

生鲜饵料离散式投饵机设计与试验

胡海刚¹, 危鹏搏¹, 段 争¹, 唐 潮¹, 钱云霞²

(1. 宁波大学海运学院, 宁波 315211; 2. 宁波大学海洋学院, 宁波 315211)

摘 要: 针对目前专为生鲜饵料设计的投饵机种类较少, 且凶猛肉食性水产生物生鲜饵料喂养过程中密集投喂易引起夺食致伤致死的现象, 该研究以虎斑乌贼为例, 基于离心式投饵原理, 提出生鲜饵料离散式投饵机设计思路, 设计以西门子 PLC 为控制核心, MCGS 触摸屏为人机交互界面的自动投饵机。该投饵机设计了适用于生鲜饵料的振动分筛盘实现生鲜饵料逐条抛投, 拥有饵料抛投速度、方向、仰角的实时可控的子系统以及多段程投饵模式, 实现离散式投饵。投饵机基础性性能测试和投饵模式验证试验结果表明, 多段程投饵模式可实现纵向抛投距离 1.8~8.0 m, 横向抛投距离 0~3.9 m, 抛投面积约 26 m² 范围内的饵料离散抛投, 覆盖 81.2% 的 8 m×4 m 室内养殖池; 该投饵机转盘转速小于 900 r/min 时, 平均饵料破碎率低于 3.3%, 转速高于 900 r/min 时饵料破碎率激增, 最大有效抛投距离 10.5 m。该研究可为今后生鲜饵料投饵机和离散式投喂提供参考。

关键词: 农业机械; 设计; 试验; 投饵机; 生鲜饵料; 离散式投饵; 复数矢量法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.011

中图分类号: S969.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-15-0087-08

胡海刚, 危鹏搏, 段争, 等. 生鲜饵料离散式投饵机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 87-94. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.011 <http://www.tcsae.org>

Hu Haigang, Wei Pengbo, Duan Zheng, et al. Design and experiment of discrete feeder for fresh feed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(15): 87-94. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.011 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

近年来海产养殖规模逐渐扩大, 其中多数为凶猛肉食性品种, 如乌贼、鲈鱼、石斑等, 其养殖环境多为低密度养殖、生鲜饵料(多为冷藏小鱼虾)投喂, 传统颗粒饵料投饵机不完全适用于此类品种。以虎斑乌贼(*Sepia pharaonis*)为例, 因其生长快、经济效益高等特点, 逐渐成为东南沿海人工海水养殖的热门对象^[1-2]。虎斑乌贼生性凶猛, 养殖密度较低, 1 m³ 水体养殖 3~5 只成年乌贼^[3], 且对养殖环境要求较高^[4-5], 故适合室内养殖。在摄食饵料时会因饵料投喂不足或者投喂过于集中等原因, 出现为夺食相互攻击导致受伤、死亡的现象^[1]。

传统投饵机多为颗粒饵料设计, 结构简单、运行模式单一, 饵料落点密集^[6-8], 易引起夺食行为, 且由于乌贼养殖密度低, 饵料残饵量高。因此饵料落点分布较为均匀的离散式投饵在虎斑乌贼养殖投喂过程中极为重要。随着农业技术的发展, 出现许多优秀的投饵设备可实现离散化投饵, 其方案多为管道或导轨输送饵料进行定点投料^[9-14], 或是使用投饵船于湖面、海面进行巡航式饵料投喂^[15-16]。上述管道、导轨类方案主要为颗粒饲料设计不适用于体积大、不规则的生鲜饵料。且投饵船主要用于室外大水面环境, 不适用于虎斑乌贼等室内养殖

品种, 因此设计一种针对生鲜饵料的固定式投饵机具有重要的意义。

基于上述问题, 本文设计了一种离心式自动投饵机, 以西门子 S7-200PLC 作为控制核心, 并选用 MCGS 触摸屏组态人机交互界面(Human Machine Interface, HMI)监控运行参数^[17-19], 使生鲜饵料逐条抛投, 饵料抛投速度、方向、仰角实时可调。并设计多段程投饵模式, 将投饵过程划分多段, 覆盖不同距离、方向的养殖水域, 实现离散式投饵。

