

doi: 10.7690/bgzd.2022.05.007

一种小型水域水面垃圾清理机器人

邵 聪^{1,2}, 林 森¹, 刘易松¹, 刘笑麟¹, 王锦融¹

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518000)

摘要: 针对城市小型水域存在的漂浮固体垃圾, 设计一款水面垃圾清洁机器人。通过清理船的垃圾收集装置、抽拉回收装置和驱动机构, 运用人机交互的技术手段实现远程控制打捞清理水面垃圾, 从而保护水体整体环境。使用结果表明: 该机器人具有性价比高、操作便捷、运行可靠、体积小等优点, 能解决传统垃圾收集的诸多弊端。

关键词: 水面垃圾; 回收; 便捷高效; 人机交互

中图分类号: TJ06; TJ450 **文献标志码:** A

Design of A Small Water Surface Garbage Cleaning Robot

Tai Cong^{1,2}, Lin Sen¹, Liu Yisong¹, Liu Xiaolin¹, Wang Jinrong¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Aiming at the floating solid waste in small urban waters, a water surface garbage cleaning robot is designed. Through the garbage collection device, the pulling recovery device and the driving mechanism of the cleaning ship, the remote control of the salvage and cleaning of water surface garbage is realized by means of human-computer interaction technology, so as to protect the overall water environment. The application results show that the robot has the advantages of high cost performance, convenient operation, reliable operation and small size, which solves many disadvantages of traditional garbage collection.

Keywords: water surface garbage; recycling; convenient and efficient; human-computer interaction

0 引言

随着时代的进步和社会的发展, 人类生活及活动场所不断扩大, 垃圾丢弃问题日益严重。湖边绿植落叶或者人为丢弃的塑料瓶、塑料袋等会使湖面有漂浮垃圾, 不仅影响美观, 造成湖水的污染, 而且清理垃圾也较为麻烦^[1]。目前, 水体清理大多依靠人力乘船进行集中打捞, 不仅人力物力耗费较大, 而且受限颇多, 无法在狭窄的水面和一些危险水域开展工作且装载垃圾较少^[2], 不符合当今科技和工业发展的机械化、智能化需求。针对市场上现有垃圾清理装置的局限性, 笔者设计一款主要针对城市小型水体漂浮的固体垃圾清理、回收的垃圾清洁机器人。

1 整体结构设计

笔者设计的水面垃圾清洁机器人整体可分为垃圾收集模块、核心控制模块、电机驱动模块、FPV 图传模块和 pix 自主巡航模块。

1.1 设计理念

1) 在硬件设计方面, 主体采用大体积箱体收集

机构, 船体与垃圾收集装置一体, 采用半入水式船体进行垃圾收集和清洁。收集装置的可拆卸便于垃圾的回收处理, 改进船体外形减小阻力以提升速度, 弥补了现阶段大型垃圾回收船存在的体积大、能耗高及需要专业人士操控等方面的不足。

2) 在控制方面, 通过终端实现对船体远程操控, 进行清洁和低电量自主返航, 实现对垃圾自主识别、路径巡航等功能, 并改进动力系统提高垃圾清洁机器人的运行速度, 提升收集和清洁效率。此外, 为机器人搭载 TDS 浑浊度传感器、温度传感器和超声波传感器, 可实现实时检测水质、监控水位高度的作用。

1.2 3 维模型验证

如图 1 所示, 充分考虑真实的工作环境, 采用双侧船体漂浮支撑, 收集装置固定于双船体中间。因双侧体船的结构在运行中可实现快速灵活的机动性, 使工作效率得到提高。双体船宽度较大, 两船体之间的空间开阔, 为安装容量较大的网状式垃圾收集箱留有足够空间。此外, 双体船宽阔的上部空间可用于安装控制电气系统。

收稿日期: 2022-01-23; 修回日期: 2022-02-27

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目-新工科大学创新型人才培养实践基地建设项目(202002251002); 全国大学生创新创业训练计划项目(2019F0393)

作者简介: 邵 聪(1997—), 男, 黑龙江人, 硕士, 从事机械制造、水面机器人研究。E-mail: 422094981@qq.com。

通信作者: 林 森(1985—), 男, 黑龙江人, 从事机械制造、创新创业研究。E-mail: dmtgls@163.com。

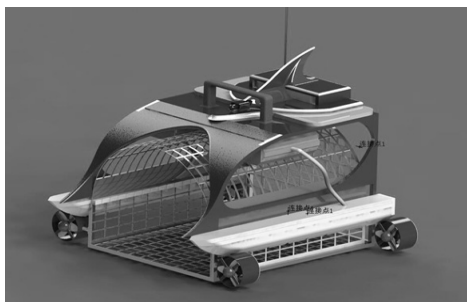


图 1 机器人主体设计

船倾斜后的回复力矩和水线面的惯性矩有直接的关系。简单来说，细长的船体横向受力时由于回复力矩小，容易左右摆动；但采用双侧船体结构，使长、宽比例变小，横向回复力矩是同样排水量的单体船的数倍，进而增加了整体稳定性，使双体船结构在承受较水流及风速的前提下仍能平稳工作。

