

面向船体壁面清洗的智能水下机器人控制系统优化

王浦勋¹, 逢雨婷²

(1. 青岛炬荣工程科技有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 山东科技大学, 山东 青岛 266555)

摘要 针对船体壁面污染物人工清洗效率低、能耗高的问题, 本研究设计了一款面向船体壁面清洗的智能水下机器人控制系统。该系统采用分布式架构, 集成主控制器、推进控制、清洗执行、环境感知和通信模块, 通过硬件系统优化、软件分层设计和能量管理策略实现高效清洗。基于刷毛与壁面作用机理建立清洗率模型, 提出自适应控制算法动态调整刷盘参数, 并采用改进 A* 算法优化路径规划, 以期为水下机器人清洗性能优化提供理论参考。实验结果表明, 当机器人移动速度 0.2 m/s、刷盘转速 200 r/min 时, 清洗效率达 388 m²/h, 能耗 163 J/m², 姿态控制精度 $\pm 2.5^\circ$, 满足船体壁面清洗的实际工况需求。

关键词 船体壁面清洗; 水下机器人; 控制系统; 清洗性能优化

中图分类号: TP242

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.011

0 引言

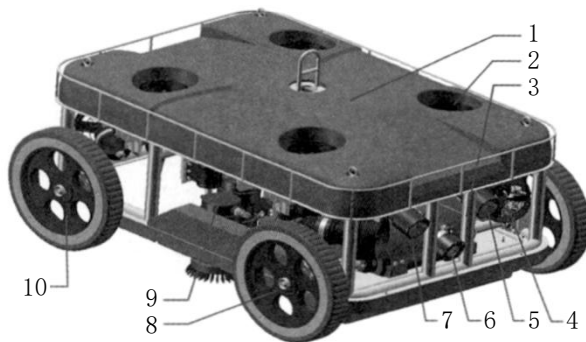
随着水产养殖工船和大型船舶不断发展, 船体壁面附着的藻类、贝类等污染物极大地影响航行效率, 也破坏养殖环境, 传统人工清洗方式存在诸多问题, 如劳动强度大、作业风险高、清洗效率低等, 亟需自动化清洗装备。当下的水下清洗机器人还存在不足, 如控制系统整合度低、清洗参数适配性差、能耗控制不到位等情况, 无法应对复杂壁面的高效清洗需求。本文依托 STM32H743IGH6 主控制器创建分布式控制系统, 通过硬件模块化设计, 软件分层架构以及多算法融合改良, 实现机器人贴壁稳定性、清洗效率和能耗的协同提升, 从而为船体壁面自动化清洗提供解决办法。

1 机器人控制系统总体设计

1.1 硬件系统架构

面向船体壁面清洗的智能水下机器人采用分布式控制系统架构, 主要由主控制器、推进控制模块、清洗执行模块、环境感知模块和通信模块组成(见图 1)。主控制器选用 STM32H743IGH6 微处理器, 集成浮点运算单元和高速外设接口, 可实现多任务实时调度。推进系统配置 8 个无刷直流推进器, 其中水平方向 4 个负责机器人姿态调整, 垂直方向 4 个提供贴壁吸附力, 单个推进器最大功率为 150 W, 额定转速 3 000 r/min。

清洗执行模块包含 4 个独立驱动的刷盘单元, 每个单元由 24 V 直流减速电机驱动, 通过增量式编码器实现转速闭环控制, 控制精度可达 ± 1 r/min。环境感知模块集成深度传感器(量程 0~100 m, 精度 ± 0.1 m)、姿态传感器(航向精度 $\pm 0.5^\circ$, 倾角范围 $\pm 180^\circ$)和双目视觉系统, 采样频率均配置为 100 Hz。通信采用脐带缆传输方式, 集成 2 芯电源线(300VDC)和 4 芯屏蔽网线(100 Mbps), 实现控制指令与视频数据的双向传输^[1]。



(注: 1-浮力材; 2-垂直推动器; 3-框架; 4-水平推进器; 5-照明灯; 6-摄像机; 7-驱动部件; 8-主动轮; 9-清洗部件; 10-从动轮)

图 1 清洗机器人

作者简介: 王浦勋(1989-), 男, 本科, 研究方向: 水下机器人。

1.2 软件分层设计

控制系统软件采用分层架构设计,分为感知层、决策层和执行层。感知层负责环境数据采集与预处理,通过卡尔曼滤波融合多传感器数据,实现机器人位姿估计,状态估计更新频率为50 Hz。决策层基于模型预测控制(MPC)算法生成运动轨迹,根据壁面污染物分布特征动态调整清洗路径,路径规划周期为200 ms^[2]。执行层采用PID控制算法实现推进器和刷盘的精确控制,其中推进器速度环PID参数为:比例系数0.8、积分时间常数0.1 s、微分时间常数0.02 s;刷盘转速环PID参数为:比例系数0.5、积分时间常数0.05 s、微分时间常数0.01 s。系统软件基于ROS2平台开发,核心功能模块包括设备驱动包、状态估计算法包、路径规划包和控制算法包,各模块间通过话题(Topic)机制实现数据交互,消息传输延迟控制在10 ms以内。

