

文章编号: 1674-5566(2023)05-0932-11

DOI: 10.12024/jsou.20230604258

梳草船导航控制系统设计与试验

李志坚¹, 朱皓¹, 吴刚², 陈雷雷¹, 陈耀坤³

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 常州华溪渔业有限公司, 江苏 常州 213311; 3. 上海海丹生物科技有限公司, 上海 201306)

摘要: 梳草船已逐步成为河蟹养殖池塘水草管理的重要装备, 为实现梳草船运行的自动化, 设计开发了一款以风机作为驱动装置的梳草船导航控制系统。针对梳草船设计了一套软硬件控制系统, 建立了梳草船运动模型并进行了试验验证, 采用航向预估PID控制方法和LOS视圆法实现了梳草船的运动控制与路径跟踪, 在实际养殖场进行了航速测试, 路径跟踪和水草收割试验。结果表明, 在所设计的导航系统控制下, 梳草船的最大运行速度可达1.14 m/s, PID航向控制方法和LOS视圆法可以准确实现梳草船的路径点跟踪, 在天气条件良好的情况下, 路径跟踪的平均误差小于0.96 m, 与人工方式相比, 单位时间内水草清理质量提高94.3%, 有效降低了水草收割的劳动强度, 提高蟹塘水草管理自动化水平。

关键词: 梳草船; 水草管理; 风力驱动; 路径跟踪; 视线法制导

中图分类号: S 969 **文献标志码:** A

河蟹池塘的水草可以为河蟹提供栖息活动场所, 还能作为优质青饲料, 并能显著改良水质。水草密度过高则会造成水草底层根茎断裂, 腐烂后会恶化水质。此外, 过多过密的水草会使河蟹栖息与蜕壳空间压缩, 所以河蟹池塘中的水草管理对河蟹养殖具有重要意义^[1-2]。

当前, 水草管理主要以人力收割为主^[3], 为提高水草收割效率, 降低人工劳动强度, 一些水草收割装置已初步发展运用。美国Hydro公司生产的一种大约八英尺宽的机械耙子^[4], 可以装载在船上, 从湖底收割水草, 不过需要添加液压液溢出保护剂, 以防止液压油泄漏造成污染。日本YUTAKA等开发出一款无人水草收割船^[5], 该船搭载RTK-GNSS导航, 使用一种特殊结构的桨作为推进器, 可以防止水草缠绕并实现长期自动导航, 船体尺寸小, 能耗低, 主要应用在莲花收割上, 但不具有水草收集功能, 收割后的水草会漂浮在水面上。陈灏等^[6]开发了一款适应于中小尺度景观水域中的小型遥控水草收割船, 该船体为

双体船结构, 采用明轮驱动, 具有体型小、质量轻、机动灵活的特点, 但不具备水草收集功能。刘会贵等^[7]开发一款具有自主导航的水草清理船, 船体采用明轮作为推进器, 该船体集草舱空间较小, 需要频繁往返岸边, 将收集的水草卸载到岸上。

目前水草收割船大多采用明轮驱动的推进装置以解决水草缠绕问题, 但这种方式传动效率低, 消耗功率较大^[6-7], 且现有大型水草收割船在实际工作时仍需多人辅助操作^[4]。梳草船作为水草收割船的一种, 其没有割刀, 可将水草连根拔起, 在水草收割过程中可以减小螃蟹受伤率^[3], 且具有水草收集功能。现有梳草船仍需人工撑船作业, 为减少人力参与, 实现梳草船自动作业, 提高收割效率, 需要在现有基础上开发梳草船导航控制系统。

路径跟踪控制是实现梳草船自主导航的关键, 主要涉及航向控制、航向制导两个方面。已有不少学者进行了无人船路径跟踪控制研究。

收稿日期: 2023-06-17 修回日期: 2023-08-10

基金项目: 上海市科技兴农技术创新项目(2022-02-08-00-12-F01096); 上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心项目(2021科技02-12)

作者简介: 李志坚(1983—), 男, 讲师, 研究方向为数字图像处理, 人工智能。E-mail: zj-li@shou.edu.cn

通信作者: 陈雷雷, E-mail: llchen@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

MU等^[8]结合模糊优化算法,提出了一种适用于直线和曲线路径的自适应视线(ALOS)制导律,采用反步法、神经网络最小参数学习法设计控制器。FOSSSEN^[9]使用扩展卡尔曼滤波器(EKF)从全球导航卫星系统中有效地估计船体航向和速度,采用航向自动舵结合视线导引(Line-of-sight, LOS)制导律实现路径跟踪控制,并进行了仿真测试。李永涛^[10]采用了PD舵向控制方法,考虑了无人船航行过程中由于环境干扰造成的横摇运动,分别设计航向控制器与减横摇控制器,能够在跟踪期望航向的基础上减弱横摇带来的扰动。董早鹏^[11]设计了基于Mamdani模糊推理的无人艇航速模糊控制器。瞿洋等^[12]在反步法与Lyapunov直接法的基础上考虑到横向动力缺失的情况,引入变前视距离的LOS制导律处理环境扰动造成的横向漂移运动。

本文主要设计实现了一种适用于虾蟹池塘养殖的梳草船自动导航控制系统。针对梳草船设计了一套软硬件控制系统;建立了梳草船运动模型并进行了试验验证,基于模型仿真验证了所设计的基于角速度传感器的航向预估PID控制方法和自适应航速的LOS视圆法;最后在蟹塘中进行梳草船路径跟踪和水草收割试验,结果表明梳草船的导航控制算法可以满足蟹塘水草收割需要。

1 控制系统设计

风力驱动梳草船的整体结构如图1所示,梳草船采用置于船体末尾的风机驱动,通过控制驱动风机转动的舵机和风机转速实现船体航行控制。

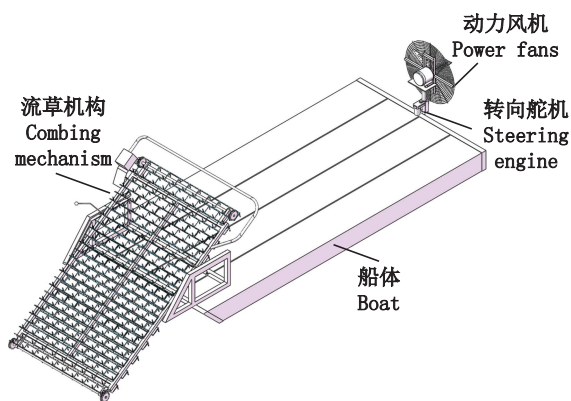


图1 风力驱动梳草船外形结构图
Fig. 1 Outline structure of the wind driven aquatic plants comb-collect boat