1.3 垃圾收集模块

如图 2 所示，针对垃圾的回收及倾倒问题，机器人创新地采用网状分体式收集机构，旨在有效收集垃圾的基础上，最大程度地减小水流以及空气所带来的阻力。网状式收集箱由铁丝焊接而成，外层加装防护网，总体尺寸为 $600\text{ mm} \times 320\text{ mm} \times (230 \sim 330)\text{ mm}$ 。整体采用可抽拉双层模块式设计，保证单次回收垃圾数量的最大化；同时，快速通过更换回收筐，可实现垃圾装满之后从机器人内取出并倾倒，并实现多次循环利用，提高工作效率。

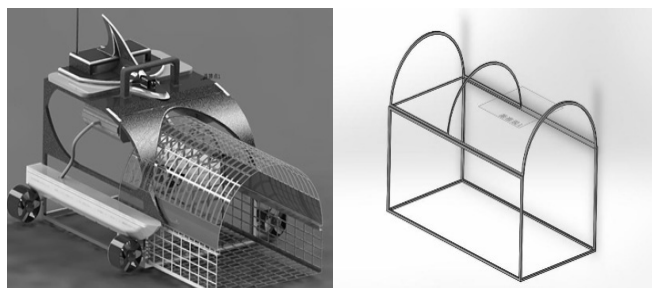


图 2 垃圾收集模块

1.4 防垃圾溢出门模块

在整体设计上，由于垃圾在水面上漂浮会随着水流而无规则运动，使得回收过程中需要机器人不断地调整方向进行收取。当垃圾过多时，容易造成溢出问题。针对此现象，笔者设计一种防溢出门。如图 3 所示，防溢出门分为左右 2 部分，与收集口采用弹性连接。当前进时，利用水的阻力将其顶开，使垃圾顺利进入收集装置，停止或转弯时，弹性机构将门关闭，能有效起到垃圾防溢出的作用且在水下前进时可有效减少阻力^[3]。

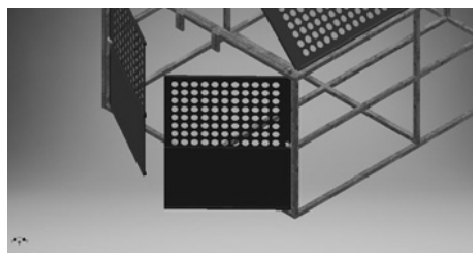


图 3 防垃圾溢出门

1.5 推进器保护装置

由于推进器在工作时要完全进入水面以下，而水下情况复杂多变，需在推进器外部加装有细网编制的保护罩，使水流顺利通过，防止螺旋桨在工作过程中被水草、悬浮的绳子、塑料袋等杂物缠绕而使螺旋桨电机出现抱死的情况，以免影响船体正常运动。

2 整体电控设计

2.1 核心控制模块

装置采用目前技术成熟的基于 2.4G 无线传输的手持遥控器^[4]，机器人核心控制模块采用 STM32 单片机。如图 4 所示，利用传感器采集的数据，检测水体的各项指标。STM32 系列是基于 ARM Cortex-M3 内核的处理器，其优点为：

- 1) 耗能低，分析数据快，能够保证双向伺服电机在运动过程中实现快速差速运动，并保持信号稳定输出；
- 2) 自身配备高速的 I2C、SPI 接口控制器，方便与各路传感器模块进行实时数据联通交互；
- 3) 多路输出的 PWM 模块便于电机在运行中的精准控制；
- 4) AD 采集通道便于实时动态电压值数据的收集，实现对电机工作状态的控制调整。

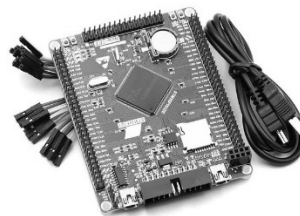


图 4 核心控制模块

2.2 电机驱动模块

如图 5 所示，机器人动力由 2 个 2.4 kg 和 4 kg 推力的水下推进器提供，分布在左右船体前后两端各对称安装，搭载 4 s 电调，实现 PWM 无级变速。该装置结构简单、功能性强、易于安装与操控^[5]，

