

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202503051



# 近海漂浮垃圾收集器的设计与实现

朱来发<sup>1,2</sup>, 谭忠诚<sup>1</sup>, 金花雪<sup>1</sup>, 杨钟莹<sup>1</sup>, 何隆榕<sup>1</sup>, 范伟<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

2. CAD/CAM 福建省高校工程研究中心(莆田学院), 福建 莆田 351100)

**摘要:** 根据已有漂浮垃圾收集装置的实际工作情况,采用自吸和反推结合的结构,提出一种近海漂浮垃圾收集器的设计方法。首先,应用自吸功能引导靠岸垃圾进入收集器,在不影响自吸功能的情况下,利用反推功能,通过差动控制实现高机动性及电机复用。然后,进行样机试制,以验证文中方法的可行性。结果表明:自吸与反推的协同工作可提升收集器对分布广、紧贴岸的漂浮垃圾的处理能力,大幅提高收集效率;样机测试中,在漂浮垃圾分布约为  $0.3 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$  的静水面上,平均收集速率为  $8 \text{ 个} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

**关键词:** 近海漂浮垃圾; 收集器; 自吸功能; 反推功能

中图分类号: TH 122

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)04-0386-07

## Design and Implementation of Offshore Floating Garbage Collector

ZHU Laifa<sup>1,2</sup>, TAN Zhongcheng<sup>1</sup>, JIN Huaxue<sup>1</sup>,  
YANG Zhongying<sup>1</sup>, HE Longrong<sup>1</sup>, FAN Wei<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. The Engineering Research Center for CAD/CAM of Fujian Universities (Putian University), Putian 351100, China)

**Abstract:** Based on the operational conditions of existing floating garbage collection devices, a design method for an offshore floating garbage collector was proposed by adopting a structure combining self-priming and reverse pushing. The self-priming function was applied to guide the floating debris into the collector, while the reverse pushing function was used to achieve high mobility and motor multiplexing through differential control, without compromising the self-priming function. A prototype was subsequently developed to verify the feasibility of the proposed design. The results demonstrated that the collaborative operation of self-priming and reverse pushing could improve the collector's ability to handle floating garbage that is widely distributed and closely attached to the shore, thereby greatly improving collection efficiency. During the prototype testing, on the still water surface with a floating garbage density of approximately  $0.3 \text{ pieces per square meter}$ , the average collection rate was  $8 \text{ pieces per minute}$ .

**Keywords:** offshore floating garbage; collector; self-priming function; reverse push function

近年来,海洋垃圾污染已成为国际广泛讨论的重大经济、政治、环境议题。目前,海洋中约有 7 500

收稿日期: 2025-03-29

通信作者: 朱来发(1977—),男,高级实验师,主要从事机械设计和智能制造的研究。E-mail: hquetc\_zhu@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275530);福建省自然科学基金资助项目(2020J01086);福建省厦门市产学研项目(2024CXY0219);CAD/CAM 福建省高校工程研究中心开放基金资助项目(K202205)

万 t 至 1.99 亿 t 塑料垃圾, 占海洋垃圾总质量的 85% 左右<sup>[1]</sup>。福建省厦门市已率先成立海上环境卫生管理站, 每天对责任海域进行巡回垃圾清理, 实现海上打捞收集<sup>[2]</sup>。