梳草船导航控制系统如图2所示,主要由控制系统端和远程监控端组成,控制系统端主要实现远程命令的接收、船体运行信息的发送、传感器信息的获取以及船体航向航速的控制。控制系统端采用ARM控制板作为主控器,传感器部分主要有GPS和姿态传感器,驱动系统部分主要有风机,控制风机角度的舵机,此外还搭载无线模块,用于数据远程传送。远程监控端实现远程遥控,导航命令的下发以及实时监控船体的运行状态。

2 系统仿真与验证

2.1 船体建模

为模拟实际船体运行状况,较方便地调整获得导航控制参数并验证算法的可用性,需要在MATLAB中搭建船体运动学模型,并对模型关键参数进行辨识。

以正北方向为X轴正方向,正东方向为Y轴正方向建立惯性坐标系,设X、Y为船体在大地坐标系下的纵向、横向位移, u 、 v 为随船坐标系下的纵向、横向速度, δ 为风机转角, F 为风机推力, φ 为船体航向角。

在小角度下根据二阶野本模型可得船体航向与风机转角之间的关系为

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{T}(K\delta - \dot{\varphi}) \quad (1)$$

根据牛顿力学综合二阶野本模型得船体模型方程为

$$\begin{cases} m\dot{v} = F\sin\delta - k_2v \\ m\dot{u} = F\cos\delta - k_1u \\ \ddot{\varphi} = \frac{1}{T}(K\delta - \dot{\varphi}) \\ \dot{Y} = u\sin\varphi + v\cos\varphi \\ \dot{X} = u\cos\varphi - v\sin\varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_1 、 k_2 为船体所受阻力与速度关系的参数; K 、 T 为船体操纵性指数; K 为船体旋回性指数; T 为船体追随性指数。

2.2 系统辨识与验证

对船体的二阶野本模型进行参数辨识。采用Z形试验的方法:梳草船以设定1 m/s航速沿初始航向做匀速直线运动,控制风机转角匀速转至设定的角度 15° ,当船体航向角改变达到 15° 时,风机转角转到相反角度并判断船体航向角,重复一次后停止试验和数据记录^[13]。

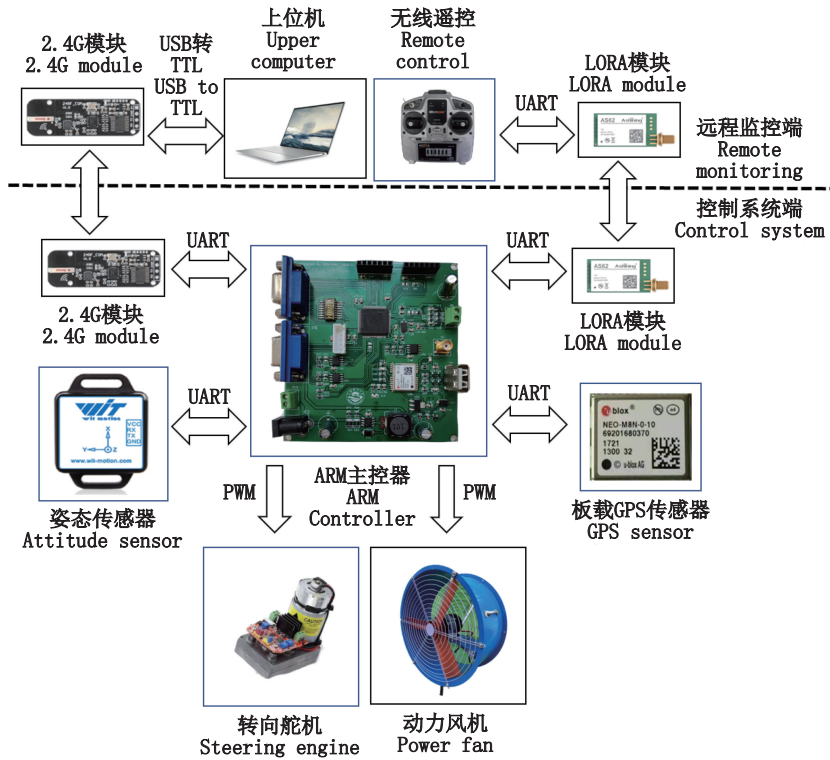
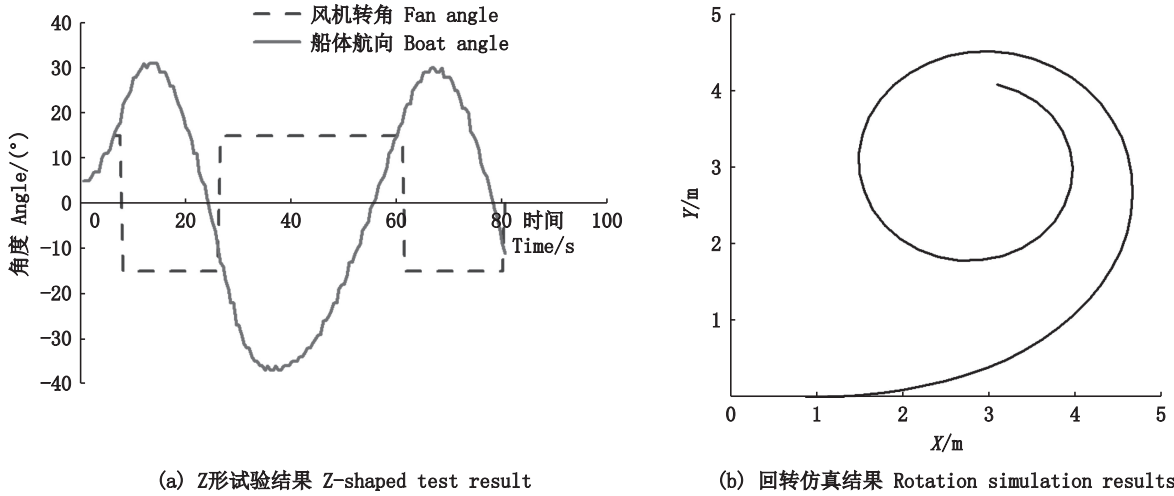


