

文章编号: 1674 - 5566(2016)02 - 0314 - 07

海洋牧场智能化浮式聚鱼装备研发与现场试验

沈卫星¹, 胡庆松¹, 申屠基康², 姜亚洲³

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 宁波市海洋与渔业研究院, 浙江 宁波 315010; 3. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090)

摘要: 海洋牧场是减缓我国近海渔业资源衰退, 实现可持续利用的重要抓手, 鱼类行为控制是海洋牧场高效运行的四大关键技术之一。为满足海洋牧场系统化渔业生产和管理的需要, 研制了一种可业务化运行的智能化浮式聚鱼装备。该装备以无线网桥为通信核心, 运用继电器组分别控制水下监控系统、声音驯化系统、定量投饵系统、传感器等, 解决了开放式海域鱼类行为的驯化与控制问题。为解决驯化中出现的自相残杀和鱼类生长的“马太效应”, 研发了柔性分级驯化栅, 通过使用前后效果的对比分析发现能够明显提高驯化效果。所研发装备在象山港海洋牧场以黑鲷为对象进行了全过程试验, 针对核心区 and 周边三个对比区进行了长周期调查, 现场试验结果表明了其有效性, 能够有效提升鱼类行为控制水平, 为最终实现海洋牧场的高效运行提供了坚实支撑。

关键词: 海洋牧场; 黑鲷; 浮式聚鱼装备; 分级驯化; 鱼类行为控制; 远程监控

中图分类号: S 969 **文献标志码:** A

海洋牧场是一个新型的增养殖渔业系统, 即在某一海域内, 建设适应水产资源生态的人工生息场, 采用增殖放流和移植放流的方法, 将生物种苗经过中间育成或人工驯化后放流入海, 利用海洋自然生产力和微量投饵育成, 并采用先进的鱼群行为控制技术和环境监控进行科学管理, 使其资源量增大, 有计划且高效率地进行渔获^[1]。基于以上分析, 海洋牧场的高效运行需要微量投饵、鱼群行为控制、环境监控等专用技术装备进行支撑。

我国海洋牧场鱼类行为控制技术研究还处于起步阶段, 依据目前国情、实际运行经济承受能力以及海洋牧场的现实要求, 所研发装备需要能够完成相关功能, 实现低成本高可靠性运行^[2]。基于此, 本文主要从如下几个方面开展工作: (1) 逻辑性控制声波和精准投饵, 使鱼类形成条件反射, 以达到对鱼类活动的行为控制; (2) 通过装备的无人值守驯化把放流的鱼苗以及野

生的幼鱼聚集在预定海域内; (3) 水下实时观测鱼群的数量、大小和活动范围, 实现视频的远程无线传输; (4) 通过搭载的传感器实时检测预定水域的水环境变化, 所测数据回传服务器; (5) 通过柔性分级驯化栅实现均匀性驯化, 减缓自相残杀。作为东海重要的放流鱼种, 本设计中均以黑鲷的趋声性和生理特性为对象进行相关研究和试验, 从而验证装备的可行性和可靠性^[3]。

1 系统的结构设计 with 功能组成

智能化浮式聚鱼装备的结构如图 1 所示, 该装备主要由核心控制单元、分级驯化栅、连接细缆、地锚组成。装备核心为控制单元, 如图 2 所示, 该单元由无线传输天线 1、太阳能板 2、主控箱 3、浮体 4、伸缩杆 5、指示灯 6、水下摄像头 8、水下音响 9、传感器 10 等组成。图 2 中, 主控箱作为控制单元载体的同时又是海上的工作平台, 利用地锚将整个装置固定在海洋牧场的预定区域, 定

收稿日期: 2015-05-18 修回日期: 2015-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(青年)基金项目(51309150); 宁波市科技攻关重大专项(2013C11014); 农业部公益性行业专项(201303047); 上海市科技兴农重点攻关项目(2014-4-4)

作者简介: 沈卫星(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机械工程。E-mail: 1961707215@qq.com