现有两种海洋漂浮垃圾处理方式, 一是传统的人工打捞, 其优势在于高度的灵活性和对漂浮物的精确判断, 当面对一些复杂地形(如海岸边、礁石、桥墩、桥洞等地)时, 能够精准、快速地进行打捞, 但人工打捞存在安全隐患, 且需耗费大量精力; 二是机械全自动或半自动收集漂浮垃圾, 较典型的海洋垃圾收集装置有海上垃圾桶、水上垃圾拦截浮体和专业垃圾清理船等<sup>[3]</sup>。目前, 李文婧等<sup>[4]</sup>提出一种智能海洋垃圾桶的设计方法, 通过垃圾桶内部的升降装置实现对垃圾的自动收集, 通过安置超声波传感器感应垃圾桶的剩余存储空间, 实现垃圾溢满提醒。陈俊均等<sup>[5]</sup>设计一种采用棘轮传动机构原理的海洋漂浮物收集器, 利用波浪能带动装置旋转产生负压, 吸引装置附近的漂浮物, 将漂浮物收集至垃圾网袋中。占金锋<sup>[6]</sup>采用双体船型, 选用排链式打捞装置, 设计一种新型 40 m 双体全自动水上垃圾清扫船, 该船具有功能全、性能强、适用广、效率高等特点。宋怡等<sup>[7]</sup>设计一款专门优化海洋环境的高效垃圾收集装置, 采用改进的卷积神经网络(CNN)图像处理技术, 实现目标检测和位置定位。孟泓宇等<sup>[8]</sup>设计一种既可清理固体垃圾, 又可清理液体垃圾的回收船。张志高等<sup>[9]</sup>提出一种基于循环梯级的结构, 实现水面漂浮垃圾的采集、传输和储存。张智远等<sup>[10]</sup>从机械结构和控制模块两个方面进行改进, 设计一款太阳能智能海洋漂浮垃圾收集船。林思源等<sup>[11]</sup>研制出一种以波浪能和太阳能为动力, 由 V 字型浮围栏和垃圾收集系统组成的近海漂浮垃圾自驱动收集装备。朱永强等<sup>[12]</sup>设计一种海洋垃圾回收船, 实现垃圾的收拢、导流、传输和分流。

海上垃圾桶在风浪较小的封闭水域具有较好的收集效果, 但面对风浪大且垃圾分布广的近海沿岸等开阔水域, 则收集效果不佳; 海上垃圾收集船因过于庞大而无法对沿岸浅水水域的漂浮垃圾进行收集, 此外, 当面对封闭水域时, 存在设备搬运困难、运行成本高等问题。基于此, 本文提出一种近海漂浮垃圾收集器的设计方法。

# 1 近海漂浮垃圾收集器的设计

## 1.1 设计方案

近海漂浮垃圾收集器设计框图, 如图 1 所示。设计内容包括电路连接、电器元件选择和系统结构设计。整个装置可遥控, 有效范围约为 800 m, 能够轻松应对近海海面等工作环境。

近海漂浮垃圾收集器工作示意图, 如图 2 所示。收集器两侧及后侧封闭, 由水下无刷电机驱动螺旋桨, 在装置内制造负压并形成一定的液面差, 收集器前方一定范围内形成流向装置中间的单向水流, 将漂浮垃圾引导到收集器的收集装置中。凭借“吸引”能力能更好地处理贴岸的漂浮垃圾。收集器在前方形成的负水压的强弱可由无刷电机控制, 在反推装置的配合下, 负水压的强弱不会影响收集器的运动。

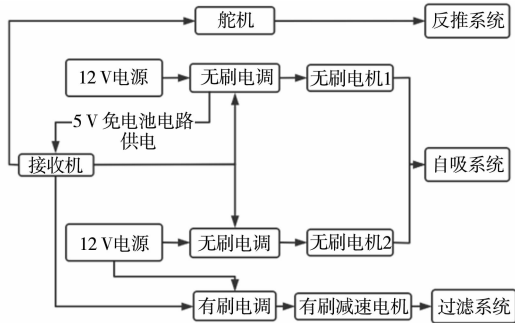
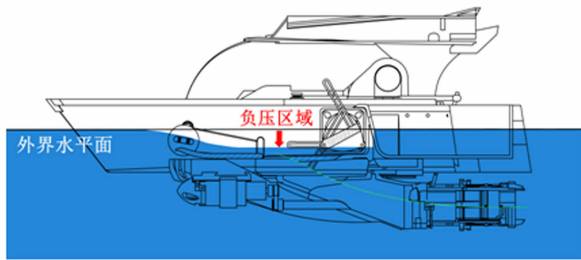
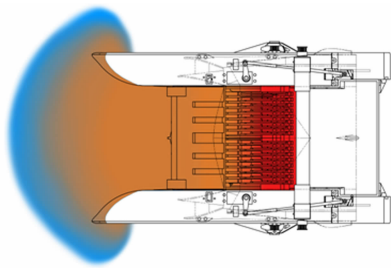


图 1 近海漂浮垃圾收集器设计框图  
Fig. 1 Design block diagram of offshore floating garbage collector