图2 梳草船导航控制系统

Fig. 2 Navigation control system of the aquatic plants comb-collect boat



(a) Z形试验结果 Z-shaped test result

(b) 回转仿真结果 Rotation simulation results

图3 Z形实验图与回转仿真结果图

Fig. 3 Z-shaped test result and rotation simulation results

试验当日风向风力为北风2级,在上海海洋大学人工湖内进行,试验结果如图3a所示。采用中心差分法将式(1)离散化后得到如式(3)所示离散方程。

$$\varphi(k) + a_1\varphi(k-1) + a_2\varphi(k-2) = b_1\delta(k) + b_2\delta(k-1) + b_3\delta(k-2) \quad (3)$$

式中: a_1, a_2, b_1, b_2, b_3 与 K, T 相关。

采用式(4)所示的递推最小二乘法迭代计算公式,对式(3)进行参数辨识^[14]。将图3a中试验

所测的风机转角 $\delta(k)$ 和船体航向角 $\varphi(k)$ 的数据代入式(4),可得 a_1, a_2, b_1, b_2, b_3 的值,进一步得到 $K=0.74, T=21.74$ 。

$$\begin{cases} \hat{\sigma}(k) = \hat{\sigma}(k-1) + G(k)[\varphi(k) - \psi^T(k)\hat{\sigma}(k-1)] \\ G(k) = \frac{P(k-1)\psi(k)}{1 + \psi^T(k)P(k-1)\psi(k)} \\ P(k) = [I - G(k)\psi^T(k)]P(k-1) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\psi(k) = [-\varphi(k-1), -\varphi(k-2), \delta(k), \delta(k-1), \delta(k-2)]$ ； $\hat{\sigma}(k) = [a_1, a_2, b_1, b_2, b_3]$ ，为参数估计； $G(k)$ 为增益矩阵； $P(k)$ 为协方差矩阵。

为了验证辨识模型的正确性,将模拟回转实验与实船回转实验进行比较。试验过程中实时记录船体位置和航向角。首先船体以 1 m/s 速度沿初始航向做匀速直线运动,然后控制风机转角匀速转至最大角度(45°),并保持该角度不变,当船体航向角改变达到 540°时,停止试验和数据记录^[13]。仿真模拟回转实验结果如图 3b,可以计算出仿真中船体回转半径为 1.29 m。在上海海洋大学人工湖内进行实船回转实验,试验当日风向风力为北风 1 级,测试结果如表 1 所示,可得稳定回转半径平均值为 1.22 m,标准差为 0.28 m。通过对比仿真结果可知,船体模型在实际可信范围内。

3 控制算法设计与仿真

系统自动导航控制框图如图 4 所示,船体首先根据设定路径点 $p_n(x_n, y_n)$, ($n = 1, 2, 3, \dots$), 期望航速 u_s 和船体当前位置 (x_t, y_t) , 采用 LOS 制导律, 获得船体目标角度 φ_d 和目标航速 u_d ; 然后经过航向控制器和航速控制器计算得到风机角度 δ

和推力值 U , 梳草船根据这两个值改变舵机转角和风机转速实现船体按预设轨迹和航速航行。在跟踪设定路径点 p_n 与 p_{n+1} 之间连接形成的直线路径过程中, 当与 p_{n+1} 距离小于跟踪目标点距离允许值 D_{allow} 时, 船体将切换跟踪轨迹, 跟踪 p_{n+1} 与 p_{n+2} 连接形成的直线轨迹; 最后船体到达最终设定路径点位附近停止航行, 完成路径跟踪。

表 1 45°回转试验结果
Tab. 1 45° rotation test results

序号 Serial Number	风机转角 Fan angle/(°)	回转半径 Radius of gyration/m
1	45	0.90
2	45	1.19
3	45	0.90
4	45	1.70
5	45	1.03
6	45	1.70
7	45	1.19
8	45	1.62
9	45	1.29
10	45	1.19
11	45	1.19
12	45	1.19
13	45	0.81

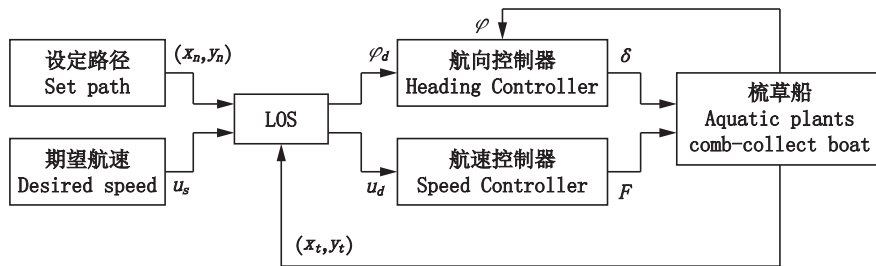


图 4 控制系统框图

Fig. 4 Control system block diagram

3.1 舵机控制方法

梳草船控制航向的方法是通过舵机驱动风机整体转动一定的角度,两者成比例关系,风机的质量约为 15 kg,在舵机转动的过程中如果舵机转动角度过大,转速过快,风机将会带来较大的惯性,从而产生转动角度大于设定角度的问题,故需对舵机的转动速度进行控制。采用一种舵机加减速方法,设当前时刻舵机转动角度为 $\theta(t)$, 转动总用时为 t_f , $\theta(t)$ 满足初始角度为 θ_0 , 最终角度 θ_f , 设 $\dot{\theta}(t)$ 为角速度, 满足初始角速度和最终角

速度为 0, 在转动过程中角速度先增加, 到中间时刻转动角速度达最大值, 而后逐渐减小到 0, 即满足 $\theta(0) = \theta_0, \theta(t_f) = \theta_f, \dot{\theta}(0) = 0, \dot{\theta}(t_f) = 0$, 代入如下所示方程:

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (5)$$

$$\text{可得 } \theta(t) = \theta_0 + \frac{3}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0) t^2 - \frac{2}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0) t^3,$$