1 设计方案

1.1 设计思路

不同于饵料落点密集的传统颗粒饵料投喂方式, 离散化投饵可使饵料落点零散分布于养殖区域, 降低夺食现象造成的损失。为实现室内养殖环境下生鲜饵料抛投落点的离散化, 提出以下设计思路:

- 1) 生鲜饵料逐条抛出, 使饵料落点不集中于个别区域;
- 2) 抛投速度可调, 不同的抛投速度实现不同距离的饵料落点;
- 3) 抛投水平方向角可调, 使饵料落点呈扇面分布, 可实现饵料大水面覆盖。同时水平方向角变化速率可影响饵料落点的疏密程度;
- 4) 抛投仰角可调, 仰角往复变化, 落点轨迹呈锯齿状分布, 饵料分布较之仰角固定式更加均匀;
- 5) 设计多段程投饵模式, 将矩形养殖水域划分近、中、远程, 同时将投饵过程划分 3 段, 每段的抛投速度、

收稿日期: 2020-03-20 修订日期: 2020-07-17

基金项目: 浙江省公益技术项目(2017C32014); 宁波市科技富民项目(2017C10006); 浙江省科技计划项目(2019C02055)

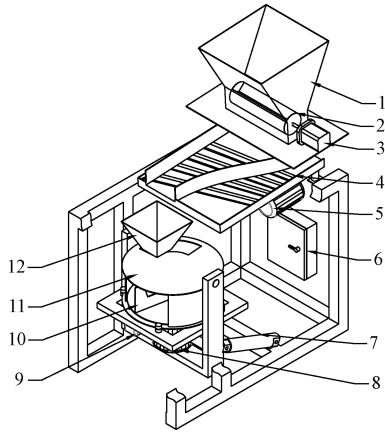
作者简介: 胡海刚, 副教授。主要从事船舶工程安全技术与机电控制研究。

Email: huhaigang@nbu.edu.cn

水平方向角速度、仰角等参数不同, 饵料落点各自覆盖近、中、远程的水域, 使饵料落点较为均匀、离散化, 不会因为落点过于集中引起乌贼夺食现象。

1.2 整机结构及工作原理

基于上述设计思路设计的投饵机由下料系统、振动分筛系统、抛投仰角控制系统、抛投速度控制系统和水平方向角控制系统组成, 其整体结构如图 1 所示。



1.料斗 2.旋转下料器 3.下料步进电机 4.振动分筛盘 5.振动电机 6.控制柜 7.电动推杆 8.转盘交流电机 9.转筒步进电机 10.转盘 11.转筒 12.小料斗
1.Hopper 2.Rolling unloader 3.Unloader step motor 4.Vibrating sieve plate 5.Vibration motor 6.Control cabinet 7.Electric pusher 8.Rotary table AC motor 9.Rotary drum step motor 10.Rotary table 11.Rotary drum 12.Little hopper

图 1 投饵机结构图

Fig.1 Structural diagram of feeder

机架主体由型号 40 mm×40 mm 和 80 mm×40 mm 的铝合金型材搭建而成。成生鲜饵料投入料斗后, 定量下料系统中的下料步进电机 (型号 42CM06, 保持转矩 0.34 N·m) 控制旋转下料器 (直径 200 mm) 慢速旋转, 当旋转下料器空心槽朝下时, 槽中饵料落入振动分筛盘中。振动分筛系统由振动分筛盘和振动电机 (型号 TO-0.4, 额定功率 0.04 kW, 额定转速 3 000 r/min, 振动力 350 N) 组成, 通过变频器 (台达 VFD-L, 输出频率范围 1~400 Hz) 调整振动频率, 使进料口投下的生鲜饵料相互分离、排序, 沿振动分筛盘的导引壁逐条依次落入转筒 (直径 400 mm) 中。转筒中转盘 (直径 390 mm) 受转盘交流电机 (型号 HMA-6334, 额定功率 0.25 kW, 额定转速 1 320 r/min, 额定转矩 2.2 N·m) 驱动高速旋转, 使饵料沿转筒开口处切线方向抛出。转盘运行过程中抛投仰角控制系统中的电动推杆 (型号 LX600, 行程 100 mm, 速度 5 mm/s, 负载力 1 000 N) 往复伸缩, 推动转盘转筒绕固定转轴旋转实现抛投仰角变化。同时水平方向角控制系统中转筒步进电机 (型号 57CM18, 保持转矩 1.3 N·m) 通过转筒底部齿轮组 (传动比 8:1) 转动转筒, 改变转筒开口方向, 实现饵料定向抛投。