(a) 液面差



(b) 负压范围

图 2 近海漂浮垃圾收集器工作示意图

Fig. 2 Work schematic diagram of offshore floating garbage collector

反推系统能够线性调节反推比例的大小,与无刷电机配合,在提供吸力的同时,实现多种运动模式。自吸作用与反推作用协同工作,可提高收集效率,在处理贴岸漂浮垃圾时,还可依靠吸引力让船靠岸即可收集垃圾,极大地降低了搁浅的风险,填补了传统漂浮垃圾收集装置难以对贴岸漂浮垃圾收集的空缺。为了尽量线性控制反推比例,在反推尾喷中设计开合结构,引导水流分流。反向水流形成的向后推力与向后水流形成的向前推力的合力即整个收集装置单侧的推力。通过改变左、右两侧的推力,可实现差动转向、原地掉头等功能。部分反推时尾喷口的水流流向,如图 3 所示。

由于驱动和形成自吸的水泵复用,要求水流通道具备较高的过滤能力,防止细小垃圾被吸入尾喷口,从而影响设备的行动能力。设计一种双层错位格栅式过滤网,可有效提高过滤能力。同时,勾爪的旋转运动,将过滤网上的垃圾转运到后方的储存箱中。过滤网和勾爪两个部件组成了过滤装置。过滤系统,如图 4 所示。

由于海水具有腐蚀性,与海水直接接触的部件需选择具有较强抗腐蚀能力的材料。结合材料加工性能,选择聚乙烯为基础材料<sup>[13]</sup>。考虑到装置只在工作时间需要浸入水中,故其他部件不做特殊处理。

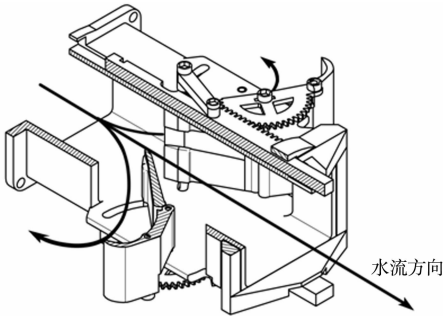


图 3 部分反推时尾喷口的水流流向  
Fig. 3 Water flow direction of tail nozzle during partial reverse pushing

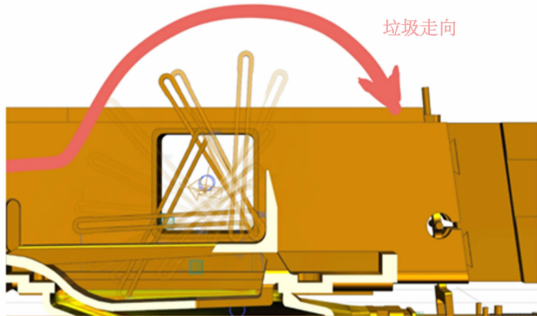


图 4 过滤系统  
Fig. 4 Filtration system

1.2 电控设计

电器元件选装,如表 1 所示。

表 1 电器元件选装  
Tab. 1 Optional installation of electrical components

类别	电子配件	型号	数量
动力部分	水下无刷电机	12 V 无刷电机(200 W)	2
过滤部分	减速电机	25GA-370 型(5.4 W)	2
反推部分	舵机	MG996R 型	2
电控部分	电调	30 A 无刷电调	2
		双路单向有刷电调	1
	接收机	MC9002 型双天线接收	1

电器元件有以下 6 种连接方式。

- 1) 两个 12 V 电源分别直接连接 2 个无刷电调。无刷电调可通过免电池电路(BEC)为接收机提供 5 V 电压。为避免两个无刷电调的供电冲突,将其中一个电调的 BEC 供电线挑出分离。
- 2) 无刷电调为接收机供电的同时,能够控制接收机的调速,对水下三相无刷电机进行调速。
- 3) 舵机额定电压为 5 V,可由接收机直接供电,同时控制舵机摇杆位置,再通过摇杆、连杆、齿轮齿条等装置,对反推量进行线性控制。
- 4) 1 个 12 V 电源另外连接有刷电调。有刷电调与接收机通过有线连接,需去掉一个供电 BEC 供电线。有刷电机直接连接有刷电调。共有两个有刷减速电机,且只需要单向运转,因此,选用有刷双路单向电调。
- 5) 接收机连接方式<sup>[14]</sup>。一通道连左边舵机,二通道连右边电机,三通道连左边无刷电调,四通道空缺,五通道连右边无刷电调,六通道空缺,七通道空缺,八通道连有刷电调。
- 6) 混控设置。 $\text{二通道信号值} = \text{一通道信号值} \times 100\%$ ;  $\text{一通道信号值} = \text{二通道信号值} \times (-50\%)$ ;