式中: $t_f = |\theta_f - \theta_0| t_d$, t_d 为每转 1° 需要的时间, 根据实际情况调节该值可实现舵机转动快慢的控制, 多次测试后选取 $t_d = 0.015$ s, 即每转 1° 需要 15 ms。

3.2 航向控制方法

因为梳草船系统具有非线性、模型不确定性、受风浪扰动等特性,建模过程中对上述影响因素进行了大量的简化,模型难以准确反映无人船实际运动情况,现有控制方法大多停留在仿真阶段^[8-12],基于神经网络^[8,11]等智能方法虽然可以提高无人船运动控制中的抗干扰能力,但需要较大的计算量,只能部署在处理性能强的工控机上。PID控制算法是一种直接数据驱动控制的方法,不依赖于精确模型,具有鲁棒性好和可靠性高等诸多优点^[15],在复杂环境中应

用具有一定的优势,因此采用PID作为航向控制方法。

航向控制器框图如图5所示,传统PID航向控制方法根据期望航向与无人船实际航向得到航向偏差来计算控制量。当执行机构执行到这一控制量时,航向已发生变化,且受到风浪的干扰,执行过程中航向变化是不固定的。因此提出一种基于传感器的航向预估方法,主要通过传感器采集船体艏摇角速度,在控制周期内对船体航向进行预估,将预估值与期望航向相减作为航向控制器的输入。

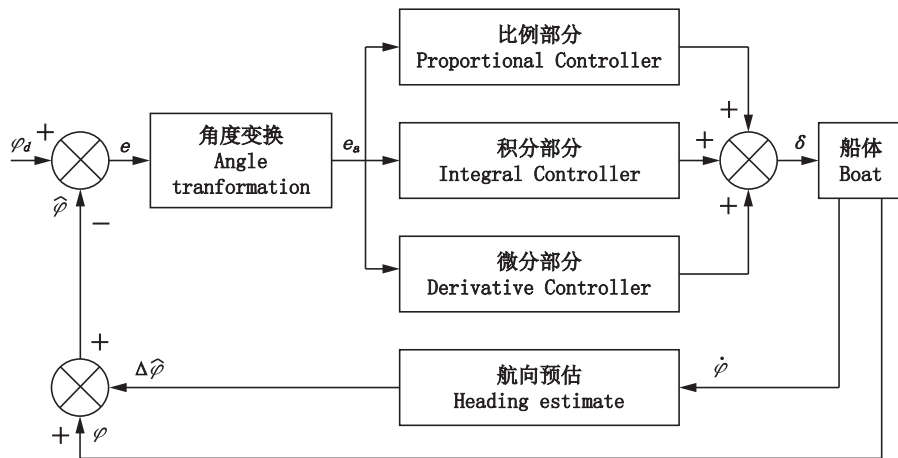


图5 改进PID控制框图

Fig. 5 Improved PID control block diagram

船体预估航向角计算公式如下:

$$\hat{\varphi}(k) = \varphi(k) + \Delta\hat{\varphi} \quad (6)$$

式中: $\hat{\varphi}$ 为预估航向角, $\varphi(k)$ 为当前传感器测得角度, $\Delta\hat{\varphi}$ 为估计角度增量。 $\Delta\hat{\varphi}$ 计算方法如下:

$$\Delta\hat{\varphi} = V_{yaw} T_p \quad (7)$$

式中: $\Delta\hat{\varphi}$ 为预测增量, T_p 为预测时间,与舵机转动总用时 t_j 相等, V_{yaw} 为陀螺仪传感器测得的航向角角速度。

位置式PID的离散表示方法如下:

$$u(k) = K_p e(k) + K_I T_s \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)]/T_s \quad (8)$$

式中: k 为采样序列号; $u(k)$ 为采样时刻 k 的PID调节输出值; $e(k)$ 为采样时刻为 k 的输入偏差值, $e(k) = \varphi_d(k) - \hat{\varphi}(k)$; T_s 为航向角采样周期和PID控制周期; $e(k-1)$ 为第 $k-1$ 次采样时刻的输入偏差值; K_p 为比例系数; K_I 为积分系数; K_D 为微分系数。

由于船体航向角为 $[-\pi, \pi]$,使得 $-\pi$ 到 π 之间不连续,当船体航向角为 -179° 时,船体逆时针转动,船体航向角减小,下一时刻船体航向角可能变为 179° ,此时计算出的角度变化值数值比较大,直接输入控制器将认为船体角度发生了很大的变化与实际不同,故需对角度进行变换处理^[16],得到 e_a ,变换方法如下:

$$e_a = \begin{cases} e + 2\pi & -2\pi < e < -\pi \\ e & -\pi < e < \pi \\ e - 2\pi & \pi < e < 2\pi \end{cases} \quad (9)$$

在MATLAB中基于式(1)进行航向控制仿真,考虑到实际舵机控制需要一定的响应时间,选取仿真周期 T_s 为0.5 s,仿真中的舵机控制响应时间为0,故不加入航向预估方法,出于安全和稳定性考虑,风机角度限制在 $[-45^\circ, 45^\circ]$ 范围内,调节PID参数后得到的仿真结果如图6所示。

图6中PID参数 $K_p = 0.38$, $K_I = 0.0006$, $K_D = 4.0$,由仿真结果可知,16 s后船体首次到达目标角

度,30 s后船体航向趋于稳定且风机角度也趋于稳定值0。选取的PID参数具有良好的控制效果。

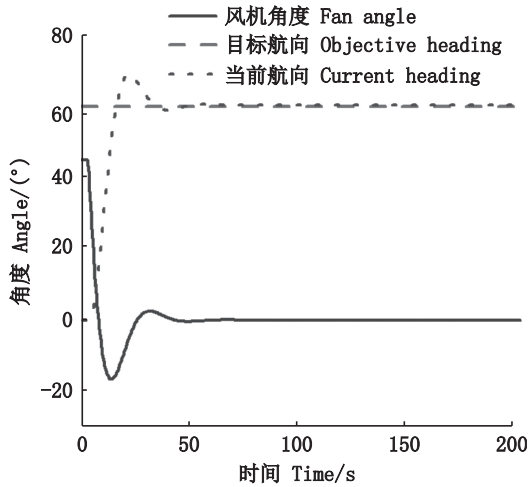


图6 PID控制仿真结果图

Fig. 6 PID control simulation result diagram

3.3 航向制导律

LOS算法作为一种经典有效的导引策略,不依赖于任何模型,其原理直观且制导效果优异。LOS制导律有基于前视距离的制导以及基于视线圆的制导2种形式。基于前视距离的制导律制导效果取决于前视距离的选取,制导效果一般,而基于视线圆制导律的制导效果与视线圆半径的选取有关,选取合适的视线圆半径可以实现较好的航向跟踪控制效果^[17-18]。本文选用LOS视圆法作为航向制导律,其基本原理如图7所示。