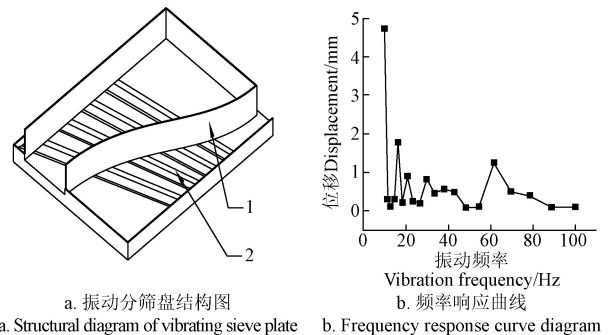
2 硬件结构设计

2.1 振动分筛系统

振动分筛系统由分筛盘、振动电机和变频器组成,

对生鲜饵料进行振动分筛处理。振动分筛盘如图 2 所示, 分筛盘上折出阶梯式导引槽, 增强振动分筛效果使成团落下的鱼虾逐渐分离。分筛盘上焊接导引壁, 生鲜鱼虾沿导引壁逐条下滑进抛投设备, 且导引壁逐渐收缩成 5 cm 开口, 防止多条鱼虾同时落入抛投设备。分筛盘下安装振动电机, 为分筛盘提供振源。

利用 ABAQUS 软件对振动分筛盘进行谐响应分析, 获得如图 3 所示频响曲线, 选用 Lanczos 法对振动筛进行模态分析, 振动筛的前 6 阶固有频率分布在 0~20 Hz 内, 当激励源的频率为 10 Hz 时, 此时振动筛发生了共振, 振幅最大, 同时, 共振会产生严重的噪声, 损坏工作部件^[20]。从频响曲线图中可知, 当频率约等于 60 Hz 时, 振动筛的位移响应较大, 分筛效果好, 因此外界激励频率取 60 Hz 时较为合理, 本投饵机采用台达 VFD-L 变频器产生 60 Hz 交流电控制振动电机振动频率。



1.导引壁 2.导引槽
1.Guiding wall 2.Guiding groove

图 2 振动分筛盘结构图及频率响应曲线

Fig.2 Structural diagram of vibrating sieve plate and frequency response curve diagram

振动分筛盘进行实物试验时, 生鲜小虾由于质量较轻, 在 10~90 Hz 范围内皆可逐条滑入抛投设备, 故选用质量较大的生鲜小鱼进行试验。试验结果如图 3, 频率在 0~20 Hz 范围内振动分筛盘有明显共振现象, 不适宜试验。频率在 20~45 Hz 范围内生鲜小鱼堆积不动或滑落速度缓慢。频率在 45~70 Hz 范围内生鲜小鱼滑落速度明显, 能够逐条滑入抛投设备。频率超过 70 Hz 时生鲜小鱼堆积不动, 现象同 20~45 Hz 且噪音极大。

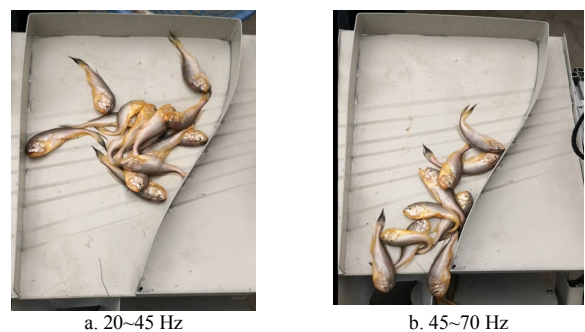
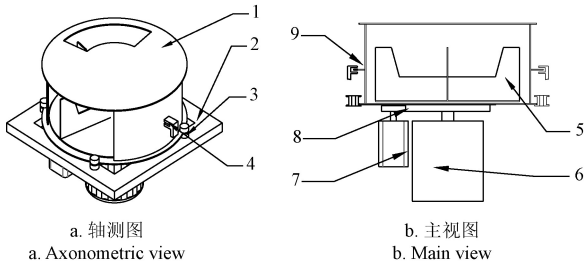