五通道信号值=三通道信号值×100%。

1.3 整体结构及工作原理

海洋垃圾收集器整体结构设计紧凑, 多处使用卡扣、榫卯等结构, 组装简单。船体下方使用浮块进行填充, 提高船体的浮力并减小船体运动阻力; 水下无刷电机及电池设计在靠下位置, 保证装置有良好的稳定性。近海漂浮垃圾收集器的整体结构, 如图 5 所示。

主动吸引模块, 如图 6 所示。水下无刷电机通过同步带与螺旋桨相连, 可有效减少噪音和抖动, 降低装配要求, 在保证扭矩传输的同时, 能防止螺旋桨卡死而导致的电机过载。通过螺旋桨产生向后的高速水流, 在进水口及前板位置形成较大的负压。两侧电机功率相同, 产生等大的推力, 最终产生的单侧推力大小由后方反推尾喷控制。

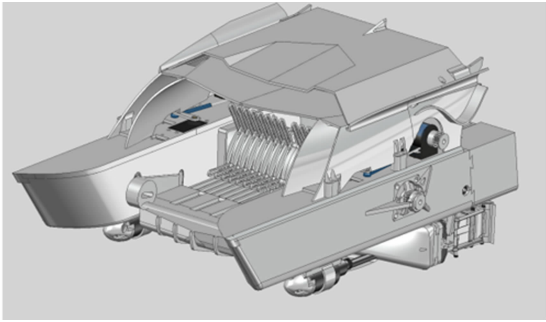


图 5 近海漂浮垃圾收集器的整体结构

Fig. 5 Overall structure of offshore floating garbage collector

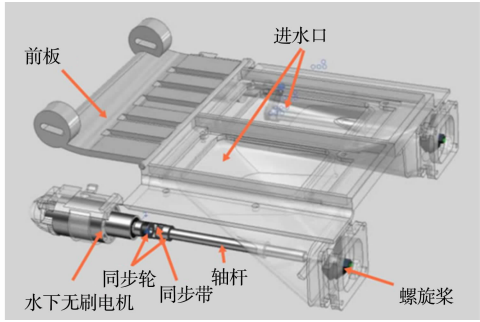


图 6 主动吸引模块

Fig. 6 Module of active suction

由螺旋桨产生的高速水流将穿过反推尾喷。舵机为反推尾喷装置的动力装置, 连杆及齿轮、齿条机构组合而成的传动结构将舵机旋转运动转化为反推尾喷上齿条的直线运动。通过调节舵机角度, 可较为线性地控制反推尾喷内分流板的开合度, 以此控制水流所占比例的大小。通过对两侧推力的协同控制, 可以产生向前或向后的推力。控制控制两侧推力差, 形成横摆力矩, 可获得以任意转向半径进行转向的能力。尾喷反推模块, 如图 7 所示。

当螺旋桨工作时, 水流将从常压区流向负压区。工作状态下水流情况示意图, 如图 8 所示。图 8 中: 箭头表示反推比例为 0% 时的水流路径。漂浮垃圾将随水流进入收集装置, 并由过滤网进行分离。

