

文章编号: 1674-5566(2025)02-0282-13

DOI: 10.12024/jso.20241104717

大滚筒智能钓机出绳速度控制及其对长鳍金枪鱼捕捞效果的影响

刘雨青¹, 吴世腾¹, 宋利明^{2,3}, 伏 州¹, 张子宸¹

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 3. 国家远洋渔业技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 自动化捕捞装备的研发是推动远洋捕捞渔业高质量发展的关键要素,为了提升远洋作业中金枪鱼捕捞效率和渔获质量,提出了一种基于南太平洋长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)延绳钓钓钩深度模型设计的智能投绳控制系统。该系统采用模糊比例积分微分(Proportion integral differential, PID)控制方式,结合作业渔船部署的传感器采集实时数据,通过可编程逻辑控制器(Programmable logic controller, PLC)实时调节投绳机的出绳速度,使钓钩深度达到目标鱼种的栖息深度。首先采用仿真实验及验证实验证实模糊PID在智能投绳控制系统的有效性,然后在中水集团远洋股份有限公司所属的“中水747”漁船上部署该系统进行海试试验,通过智能投绳控制系统作业与传统人工作业两种方式对比出绳速度控制精度及稳定性、钓钩深度及渔获情况。结果显示:(1)系统能根据船速自动调节出绳速度,将静态误差控制在2%左右;(2)最深钓钩平均深度为230.20 m,两浮子间53.57%的钓钩深度与长鳍金枪鱼的捕食深度重合;(3)长鳍金枪鱼上钩率提高了31.85%,目标渔获的优势体质量区间由(14,18] kg提升至(18,22] kg,渔获质量及效率显著提升。研究表明,智能投绳控制系统作业优于传统人工作业,可有效提升金枪鱼目标鱼种的捕捞效率。本研究为金枪鱼捕捞装备的智能化控制提供了科学依据,推动了远洋渔业装备的技术创新与智能化升级。

关键词: 长鳍金枪鱼; 智能投绳控制系统; 模糊PID; 出绳速度; 捕捞效率

中图分类号: S 972.6; TP 29

文献标志码: A

《“十四五”全国渔业发展规划》提出推进远洋渔业高质量发展,研发远洋渔船捕捞机械化、自动化装备,实现以机代人。2022年《农业农村部关于促进“十四五”远洋渔业高质量发展的意见》提出要鼓励渔业科技创新、装备研发与技术应用,加强先进技术在远洋渔业装备领域中的研发与应用。捕捞装备作为远洋渔船的重要组成部分,不仅影响着远洋捕捞作业的成本、效益和质量,对船员与渔船的安全性也有着密不可分的联系。在远洋渔业中,金枪鱼是重要的捕捞物种之一,捕捞方式有围网和延绳钓两种^[1],中国远洋金枪鱼延绳钓主要采用大滚筒钓机,依靠船长经验,控制钓钩的投放深度^[2],使其达到金枪鱼的栖息深度。

国内外学者对金枪鱼捕捞技术进行了研究,

建立了钓钩深度理论模型^[3],为金枪鱼延绳钓大滚筒钓机效率优化提供了理论支撑。郭刚刚等^[4]通过频次分析与经验累积分布函数相结合的方法,计算出南太平洋长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)适宜的垂直活动水层为88~238 m; ZHOU等^[5]研究发现200 m水层为长鳍金枪鱼的摄食水层;宋利明等^[6]基于田内准则对延绳钓渔具进行缩小,采用ANSYS Workbench力学仿真对延绳钓钓钩深度进行仿真,得出钓钩仿真深度与钓钩实测深度无显著性差异;杨嘉樑等^[7]研究发现钓具沉降到160~240 m水层时长鳍金枪鱼捕捞效率较高。金枪鱼延绳钓投绳机系统是一种阀控液压马达系统,其工作状态受投绳工作流程多种因素的影响,包括液压系统压力、大滚筒惯性等。在金枪鱼延绳钓漁船上复杂的工作环境下,

收稿日期: 2024-11-29 修回日期: 2025-01-09

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2401301, 2023YFD2401305)

作者简介: 刘雨青(1976—),女,副教授,研究方向为自动控制技术和基于深度学习的图像识别技术。E-mail:yqliu@shou.edu.cn

通信作者: 宋利明, E-mail:lmsong@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.shhydxxb.com>

比例积分微分(Proportion integral differential, PID)系列控制仍是简单高效的控制方法之一,可以使投绳机在控制精度和鲁棒性等方面满足控制系统要求。雷晓顺等^[8]研究发现在液压马达仿真模型中,基于传统PID和模糊PID对转速进行恒速控制的过程中,模糊PID的超调量及调整时间优于传统PID;陆金华等^[9]研究发现,在变负载的情况下,经过模糊PID控制策略优化后的调速方法对速度控制效果稳定且稳态误差较常规控制方法大幅度减小;喻瑞波等^[10]研究发现,模糊PID在液压马达外负载不同、前后运动速度不同及速度转换运动工况均具有较好控制性能,且适应于长期控制。

当渔船在不同海况环境下,控制出绳速度可以使钓钩达到不同的深度,但由于钓钩深度的控制主要靠船长的经验,经验不同,采用的出绳速度也不同,使得金枪鱼延绳钓钓钩深度偏离目标鱼种栖息的深度,因此不同渔船捕捞产量存在差异^[11],在相同海域内渔获上钩率与国外延绳钓渔船相比也存在差距。本研究基于南太平洋金枪鱼延绳钓钓钩深度模型,通过金枪鱼捕捞效率影响因子对大滚筒钓机的投绳系统进行智能控制,

确定长鳍金枪鱼为目标鱼种,通过与传统人工作业进行对比试验,研究智能投绳系统的性能指标和捕捞效率^[12],为金枪鱼延绳钓大滚筒钓机的智能化研究与优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置采用宁波捷胜海洋装备股份有限公司开发的JT-12B-1滚筒式钓机系统,该系统主要由液压泵站、大滚筒、投绳机、起绳机和手动比例阀等模块组成。智能投绳控制系统作业利用项目组研发的可编程逻辑控制器(Programmable logic controller, PLC)采集船上布设的传感器数据对投绳机出绳速度进行实时控制,引入闭环控制和误差补偿设计,进而使延绳钓钓钩深度达到目标深度,其余部分工作状态保持与传统人工作业状态一致^[13]。

试验投绳机为双压轮结构如图1所示。投绳机主要结构为调速阀、投绳轮、导线滚轮、转角铝轮、出线板和压线轮。主线从导线滚轮送入投绳机,经转角铝轮转入投绳轮,由双压线轮与投绳轮挤压转动投入海中,出线板控制出线方向。