图 3 不同振动频率下振动分筛盘试验结果

Fig.3 Test results of vibrating sieve plate under different vibration frequency

2.2 水平方向角控制系统

水平方向角控制系统控制饵料抛出时的水平方向。其结构图如图 4，转筒上下板边缘嵌入固定滚轮凹槽中，4 个固定滚轮形成一个限制转筒移动，不限制旋转的支架。齿轮组中的从动齿轮固定在转筒底部，步进电机通过驱动主动齿轮精准控制转筒角速度及其开口朝向。转筒两侧支架上安装光电开关，光电开关触发时步进电机反转，限制转筒最大转向角度，防止操作失误使转筒开口朝向投饵机内部。



1. 转筒 2. 转筒支架 3. 固定滚轮 4. 光电开关 5. 转盘 6. 转盘交流电机
7. 转筒步进电机 8. 齿轮组 9. 遮光片
1. Rotary drum 2. Rotary drum holder 3. Fixed roller 4. Optoelectronic switch
5. Rotary table 6. Rotary table AC motor 7. Rotary drum step motor 8. Gear set 9. Shade

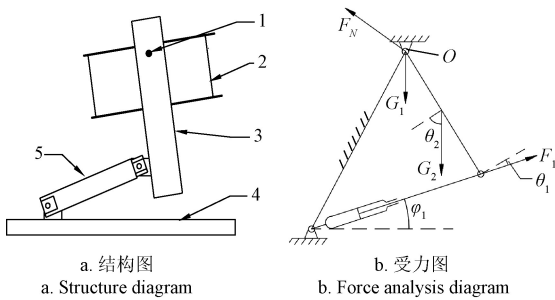
图 4 水平方向角控制系统结构图

Fig.4 Structural diagram of horizontal angle system

2.3 抛投仰角控制系统

抛投仰角控制系统负责控制生鲜饵料抛出时与水平面的夹角。其结构如图 5a，本投饵机选用电动推杆实现抛投仰角控制，通过电动推杆的伸缩使转筒、转盘等抛投设备绕转轴旋转，从而控制抛投仰角。

为确定电动推杆所受最大负载，便于电动推杆选型，选取连杆作为受力分析对象，其静力学分析如图 5b，由于电动推杆运行速度慢不考虑加速度，且转轴直径小，产生的摩擦阻力矩远小于杆件自重产生的力矩，故不考虑摩擦力矩的影响。



1. 转轴 2. 转筒 3. 连杆 4. 支架 5. 电动推杆
1. Rotating shaft 2. Rotary drum 3. Link rod 4. Holder 5. Electric pusher
注：\$G_1\$ 为转轴处受转筒转筒重力，N；\$F_N\$ 为转轴对杆件的支持力，N；\$G_2\$ 为杆件受电机和杆件自身重力，N；\$F_1\$ 为杆件尾端受电动推杆推力，N；\$\varphi_1\$ 为电动推杆与水平面的夹角，(\$^\circ\$)；\$\theta_1\$ 为 \$F_1\$ 与连杆的压力角，(\$^\circ\$)；\$\theta_2\$ 为 \$G_2\$ 与连杆的压力角，(\$^\circ\$)；\$O\$ 为坐标原点。
Note: \$G_1\$ is the gravity of rotary, N; \$F_N\$ is the supporting force of the rotating shaft to the link rod, N; \$G_2\$ is the gravity of link rod and motor, N; \$F_1\$ is the push force of the electric pusher at the end of the link rod, N; \$\varphi_1\$ is the angle between the electric pusher and the horizontal plane, (\$^\circ\$); \$\theta_1\$ is the pressure angle between the \$F_1\$ and the link rod, (\$^\circ\$); \$\theta_2\$ is the pressure angle between the \$G_2\$ and the link rod, (\$^\circ\$); \$O\$ is coordinate origin.

