。遥控器使用了 TX18S 开源遥控器, 采用全新的 OPENTX 开源系统, 以 STM32F429 为主控芯片, 内置 CC2500 单芯片 4 合 1 射频模块, 可支持 FlySky、DSM、Syma、Traxxas 等 50 多种协议, 兼容性强。同时其配备的可调角度的霍尔摇杆可对船进行精准操控。

## 3 水面垃圾识别定位系统

### 3.1 系统概述

本系统是基于机器视觉的水面垃圾识别定位的算法集成系统, 主要搭载于无人垃圾清理船, 可有效识别水面漂浮物、过滤水面反光点干扰, 进而实现复杂水域的清理功能<sup>[15]</sup>。

### 3.2 算法设计说明

#### 3.2.1 目标识别定位算法

结合水面特征提取算法和 Mask 水面图像过滤算法, 对目标图像进行过滤, 在剔除水面特征后,

对于剩下的部分再进行 Canny 轮廓提取算法、Douglas-Peucker 轮廓拟合算法和轮廓发现与定位算法, 即可完成对水面漂浮物的发现和精确定位, 最后通过像素面积计算并与原图像进行分析和比较, 筛选评定出最终的定位结果<sup>[16]</sup>。

经过实际检测(经人工标定的正样本 600 张、负样本 400 张), 算法识别十分稳定, 识别精确度达 97.3%, 处理效果如图 6 所示。目标点匹配特征点筛选后, 在识别过程中可有效降低因水面反光造成的垃圾识别准确度下降的问题, 可有效覆盖中小型水域, 实现水面漂浮物的高效识别<sup>[17]</sup>。

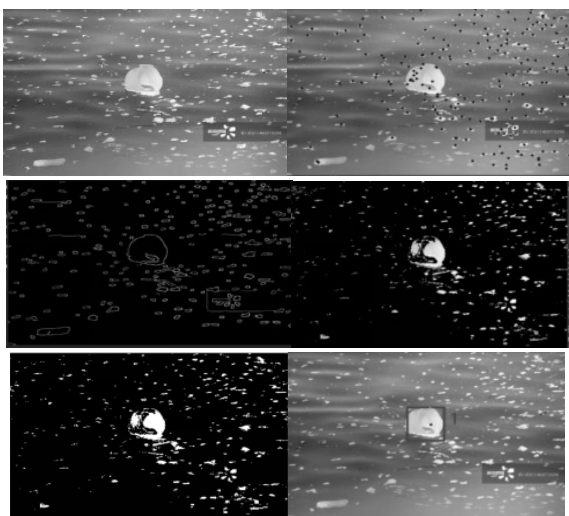


图 6 识别处理效果

### 3.2.2 交互界面设计

以无人机巡航控制软件反馈为基础建立人船交互系统, 通过船上图传设备进行远距离图像传输, 以 PC 端软件进行信息收集和远程控制, 可实时监控水面状况, 并出具污染情况报告, 便于操作者进行标注清理。具体的人船交互界面如图 7 所示。

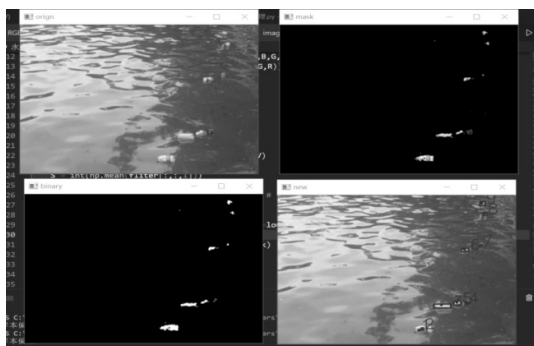


图 7 交互界面

## 4 航行规划设计

由于现行船舶航点规划开源平台较少, 故选择无人机航点规划开源平台进行对接, 使用水中机器

人相关固件即可实现通信。

### 4.1 硬件配置

船体上搭载有乐迪 SE100 M8N 高精度定位罗盘, 内置有先进的接收芯片 UBX-M8030(M8), 在双模模式下定位精度可达 0.5 m, 测速精度可以达到 0.1 m/s, 使用 NMEA 协议即可与开源自动驾驶仪软件程序实时通信。