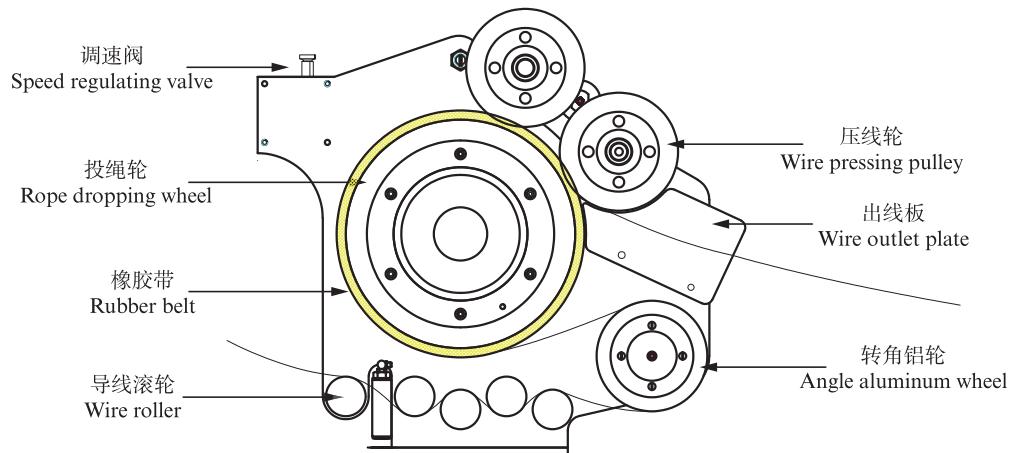


图1 延绳钓双压轮投绳机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the double-pressure wheel casting machine for longline fishing

1.2 延绳钓工作原理与钓钩深度模型

延绳钓作业依靠钓钩达到目标渔获的栖息水层进行精准捕捞,投绳机的不同转速影响出绳速度进而影响干线、钓钩所处水深,对目标渔获物的捕捞效率产生影响。调节投绳机调速阀控制投绳机转速,使干线、钓钩处于目标渔获活动水层是提高捕捞效率最直接有效的方式。

在海上作业过程中,延绳钓干线在水中的形状近似为悬链线(展开形状如图2所示),影响延绳钓钓钩实际深度的因子较多^[14],例如风速、漂流速度、钓钩编号位置等,剔除微小影响因子^[15],实际钓钩深度模型的建立需要测定目标海域实际的延绳钓钓钩深度,延绳钓钓钩理论深度的计算基于悬链线钓钩深度计算公式^[16]:

$$D_{\delta} = h_a + h_b + l \left[\sqrt{1 + \cos^2 \varphi_0} - \sqrt{\left(1 - \frac{2\delta}{m}\right)^2 + \cos^2 \varphi_0} \right] \quad (1)$$

$$L = v_2 \times m \times t \quad (2)$$

$$l = v_1 \times m \times \frac{t}{2} \quad (3)$$

$$K = \frac{L}{2l} = \frac{v_2}{v_1} = \cot \varphi_0 \operatorname{sh}^{-1}(\tan \varphi_0) \quad (4)$$

式中: D_{δ} 为钓钩的理论深度; h_a 为支线长; h_b 为浮子绳长; l 为两浮子间干线弧长的一半; φ_0 为水平面与干线支承点切线的夹角; δ 为钓钩钩号; m 为两浮子间干线分段数,即为两浮子间支线数加1; L 为海面上两浮子间的距离; v_2 为作业中的实时船速; t 为投绳时相邻两支线相隔时间; v_1 为作业时投绳机出绳速度; K 为短缩率。其中 φ_0 在实际生产中难以直接测量,一般处理办法为通过短缩率 K 间接得出^[17]。

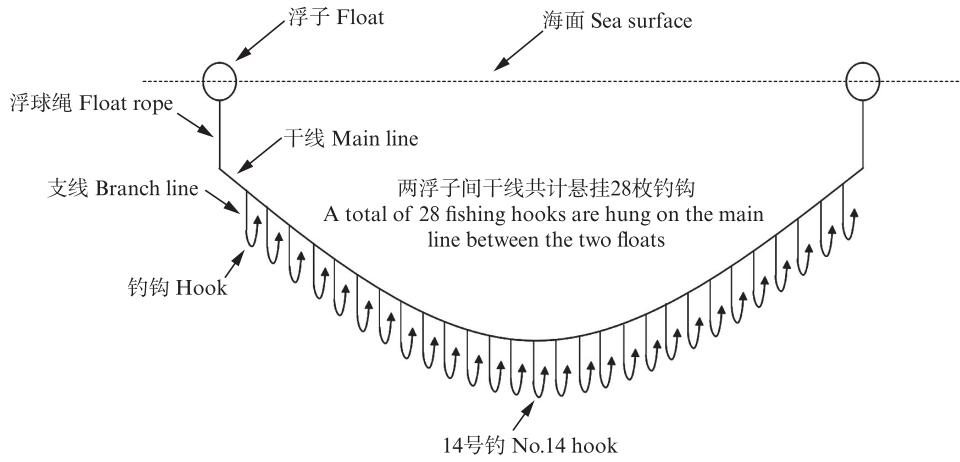


图2 延绳钓渔具示意图

Fig. 2 Schematic diagram of longline fishing gear

1.3 智能投绳控制系统设计

传统的投绳机控制方式是依靠经验人工调节,在渔船航行速度变化时,船员调节投绳机的调速阀开度以改变出绳速度。由于海洋环境复杂多变,在天气、海风、海浪等因素的影响下,渔船在相同动力下航行的速度难以保持恒定,虽然有航速表,但船上工作人员对船速表无法保证持续观察,这样会导致投绳机的调速不能及时跟随船速变化而变化,产生时滞误差。根据南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓钓钩深度模型可知,钓钩深度还受到风速、漂流速度等因素影响,传统人工作业通常在处理出绳速度时忽略这些影响因素,造成系统误差。因此,传统的投绳机控制方式在工作过程中存在调节时滞误差高,下钩准确率低等缺点。

对于以上问题,结合南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓钓钩深度模型,设计了一种基于模糊PID控制方法的智能投绳控制系统,以提高投绳机的响应速度与控制精度,进而改善目标渔获捕捞效

率。智能投绳控制系统设计流程如图3所示。

基于宋利明等^[18]的研究方法,根据南太平洋的调查作业实测数据研究的南太平洋金枪鱼延绳钓钓钩深度模型设计投绳控制系统,该模型是采用多元线性回归拟合钓钩实际深度与理论深度、目标海域环境参数和投绳机工作参数的数学模型,推导出南太平洋金枪鱼延绳钓钓钩深度模型。该模型输入为钓具参数、船速及环境因素等,输出为最佳出绳速度和钓钩深度,精确控制投绳机出绳速度与最佳出绳速度一致,可以使钓钩深度尽可能多地达到目标渔获活动区间。本研究所设计的智能投绳控制系统利用传感器获取渔船航速、环境信息和投绳机工作状态实时数据等^[19],由 Siemens S7-1200 PLC 控制器计算南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓钓钩深度模型,并对传感器采集数据实时处理,输出最佳出绳速度。本系统通过机械结构设计将步进电机与投绳机调速阀相连,由 PLC 控制器对步进电机步长及转动方向进行控制,采用模糊 PID 算法控制调速阀调

节液压系统阀门开度及液压油流量,驱动投绳机马达改变出绳速度,使投绳机实时匹配最佳出绳速度,使钓钩深度尽可能达到理论钩深。该智能投绳控制系统将传统人工作业中的人工决策改