图 5 电动推杆-连杆结构图与受力图

Fig.5 Structure and force analysis diagram of electric pusher-link rod

根据静力学原理，以连杆上端转轴作为坐标原点：

$$\begin{cases} F_{1x} - F_{Nx} = 0 \\ F_{1y} + F_{Ny} - G_1 - G_2 = 0 \\ \frac{1}{2}l_2G_2\cos\theta_2 - l_2F_1\cos\theta_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 \$F_{1x}\$ 为 \$F_1\$ 水平分力，N；\$F_{1y}\$ 为 \$F_1\$ 竖直分力，N；\$F_{Nx}\$ 为 \$F_N\$ 水平分力，N；\$F_{Ny}\$ 为 \$F_N\$ 竖直分力，N；\$l_2\$ 为连杆长度，m。

求得推杆推力 \$F_1\$：

$$F_1 = \frac{1}{2}G_2\cos\theta_2/\cos\theta_1 \quad (2)$$

通过试验样机测量和图解法测绘可得出 \$\theta_1\$ 和 \$\theta_2\$ 大致取值范围 \$\theta_1 \in [3^\circ, 25^\circ]\$，\$\theta_2 \in [70^\circ, 85^\circ]\$，\$G_2\$ 经电子秤（型号 ACS-55，精度 0.1 g）测量约为 120 N，推杆最大推力 \$F_{1\max}=22.7\$ N，根据企业提供的参数，电动推杆型号选择 LX600，行程 100 mm，速度 5 mm/s，负载力 1 000 N。

3 控制系统设计

该投饵机以西门子 S7-200PLC 作为核心控制器控制转筒步进电机、变频器、电动推杆等器件，实现水平方向角、抛投速度、抛投仰角等运行参数的实时控制，并设计多段程投饵模式，控制生鲜饵料抛投落点。

3.1 水平方向角控制

西门子 S7-200PLC 集成了 2 个脉冲输出接口（I0.0 和 I0.1），为转筒步进电机提供脉冲信号，控制转筒转速和开口朝向，最大支持 100 kHz^[20-21]。由于西门子 S7-200PLC 的输出信号为 +24 V 而步进电机驱动器的控制信号为 +5 V，故 PLC 输出端子与驱动器之间串联一 2 k\$\Omega\$ 电阻，起分压作用。通过选择步进电机驱动器上的拨码开关设置微步细分数，设定步进电机每转一圈所需脉冲数。

PLC 中通过 PTO-MAN 和 PTO-CTRL 指令实现步进电机的启停，通过计算特定转速对应脉宽并存入脉冲控制寄存器，PLC 自动调整输出脉宽，实现转筒步进电机的速度控制及启停，间接控制水平方向角。光电开关触发后，PLC 将输入步进电机驱动器 DIR+ 的信号取反，实现步进电机的反向旋转。并使用高速计数器记录脉冲输出个数，可将脉冲数换算成当前水平方向角，实现人机交互界面当前水平方向角的实时监控。

3.2 抛投速度控制

抛投速度控制系统中转盘作为核心部件由三相交流电机驱动，转盘高速转动为生鲜饵料提供抛投初速度。台达变频器 VFD-L 调整电机的输入电流频率，控制转盘转速，实现饵料抛投速度控制，该变频器可实现 400 Hz 以内交流电输出。

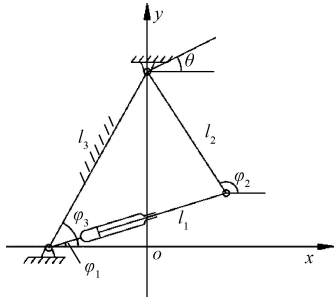
本投饵机采用的台达 VFD-L 变频器支持 RS-485 串口的 MODBUS 通信协议^[22]，西门子 S7-200PLC 同样支持该通信协议。分别配置变频器和 PLC 的通信参数即可调用 MBUS_MSG 通信指令修改变频器频率命令寄存器 2001H 的参数，从而调整输出频率，实时控制抛投速度。

3.3 仰角控制

抛投仰角控制系统可看作带滑块的连杆机构, 故可通过复数矢量法分析各连杆的运动及杆对于铰链的相对关系^[23-24], 并使用 MATLAB 数学分析工具得到抛投仰角与推杆通电时间的函数关系。