1.3 能量管理策略

为延长水下作业时间,系统设计了多模式能量管理策略。采用24 V/100 Ah磷酸铁锂电池组作为主电源,通过DC-DC转换器为各模块供电,转换效率达92%。能量管理系统实时监测电池SOC(State of Charge),当SOC低于20%时自动触发低功耗模式,关闭非必要传感器,降低推进器功率输出。建立能耗模型实现能量优化分配,模型考虑不同作业阶段的能耗特征:贴壁吸附阶段功耗约300 W,移动清洗阶段功耗约500 W,待机阶段功耗≤50 W。通过动态调整机器人移动速度和刷盘转速,实现单位清洗面积能耗控制在163 J/m²以下。电池管理系统具备过充、过放、过流保护功能,充放电循环寿命≥2 000次^[3]。

2 清洗性能优化算法

2.1 刷盘参数优化模型

基于刷毛与壁面相互作用机理,建立刷盘清洗性能优化模型。通过扫描电子显微镜观察发现,船体壁面污染物主要由三层结构组成:表层为0.1~0.3 mm厚的黏液层,中层为2~5 mm的藻类群落,底层为0.5~1 mm的钙质附着层。刷毛与壁面的作用过程可分为三个阶段:弹性变形阶段刷毛弯曲角小于15度、塑性接触阶段刷毛弯曲角介于15~30度之间和疲劳断裂阶段刷毛弯曲角大于30度。定义清洗率为有效清洗面积与理论清洗面积的比值,其中有效清洗面积需满足污染物残留厚度不超过50 μm的区域面积,计算公式如下:

$$e = \frac{N \cdot L \cdot \delta}{v} \cdot \omega \quad (1)$$

式(1)中,刷毛层数取值范围为2~6层,刷毛有

效长度为0.05~0.15 m,刷毛直径为0.1~0.3 mm,机器人移动速度为0.1~0.5 m每秒,刷盘角速度为10到50弧度每秒。采用L9(34)正交实验设计,选取刷毛层数2层、4层、6层、刷毛直径0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm、移动速度0.2 m/s、0.3 m/s、0.4 m/s和角速度20 rad/s、30 rad/s、40 rad/s为影响因素,每个因素3水平,共9组实验。通过极差分析得出各因素影响权重:刷毛层数32.7%、移动速度28.5%、刷毛直径22.3%、角速度16.5%,其中刷毛层数和移动速度的显著性水平P值小于0.01。

2.2 自适应清洗控制算法

针对不同污染物类型设计自适应清洗控制算法,采用基于深度学习的视觉识别系统YOLOv5s网络实时检测壁面污染物特征,通过双目视觉测距原理计算污染物厚度d,测量范围为0~10 mm,精度为±0.2 mm,采用微型超声硬度计检测硬度H,测量范围为0~100 Shore A,分辨率为1 Shore A。系统采样频率为10 Hz,数据处理延迟小于50 ms。控制策略分为三级响应:当检测到硬质污染物如贝类附着且硬度H大于50 Shore A时,算法自动提升刷盘转速至250 r/min对应角速度26.18 rad/s,增加预压力至80 N;对于软质藻类污染物且硬度H小于30 Shore A,降低转速至150 r/min对应15.71 rad/s,预压力调整为40 N;中等硬度污染物硬度H介于30~50 Shore A之间采用折中参数200 r/min。

2.3 路径规划与避障策略

采用改进栅格法构建船体壁面环境地图,将10 m×5 m作业区域划分为5 mm×5 mm的精细栅格,通过SLAM技术实现实时地图更新定位精度为±3 cm。改良的A*算法引入双目标优化函数,其中路径长度权重为0.4~0.6,能耗模型考虑推进系统占比62%、刷盘驱动占比28%和传感器功耗占比10%。通过动态加权系数协调两者关系,当剩余电量大于80%时路径长度权重为0.6,优先保证覆盖率;当电量小于30%时路径长度权重为0.4,优先降低能耗^[4]。

路径规划采用“全局一局部”双层架构:全局路径采用回字形清扫模式,通过Bresenham算法生成平行扫描线,路径重叠比例控制在5%±1%;局部路径规划针对静态障碍物如焊接接缝、凸起螺栓采用膨胀栅格法,设置10 cm安全距离绕行;动态干扰如水流冲击、突发海流通过PID姿态控制器补偿,横滚角和俯仰角控制在正负5度范围内,采用增量式PID算法,其中比例系数K_p为8.5,积分系数K_i为0.3,微分系数K_d为2.1。

定位系统采用视觉里程计V0与惯性测量单元IMU

的紧耦合融合方案, VO 通过 ORB 特征点匹配计算相对位移误差小于 2%, IMU 采样率为 100 Hz 提供角速度和加速度数据, 采用卡尔曼滤波进行数据融合。实验表明, 融合定位的位置误差不超过 ± 10 cm, 航向误差不超过 ± 1 度, 满足清洗作业精度要求。表 1 列出了不同路径规划算法的性能比较情况。