防水电机推进器内置驱动，高功率、质量轻且体积小^[6]，可实现实时机器人运动姿态控制；同时，推进器内置多重保护，具有过电压、欠电压、过热保护电路，给船体提供足够的动力输出。

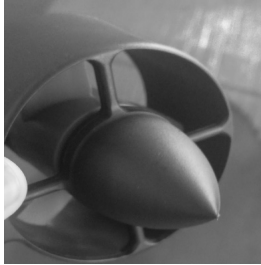


图 5 电机驱动模块

2.3 FPV 图传模块

如图 6 所示，机器人搭载智能 FPV 图传。当垃圾距离过远时，通过图传能实时观察并传输水面情况，帮助快速定位垃圾位置，为提高垃圾收集效率，实现更深度的人机交互提供技术平台。



图 6 FPV 图传模块

2.4 pix 自主巡航

2.4.1 便捷联式惯性导航系统

由于水面垃圾清洁机器人工作场所为室外小型水域，不会有遮挡物遮挡信号，而且行驶的距离也不会太远，船舶通过自主航行模块，预先使用 GPS 测定位置，通过上位机计算出机器人所在坐标、目标坐标方位差以及轨迹方向^[7]，使船体在规划的航迹上巡查，同时可实现前进、转弯和停止等操作^[8]。

航行控制采用 PID 算法线性控制，根据给定值和实际输出值构成控制偏差，然后利用偏差给出合理的控制量，从而实现低电量自主返航。

Mission Planner 作为地面站进行实时定位和姿态控制，串口：COM4 PX4 FMU 波特率 115 200。

2.4.2 航行控制 PID 算法

如图 7 所示，根据给定值和实际输出值构成控制偏差，然后利用偏差给出合理的控制量实现线性控制，使船体在沿着给定方向数值移动的同时能实时监测偏移量进行自主调整。

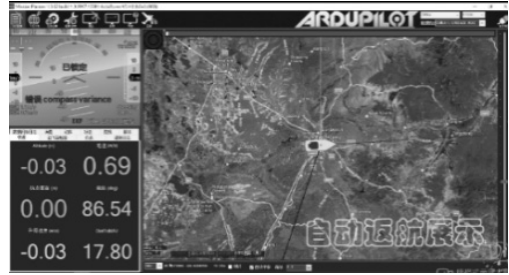


图 7 自主返航控制算法

3 载荷结构数据分析

3.1 有限元分析

分析整体结构，外壳上部为机器人核心控制板、pix 飞控以及 FPV 图传接收器所在位置，外壳受均布载荷。由于设计时外壳采用 ABS 材料 3D 打印，ABS 泊松比为 0.394，弹性模量为 2.2 GPa，在设置为极端外力载荷的情况时，外壳的变形仍然较小，在设计范围之内，可忽略变形给机器人带来的影响。要着重分析受力集中位置的应力集中与疲劳寿命。

外壳有限元分析：如图 8—10 所示，根据计算分析，在机器人运行过程中所受的力为来自风的阻力和电子元器件自身带来的压力；因此，外壳设计为仿鲨鱼鳍的流线型，能最大程度减少风阻。

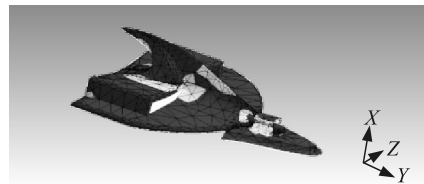


图 8 外壳应变

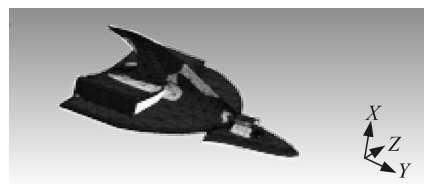


图 9 外壳应力

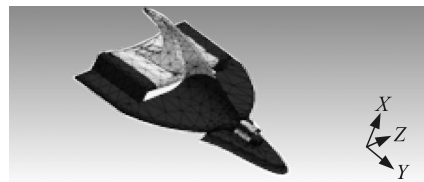


图 10 外壳变形

框架有限元分析：机器人框架由铝型材及碳纤维制成，方便拆卸而且结构的刚度和强度都很强，可有效抵御外界带来的冲击力。根据分析，框架安装推进器的位置为受力最集中的地方，通过结构危险点的应力应变分析表明，在 8.0~10.7m/s 风浪载