进为PLC智能输出,提高控制实时性与控制精度,减轻了渔船工作人员的工作负担,提高渔船捕捞作业工作效率。

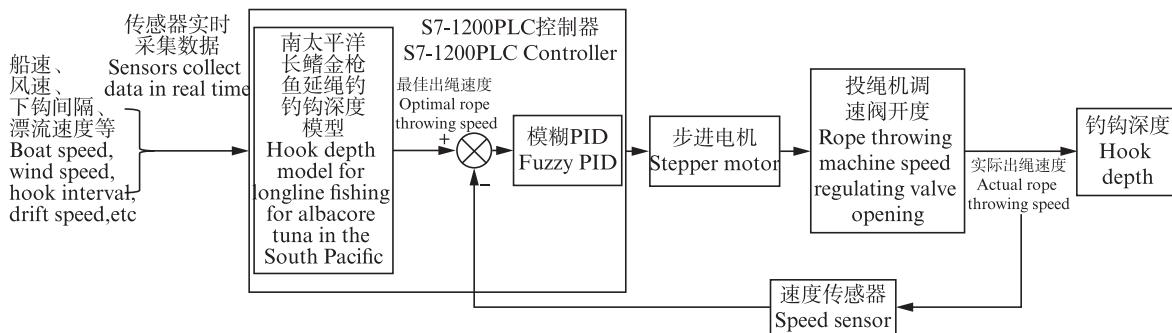


图3 智能投绳控制系统设计流程

Fig. 3 Intelligent throwing-rope control system design flow

1.4 试验方法

1.4.1 仿真实验

投绳机在海洋环境下工作,需根据船速进行快速跟踪以及保持稳定输出。在实际生产过程中,采用PID系列控制方式可以根据期望出绳速度与实际出绳速度的偏差对投绳机进行调节,而不受滚筒式钓机系统其他部件影响,同时对投绳速度误差及稳定性达到较好的控制效果。对本质为阀控液压马达系统的投绳机系统的控制方式选用PID系列中的整定PID与模糊PID进行对比,通过Simulink仿真软件建立控制系统模型,分析不同控制方式对控制系统的影响,判断优劣。

整定PID控制方式采用Z-N法^[20]求出PID最佳参数,并构建PID控制器。Z-N法即通过增加比例增益(K_p),观察系统响应,找到引起振荡的最小 K_p 值(即临界比例增益 K_c),根据Z-N法则,可以计算积分时间(T_i)和微分时间(T_d)。根据计算得到的 T_i 和 T_d ,结合 K_c ,可以得到最终的PID控制器参数。在整定PID控制的基础上加入模糊控制器形成模糊控制方法,模糊控制规则的设计如下:当实际出绳速度与最佳出绳速度误差较大时,增大比例增益(K_p),同时误差变化率(e_c)增大,此时应减小微分增益(K_d),否则将使系统稳定性降低;当实际出绳速度与最佳出绳速度接近时,选用合适的比例增益(K_p)减小系统超调以及适中的积分增益(K_i)、微分增益(K_d)改善系统响应速度;当实际出绳速度几乎达到最佳出绳速度

时,增大积分增益(K_i)减小系统稳态误差,此时误差变化率(e_c)较小,应增大微分增益(K_d)以减小系统振荡及提高系统抗干扰能力。

目标出绳速度与实际速度的误差(e)取值范围与误差变化率(e_c)的取值范围设为 $[-8, 8]$ 。PID控制器参数的修正量分别设置: ΔK_p 的取值范围设为 $[-6, 6]$; ΔK_i 的取值范围设为 $[-6, 6]$; ΔK_d 的取值范围设为 $[-1, 1]$ 。设定输入输出对应的论域皆为 $[-6, 6]$,因此误差(e)和误差变化率(e_c)的量化因子 K_e 、 K_{ec} 均为0.75。PID控制器参数的修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的量化因子 $K_{\Delta kp}$ 为1、 $K_{\Delta ki}$ 为1、 $K_{\Delta kd}$ 为6。输入输出共5个变量均采用等距离三角形隶属度函数。设计模糊规则表,如表1所示,其中NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB为模糊集合的语言变量,分别表示大负值、中负值、小负值、零、小正值、中正值、大正值。

仿真实验以正常船速时延绳钓钩深度模型得出最佳出绳速度5 m/s为输入。从仿真结果(图4)来看,采用整定PID控制方式超调量为25.8%,上升时间为3.55 s,调整时间为25.39 s。模糊PID控制方式下超调量为8.4%,上升时间为2.18 s,调整时间为18.68 s。模糊PID控制较整定PID控制方式超调小、调节时间短、响应速度快,可以降低投绳机的振荡频率,适用于钓钩深度影响因子(船速、风速、漂流速度等)较多的复杂海洋环境,因此本系统采用模糊PID控制方式。

表1 模糊控制规则表
Tab. 1 Fuzzy control rule

$\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e_c	NB	NB/PB/NS	NB/PB/PS	NM/PM/PB	NM/PM/PB	NS/PS/PM	ZO/ZO/PM
	NM	NB/PB/NS	NB/PB/PS	NM/PM/PB	NS/PS/PM	NS/PS/PM	ZO/ZO/PS
	NS	PS/PM/ZO	NB/PB/PS	NM/PS/PM	NS/PS/PM	ZO/ZO/PS	PS/NS/ZO
	ZO	NM/PM/ZO	NM/PM/PS	NS/PS/PS	ZO/ZO/ZO	PS/PS/PS	PM/PM/PS
	PS	NS/PM/ZO	NM/MS/ZO	NS/ZO/PS	PS/NS/ZO	PS/PS/ZO	PM/NM/ZO
	PM	NS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	PS/NS/NS	PM/NS/NS	PM/NM/NS	PM/NB/NS
	PB	ZO/ZO/NB	ZO/ZO/NM	PM/NS/NM	PM/NM/NM	PM/NM/NS	PB/NB/NB

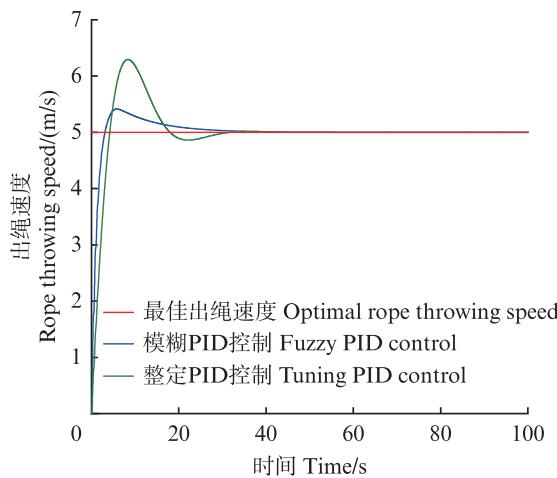


图4 仿真结果
Fig. 4 Simulation results

1.4.2 验证实验

经仿真实验后,在实验室环境利用大滚筒模拟海上投绳机作业情况做验证实验。实验室环境模拟如图5所示。



图5 实验室模拟验证实验场景
Fig. 5 Laboratory simulation verifies experimental scenarios

在实验室环境部署智能投绳控制系统,验证整定PID控制与模糊PID控制2种控制方式的控制效果。以最佳出绳速度5 m/s为输入,出绳速度采样频率为1 s/次,验证实验结果如图6所示。