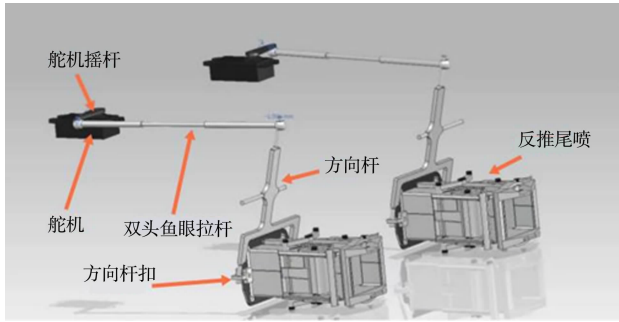


图 7 尾喷反推模块

Fig. 7 Reverse push module of tail nozzle

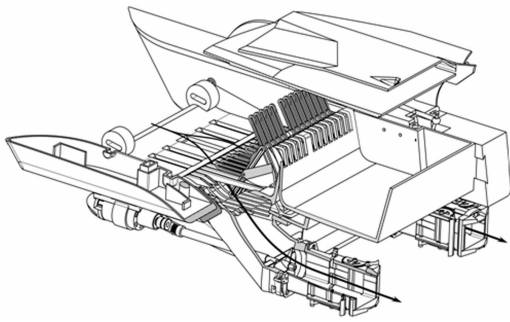


图 8 工作状态下水流情况示意图

Fig. 8 Schematic diagram of water flow situation under working condition

因减速电机不能防水, 为提高设备稳定性, 将其设置于水面之上, 减速电机通过同步带驱动三角转子旋转。三角转子装配图, 如图 9 所示。转子带动勾爪旋转, 将过滤网上的漂浮垃圾转运到后方的垃圾储存箱中, 结合等边曲线(勒洛三角形)的特殊运动轨迹, 可以使勾爪达到水平时处在更低的位置, 尽可能地减小将漂浮垃圾往前推的趋势。

样机前板材料密度略大于水, 两侧圆柱为中空结构, 前板可上下浮动, 自动调整吃水深度。前板上移示意图, 如图 10 所示。图 10 中: 箭头表示水流路径, 在快速前进时, 水流将抬起前板, 更多水流直接从前板下方流入, 降低整体的阻力, 并保证足够的进水量, 有效提升最大速度。由于材料密度略大于水, 因此, 当速度减慢时, 前板后端会自动下沉, 使进水通道依旧保持在前板上方。



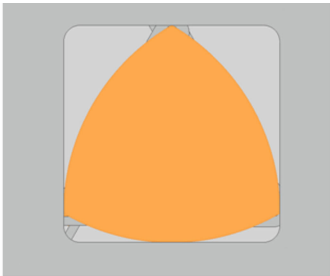


图 9 三角转子装配图

Fig. 9 Assembly diagram of triangle rotor

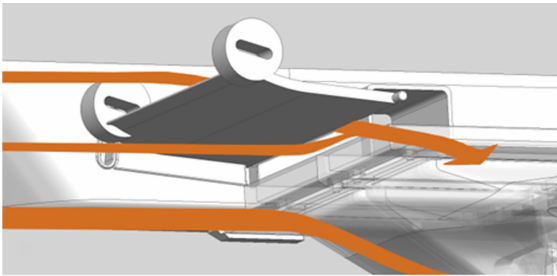


图 10 前板上移示意图

Fig. 10 Schematic diagram of front board moving up

2 数据分析

2.1 基本尺寸设计

调查结果显示,中块和小块垃圾占漂浮垃圾的 98% 以上<sup>[15]</sup>,且垃圾分布范围广而远。这要求装置具有良好的行动力,尽可能地发挥远程遥控操作的优势。近海漂浮垃圾收集器的尺寸,如图 11 所示。

近海漂浮垃圾收集器的最高水位线为 252.50 mm,最低水位线为 192.50 mm。超过最高水位线,可能会导致进水;低于最低水位线,可能因进水不足引起水泵空转。通过配重使水位接近最高水位线,从而充分保证进水量,有利于垃圾随着水流进入收集器中。

2.2 部分构件的有限元分析

2.2.1 方向杆有限元分析 MG996R 型舵机的额定扭矩为 13 kg · cm,舵机摇杆臂长为 20 mm,力传动比约为 0.92,经计算可得方向杆最大负载约为 58.6 N,将其作为方向杆载荷。