荷条件下船体可正常运行且结构可靠。以下为 ANSYS 有限元分析, 如图 11—13 所示。

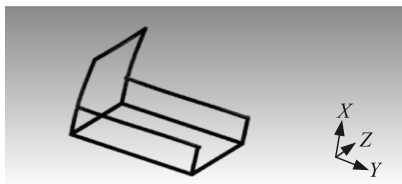


图 11 框架应变

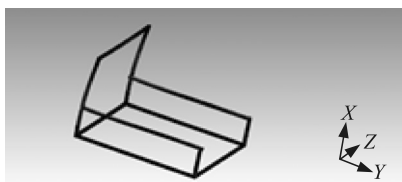


图 12 框架应力

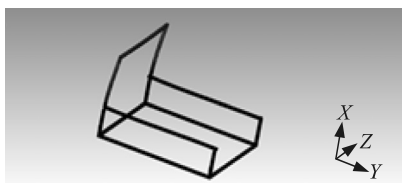


图 13 框架变形

任何形式的排水型船体在自身重力与浮力双重作用下都可以认为是无支撑体。在有波浪的冲击水面上, 船舶还承受有惯性力、水流冲击力和浮力重新平衡所引起的附加荷载。

3.2 水载荷

船体由于重量和浮力沿船长或船宽方向受力分布不均匀而产生纵向、横向的弯曲。对普通型号船(除加大船型外), 由于宽度尺寸偏小, 横向所受弯曲可忽略不计; 而采用双体船设计结构, 加大了宽度比例, 使机器人仅两侧漂浮体受浮力影响, 导致船体的重力和浮力沿船长方向的分布不一致, 在船舶的各个剖面不相等, 所以船体各横剖面上要产生弯矩和剪力也不尽相同。

3.3 冲击载荷

冲击载荷一般在来自水波浪的冲击或是来自空中自由落体对机器人机体的冲击, 会对整体产生影响; 因此, 在机器人结构设计中应充分考虑船体所受冲击。

3.4 边界条件和载荷施加

1) 边界条件: 机器人行驶于水面, 实际为一自由体, 笔者在左船体各框架和舱壁位置, 选取船底中纵析、2 根旁纵析 3 处节点, 取为自由支持, 针对双体船结构的对称性, 在计算载荷时需将受力和

约束分别加在 2 个漂浮体, 在单个上限制位移, 另一漂浮体施加载荷, 计算得出边界值。

2) 载荷计算: 在右片体各强框架和舱壁位置处船底中纵析对应的节点上均匀施加垂向剪力, 模拟横向弯曲状态。

4 机器人参数指标

4.1 待机和工作时长

笔者使用的提供动力的电池为 2 块 5 200 mah 4 s 40 c 的锂电池, 工作电压为 14.8~17 V 可以为 4 个推进器提供强劲的动力, 前置 2 个推进器为 ROV-350 kV/2.4 kg 推力的水下推进器, 后置推进器为 2 个 ROV-560 kV/4 kg 推力的水下推进器。最大总功率为 $P=UI=660$ W, 总航行时间理论值为 28 min, 通过对样机的实际测试, 实际航行测试为满电状况下为 26.3 min 后低电压报警器自动报警, 在水中行进速度约 0.64 m/s, 可以准确快速到达垃圾处, 并对垃圾进行清理^[9]。

低电压自动报警器是可以设置报警电压的集成模块, 笔者设置为每秒电池电压 ≤ 3.6 V 时船体自动报警。

为高压增氧泵供电的移动电源模块为 10 000 mah 的电源, 高压增氧泵的功率为 1 W, 为了响应清洁能源的号召, 此设计的移动电源使用太阳能充电板进行供电, 太阳能充电板的规格为 6 mm×6 mm, 使用 10 块太阳能板串联, 充电功率为 1 V/500 ma。经过实测, 在有光环境下可提供足量的移动电源的电量, 无光环境下使用实际时间超过了 8 h。

fpv 图传系统使用的 12 V/2 500 mah 的锂电池, fpv 图传套件的功率为 70 mW, 实际使用的时间由于过热损耗在 1 h 以上。

4.2 单次垃圾收集量

机器人垃圾收集模块尺寸为长×宽×高=57 cm×32 cm×35 cm, 体积约为 63 840 cm³, 单次理论收集垃圾体积 57 697.5 cm³, 但为了机器人运行稳定以及防止收集垃圾回程中造成二次泄漏, 单次机器人垃圾收集量为 5 000 cm³。

4.3 制作成本

在机器人整个制作当中, 标准结构件及电器件需要购买, 通过 3D 打印、激光切割、车床、钻床等工具按尺寸要求自行制作结构拼接而成, 电路板根据要实现的功能自行焊接, 可降低制作成本。