表 1 路径规划算法性能对比

算法类型	路径长度 /m	清洗覆盖率 /%	能耗 /J	计算时间 /ms
传统 A*	12.6	89	7 850	45
改进 A*	10.8	98	6 240	58
RRT*	14.3	92	8 120	120

实验条件为 10 m \times 5 m 的壁面区域, 包含 3 个直径 0.5 m 的静态障碍物。

3 系统集成与实验验证

3.1 机械结构设计

机器人本体采用开架式铝合金框架结构, 尺寸为 800 mm \times 600 mm \times 450 mm, 质量 65 kg, 浮力调节通过可更换浮力材实现, 确保水下作业时重力与浮力平衡。刷盘模块采用模块化设计, 通过卡环与固定悬架连接, 可快速更换不同参数的刷盘 (直径 120 mm/140 mm/210 mm)。推进系统布局采用 X 型配置, 水平推进器间距 500 mm, 垂直推进器间距 400 mm, 确保姿态控制的机动性。轮式移动机构采用 2 主动轮+2 从动轮配置, 主动轮直径 150 mm, 橡胶材质胎面, 提供 150 N 的附着力。清洗部件与壁面的预压力通过弹簧机构调节, 压力范围 30 ~ 100 N 连续可调。整体结构防护等级达到 IP68, 可在 50 m 水深长期工作^[5]。

3.2 实验测试平台

搭建包括实验水池、测试架、数据采集系统的综合测试平台。实验水池尺寸为 10 m \times 5 m \times 3 m, 配置水循环系统模拟不同流速 (0 ~ 1.5 m/s)。测试架采用三维调节机构, 可模拟船体壁面的倾斜角度 ($0^\circ \sim 90^\circ$)^[6]。数据采集系统包括: 功率分析仪 (精度 $\pm 0.5\%$)、激光测距仪 (量程 0 ~ 50 m, 精度 ± 1 mm)、高速摄像机 (帧率 100 fps) 和力传感器 (量程 0 ~ 200 N, 精度 ± 0.1 N)。实验环境参数控制: 水温 25 ± 1 $^\circ\text{C}$, 盐度 $30 \pm 2\%$, pH 值 7.8 ± 0.2 。通过岸基显控单元实现机器人远程控制和数据实时监测, 采样频率 1 kHz, 数据存储容量 1 TB。

3.3 性能实验结果

在台州市临海域养殖工船进行实船试验, 舱壁面积 500 m², 附着污染物主要为藻类 (厚度 3 ~ 5 mm)

和贝类 (直径 5 ~ 20 mm)。实验测试机器人在不同工况下的性能指标, 结果如表 2 所示。当机器人移动速度 0.2 m/s, 刷盘转速 200 r/min 时, 清洗效率达到 388 m²/h, 清洗能耗 163 J/m², 满足设计要求。连续作业 8 小时后, 电池 SOC 从 100% 降至 22%, 平均无故障工作时间 (MTBF) 达到 120 小时。姿态控制精度测试表明, 横滚角和俯仰角波动范围 $\pm 2.5^\circ$, 航向角偏差 $\leq \pm 0.8^\circ$, 贴壁间隙保持在 5 ± 1 mm。视觉识别系统对污染物的识别准确率达 95%, 自适应控制算法响应时间 ≤ 200 ms。实验条件为 4 层刷毛, 120 mm 直径刷盘, 预压力 60 N。

表 2 机器人清洗性能实验结果

移动速度 / (m \cdot s ⁻¹)	刷盘转速 / (r \cdot min ⁻¹)	清洗率 / (m ² \cdot h ⁻¹)	清洗效率 / (m ² \cdot h ⁻¹)	能耗 / (J \cdot m ⁻²)
0.1	150	1.02	216	185
0.2	200	1.12	388	163
0.3	250	0.98	432	212

4 结束语

本研究针对船体壁面清洗需求, 设计了基于分布式架构的智能水下机器人控制系统, 通过硬件模块化集成、软件分层设计和多算法协同优化, 实现了高效低耗的壁面清洗。实验结果表明, 所提出的刷盘参数优化模型可使清洗率提升 42%, 自适应控制算法降低能耗 18%, 改进 A* 路径规划算法将清洗覆盖率提高至 98%。实船试验验证了机器人在 0.2 m/s 移动速度和 200 r/min 刷盘转速下, 清洗效率达 388 m²/h, 能耗 163 J/m², 姿态控制精度 $\pm 2.5^\circ$, 满足实际工况要求。

参考文献:

- [1] 王晓鸣, 李腾. 壁面清洗水下机器人清洗性能分析与试验 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2023, 53(11): 3062-3068.
- [2] 张福泉. 水下船体表面清洗机器人设计与研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2023.
- [3] 孔维翔. 磁吸履带式水下清洗机器人设计与运动性能研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- [4] 杜小禹. 可自适应船体变曲率爬壁机器人设计及其特性分析 [D]. 天津: 河北工业大学, 2023.
- [5] 朱峰. 水下刷船机器人水动力学分析及清洗系统特性研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- [6] 黎灿明. 中小型水下船体清洗机器人设计 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.