建立如图 6 所示的几何模型, 该机构的封闭复数矢量方程为:

$$l_1 + l_2 = l_3 \Leftrightarrow l_1 e^{i\phi_1} + l_2 e^{i\phi_2} = l_3 e^{i\phi_3} \quad (3)$$



注: l_1 为推杆长度, m; l_2 为连杆长度, m; l_3 为固定机架长度, m; ϕ_1 为推杆与水平面的夹角, ($^\circ$); ϕ_2 为连杆与水平面的夹角, ($^\circ$); ϕ_3 为固定机架与水平面的夹角, ($^\circ$); θ 为抛投仰角, ($^\circ$)

Note: l_1 is the length of the pusher, m; l_2 is the length of the link rod, m; l_3 is the length of the fixed frame, m; ϕ_1 is the angle between the pusher and the horizontal plane, ($^\circ$); ϕ_2 is the angle between the link rod and the horizontal plane, ($^\circ$); ϕ_3 is the angle between the fixed frame and the horizontal plane, ($^\circ$); θ is elevation angle, ($^\circ$).

图 6 抛投仰角控制系统几何模型图

Fig.6 Geometric model diagram of casting elevation angle system

按欧拉公式展开, 实部与虚部分别相等, 并消去 ϕ_2 得:

$$l_1^2 = (l_3 \cos \phi_3 - l_2 \cos \phi_2)^2 + (l_3 \sin \phi_3 - l_2 \sin \phi_2)^2 \quad (4)$$

化简为:

$$A \cos \phi_2 + B \sin \phi_2 + C = 0 \quad (5)$$

式中系数

$$A = -2l_1 l_3 \cos \phi_3, B = -2l_1 l_3 \sin \phi_3, C = -l_1^2 + l_2^2 + l_3^2$$

代入三角函数万能公式得:

$$\phi_2 = 2 \arctan \left(\frac{B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A - C} \right) \quad (6)$$

其中电动推杆行程 100 mm, 速度 5 mm/s, 推杆未伸出长度为 250 mm, 故推杆长度 $l_1 = 0.25 + 0.005t$, m。各初始参数带入公式 (6), 又因 ϕ_2 与抛投仰角 θ 相差 90° 得:

$$\theta = 2 \arctan \left(\frac{0.5055 + \sqrt{0.2905 - [(0.25 + 0.005t)^2 - 0.5426]}}{(0.25 + 0.005t) - 0.7296} \right) - 90 \quad (7)$$

式中 t 为推杆运行时间, s。

运用 MATLAB 软件绘制函数图像, 如图 7 所示。

电动推杆行程 100 mm, 速度 5 mm/s, 推杆最大运行时间 20 s, 从图 7 可知, 推杆运行时间 0~20 s 内, 推杆运行时间与抛投仰角的关系函数几乎呈一条直线, 通过 0 s 和 20 s 时的仰角数值, 构建一次函数代替实际关系函数, 使 PLC 快速计算出到达特定仰角所需时间, 利用 TON 定时器指令控制电动推杆接正向电压的时间, 运行至特

定仰角后推杆接反向电压, 推杆收缩, 如此向推杆提供周期性方波电压, 实现仰角往返变化。

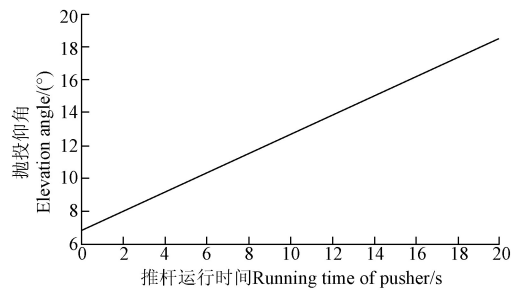


图 7 抛投仰角-推杆运行时间关系函数图

Fig.7 Function diagram of elevation angle-pusher running time

3.4 人机交互界面

人机交互界面 (HMI) 设计选用 MCGS TCP7062Ti 昆仑通态触摸屏作为操作界面, 触摸屏操作系统使用自带 MCGS 嵌入版组态软件编辑。触摸屏主要功能包括参数实时监控, 如当前转盘转速、抛投仰角、水平抛头方向角等运行参数, 以及屏上启动停止功能。