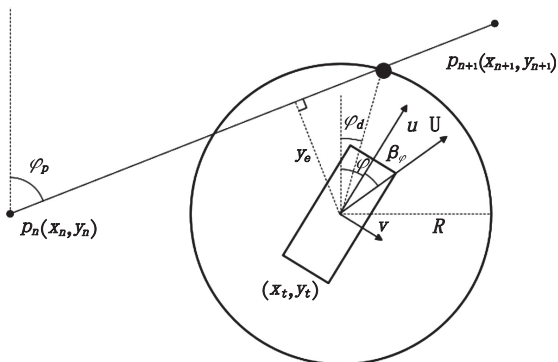


图7 LOS视圆法示意图

Fig. 7 Schematic diagram of LOS circle method

设 φ 为当前航向角, φ_d 为制导律下的目标航向角, φ_p 为船体当前跟踪路径的路径角; u 、 v 分别表示船体在随船坐标系下的纵向与横向速度, U

代表船体合速度,即 $U = \sqrt{u^2 + v^2}$,船体的侧滑角 $\beta_\varphi = \arctan(v/u)$ 。可以计算梳草船距离当前航线的垂向距离 y_e ,即,交叉跟踪误差:

$$y_e(t) = -[x(t) - x_n] \sin \varphi_p + [y(t) - y_n] \cos \varphi_p \quad (10)$$

视线圆的原理是以船体为中心,定义一个半径为 R 的圆,该圆与给定轨迹有两个或一个交点,交点中距离下一路径点接近的点即为跟踪的下一目标点。视线圆半径需要大于当前跟踪误差 y_e 来保证视线圆与当前跟踪路径存在交点,视线圆半径选取方法^[18]如下。

$$R = R_{\min} + \frac{1}{2} \left[\frac{(a|y_e| - R_{\min})(|y_e| - R_{\min})}{c + ||y_e| - R_{\min}|} + a|y_e| - R_{\min} \right] \quad (11)$$

式中: R_{\min} 为最小视线圆半径; a 、 c 均为正常数。

当 $a \geq 1, c \approx 0$ 时,有

$$R = \begin{cases} R_{\min} & |y_e| \leq R_{\min} \\ a y_e & |y_e| > R_{\min} \end{cases} \quad (12)$$

从图7可以看出视线圆型LOS制导律下的目标航向角为:

$$\varphi_d = \varphi_p - \beta_\varphi - \arcsin(y_e/R) \quad (13)$$

视线圆半径的大小对跟踪效果有很大的影响,为实现多种速度条件下的一致跟踪效果,最小视线圆半径 R_{\min} 将根据当前船纵向速度进行动态调整^[19],最小视线圆半径 R_{\min} 的计算公式为:

$$R_{\min} = \begin{cases} R_L & v \leq v_{\min} \\ pv + q & v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ R_U & v \geq v_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

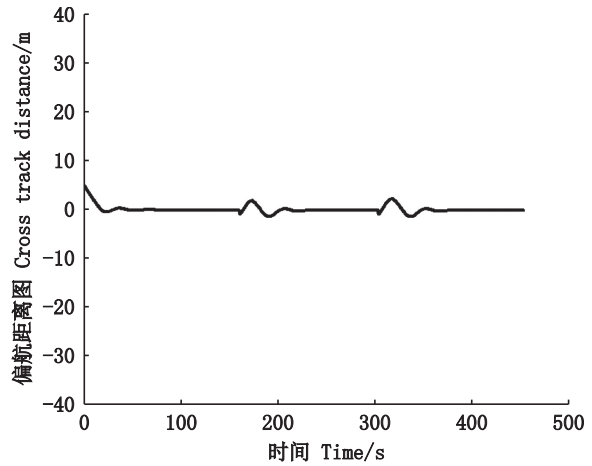
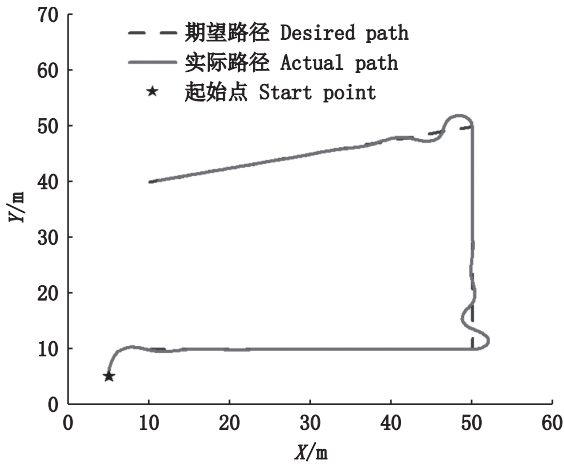
式中: R_L, R_U 为最小视线圆半径上下阈值; v_{\min}, v_{\max} 为速度上下判断阈值; p, q 为预设常数,根据实际船体测试调整。

在MATLAB中基于式(2)进行路径跟踪仿真测试,仿真中设定4个路径点,船体速度设定为0.6 m/s,得到如图8所示的仿真结果。

图8中PID参数 $K_p = 0.38, K_I = 0.0006, K_D = 4.0$,最小视线圆半径 R_{\min} 取固定值6, $a=1.1$,跟踪目标点距离允许值 $D_{\text{allow}} = 6$ 。在26.5 s时刻船体跟踪到目标轨迹,此时坐标位置为(9.031, 10.183),从仿真结果中可以看出路径转弯处偏航距离值较大,直线路径跟踪部分偏航距离较小,从跟踪到目标轨迹开始到跟踪结束的过程中偏航距离最大值为2.288 m,平均偏航距离为0.257 m,设计的航向制导方法可以满足路径跟踪