方向杆有限元分析,如图 12 所示。由图 12 可知:圆杆与主板接触位置变形最大;方向杆的最小屈

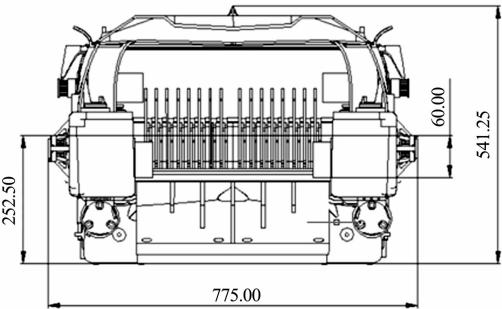
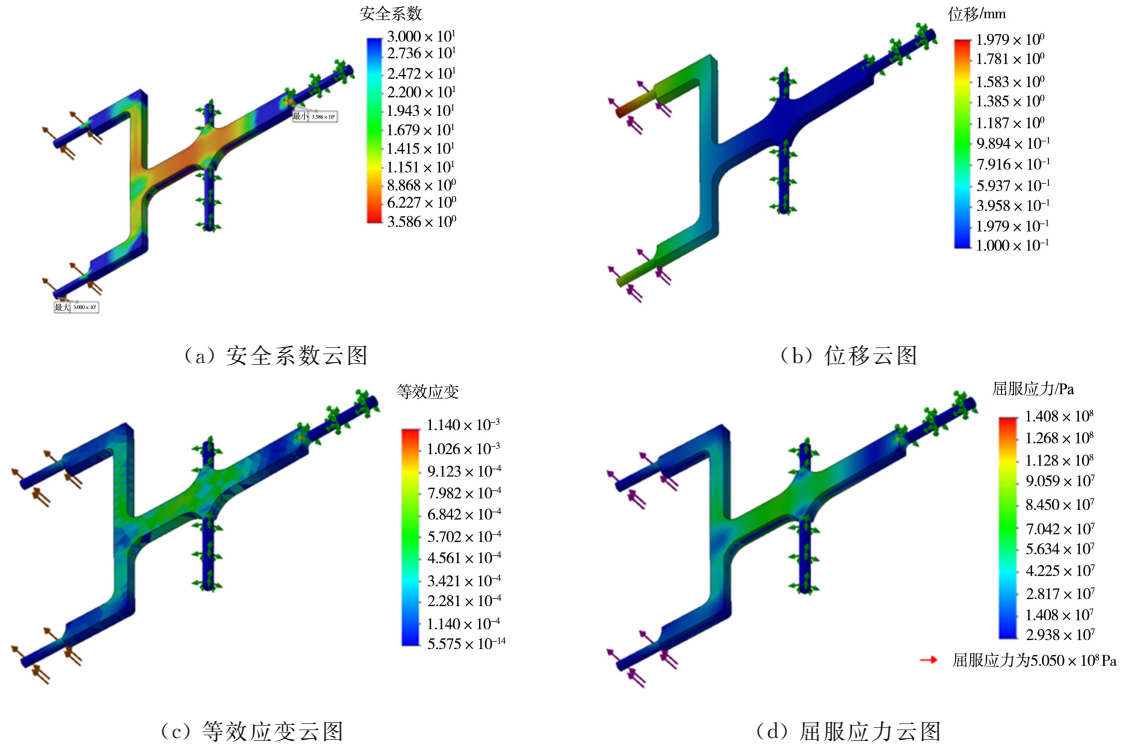


图 11 近海漂浮垃圾收集器的尺寸(单位: mm)

Fig. 11 Dimensions of offshore floating garbage collector (unit: mm)



(a) 安全系数云图

(b) 位移云图

(c) 等效应变云图

(d) 屈服应力云图

图 12 方向杆有限元分析

Fig. 12 Finite element analysis of directional rods

服应力为 2.938 MPa,最大屈服应力为 140.8 MPa,最大位移为 1.979 mm,最小安全系数为3.6。方向杆的材料为 7075 铝合金,无热处理,屈服强度为 503 MPa,材料强度满足要求。

2.2.2 反推尾喷拉杆有限元分析 电机最大推力为 19.6 N,当反推比例为 100%时受力最大。结合尾喷口的几何参数,受力点等效于分流板中心位置,经计算可得反推尾喷拉杆的最大压力为 2.5 N。由于该结构为二力杆件,压力沿杆轴向。

将 2.5 N 作为杆件载荷进行有限元仿真。反推尾喷拉杆有限元分析,如图 13 所示。由图 13 可知:变形最大处为轴孔位置;反推尾喷拉杆的最小屈服应力为 113.3 Pa,最大屈服应力为 0.428 MPa,最大位移为 5.81  $\mu\text{m}$ ,最小安全系数为 70.0。反推尾喷拉杆的材料选用光敏树脂,屈服强度约为 30 MPa,材料强度满足要求。