MCGS TCP7062Ti 昆仑通态触摸屏兼容西门子 PLC 的 PPI 通信协议, 通信速率为 19.2 K~12 Mbit/s^[25-28], 可实现高速通信, 采集 PLC 处投饵机运行参数, 实时显示在操作界面上。

3.5 多段程投饵模式

为实现离散化投饵, 设计多段程投饵模式, 通过 3 段抛投, 改变各阶段转筒角速度、转盘转速、最大抛投仰角、阶段持续时间等运行参数, 使饵料落点覆盖近、中、远程不同养殖区域, 实现离散投饵。

投饵机运行流程如下: 投饵机启动旋转下料步进电机, 投饵机逐条下料, 同时运行上述的多段程运行模式, 每一阶段按照运行参数设定定时器, PLC 按照该段转筒角速度设定输出的脉冲宽度, 调整转筒旋转角速度, 控制水平方向角及饵料落点在横向投饵距离上的疏密程度; PLC 调整输出给电动推杆的周期性方波信号的周期值, 使抛投仰角于初始仰角和该段最大抛投仰角之间往复运动, 饵料落点呈锯齿状分布; PLC 修改变频器输出频率, 转盘按该段转速旋转, 控制饵料抛投速度, 各阶段转盘转速合理选取即可实现饵料落点在近、中、远程不同养殖区域的覆盖。定时结束时重新载入下一投饵阶段的运行参数, 重复上述步骤直到所有阶段运行完成, 停止各设备。

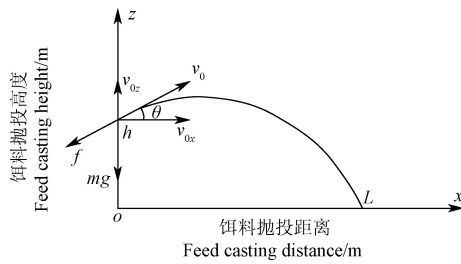
3.6 饵料落点分析

为直观分析多段程投饵模式抛投效果, 对多段程投饵模式的抛投落点进行运动学计算, 并仿真、绘制饵料落点分布图像。饵料运动模型示意图如图 8, 考虑空气阻力的情况下, 由于饵料抛投初速度小于 15 m/s, 且生鲜杂鱼饵料截面积小于 10 cm², 故空气阻力正比于速度, 空气阻力 $f(N)$ 为^[29]:

$$f = 6\pi\eta r v \quad (8)$$

式中 η 为流体黏性系数, Pa·s; r 为运动物体等效半径, m; v 为物体运动速度, m/s。常温时 $\eta = 1.82 \times 10^{-5}$ Pa·s,

$r < 20 \text{ mm}$, $v < 15 \text{ m/s}$, 故 $f < 1.02 \times 10^{-4} \text{ N}$, 远小于饵料受到重力可视作无空气阻力便于计算^[29-30]。



注: v_0 为初速度, m/s ; v_{0z} 为初速度竖直分速度 m/s ; v_{0x} 为初速度水平分速度 m/s ; f 为空气阻力, N ; h 为饵料抛投初始高度, m ; mg 为饵料所受重力, N ; L 为饵料抛投距离, m ; θ 为抛投仰角, $(^\circ)$ 。

Note: v_0 is the initial velocity, m/s ; v_{0z} is the vertical component velocity, m/s ; v_{0x} is the horizontal component velocity, m/s ; f is air resistance, N ; h is the initial feeding height, m ; mg is the gravity of the feed, N ; L is the feed casting distance, m ; θ is elevation angle, $(^\circ)$ 。

图 8 饵料运动模型示意图

Fig.8 Schematic diagram of motion model for feed

由图 8 可得运动微分方程为:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = 0 \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = -mg \end{cases} \quad (9)$$

取初始条件 $t=0$ 时, $x=0$, $z=h$ 可解得:

$$\begin{cases} x = v_{0x} t \\ z = v_{0z} t - \frac{1}{2} g t^2 + h \end{cases} \quad (10)$$

对于饵料的落点计算, 代入实际参数可列下列方程:

$$\begin{cases} v_0 t_2 \sin \theta - \frac{1}{2} g t_2^2 + h = 0 \\ v_0 t_2 \cos \theta = L \end{cases} \quad (11)$$