需要。为避免船体在路径拐点处产生过大的距离偏差,在实船路径跟踪过程中对航速进行实时

控制,在路径点切换处(即转弯处),当距离目标的设定路径点距离较小时,船体将进行减速。



(a) 路径跟踪结果图 Path tracking result graph

(b) 偏航距离图 Cross track distance graph

图8 路径跟踪结果

Fig. 8 Path tracking result

4 现场试验

4.1 航向控制试验

选取PID参数 $K_p = 0.38$, $K_i = 0.0006$, $K_d = 4.0$,控制周期 $T_s = 0.5$ s。在上海崇明蟹塘养殖场内进行实船航向控制试验,试验当日风向风力为南风2级。船体初始航向为 -8.9° , 3.5 s时刻下发命令设定船体目标航向为 160° ,得到的航向控制结果如图9所示,可以看出在33.5 s时刻船体到达目标航向,选用的控制方法可以让船体航向较快收敛至目标角度,但由于风力及船体左右受到水草阻力的不同,在到达目标航向后船体航向发生一定的波动,此时航向控制器继续调节使其维持在较小的误差内,航向控制器基本满足控制需求。

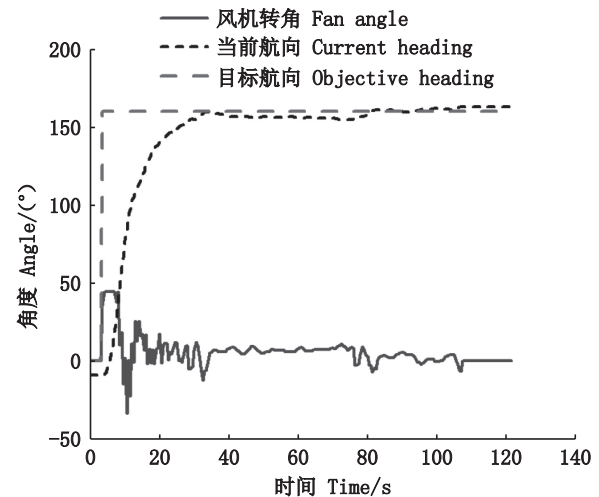


图9 航向控制结果

Fig. 9 Heading control result

4.2 路径跟踪试验

在上海崇明蟹塘养殖场内采集蟹塘作业区域内多个点位的GPS信息,并通过上位机下发,进行路径点跟踪试验。选取PID参数 $K_p = 0.38$, $K_i = 0.0006$, $K_d = 4.0$,控制周期 $T_s = 0.5$ s,路径跟踪试验参数设置:跟踪目标点距离允许值 $D_{allow} = 6$, 视线圆参数 $a = 1.1$, 最小视线圆参数 $R_L = 4$, $R_U = 8$, $v_{min} = 0.2$, $v_{max} = 0.6$, $p = 5$, $q = 4$ 。设定点位信息后,下发路径跟踪命令,实时记录当前位置,航向和速度等信息,当船体运行到最终的目标点位后停止试验记录,得到图10所示的试验结果。

图10a为轨迹1的跟踪曲线,设有8个目标点位,试验当日风向风力为北风1级,图10b和10c为轨迹1跟踪过程中的误差曲线和速度曲线。图10d为直线轨迹2和3的轨迹跟踪结果图,分别设有2个目标点位,轨迹2试验当日风向风力为北风3级,轨迹3试验当日风向风力为北风1级。从图10a可以看出,选用的控制方法可以较好地适应不同水草密度的水域,能够稳定跟踪期望路径,到达设定的目标点位。设定GPS点位 $(121.5565755^\circ, 31.702539^\circ)$ 为坐标原点,以正北方向为X轴正方向,正东方向为Y轴正方向,建立坐标系,计算采集的GPS点距离坐标原点的X

轴和Y轴相对距离即可得到其对应坐标系下的位置,采用式(10)可计算得到每个坐标点处的偏航距离,得到图10b所示的轨迹1的跟踪误差曲线图,可知在46 s时刻梳草船跟踪到目标轨迹1,到达设定目标点1附近,此后由于受到水草阻力和风力的影响,整个过程中跟踪误差持续变换,计算下来跟踪误差最大值为4.817 m,平均值为0.956 m,标准差为0.880 m。同理可得轨迹2和3的跟踪误差平均值分别为1.579 m和0.759 m。

从图10a、10b和10d可以看出在直线跟踪部

分误差较小,路径点切换处的误差值较大。在同等风力风向影响的条件下,纯直线路径跟踪要比曲线路径跟踪误差小。通过对比直线轨迹跟踪曲线2和3,可以看出风力情况对试验结果影响较大。在实际收割过程中,直线收割部分采用直线路径跟踪,转弯部分可以配合遥控操作减小误差。船体路径跟踪过程中的速度曲线如图10c所示,除在转弯处进行减速以减小误差,直线行驶部分速度维持在0.4 m/s以上,运行速度满足水草收割作业需求。