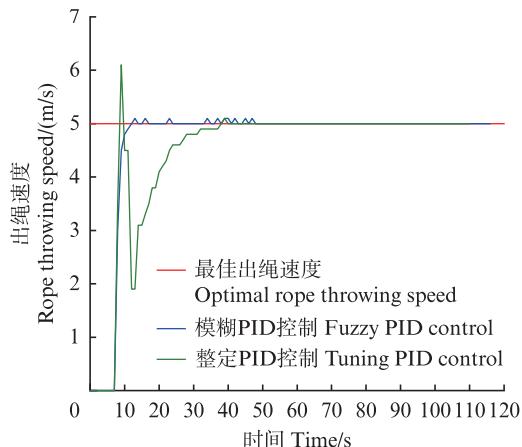


图6 验证实验结果
Fig. 6 Results of the verifying experimental

根据实验室模拟实验得到:整定PID控制方式的超调为22%,上升时间为9 s,调整时间为32 s;模糊PID控制方式的超调量为2%,上升时间为10 s,调整时间为11 s。与仿真实验中模糊PID效果更优相符合。所以最终在智能投绳控制系统中选用模糊PID的控制方式。

1.4.3 海试试验

当前低温延绳钓渔船所捕捞的金枪鱼主要为长鳍金枪鱼,海试试验以南太平洋长鳍金枪鱼延绳钓钩深度模型为基础,在作业渔船上部署智能投绳控制系统,试验渔船为中水集团远洋股份有限公司斐济分公司所属低温金枪鱼延绳钓渔船“中水747”,试验时间为2023年7月7日—2023年9月23日(以下简称为“本航次”),试验海域为

南太平洋所罗门群岛专属经济区^[21]。试验船只总长40 m,型宽7.8 m。

在正常海况下,延绳钓渔船每天作业1次,在斐济时间5:00~6:00开始投钩,持续5~6 h,每日投钩时船速在风力和海流的影响下为7~9 kn,平均船速约8 kn;起绳时间依据当日渔情决定,大约在斐济时间15:00~03:00(第二天),持续约10 h。本航次共81 d,实际作业54次,总投放钓钩172 700枚,平均每次作业投放钓钩3 198枚。在54次作业中,采用传统人工作业方式39次,总计投放钓钩125 100枚,平均每次作业投放钓钩3 208枚;智能投绳控制系统作业15次,总计投放钓钩47 600枚,平均每次作业投放钓钩3 173枚。除两种不同作业方式外,其余渔获效率影响因素(如海域、环境、鱼饵等)保持一致,同时采取穿插作业,即智能投绳控制系统作业与传统人工作业每天交换,避免因鱼群分布因素导致试验结果差异。

试验中采集出绳速度、钓钩深度和渔获尾数及体质量等数据,采取智能投绳控制系统作业与传统人工作业2种作业方式,评判其优劣性^[22]。船速信号采集采用HS6001-485GPS/北斗定位模块,更新频率为1 Hz,定位精度为2.5 m,同时该模块还可提供渔船船位、航向等信号。

2种作业方式的出绳速度计算方法相同,均采用霍尔传感器脉冲计算法,在投绳轮上部署霍尔传感器,投绳轮每转1圈,霍尔传感器发出1次脉冲信号,测量投绳轮外圈周长,记录投绳轮转动圈数及对应时间,经PLC控制器计算得出相应出绳速度。为保证出绳速度测量的准确性,将霍尔传感器1次脉冲间隔作为1个周期,计算每5个周期的平均出绳速度并输出,避免了环境因素等造成测速误差,计算公式:

$$v_c = (C \times 5) / T_i \quad (5)$$

式中: v_c 为出绳速度; C 为投绳轮外圈周长; T_i 为投绳轮每转动5圈所需时间。

2种作业方式的钓钩深度计算方法相同,均采用道万自容式深度测量仪,同时,本次深度数据来源均为14号钩。该仪器最小采样间隔为0.1 s,供电电压为DC3~5V,将该仪器挂在延绳钓支线末端钓钩位置,自动记录所处水深的压力值,通过公式(6)即可得出该位置水深。

$$D_h = P_h \times 1.019\ 716 \quad (6)$$

式中: D_h 为钓钩深度; P_h 为钓钩所处深度压力值。

在试验中,每天起绳过程中记录渔获种类、数量及部分体质量数据^[23]。

1.5 数据处理

本次试验主要对投绳机的出绳速度、钓钩深度和渔获情况进行数据处理和分析。其中出绳速度由PLC控制器采集霍尔传感器数据,通过上位机实时记录保存, GPS传感器获取船速信号,根据南太平洋金枪鱼延绳钓钓钩深度模型计算出最佳出绳速度,与实测速度进行对比分析。

出绳速度准确率由平均绝对误差衡量,计算公式:

$$P_{MAE} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |v_{AS} - v_{BS}| \quad (7)$$

式中: n 为抽样次数; v_{AS} 为实际出绳速度; v_{BS} 为最佳出绳速度。

钓钩深度由钓钩有效率来衡量。本次试验对14号钩采集的钓钩深度数据进行拟合校正,获得两浮子间28枚钓钩的深度数据,与长鳍金枪鱼栖息深度区间(160~240 m)进行匹配,钓钩有效率计算公式如下:

$$E_h = \frac{I}{T_h} \times 100\% \quad (8)$$

式中: E_h 为钓钩有效率,%; I 为落入长鳍金枪鱼栖息深度区间的钓钩数; T_h 为总钓钩数。

渔获情况统计通过上钩率进行计算。上钩率的定义为每次作业每1千枚钓钩的渔获尾数,计算公式如下:

$$P = T_f / (N \times 10^{-3}) \quad (9)$$

式中: P 为上钩率; T_f 为渔获尾数; N 为钓钩总数。

平均平方差和用来表征作业过程中捕获目标渔种金枪鱼体质量样本分布离散状态,平均平方差和越小表示捕获目标渔种体质量离散较小,平均平方差和越大表示捕获目标渔种体质量离散较大。

$$S_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (10)$$

式中: n 为样本数量; x_i 为样本数据值; \bar{x} 为样本平均值。

2 结果

2.1 出绳速度对比

基于南太平洋钓钩深度模型,智能投绳控制系统的出绳速度与模型中最佳出绳速度一致才能达

到最佳钩钩深度,提高目标金枪鱼的捕捞效率,所以对相同船速下出绳速度的对比分析可以更好地反映出智能投绳控制系统作业和传统人工作业的差异。

在渔船作业过程中存在过高船速、正常船速、过低船速3种状态。在顺风顺流的情况下,实际航行速度受风、流、浪等因素的影响会偏低;在逆风

逆流的情况下,实际航行速度偏高。在正常船速(4.0 m/s)、过高船速(4.3 m/s)、过低船速(3.7 m/s)等3种行驶状态下,以南太平洋钩钩深度模型计算的最佳出绳速度为基准,智能投绳控制系统作业和传统人工作业方式分别采样100 min,采样频率为1 min/次,记录3种行驶状态下对应的投绳机出绳速度如图7所示。