### 4.2 Ardupilot 介绍

ArduPilot 是一种专为无人机构建的开源自动驾驶仪软件程序, 该软件程序由开发人员和爱好者组成的庞大群体不断更新和改进, 从最初为开源 Arduino 微处理器构建的相当简单的软件起步, 不断壮大和复杂化, APM 项目如今已兼容众多无人机平台。目前, 该程序内含超过 70 万行代码, 是一种非常精细的控制系统。

### 4.3 航线规划

水面清理船操作者通过手机 APP 或者 ArduPilot 软件规划任务航线, 完成后借助无线通信模块(蓝牙/数传)将规划好的航线发送到小船的控制板蓝牙或者数传接收端。控制板对蓝牙或者数传接收到的数据进行解析, 把收到的航线任务存放到 EEPROM 中, 为将要执行的航线任务做好航点准备。采用手机 APP 或者 ArduPilot 发送解锁、启航命令, 然后切换 AUTO 模式, 小船即开始执行 auto 模式。在 auto 模式下, 小船会不停地从 EEPROM 中读取目标任务点与实际任务点进行对比, 然后通过位置 PID 控制, 姿态 PID 控制, 最终输出需要的控制量的 PWM 到小船上的电调, 进而通过控制电机的旋转大小实现小船位置的调节, 从而完成航线任务规划<sup>[18]</sup>, 航点规划图如图 8 所示。



图 8 ArduPilot 航点规划

### 4.4 自主返航

由于水面上几乎不存在障碍物, 使用自主返航

成为一个不错选择。本文中自主返航系统主要依靠 GPS 定位模块和 MPU6050 3 轴陀螺仪模块实现。GPS 定位模块拟采用 S1216F8-BD GPS+北斗双模定位模块, 将其与清污船的主控进行串口通信实现, 主控程序按照规定的协议进行解析串口数据, 很容易获取清污船的经纬度坐标, 可规划清污船返航的路线, 然后再通过 MPU6050 3 轴陀螺仪确定清污船的航向角, 按照规划路线返回至出发的位置<sup>[19]</sup>。

### 5 仿真模拟分析

触水船体是整船的重要组成部分, 也是受力的主要部位和重要的承载件及传力件, 除了要承受水面的各种作用反力和载荷, 还需承受船体转弯时的力矩。由于载荷的性质是动态的, 因此有必要对船体进行流固耦合特性和结构力学特性仿真与分析, 了解清污船在水面以一定速度移动时的排水状态, 并确保在受到各向应力和转弯扭矩的情况下, 船体结构稳定、应力应变良好。

#### 5.1 有限元分析模型

使用 Fluent 仿真模拟软件对船体主结构在水中以近极限速度 10 m/s 运动时, 船体结构的应力应变、

湍流动能以及附近水流状态等情况进行了模拟, 为船体的搭建和运行情况的预知建立了良好基础。

#### 5.2 建立船体物理模型

在保证主体结构完整和几何尺寸准确的前提下, 对船体模型进行适当简化, 忽略了小倒角和制作工艺上产生的变形误差, 删除了一些非必要结构, 提高了重点受力面和扭转部位的网格质量, 减小了网格的划分难度, 在 Soildworks 中建立了如图 9 所示的双船体模型<sup>[20]</sup>。

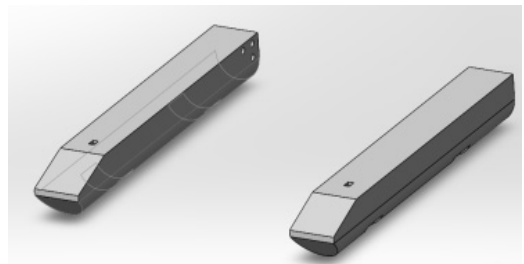


图 9 双船体物理模型

将实际使用的 XPS 材料的弹性模量、剪切强度等相关属性赋予模型, 建立完备的物理模型, 尽可能营造贴近实际运行的环境参数。材料属性如表 1 所示。

表 1 船体的材料属性

名称	内部材料	适用温度/℃	压缩强度/kPa	吸水率/(V/v)	透湿系数/(NG/M.G.PA)
XPS 挤塑板	聚苯乙烯	-50~+70	300	≤1.0	≤3.0