通信作者: 胡庆松, E-mail: qshu@shou.edu.cn

量投饵装置安装在主控箱内部,且通过主控箱内部的可编程逻辑控制器实现定时定量自动投喂饵料。

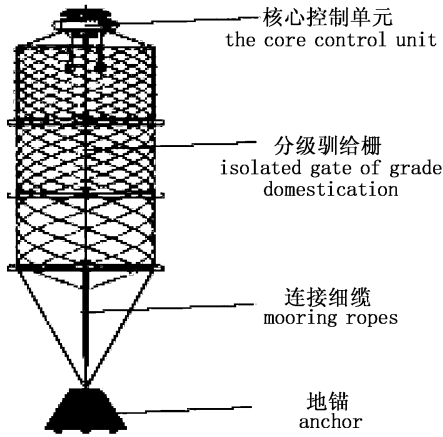


图1 智能化浮式聚鱼装备结构组成图
Fig.1 The general structure of intelligent floating fish accumulating equipment

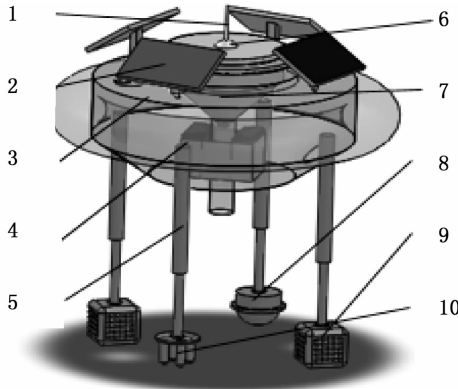


图2 智能化浮式聚鱼装备核心功能图
Fig.2 The core functions of intelligent floating fish equipment

整个装置分为6个部分:能源系统、监控系统、水质监测系统、通讯定位系统、控制系统以及驯化系统。由于海上的特殊工作环境,能源供应系统主要采用太阳能加蓄电池的方式。经计算和选型最终确定,本系统采用四块15W的太阳能板并联,储能装置为两块12V/20AH的铅蓄电池,整个系统的最大功耗在6AH/d,确保能源供应系统在阴雨天的情况下连续3天正常工作,提高系统可靠性。监控系统是观测试验效果直观且可行的方式^[4],利用360度可旋转摄像头,利用微波进行视频通讯,数据传输至1.5 km外基

地;用304 不锈钢金属做外壳保证其耐腐蚀性,采用透明有机玻璃罩密封并实现水下监控的功能^[5]。水质检测系统采用 AP2000 型传感器,可以检测溶氧、盐度、pH 等 8 项参数。通讯系统采用 3G 无线网络传输和无线网桥相结合,在网络允许的情况下采用 3G 网络传输,在没有网络的情况下可采用无线网桥的模式,增加传输的可靠性。

2 控制系统工作原理及设计

整个装置控制系统框图如图3所示,可编程控制器是自动驯化系统的控制核心。它具有多个开关量输入输出接口,可编程控制器通过继电器组连接各个系统模块,并利用所支持的图形化功能块指令程序设定投饵系统各模块的工作状态;通过数据链路层互联的网桥功能实现控制指令的远程输送以及驯化系统工作状态的远程监控。网桥发射终端通过网桥的无线通讯功能直接与传感器相连,实现驯化环境的实时监测,数据回传至上海海洋大学信息中心专用服务器。整个系统的工作原理是:可编程控制器作为控制核心,读取指令程序,通过继电器组控制水下监控系统、投饵系统、放音系统及测量传感器按时工作。利用水下摄像系统的实时反馈,将鱼类活动状况等信息通过微波传送到上位机。根据反馈信息,工作人员利用上位机在线控制,实时调整投饵机的工作参数,实现海洋牧场的科学化管理。

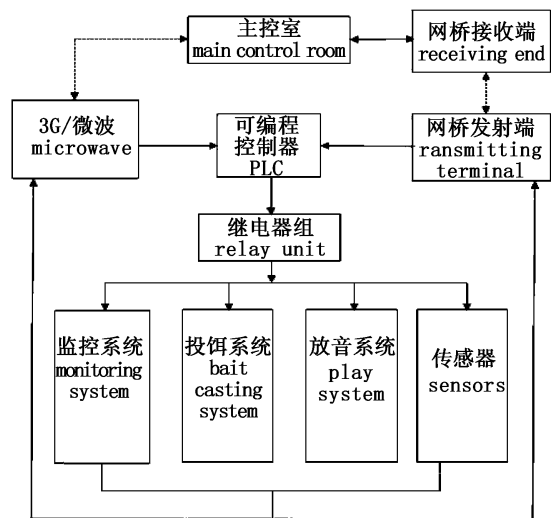


图3 智能化浮式聚鱼装备控制系统功能图
Fig.3 The control function chart of intelligent floating fish accumulating equipment