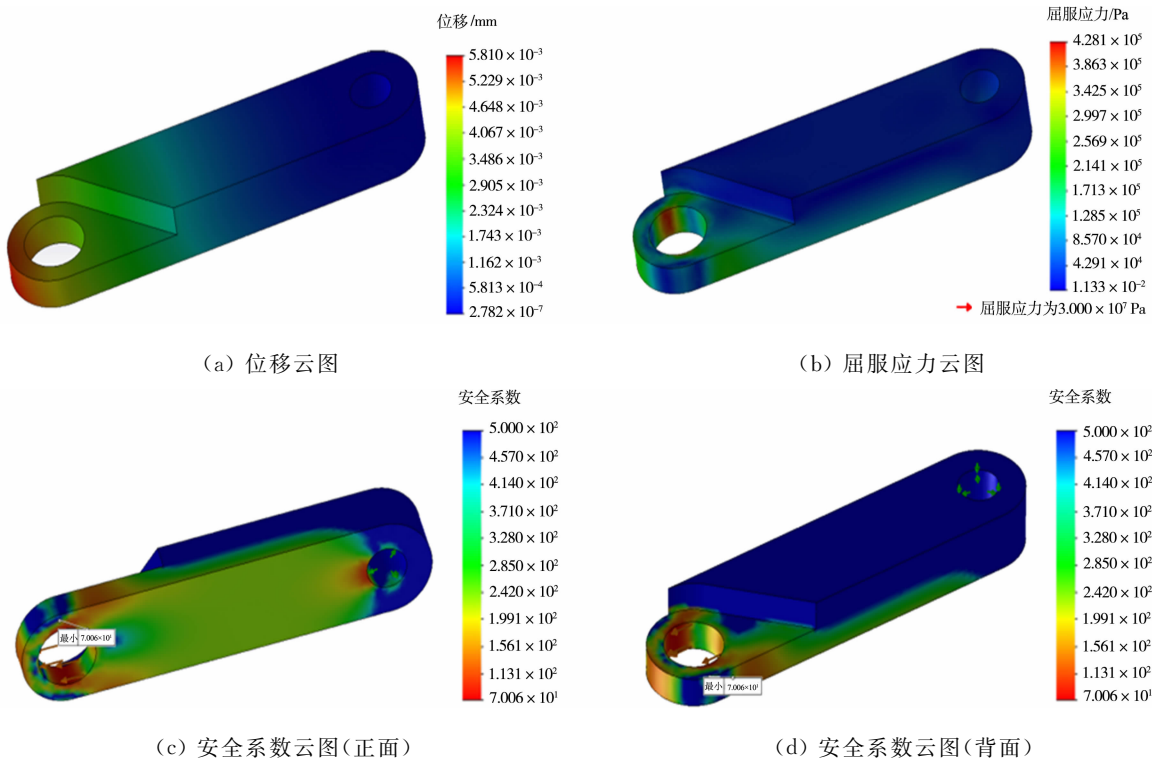


图 13 反推尾喷拉杆有限元分析

Fig. 13 Finite element analysis of reverse push tail nozzle rod

综上可知,主要受力连接件安全系数均大于 3,满足强度要求;变形量均在允许范围内,不存在因过度变形而产生的失效。

2.3 样机实物数据测算

样机静态实拍图,如图 14 所示。

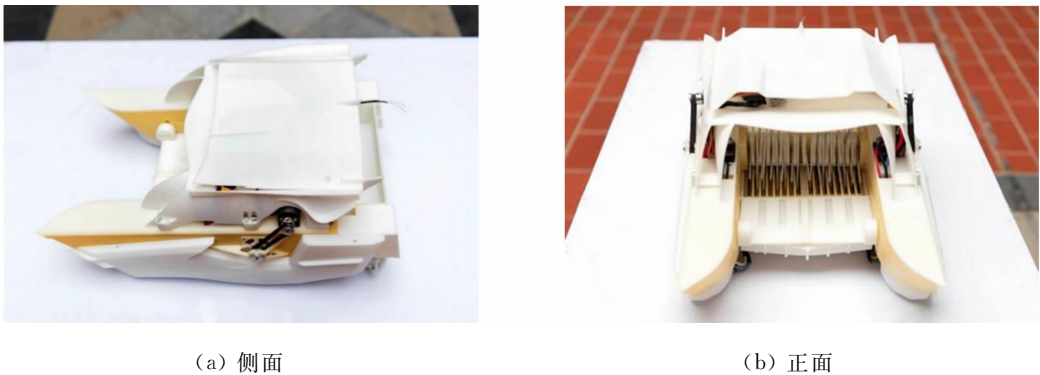


图 14 样机静态实拍图

Fig. 14 Static real shot image of prototype

无风环境下,样机实测数据,如表 2 所示。

样机电池容量为  $9\,000\text{ mA}\cdot\text{h}^{-1}$ ,电压为  $12\text{ V}$ 。整机最大总功率为  $410.8\text{ W}$ ,经计算可得续航时间为  $0.263\text{ h}$ ,根据实测航速,经计算可得续航里程。