#### 5.3 船体有限元模型的生成

对建立的模型进行检查和修改, 防止模型失真。在网格划分上, 通过多面体网格划分法进行网格划分, 对 1.818 s 内的情况进行分析, 共生成 1 070 668 个节点, 6 375 410 个网格。

#### 5.4 基于 workbench 驱动的双船体仿真分析

##### 5.4.1 关于船体和环境的流固耦合分析

流固耦合特性研究用来分析可变形固体在流场作用下的各种行为以及固体位形与流场的相互作用, 通过模拟可以得到固体在流场中运动时流场的变化及结构的位移、约束反力、应力、应变等参数, 同时还可以观测到流场对物体造成的形变及其大小。通过对照相关参数即可对相应零部件的材料、属性、样式进行调整, 确保实物的稳定性和适用性。

##### 5.4.2 操作流程概述

为更好模拟水中环境, 选取 k-epsilon 湍流模型做标准近壁处理, 设置环境参数为“25℃的液态水”, 分配水流为由船头方向流入船尾方向流出,

水速为 10 m/s。最后经运算迭代得到模拟数据。具体结果如图 10—13 所示。

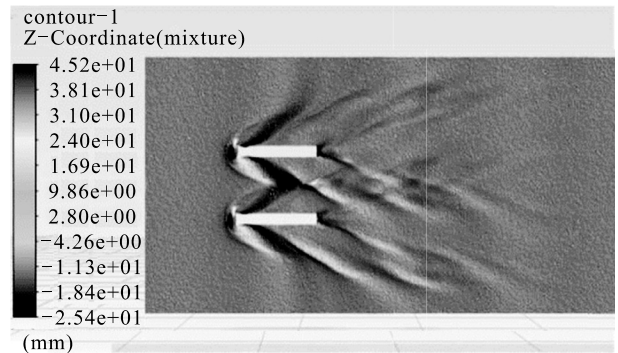


图 10 船体周围的流场压力云图

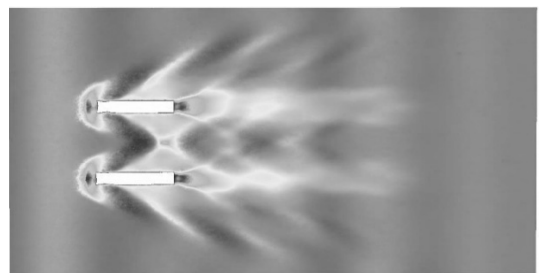


图 11 船航行波形



图 12 船体压力云图

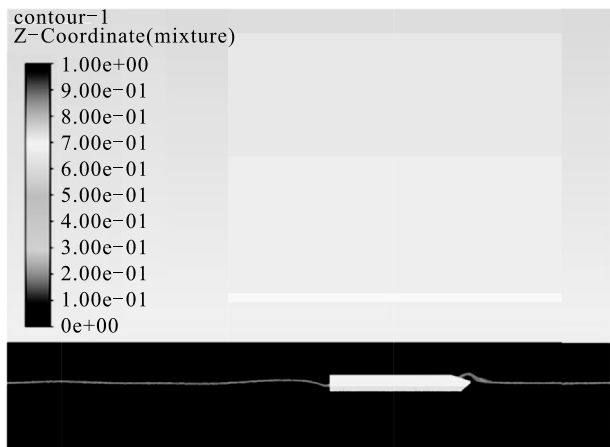


图 13 船体截面处水流压力云图

## 5.5 结论

仿真结果表明: 船体在静水域中以最大速度航行时, 排水情况良好, 船体稳定, 两船体排出的水在船体内部的交互不会影响船体的平稳运行, 可在达到最大航速情况下进行稳定持续作业; 当船体在水中进行差速转弯运动时, 船体自身结构稳定足以抵抗扭转力, 保持船体的完整。船体设计达到可实际使用水平, 可完成既定航行目标。