3 驯化系统设计

驯化系统主要由声音驯化系统、自动定量投饵系统以及柔性分级驯化栅组成。黑鲷的听觉阈值为 100 ~ 1 000 Hz, 最佳感受音频为 300 ~ 400 Hz^[6]。根据黑鲷最佳感受音频, 本试验采用的驯化波形用波形发声器 (RIGOL-DG3061A) 生成时长 3 s 的 350 Hz 正弦波, 播放时间间隔为 1 s, 如图 4 所示。黑鲷属于听觉敏感鱼类, 水中距离喇叭 1 m 处的水中声压为 118.5 dB。同时黑鲷的进食环境光线较暗、温度相对较低^[7], 故将驯化装置的投饵时间设为早上和傍晚。

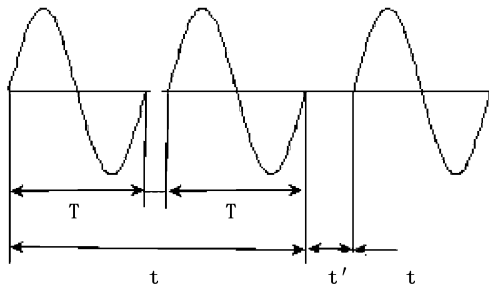


图 4 350 Hz 正弦波波形 ($t=3\text{ s}$, $T=1/300\text{ s}$, $t'=1\text{ s}$)

Fig. 4 350 Hz sine waveform ($t=3\text{ s}$, $T=1/300\text{ s}$, $t'=1\text{ s}$)

饵料仓储结构如图 5 所示, 由 V 型料斗、传电机、定量下料机构组成。传统的下料机构主要有振动式、电磁阀式、螺旋输送式等。振动式下料机构噪音大, 密封困难; 电磁阀式下料机构瞬时电流过大, 不适宜海上使用; 螺旋输送式运动精度高, 适宜定量间歇式投料, 故在本设计中予以采用。本装置以黑鲷作为驯化对象, 由于黑鲷抢食性严重且存在种内残杀现象^[8], 故本装置采用一种特殊的定量下料机构, 如图 6 所示, 转轴与电机相连通过电机转速来控制下料间隙, 由定量槽来确保下料量, 盖板防止非工作期时漏料。

下料的的同时底部安装柔性分级驯化栅, 如图 7 所示。网衣托架采用 PPR 管材焊接成圆形浮框, 浮框内装配上用 pp 绳索编织的网格, 每一层的网格疏密程度不一样, 这些网格也同时作为藻类附着基。

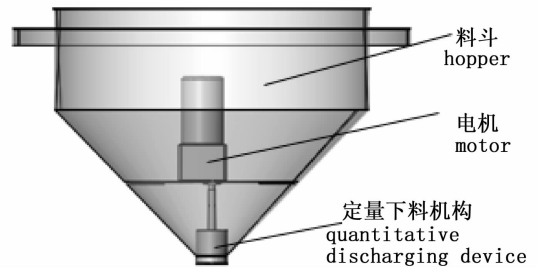


图 5 饵料仓储结构

Fig. 5 The structure of artificial bait warehouse

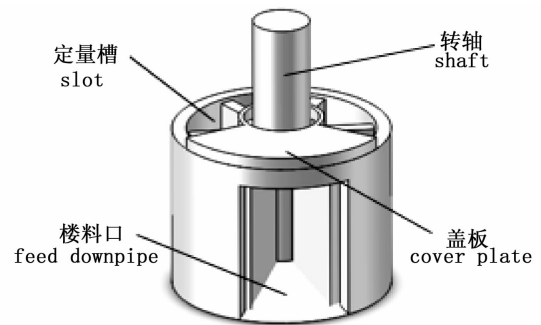


图 6 定量下料机构

Fig. 6 The quantitative feeding mechanism

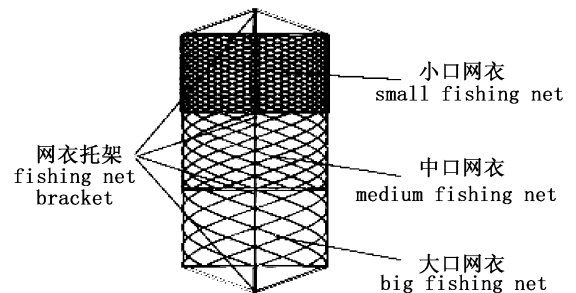


图 7 柔性分级驯化栅

Fig. 7 The flexible hierarchical domesticated mesh

柔性分级装置设计的理论依据为鱼类生物学特性和渔具选择性原理, 结合刚性分级栅试验结果^[9], 确定柔性分级栅间距。具体采用的方法为几何形态法 (从体宽测量值推算, Sechin 方法) 和 Logistic 曲线模型^[10], 最终求出在一定的留存率下 (90% 以上), 体长与分级栅间距的关系方程, 主要计算公式如下:

$$Y = 5.0 \times 10^{-9} X^2 + 0.3722X - 1.6474 \quad (1)$$

式中: X 为黑鲷体长; Y 为分级栅间距(mm)。

在考虑体宽的同时还必须考虑鱼体的可压缩性和分级栅的弹性。鱼体的可压缩性和分级栅的弹性随鱼的力量、鱼体硬度、分级栅材料而异,一般相差可达5%~10%^[9]。综合以上因素及公式(1)确定网衣间距的三种规格分别为:28 mm、56 mm、100 mm。当饵料瞬间抛散下来时依次经过小口网衣、中口网衣、大口网衣,不同规格的网衣可以将大小不同的黑鲷进行分隔,让体长在50~80 mm左右的黑鲷先吃到饵料,来不及吃的再让体长在80~160 mm左右的黑鲷食用,最终的饵料由体长在160 mm以上的黑鲷食用,这样既避免了饵料的浪费,提高饵料利用率,又避免了黑鲷种族之间的相互残杀,提高驯化效果。该装置简单易行符合黑鲷的驯化需求,经现场一个月的试验,该设计能正常运行。

4 系统现场试验

试验分为两个阶段,网箱内驯化试验主要目的是建立黑鲷和声音间的条件反射,放流后试验用于控制黑鲷活动与海洋牧场区域。

4.1 网箱内驯化试验

为建立黑鲷和声音间的条件反射并验证系统的可靠性,该装置在象山港海洋牧场网箱对黑鲷进行了为期21 d的驯化实验。驯化实验在12 m×12 m的网箱中进行(2×2个小型网箱互联),如图8。



图8 网箱驯化现场

Fig.8 The equipment in net cage

试验分为两组,每组黑鲷8 000尾,一组有柔性分级驯化装置,另一组对照组没有柔性分级驯化装置。两组除了有无柔性分级驯化栅以外其他

设置均相同。根据黑鲷的行为特征对驯化装置进行了相关设置和调整。具体应用方面,驯化时间点选择:每天驯化两次,根据水温等参数,一般分别为早上6点和下午18点。驯化时长设定:驯化时前两分钟只放音,然后开始投饵,放音与投饵时间都为8 min,每2 s投料一次^[11],然后停止。在驯化初期,驯化7天左右后,将装置进行移位并继续驯化,以加强驯化效果。驯化过程中,利用水下摄像监控系统对驯化过程和效果进行监控和记录,驯化一周后驯化机周围的驯化效果如图9所示。



图9 放音后浮式聚鱼装备周围的驯化效果

Fig.9 The domestication effect around equipment with the sound

对于黑鲷等鱼种,由于本身攻击性强,自相残杀现象严重^[12],对照组的种群间自相残杀现象如图10所示。为验证驯化效果,驯化结束时对两组实验样本进行取样调查,每组取样21尾进行数据统计,取样数据见表1。由数理统计学公式(2)(3)对两组数据进行数据处理得到实验组和对照组的均值和方差分别为 $\bar{x}_1 = 119.05$ 、 $\bar{x}_2 = 87.45$ 、 $S_1 = 24.03$ 、 $S_2 = 36.58$ 。从两组数据的均值和方差可以看出无论是均值还是离散程度实验组明显优于对照组。柔性分级驯化栅的引入有效的减少了黑鲷种群间的自相残杀现象,降低了生长过程中“马太效应”的产生程度,有效地缓解了驯化过程中的两极分化现象,提高了驯化效率。

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) = \frac{1}{n} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n}[(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2]} \quad (3)$$

式中: x 为样本值; n 为样本容量; \bar{x} 为样本均值; S 为样本方差。



图 10 对照组中黑鲷自相残杀
Fig. 10 The internecine phenomenon of *Sparus macrocephalus* in comparative group