表 2 样机实测数据  
Tab. 2 Measured data of prototypes

参数	数值	参数	数值
样机与实物的比例	1.0 : 2.5	质量/kg	2.32
电机推力/N	19.6	最大航速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.7
吸引半径/m	0.4	续航里程/km	0.67

在漂浮垃圾分布约为  $0.3\text{ 个}\cdot\text{m}^{-2}$  的静水面上,平均收集速率为  $8\text{ 个}\cdot\text{min}^{-1}$ ,收集速率较高,但在垃圾靠岸情况下,收集速率会降低。

### 3 结束语

设计一种近海漂浮垃圾收集器,通过自吸功能,有效提高了贴岸漂浮垃圾的收集能力;通过反推控制,实现了收集器的机动性,以及吸力与动力的电机复用。样机试制证明了文中方法的可行性,并验证了收集器对处于复杂地形、贴岸的漂浮垃圾的出众收集能力。通过参数设计,使近海漂浮垃圾收集器能适应国内大部分的工作环境,对垃圾少、范围广、难收集的水域效果更加显著。在样机测试中,样机的最大航速为  $0.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,续航里程为  $0.67\text{ km}$ ,形成的吸引半径为  $0.4\text{ m}$ ,在漂浮垃圾分布为  $0.3\text{ 个}\cdot\text{m}^{-2}$  的静水水面上,平均收集速率为  $8\text{ 个}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在未来的工作中,将进行与其他辅助装置协作的研究,如声呐、AI 等。此外,也可结合 5G 通讯及高空探查,进一步降低工作强度,扩大收集范围。

#### 参考文献:

[1] 王姣姣,杨小明,韦正峥,等. 推进海洋塑料治理和高值化利用[J]. 环境经济,2024(14):39-43.

[2] 高宇,黄海萍,吴侃侃,等. 厦门海洋垃圾防治与管理实践及启示[J]. 海洋开发与管理,2021,38(11):91-96. DOI: 10.20016/j.cnki.hykyfjgl.2021.11.015.

[3] 房瑞,段志勇,刘在智,等. 海洋垃圾治理技术综述[J]. 综合智慧能源,2023,45(5):70-79.

[4] 李文婧,孙榕,刁鹏飞,等. 智能海洋垃圾桶[J]. 科学技术创新,2021(17):179-180.

[5] 陈俊均,陈田嘉,韩露,等. 波浪能海洋漂浮物收集装置设计[J]. 广州航海学院学报,2019,27(3):30-33.

[6] 占金锋. 40 m 双体全自动水上垃圾清扫船的研制[J]. 江苏船舶,2018,35(3):1-3,12.

[7] 宋怡,于鑫,徐云艳,等. 海洋垃圾高效检测与自动收集装置的设计[J]. 南方农机,2025,56(6):111-113.

[8] 孟泓宇,柳青,韩旭,等. 海洋垃圾回收船设计[J]. 机械工程师,2025(1):68-72.

[9] 张志高,吴丽晓,崔志远,等. 一种基于循环梯级的海洋垃圾处理装置[J]. 科学技术创新,2022(25):189-192.

[10] 张智远,刘观,王瑞,等. 太阳能智能海洋漂浮垃圾收集船设计[J]. 科技视界,2024,14(13):82-85.

[11] 林思源,张振伟,刘必劲,等. 近岸海漂垃圾自驱动收集装备的研制及应用[J]. 厦门理工学院学报,2022,30(1):81-86. DOI:10.19697/j.cnki.1673-4432.202201012.

[12] 朱永强,张平霞. 海洋垃圾回收船设计[J]. 机械设计与制造,2020(1):18-20. DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2020.01.005.

[13] 姜良朋,何春霞,王磊,等. 四种植物纤维/高密度聚乙烯木塑复合材料耐海水腐蚀性能比较[J]. 复合材料学报,2019,36(7):1625-1632. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20181023.001.

[14] 邓群. 2.4 GHz 无线航模遥控系统的设计[D]. 宁波:宁波大学,2013.

[15] 孙伟,汤宪春,徐艳东,等. 山东省沿岸海域海洋垃圾分布、组成和变化特征[J]. 科学技术与工程,2016,16(18):89-94.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴跃勤)