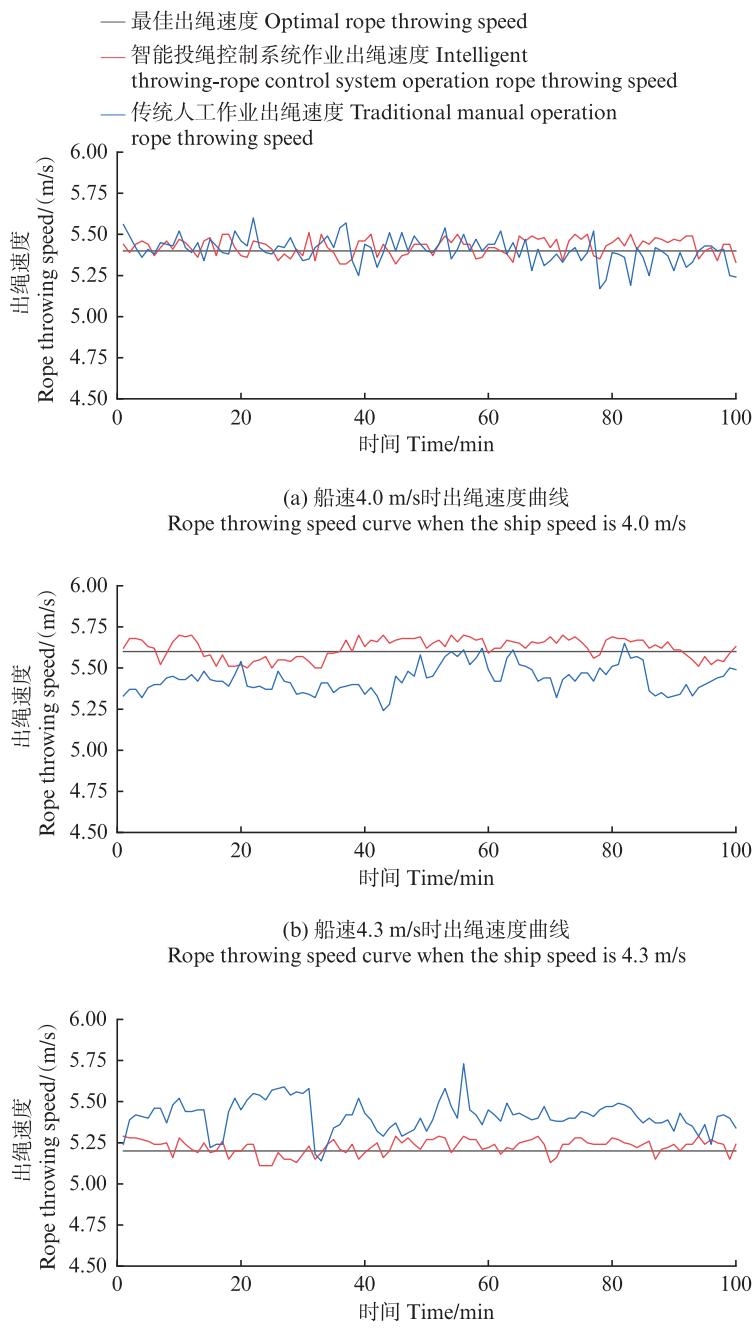


图7 出绳速度曲线

Fig. 7 Rope throwing speed curve

传统人工作业方式正常船速、过高船速、过低船速下与对应的最佳出绳速度存在误差。传统人工作业方式在3种情况下的平均绝对误差分别为1.07%、2.98%、4.14%,在过高船速和过低船速下误差较大,其中正常船速下的出绳速度最大误差为4.26%,过高船速下的出绳速度最大误差为6.43%,过低船速下的出绳速度最大误差为10.19%;智能投绳控制系统作业在3种情况下的出绳速度与最佳出绳速度的平均绝对误差分别为0.94%、1.01%、0.88%,基本保持不变,其中正常船速出绳速度最大误差为2.04%,过高船速出绳速度最大误差为1.79%,过低船速出绳速度最大误差为1.73%。

2.2 钩钩深度对比

传统人工作业和智能投绳控制系统作业分别采集了5次作业的钩钩深度数据,均为14号钩钩,钩钩深度数据采样频率为1 s/次,设定深度数据采集时间从斐济时间09:00到13:00,共计4 h。传统人工作业最深钩钩深度为315.80 m,平均钩钩深度为192.83 m;智能投绳控制系统作业最深钩钩深度为340.57 m,平均钩钩深度为230.20 m。钩钩深度趋势如图8所示。

长鳍金枪鱼偏好觅食的水层应为160~240 m水层^[8],智能投绳控制系统作业中最深钩钩的平均深度为230.20 m,按照悬链线公式计算,两浮子间28枚钩钩能够保持在160~240 m深度的钩钩为15枚,钩钩有效率为53.57%,能够最大化保持钩钩深度与长鳍金枪鱼栖息深度重合,并且智能投绳控制系统作业钩钩深度在长时间范围内

较为稳定。传统人工作业中最深钩钩的平均深度为192.83 m,经计算,两浮子间28枚钩钩能够保持在160~240 m深度的钩钩为11枚,钩钩有效率为39.29%,且传统人工作业中钩钩深度变化较大,钩钩在150~300 m间波动,不能稳定保持在一个深度区间内,对长鳍金枪鱼捕捞具有随机性,捕捞效率不高。

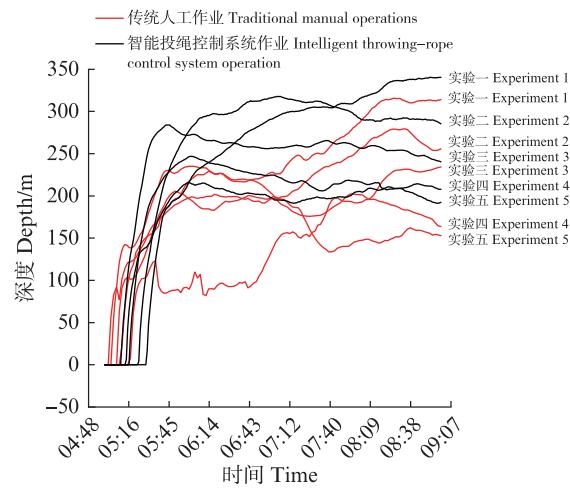


图8 钩钩深度趋势

Fig. 8 Trend of fishing hook depth

2.3 主要渔获种类及其上钩率等

本航次共钓获鱼类12种,长鳍金枪鱼、黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)和大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)为主要渔获物。本次试验共作业54次,共计捕捞长鳍金枪鱼1 651尾,黄鳍金枪鱼156尾,大眼金枪鱼100尾。智能投绳控制系统作业和传统人工作业次数、投放的钩钩数、主要渔获尾数、质量等见表2。

表2 智能投绳控制系统作业和传统人工作业次数、投放的钩钩数和渔获量情况

Tab. 2 Number of intelligent throwing-rope control system operation and traditional manual operation, number of hooks deployed, and catch amount

投绳控制方式 Deployment control method	作业次数 Number of operation	下钩数 Number of hooks	总渔获量 Total catch/尾			平均渔获量 Average catch/(尾/次)		
			长鳍 Albacore tuna	黄鳍 Yellowfin tuna	大目 Bigeye tuna	长鳍 Albacore tuna	黄鳍 Yellowfin tuna	大目 Bigeye tuna
智能投绳控制系统 Intelligent throwing-rope control system	15	47 600	552	28	34	36.80	1.90	2.30
传统人工 Traditional manual	39	125 100	1 099	128	66	28.20	3.30	1.70
总计 Total	54	172 700	1 651	156	100	30.57	2.89	1.85

根据公式(9),计算长鳍金枪鱼和黄鳍金枪鱼的上钩率,如图9所示,在智能投绳控制系统作业下,长鳍金枪鱼的上钩率为11.59尾/千钩,黄鳍金枪鱼的上钩率为0.58尾/千钩。传统人工作业长鳍金枪鱼的上钩率为8.79尾/千钩,黄鳍金枪鱼的上钩率为1.02尾/千钩。