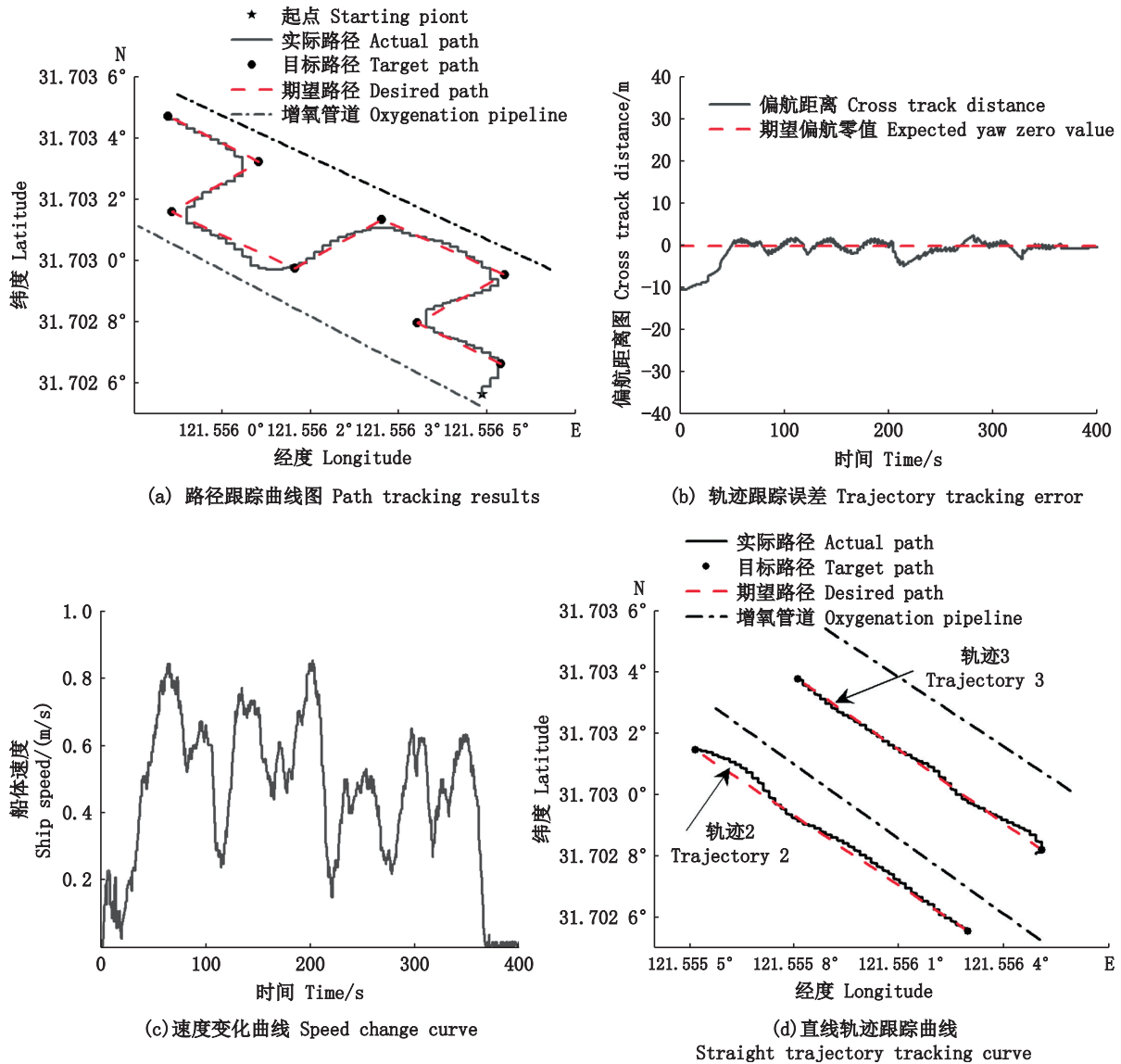


图10 实船路径跟踪测试

Fig. 10 Real ship path tracking test

4.3 水草收割试验

在上海崇明蟹塘养殖场使用遥控控制梳草船体航行,测试在装满水草和空载情况下的航

行速度,满载航速可达0.44 m/s,空载船速达1.14 m/s,满足现场水草收割需求。如图11a使用风力驱动梳草船进行水草收集实验,收

集 2 min 29 s, 收集量为 95.5 kg, 计算得到收集效率为 2 307 kg/h, 多次试验统计梳草船收集水草效率和人工水草收集效率, 取平均值得到单位时间内使用梳草船比人工水草清理质量提高 94.3%。采用遥控加自主导航方式收割水草, 收割后的航拍图如图 11b 所示, 池塘中的两条白色长管为增氧管道, 增氧管道下方与其平行的两

条收割轨迹为图 10d 中对应的直线轨迹。除此之外, 两条增氧管道之间的区域采用遥控的方式进行收割, 两侧的区域采用遥控加直线路径跟踪方式进行收割, 可以看到相比于纯遥控方式, 加入直线路径跟踪方式的水草收割直线度更好, 设计的路径跟踪方法具有较高的实用性。



(a) 收割作业 Harvesting operations



(b) 收割后效果图 After the harvest

图 11 收割作业图

Fig. 11 Harvesting operations

在试验中发现, 风力驱动梳草船在实际使用过程中易受风力等天气情况的影响, 在路径跟踪精度和抗干扰能力上有较大的提升空间。目前主要通过风机转动来控制船体转弯, 船体的灵活性和操纵性有进一步提升的空间。相比原有人工撑船收割水草的方式, 风力驱动梳草船可以大幅降低工人劳动量, 提高工作效率。此外, 风力驱动梳草船在水草密集的池塘中适应性较好, 不仅可以运用在蟹塘水草收割上, 在蟹塘投饵、撒药等全塘工作场景中也有较好的应用前景。

5 结论

鉴于水草管理对河蟹养殖的重要性, 梳草船必将成为河蟹池塘的重要装备之一。本文设计了一套梳草船导航控制系统。首先设计了一套梳草船软硬件控制系统。随后建立了梳草船运动模型并进行了试验验证。接着采用了舵机加减速控制算法以实现舵机转动的平稳运行; 针对传统 PID 算法在实际运用中的舵机响应延时, 船体航向控制具有滞后性, 提出一种基于传感器的航向预估 PID 控制; 针对 LOS 制导下的路径跟踪算法受航速影响较大且在路径点切换处超调较大的问题, 对视线圆的选取提出了自适应航速的改进方法, 并对转弯处的航速进行动态调节。最

后在河蟹池塘进行了路径跟踪试验和实际作业。结果表明, 梳草船路径跟踪平均误差小于 0.96 m, 单位时间内收集水草质量比人工提高 94.3%, 相比于纯遥控方式, 加入直线路径跟踪方式的水草收割直线度更好。设计的梳草船遥控和导航控制系统可以大幅度减少工人劳动量, 具有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] 朱雷阳, 鲍明明, 李旭光, 等. 浅析高温期蟹池水草的养护与管理[J]. 科学养鱼, 2020(8): 36-38.
ZHU L Y, BAO M M, LI X G, et al. Preliminary analysis on maintenance and management for weed in river crab pond during high-temperature period [J]. Scientific Fish Farming, 2020(8): 36-38.
- [2] 张光宝, 姜晓东, 陈文彬, 等. 水草种植模式对全雄中华绒螯蟹成蟹养殖性能和经济效益的影响[J]. 南方水产科学, 2023, 19(2): 107-115.
ZHANG G B, JIANG X D, CHEN W B, et al. Effect of submerged macrophytes planting mode on performance and economic profit of all-male adult *Eriocheir sinensis* culture [J]. South China Fisheries Science, 2023, 19 (2) : 107-115.
- [3] 沈启扬, 朱虹, 孙龙霞, 等. 虾蟹池塘养殖水草收割机应用现状及发展前景[J]. 江苏农机化, 2020(1): 13-15.
SHEN Q Y, ZHU H, SUN L X, et al. Application status