## 6 结束语

采用双体式船身设计的新型清污船, 垃圾清理效率高、智能化程度高, 具备结构强度高、抗风浪能力强、使用寿命长的优势, 可显著提高中小型水域的水面垃圾清理效率, 促进环境友好型社会发展, 具有良好的市场推广价值。

## 参考文献:

- [1] 刘伯运, 赵帅, 赵强强, 等. 水面垃圾清理机器人[J]. 兵工自动化, 2022, 41(2): 92-96.
- [2] 邵聪, 林森, 刘易松, 等. 一种小型水域水面垃圾清理机器人[J]. 兵工自动化, 2022, 41(5): 32-35.
- [3] 胡宏梅, 浦灵敏, 周成. 基于无人机的社区智慧垃圾服务系统的研究与设计[J]. 电气自动化, 2019, 41(6): 61-63.
- [4] 刘昭青. 荷兰 RanMarine 技术公司建造无人机清除海中垃圾[J]. 航海, 2018(5): 16.
- [5] 杜友威, 周新院. 穿浪双体船的阻力分析与船型优化[J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2019(1): 95-98.
- [6] 袁文鑫, 杜林, 于群, 等. 基于阻力性能的高速双体船水动力构型优化[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(13): 9-13.
- [7] 马庆, 程光, 段效贤, 等. 水面垃圾智能收集装置的实现[J]. 电子世界, 2021(5): 25-26.
- [8] 向耕. 一种新型水面漂浮物拦截装置设计[J]. 科学技术创新, 2021(24): 186-187.
- [9] 金福锦, 郝雨楠, 焦红文, 等. 建筑绝热用石墨改性挤塑聚苯乙烯泡沫板的应用及标准解读[J]. 中国塑料, 2021, 35(9): 109-115.
- [10] HE H W, ZHANG T, YANG Y K. Corrigendum to A facile way to modify carbon fibers and its effect on mechanical properties of epoxy composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 164-174.
- [11] 王晓霞, 李俊刚, 韩涛. 真空加压法制备 TiC<sub>p</sub>/2024 复合材料[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2000(2): 156-158.
- [12] 张琼, 刘翰霖, 李平平, 等. 聚氨酯/二氧化硅复合超细纤维膜的制备及其防水透湿性能[J]. 纺织学报, 2019, 40(2): 1-7.
- [13] 戚相成, 杨国清, 王德意. 氟化协同偶联剂改性纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧树脂的热氧老化特性研究[J]. 大电机技术, 2021(6): 1-9.
- [14] 王德超. 无人测量船使用中“防漏防腐”的若干措施[J]. 全面腐蚀控制, 2020(10): 101-102.
- [15] 张凯, 盛林华, 倪杰, 等. 水面保洁子母船多模式控制方法研究[J]. 控制工程, 2021, 28(11): 2185-2192.
- [16] 梁秀梅. 无人艇视觉系统目标图像特征提取与识别技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [17] 鲍佳松, 黄细霞, 姬克, 等. 基于深度卷积神经网络的水面漂浮物分类识别[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(10): 136-138, 146.
- [18] 潘伟, 董其林, 许小卫, 等. 考虑通航环境因素的智能船舶航线规划[J]. 上海海事大学学报, 2021, 42(3): 76-84.
- [19] 郑珺瑀, 林盛鑫, 余力. 基于里程计与机器视觉的无人机自主返航系统[J]. 东莞理工学院学报, 2021, 28(5): 21-24.
- [20] 张兰生, 李杨, 徐超, 等. 基于 ANSYS Workbench 的驱动桥壳动力学特性仿真与分析[J]. 工具技术, 2021, 55(11): 64-68.