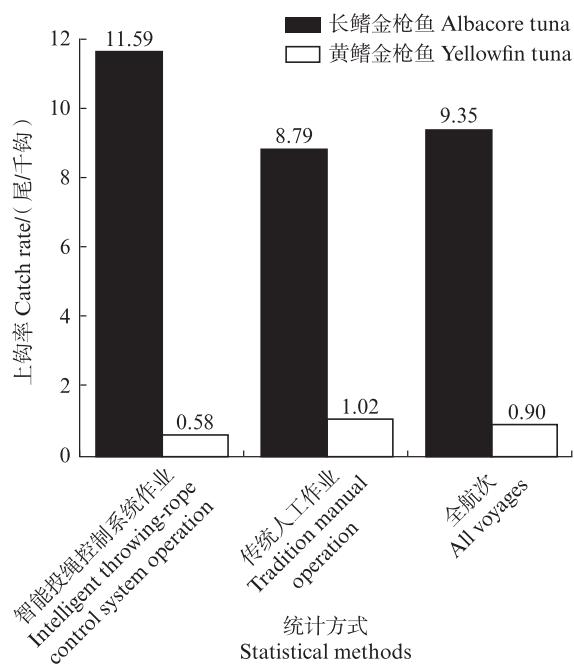


图9 长鳍金枪鱼和黄鳍金枪鱼上钩率统计

Fig. 9 Statistics on the hooking rate of Albacore tuna and Yellowfin tuna

试验过程中记录的智能投绳控制系统作业和传统人工作业捕获的长鳍金枪鱼尾数、总质量、平均体质量见表3。

在智能投绳控制系统作业中随机人工称量124尾长鳍金枪鱼的体质量,长鳍金枪鱼平均体质量为19.10 kg/尾,最小体质量为14.00 kg,最大体质量为24.50 kg,其中(18,22]kg为优势体质量,占48.39%;在传统人工作业中随机人工称量194尾长鳍金枪鱼的体质量,长鳍金枪鱼的平均

体质量为17.14 kg/尾,最小体质量为10.00 kg,最大体质量为26.00 kg,其中(14,18]kg为优势体质量,占47.94%。随机称量长鳍金枪鱼体质量分布如图10所示。

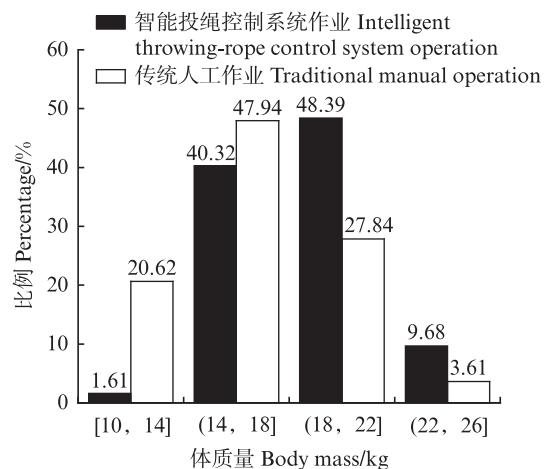


图10 长鳍金枪鱼体质量分布

Fig. 10 Albacore tuna body mass distribution

根据公式(10),智能投绳控制系统作业长鳍金枪鱼体质量平均平方差和为6.23,传统人工作业长鳍金枪鱼体质量平均平方差和为9.45。

3 讨论

智能投绳控制系统作业相对于传统人工作业优势在于能够利用所部署传感器,经实时数据与南太平洋长鳍金枪鱼钓钩深度模型处理后,得出科学的实时出绳速度,并经过智能投绳控制系统中的模糊PID控制模块,对出绳速度进行精准实时控制,得到符合目标渔获活动区间稳定钓钩深度,进而获得渔获效率的提高。对两种不同作业方式的讨论从出绳速度的控制切入,延伸到钓钩深度和渔获效率,获得三者相关性结论。

表3 智能投绳控制系统作业和传统人工作业捕获的长鳍金枪鱼尾数、总质量、平均体质量

Tab. 3 Number, total mass, and average body mass of albacore tuna caught by intelligent throwing-rope control system operation and traditional manual operation

投绳控制方式 Deployment control method	渔获量 Catch/尾	总质量 Total mass/kg	平均体质量 Average body mass/kg
智能投绳控制系统 Intelligent throwing-rope control system	124	2 369.0	19.10
传统人工 Traditional manual	195	3 325.7	17.14
合计 Total	319	5 694.7	17.85

3.1 出绳速度

金枪鱼延绳钓作为一项复杂而又精密的捕捞技术,选取出绳速度作为智能投绳控制系统的控制对象有助于排除诸如大滚筒惯性、液压系统压力等投绳过程中众多微小影响因素对延绳钓钩深度控制效果的影响,从而精简了控制过程,提高了控制精度和可靠性。

相较前人已做研究^[24]中利用PLC结合数据库策略控制出绳速度方案,本研究设计的智能投绳控制系统引入了钩钩深度模型实时计算策略以及模糊PID闭环控制方法,采用实时计算策略避开了数据库方案中需对大量数据进行处理,提高了系统响应速度,系统轻量化程度提高。数据库设定出绳速度只能保证其输出量的准确性,对于出绳速度受环境因素干扰造成的误差缺乏纠正机制。智能投绳控制系统引入闭环控制,针对由海浪、绳结震荡等扰动因素产生的出绳速度波动进行优化,将实时出绳速度信号反馈到PLC控制器,与目标出绳速度匹配,减小系统扰动稳态误差。同时,由于控制设备存在无法避免的硬件时滞限制,需设置工作过程允许的控制余量,智能投绳控制系统在满足实际生产需求的前提下设计误差补偿增加控制余量,在实际实验中设置最佳出绳速度±2%的误差余量引入智能投绳控制系统作为误差补偿,实际出绳速度在当前最佳出绳速度±2%误差内不做调整,智能投绳控制系统作业方式在出绳速度控制稳定性方面取得了改进效果。

3.2 钩钩深度

除出绳速度控制方式不同外,试验设置影响钩钩深度的其他因素保持一致,并采取穿插作业,尽可能减小因天气、海流等原因造成的试验误差。同时,每次试验大滚筒设备工况及试验流程保持一致,尽可能减小因设备原因或者人为原因造成试验误差。出绳速度不同可能导致钓具水平张力的差异,钓具水平张力的影响因素主要有主线跨度和主线单位长度质量^[25]。在每次投绳过程中,主线保持一致,每两浮子间均挂钓钩28枚,每两枚钓钩间隔时间均为6 s,两种不同作业方式在出绳速度上的差异导致每两浮子间主线跨度可能存在差异。智能投绳控制系统实时调整出绳速度至最佳值,保证主线呈最佳悬链线分布,而传统人工作业因出绳速度不稳定导致悬

链线分布偏离,钓具水平张力偏离,影响钓钩沉降效率。钓具水平张力差异对两种作业方式钓钩深度差异存在一定影响。

通过实测钓钩深度数据,智能投绳控制系统作业钓钩最大深度稳定在目标渔获区间内的时长占比为37.7%,传统人工作业钓钩最大深度稳定在目标渔获区间内的时长占比为31.4%,由于所测钓钩深度为两浮子间主线最深位置,结合钓钩有效率情况,智能投绳控制系统作业的钓钩深度稳定性较传统人工作业有较大优势。