表 1 黑鲷体长值

Tab. 1 The body length of *Sparus macrocephalus* mm

实验组 experiment group	157	153	137	99	94	90	101
	140	138	124	87	121	135	147
	108	84	128	80	90	143	119
对照组 control group	155	168	124	83	92	69	158
	62	111	56	60	86	91	46
	55	68	69	56	48	92	87

经 3 周驯化后,对黑鲷进行放流。此次放流试验包括生产性增殖放流和驯化性增殖放流,其中生产性增殖放流 124 万尾,驯化性增殖放流 1.6 万尾。为区别增殖群体属性和方便后期的渔业资源调查对放流鱼群进行耳石微量元素(锶 Sr)标记,其中生产性增殖放流鱼群为单峰型标记,而驯化性增殖放流鱼群为双峰型标记。为防止放流时流速过大将鱼苗冲离海洋牧场,放流选在小潮的低平潮时进行。放流后,将智能化浮式聚鱼装备放在预定的海洋牧区进行后期的试验,如图 11 所示^[13]。



图 11 海洋牧场开放海域现场试验
Fig. 11 Practical experiment in opening ocean ranching

4.2 海洋牧场现场试验效果监测

海洋牧场浮式聚鱼装置在开放海域运行中,通过水下视频观测,拍摄到黑鲷鱼苗聚集到周边。为进一步分析实际效果,放流后六个月由中国水产科学研究院东海水产研究所进行渔业资源调查,调查区域如图 12 所示。调查采样点选取四个部分,分别是海洋牧场上游 A 区、海洋牧场对岸 B 区、海洋牧场核心区 C 区以及海洋牧场下游 D 区。每个调查区选取 120 尾鱼苗做样本,调查发现 A 区中驯化的鱼苗 0 尾,未驯化的鱼苗 32 尾占该区样本的 26.7%;B 区中驯化的鱼苗 1 尾占该区样本的 0.8%,未驯化的鱼苗 28 尾占该区样本的 23.3%;C 区中驯化的鱼苗 39 尾占该区样本的 32.5%,未驯化的鱼苗 19 尾占该区样本的 15.8%;D 区中驯化的鱼苗 0 尾,未驯化的鱼苗 25 尾占该区样本的 20.8%。由调查数据可以发现样本中 97.5% 的驯化鱼苗在预定的海洋牧区内,其他 3 个区仅有一条,基本实现了对增殖放流鱼群的可控性。



图 12 宁波象山港海洋牧场对比试验区区域图
Fig. 12 The comparative experiment field map of ocean ranching in Xiangshan, Ningbo

5 结论

智能化浮式聚鱼装备以逻辑控制器为控制核心,实现音响放声的定时工作、定时定量自动投饵以及投饵工作参数的远程控制和修改,并通过微波将水下视频信号经无线网桥输出到上位机上,可以实现水下效果的录制和用于反馈控制。该系统有效地解决了海洋牧场环境下饵料微量投放、鱼类音响驯化、水下摄像以及远程监控等系统化运行和管理问题。另外,通过搭载用于测量海水溶氧、pH 值、温度、盐度等多个参数的检测传感器,能够将数据实时回传至服务器,实现了浮式聚鱼装备系统功能的扩展。无人值

守式智能化工作和远程监控是海洋渔业设施和管理的发展趋势^[14],所研发的智能化浮式聚鱼装备在这一方面做出了良好的探索,对于推进海洋牧场的高效运行具有重要价值。

参考文献:

- [1] 张国胜,陈勇,张沛东,等. 中国海域建设海洋牧场的意义及可行性[J]. 大连水产学院学报, 2003, 18(2): 141-144.
ZHANG G S, CHEN Y, ZHANG P D, et al. Significance and feasibility of establishing marine ranching in Chinese sea area [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2003, 18(2): 141-144.
- [2] 孙书贤. 建设海洋牧场发展新型生态渔业[J]. 海洋开发与与管理, 2005, 22(6): 81-83.
SUN S J. Construct marine pasture and develop new type of ecological fishery [J]. Ocean Development and Management, 2005, 22(6): 81-83.
- [3] 唐峰华,李磊,廖勇,等. 象山港海洋牧场示范区渔业资源的时空分布[J]. 浙江大学学报(理学版), 2012, 39(6): 696-702.
TANG F H, LI L, LIAO Y, et al. Spatial and temporal distribution on fishery resources of marine pasture demonstration area in Xiangshan Harbor [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2012, 39(6): 696-702.
- [4] LETESSIER T B, KAWAGUCH S, KING R, et al. A robust and economical underwater stereo video system to observe Antarctic Krill[J]. Open Journal of Marine Science, 2013, 3(3): 148-153.
- [5] 霍春玲. 非金属耐腐蚀材料在工程设计中的选择和应用[J]. 中国高新技术企业, 2008(9): 103-104.
HUO C L, Selection and application of nonmetal corrosion materials in engineering design [J]. Review of China High Technology Enterprises, 2008(9): 103-104.
- [6] 陈德慧,刘洪生,胡庆松,等. 网箱中黑鲷音响驯化的诱集效果探究[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(4): 554-560.
CHEN D H, LIU H S, HU Q S, et al. Attractive effect of acoustic taming on Sparus macrocephalus in a cage [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21(4): 554-560.
- [7] 张磊,胡庆松,章守宇. 海洋牧场鱼类驯化装置设计与试验[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(3): 398-403.
ZHANG L, HU Q S, ZHANG S Y. Design and experiment of fish domestication equipment for ocean ranching [J]. Journal of Shanghai University, 2013, 22(3): 398-403.
- [8] 朱德芬. 黑鲷人工养殖技术讲座 [J]. 水产养殖, 1996(3): 30-32.
ZHU D F. The lectures on sparus macrocephalus of artificial culture technology [J]. Aquaculture, 1996(3): 30-32.
- [9] 宋利明,张禹,周应祺,等. 网箱养殖大黄鱼两种间距分级栅分级效果的比较[J]. 水产学报, 2006, 30(6): 785-790.
SONG L M, ZHANG Y, ZHOU Y Q, et al. A comparison of grading effects of grading panel with two different bar spacings for cage-cultured *Pseudosciaena crocea*[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(6): 785-790.
- [10] KUMAR S, TAMURA K, NEI M. MEGA3: Integrated software for molecular evolutionary genetics analysis and sequence alignment[J]. Briefings in Bioinformatics, 2004, 5(2): 150-163.
- [11] FINE M L, PARMENTIER E. Mechanisms of fish sound production [M]//Sound Communication in Fishes. Vienna Springer, 2015: 77-126.
- [12] KANG C B, LEE S H, HWANG J H, et al. Morphological development of larvae and juveniles of *Acanthopagrus schlegelii*[J]. Development & Reproduction, 2014, 18(4): 311-319.
- [13] CHEN P, QING C, YU J, et al. Evaluation of the effect of stock enhancement in the coastal waters of Guangdong, China [J]. Fisheries Management and Ecology, 2015, 22(2): 172-180.
- [14] TANAKA T, OTA Y. Reviving the seto inland sea, japan; applying the principles of satoumi for marine ranching project in Okayama [M]//Marine Productivity: Perturbations and Resilience of Socio-ecosystems. Switzerland: Springer International Publishing, 2015: 291-294.

Research and experiment of intelligent floating fish accumulating equipment for ocean ranching

SHEN Weixing¹, HU Qingsong¹, SHENTU Jikang², JIANG Yazhou³

(1. College of Engineering Science & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Research Institute of Marine and Fishery, Ningbo 315010, Zhejiang, China; 3. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: Ocean ranching is a vital method to slow the decline of coastal fisheries resources and achieve its sustainable utilization. Fish behavior control is one of the four key technologies for ocean ranching efficient operation. To meet the requirement of fishery production and management in ocean ranching, an intelligent floating fish accumulating equipment that can long-term run is developed. Take wireless network bridge as the communication centre and electric relay as the switch to control the underwater video supervising subsystem, sound taming subsystem, quantitative baiting subsystem and sensor, which solves the fish behavior control and taming problem in opening ocean area. To solve the phenomena of destroying each other and "Matthew effect" in fish growing process, flexible classified mesh is designed and its application has dramatically improved the taming effect. Take *Sparus macrocephalus* as the research object, the equipments developed have been applied in the practical ocean ranching. Long term investigation to the core area and 3 comparative areas has been conducted and the result shows its validity, which improves the fish behavior control ability and provides solid support for the high efficient operation of the ocean ranching.

Key words: Ocean ranching; *Sparus macrocephalus*; floating fish accumulating equipment; classified domestication; fish behavior control; remote supervision