- and development prospect of aquatic grass harvester for shrimp and crab pond culture [J]. *Jiangsu Agricultural Mechanization*, 2020(1): 13-15.
- [4] DESMARAIS D L. Hydro-Raking as a management option for aquatic non-native invasive and native nuisance plants in freshwater ponds and lakes: case studies in massachusetts [C]//International Development, Community and Environment (IDCE). 2016.
- [5] KAIZU Y, SHIMADA T, TAKAHASHI Y, et al. Development of a small electric robot boat for mowing aquatic weeds [J]. *Transactions of the ASABE*, 2021, 64(3): 1073-1082.
- [6] 陈灏,周莹,许东员. 小型电动可遥控水草收割机的研制[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(26): 14791-14792.
- CHEN H, ZHOU Y, XU D Y. Development of a small-scale battery-driven remote-controllable weed harvester [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(26): 14791-14792.
- [7] 刘会贵,赵德安,孙月平,等. 水草全自动清理船控制系统[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(s1): 281-286.
- LIU H G, ZHAO D A, SUN Y P, et al. Control system for automatic aquatic plant cleaning ship [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(s1): 281-286.
- [8] MU D D, WANG G F, FAN Y S, et al. Fuzzy-based optimal adaptive line-of-sight path following for underactuated unmanned surface vehicle with uncertainties and time-varying disturbances [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 2018: 7512606.
- [9] FOSSEN T I. Line-of-sight path-following control utilizing an extended Kalman filter for estimation of speed and course over ground from GNSS positions [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2022, 27(1): 806-813.
- [10] 李永涛. 水面无人艇参数辨识方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- LI Y T. Research of USV parameter identification method [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [11] 董早鹏. 无人艇运动模糊控制技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- DONG Z P. Research on motion control of USV based on fuzzy technology [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [12] 瞿洋,徐海祥,余文墨,等. 基于ILOS的欠驱船舶循迹控制[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2016, 40(5): 834-838.
- QU Y, XU H X, YU W Z, et al. Integral line-of-sight guidance for path following of underactuated marine surface vessels [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2016, 40(5): 834-838.
- [13] 张心光. 基于船舶操纵性试验分析的辨识建模研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- ZHANG X G. Identification modeling based on analysis of ship manoeuvring tests [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [14] 包政凯,朱齐丹,刘永超. 满秩分解最小二乘法船舶航向模型辨识[J]. *智能系统学报*, 2022, 17(1): 137-143.
- BAO Z K, ZHU Q D, LIU Y C. Ship heading model identification based on full rank decomposition least square method [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2022, 17(1): 137-143.
- [15] 孙霄阳,周平. 基于未知状态估计与神经网络补偿的增强PID控制方法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2023, 53(4): 715-736.
- SUN X Y, ZHOU P. Enhanced PID control method based on unknown state estimation and neural network-based compensation [J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2023, 53(4): 715-736.
- [16] 韩鹏,刘志林,周泽才,等. 基于LOS法的自航模航迹跟踪控制算法实现[J]. *应用科技*, 2018, 45(3): 66-70.
- HAN P, LIU Z L, ZHOU Z C, et al. Path tracking control algorithm based on LOS method for surface self-propulsion vessel [J]. *Applied Science and Technology*, 2018, 45(3): 66-70.
- [17] 高鹏,万磊,徐钰斐,等. 基于无模型自适应控制的底栖式AUV路径点跟踪控制[J]. *水下无人系统学报*, 2022, 30(4): 429-440.
- GAO P, WAN L, XU Y F, et al. Waypoint-tracking control of a benthic AUV based on model-free adaptive control method [J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2022, 30(4): 429-440.
- [18] ABDURAHMAN B, SAVVARIS A, TSOUDOS A. A switching LOS guidance with relative kinematics for path-following of underactuated underwater vehicles [J]. *IFAC-Papers On Line*, 2017, 50(1): 2290-2295.
- [19] 吴才聪,吴思贤,文龙,等. 拖拉机自动导航变曲度路径跟踪控制[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 1-7.
- WU C C, WU S X, WEN L, et al. Variable curvature path tracking control for the automatic navigation of tractors [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(21): 1-7.

Design and test on the navigation control system of the aquatic plants comb-collect boat

LI Zhijian¹, ZHU Hao¹, WU Gang², CHEN Leilei¹, CHEN Yaokun³

(1. College of Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Changzhou Huaxi Fisheries Co., Ltd, Changzhou 213311, Jiangsu, China; 3. Shanghai Haidan Biotechnology Co., Ltd, Shanghai 201306, China)

Abstract: The aquatic plants comb-collect boat has gradually become an important equipment for the management of aquatic plants in river crab breeding ponds. In order to realize the automation of the aquatic plants comb-collect boat, an automatic navigation control system for the boat with a fan as the driving device was designed and developed. Firstly, a set of the aquatic plants comb-collect boat software and hardware control system was designed; Then, the dynamic model of the aquatic plants comb-collect boat was established and verified by experiments; Then, the motion control and path tracking of the aquatic plants comb-collect boat were realized by using the heading estimation PID control method and the LOS circle of sight method; Finally, the speed test, path tracking and waterweed harvesting experiments were carried out in the farm. The results show that the maximum speed of the aquatic plants comb-collect boat can reach 1.14m/s, the PID heading control method and the LOS circle of sight method can accurately realize the path point tracking of the aquatic plants comb-collect boat. In good weather conditions, the average error of path tracking is less than 0.96 m. compared with the manual method, the cleaning weight per unit time is increased by 94.3%, which effectively reduces the labor intensity of harvesting aquatic plants and improves the automation level of aquatic plant management in crab ponds.

Key words: aquatic plants comb-collect boat; water weed management; wind driven; path tracking; sight guidance