3.3 出绳速度、钩钩深度与渔获情况相关性

现有研究以金枪鱼渔获率与钩钩深度的关系^[26]为主,本研究从影响钩钩深度的投绳机出绳速度切入,讨论出绳速度、钩钩深度与渔获效率的相关关系如下。

出绳速度控制直接影响到钩钩深度的稳定性。传统人工作业下,由于出绳速度稳态误差范围大,且出绳速度控制稳定性较低,造成干线在海中沉降速度变化较大,导致每次作业钓钩在150~300 m深度区间波动,与目标鱼种栖息深度重合率差。智能投绳控制系统作业能够将出绳速度稳态误差范围控制在较小范围内,且出绳速度控制稳定性高,干线在海中沉降速度变化不大,在钓钩沉降到目标鱼种栖息深度后稳定时长占比高,钓钩深度稳定性好。

渔获情况与钩钩深度情况成正相关关系^[27]。传统人工作业钓钩有效率随钩钩深度波动而变化,导致钓钩有效率较智能投绳控制系统作业下降14.29%,渔获上钩率和体质量稳定性受钓钩有效率影响下降。最佳出绳速度按照目标渔获设置使钩钩深度分布区间与目标鱼种捕捞区间符合,长鳍金枪鱼智能投绳控制系统作业较传统人工作业上钩率提高31.85%。黄鳍金枪鱼智能投绳控制系统作业较传统人工作业上钩率降低43.14%,证明了渔获情况与钩钩深度情况的正相关性。

渔获质量是作业效率的最直接表现。智能投绳控制系统作业较传统人工作业,目标渔获优势体质量区间从(14,18]kg增长至(18,22]kg,平均体质量增长11.44%。智能投绳控制系统作业长鳍金枪鱼体质量平均平方差和较传统人工作业降低34.07%,在智能投绳控制系统作业下捕获长鳍金枪鱼体质量散布较小,捕获长鳍金枪鱼的

体质量稳定性更好,渔获质量较传统人工作业有明显提升,且有利于资源的养护。

综上,出绳速度的控制精度及稳定性、钓钩深度情况及有效率和渔获情况存在正相关关系。出绳速度作为南太平洋金枪鱼延绳钓钓钩深度模型中直接输出变量,在外部环境一致的情况下,出绳速度控制精度及稳定性越高,钓钩深度稳定性越好,钓钩有效率越高,渔获质量越优。采用智能投绳控制系统可以直接将出绳速度与钓钩深度和目标鱼种的栖息水层建立联系,直接对捕捞效率和渔获物品质产生影响。智能投绳控制系统在出绳速度控制、钓钩深度稳定性以及渔获情况方面均优于传统人工作业。智能投绳控制系统建立了出绳速度与渔获效率的直接联系,对目标渔获捕捞效率的提高有积极作用,从而实现捕捞作业经济效益的最大化。

4 结论

本研究基于金枪鱼延绳钓大滚筒设备以及南太平洋海域金枪鱼的延绳钓钓钩深度模型设计了1种金枪鱼延绳钓智能投绳控制系统。出绳速度作为影响钓钩深度的重要因子,直接影响渔获效率。通过仿真实验及验证实验,该系统采用模糊PID控制方式对出绳速度进行闭环控制,提高出绳速度控制精度,添加误差补偿环节,提高出绳控制稳定性。与传统人工作业比较,智能投绳控制系统精度高、稳定性好、响应速度快,同时提高了渔船自动化程度,减少了人工劳动。海试试验对该系统进行实际验证,目标鱼种为长鳍金枪鱼:出绳速度稳态误差范围控制在2%左右,并能随船速的不同自动调节出绳速度达到最佳速度;智能作业最深钓钩平均深度为230.20 m,两浮子间53.57%钓钩的深度与长鳍金枪鱼栖息深度重合;在渔获效率上智能投绳控制系统作业相比传统作业,长鳍金枪鱼上钩率提高31.85%,捕获长鳍金枪鱼平均体质量提高11.44%。试验结果表明,智能投绳控制系统作业效率、钓钩深度准确性以及钓钩深度保持方面优于传统人工作业,能有效提升金枪鱼目标鱼种的捕捞效率,提高产量。本试验充分验证了延绳钓机智能投绳控制系统作业具有更好的准确性与实用性,可为金枪鱼延绳钓大滚筒钓机的智能化研究与优化提供依据。

感谢上海高水平地方高校创新团队(渔业工程与装备团队)与中水集团远洋股份有限公司的支持。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] SWIMMER Y, ZOLLETT E A, GUTIERREZ A. Bycatch mitigation of protected and threatened species in tuna purse seine and longlinefisheries [J]. *Endangered Species Research*, 2020, 43: 517-542.
- [2] 马家志,虞聪达,郑基,等.北大西洋公海金枪鱼延绳钓渔具渔法及其性能调查研究[J].浙江海洋学院学报(自然科学版),2015,34(3):287-292.
MA J Z, YU C D, ZHENG J, et al. Study on fishing gear and fishing method and fishing performance about tuna longline in the high sea of North Atlantic Ocean[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2015, 34(3): 287-292.
- [3] SONG L M, LI J, GAO P F, et al. Modeling the hook depth distribution of pelagic longlining in the equatorial area of Indian Ocean[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2012, 11(4): 547-556.
- [4] 郭刚刚,张胜茂,樊伟,等.南太平洋长鳍金枪鱼垂直活动水层空间分析[J].南方水产科学,2016,12(5):123-130.
GUO G G, ZHANG S M, FAN W, et al. Spatial analysis of vertical active layer of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) in the South Pacific Ocean[J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(5): 123-130.
- [5] ZHOU C, HE P G, XU L X, et al. The effects of mesoscale oceanographic structures and ambient conditions on the catch of albacore tuna in the South Pacific longlinefishery [J]. *Fisheries Oceanography*, 2020, 29(3): 238-251.
- [6] 宋利明,周旺.基于ANSYS Workbench力学仿真的金枪鱼延绳钓钓钩深度[J].渔业现代化,2021,48(4):85-94.
SONG L M, ZHOU W. Hook depth of pelagic longline based on ANSYS Workbench simulation [J]. *Fishery Modernization*, 2021, 48(4): 85-94.
- [7] 杨嘉樑,黄洪亮,宋利明,等.基于分位数回归的库克群岛海域长鳍金枪鱼栖息环境综合指数[J].中国水产科学,2014,21(4):832-851.
YANG J L, HUANG H L, SONG L M, et al. An integrated habitat index for albacore tuna (*Thunnus alalunga*) in the waters near the Cook Islands based on the quantile regression method [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(4): 832-851.
- [8] 雷晓顺,侯帅,秦璇,等.电液比例阀控液压马达系统的模糊PID恒速控制[J].流体传动与控制,2016(1):42-46, 49.

- LEI X S, HOU S, QIN X, et al. Electro-hydraulic proportional valve-controlled hydraulic motor system of fuzzy PID constant speed control [J]. *Fluid Power Transmission & Control*, 2016(1): 42-46, 49.
- [9] 陆金华, 朱兴龙, 付光华, 等. 液压系统进油节流调速的模糊PID控制策略与仿真研究[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(4): 18-22.
- LU J H, ZHU X L, FU G H, et al. Research on the fuzzy PID control strategy and simulation for throttling speed regulation of hydraulic system [J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2020, 49(4): 18-22.
- [10] 喻瑞波, 蔡宛涛, 陈瑞, 等. 基于模糊PID的防爆叉车液压马达同步驱动控制方法[J]. 制造业自动化, 2022, 44(8): 144-147, 152.
- YU R B, CAI W T, CHEN R, et al. Synchronous drive control method of explosion-proof forklift hydraulic motor based on fuzzy PID [J]. *Manufacturing Automation*, 2022, 44(8): 144-147, 152.
- [11] COELHO R, FERNANDEZ-CARVALHO J, SANTOS M N. Habitat use and diel vertical migration of bigeye thresher shark: overlap with pelagic longline fishing gear [J]. *Marine Environmental Research*, 2015, 112: 91-99.
- [12] 张洪亮, 徐汉祥, 徐晓, 等. 金枪鱼延绳钓投绳效率的研究[J]. 海洋渔业, 2007, 29(4): 302-306.
- ZHANG H L, XU H X, XU X, et al. Study on the casting efficiency of tuna longliner[J]. *Marine Fisheries*, 2007, 29(4): 302-306.
- [13] 郭财发, 周伯荣. 基于嵌入式平台的PLC系统设计与应用[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2022, 20(4): 31-34.
- GUO C F, ZHOU B R. Design and application of PLC system based on an embedded platform [J]. *Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 20(4): 31-34.
- [14] SONG L M, LI J, XU W Y, et al. The dynamic simulation of the pelagic longline deployment [J]. *Fisheries Research*, 2015, 167: 280-292.
- [15] CAMPBELL R A, YOUNG J W. Monitoring the behaviour of longline gears and the depth and time of fish capture in the Australian Eastern Tuna and Billfish Fishery [J]. *Fisheries Research*, 2012, 119-120: 48-65.
- [16] 李杰, 晏磊, 杨炳忠, 等. 罩网兼作金枪鱼延绳钓的钩深度与渔获水层分析[J]. 海洋渔业, 2018, 40(6): 660-669.
- LI J, YAN L, YANG B Z, et al. Estimation on hook and capture depth of tuna longline conducted by falling-net fishing vessel [J]. *Marine Fisheries*, 2018, 40(6): 660-669.
- [17] 宋利明, 高攀峰. 马尔代夫海域延绳钓渔场大眼金枪鱼的钓获水层、水温和盐度[J]. 水产学报, 2006, 30(3): 335-340.
- SONG L M, GAO P F. Captured depth, water-temperature and salinity of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) longlining in Maldives waters [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2006, 30(3): 335-340.
- [18] 宋利明, 谢凯, 赵海龙, 等. 库克群岛海域海洋环境因子对长鳍金枪鱼渔获率的影响[J]. 海洋通报, 2017, 36(1): 96-106.
- SONG L M, XIE K, ZHAO H L, et al. Effects of environmental variables on catch rates of *Thunnus alalunga* in waters near Cook Islands [J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(1): 96-106.
- [19] 张斌. 基于PLC的金枪鱼延绳钓装置控制系统设计[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- ZHANG B. The design of the control system of the tuna longline fishing device based on PLC [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [20] FENG H, YIN C B, WENG W W, et al. Robotic excavator trajectory control using an improved GA based PID controller [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 105: 153-168.
- [21] CHANG Y J, HSU J, LAI P K, et al. Evaluation of the impacts of climate change on albacore distribution in the South Pacific Ocean by using ensemble forecast [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 731950.
- [22] 李世通, 唐衍力. 瓦努阿图及周边海域金枪鱼延绳钓上钩率和渔场分布的初步研究[J]. 水产科学, 2017, 36(6): 714-721.
- LI S T, TANG Y L. Catch rate and distribution of tuna longlinefishery in Vanuatu and surrounding ocean area [J]. *Fisheries Science*, 2017, 36(6): 714-721.
- [23] SARI I, ICHSAN M, WHITE A, et al. Monitoring small-scale fisheries catches in Indonesia through a fishing logbook system: challenges and strategies [J]. *Marine Policy*, 2021, 134: 104770.
- [24] 崔秀芳, 张斌, 邵祺, 等. 基于PLC的金枪鱼延绳钓投绳机控制系统[J]. 制造业自动化, 2022, 44(10): 84-87.
- CUI X F, ZHANG B, SHAO Q, et al. PLC-based tuna longline casting machine control system [J]. *Manufacturing Automation*, 2022, 44(10): 84-87.
- [25] 郭小刚, 王刚, 宋晓东, 等. 悬链线竖向集中力作用下的构形分析和张力计算[J]. 计算力学学报, 2020, 37(4): 431-438.
- GUO X G, WANG G, SONG X D, et al. Configuration analysis and tension calculation of catenary under vertical concentrated force [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2020, 37(4): 431-438.
- [26] ZHU J F, XU L X, DAI X J, et al. Comparative analysis of depth distribution for seventeen large pelagic fish species captured in a longline fishery in the central-eastern Pacific Ocean [J]. *Scientia Marina*, 2012, 76(1): 149-157.

- [27] 杨胜龙. 次表层环境对热带中西太平洋黄鳍金枪鱼垂直水层分布和延绳钓渔获率影响研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
YANG S L. Study on the influence of subsurface

environment on the vertical distribution and longline catch rate of yellowfin tuna in the tropical central and western Pacific ocean [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.

Rope throwing speed control of large drum intelligent fishing machine and its effect on albacore tuna fishing results

LIU Yuqing¹, WU Shiteng¹, SONG Liming^{2,3}, FU Zhou¹, ZHANG Zichen¹

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China)

Abstract: The research and development of automated fishing equipment is a key factor in promoting the high-quality development of offshore fishing. In order to improve the efficiency and quality of tuna fishing in offshore operations, this study proposes an intelligent throwing-rope control system based on the hook depth model for south Pacific albacore tuna (*Thunnus alalunga*). The system employs a fuzzy PID control method that integrates real-time data collected by sensors deployed on operating fishing vessels, and dynamically adjusts the rope throwing speed through a PLC controller to ensure that the hook depth matches the habitat depth of the target fish species. The study first validated the effectiveness of the fuzzy PID control method in the intelligent throwing-rope control system through simulation and verification experiments, and then deployed the system for sea trials on the "Zhongshui 747" fishing vessel owned by CNFC Overseas Fishery Co., Ltd., comparing the rope throwing speed control precision, stability, hook depth, and fishing outcomes between the intelligent system and traditional manual operations. The results are as follows: (1) The rope throwing speed can be automatically adjusted to the optimal speed based on the ship's speed, control the steady-state error range of the ropethrowing speed to around 2%; (2) The average depth of the deepest hook was 230.20 m, and 53.57% of the hook depths between the two floats coincided with the albacore tuna's feeding depth; (3) The hook rate of albacore tuna increased by 31.85% and the target catch body mass range increased from (14, 18] kg to (18, 22] kg, improving the catch quality. This study shows that the intelligent throwing-rope control system outperforms traditional manual operations and the intelligent throwing-rope control system can effectively improve fishing efficiency and catch quality for target tuna species. This study provides a scientific basis for the intelligent control of tuna fishing equipment, driving technological innovation and intelligent upgrades in pelagic fishing equipment.

Key words: albacore tuna; intelligent throwing-rope control system; fuzzy PID; rope throwing speed; fishing efficiency