式中 t_2 为饵料下落所需时间, s 。

解出落点距离 L 及落点在水平面上的坐标:

$$\begin{cases} L = v_0 \cos \theta \sqrt{\frac{v_0^2 \sin^2 \theta + 2gh}{g}} + v_0 \sin \theta \\ L_y = L \cos \gamma \\ L_x = L \sin \gamma \end{cases} \quad (12)$$

其中 γ 为抛投水平方向角, $(^\circ)$ 。 L_x 为饵料落点的横向抛投距离, m ; L_y 为饵料落点的纵向抛投距离, m 。

4 投饵结果分析与优化

4.1 多段程投饵模式参数优化

投饵总持续时间与投饵量相关, 在总持续时间不变的条件下, 不断调整各抛投阶段的往返角度、转筒角速度、转盘转速和各阶段持续时间, 从而调整落点的抛投仰角 θ 、水平方向角 γ 、抛投初速度 v_0 、各阶段的落点数。使第一阶段落点横向抛投距离在 $1.5 \sim 2.5 \text{ m}$ 范围, 纵向抛投距离在 $2 \sim 3 \text{ m}$ 范围; 第二阶段落点横向抛投距离在 $1 \sim 3 \text{ m}$ 范围, 纵向抛投距离在 $4 \sim 6 \text{ m}$ 范围; 第三阶段落点横向抛投距离在 $0.5 \sim 3.4 \text{ m}$ 范围, 纵向抛投距离在

$6.5 \sim 7.5 \text{ m}$ 范围; 总投饵面积大于 16 m^2 的运行参数如表 1。

表 1 多段程投饵模式参数

Table 1 Parameters of multi-stage casting mode

抛投阶段 Casting stage	往返角度 Round angle/ $(^\circ)$	转筒角速度 Angular velocity of rotary drum/ $(^\circ/\text{s})$	转盘转速 Revolving speed of rotary table/ (r/min)	持续时间 Duration time/s
1	6.7~12	2.67	350	15
2	6.7~16	1.34	500	40
3	6.7~8	2.00	750	20

根据抛投的实际情况, 假设平均每 2 s 抛投一条生鲜饵料, 由 MATLAB 软件可得抛投仿真图 9。仿真结果表明: 第一阶段落点横向抛投距离 $1.2 \sim 3 \text{ m}$, 纵向抛投距离 $2 \sim 3 \text{ m}$; 第二阶段落点横向抛投距离 $0.6 \sim 3.8 \text{ m}$, 纵向抛投距离 $3.9 \sim 6 \text{ m}$; 第三阶段落点横向抛投距离 $0 \sim 3.9 \text{ m}$, 纵向抛投距离 $6.5 \sim 7.8 \text{ m}$ 。总投饵面积 17.95 m^2 。实现了饵料均匀、离散化抛投, 符合多段程离散化投饵要求。

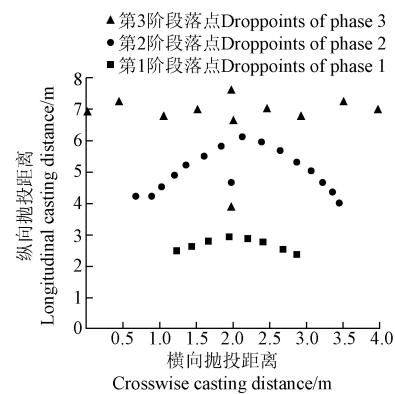


图 9 多段程投饵模式落点结果

Fig.9 Casting droppoint results of multi-stage casting mode

于 2019 年 11 月 07 日在浙江宁波象山县来发水产育苗场内进行投饵试验 (图 10a)。育苗场养殖池规格 $8 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, 为便于观察该运行模式下饵料落点, 养殖池未蓄水。采用表 1 中的多段程投饵模式参数进行试验。由于饵料易落地后滑行, 下落速度不均匀等原因, 试验投饵距离及面积大于仿真结果。实际纵向抛投距离 $1.8 \sim 8.0 \text{ m}$, 横向抛投距离 $0 \sim 3.9 \text{ m}$, 投饵面积约为 26.0 m^2 , 可覆盖 81.2% 的养殖池面积。

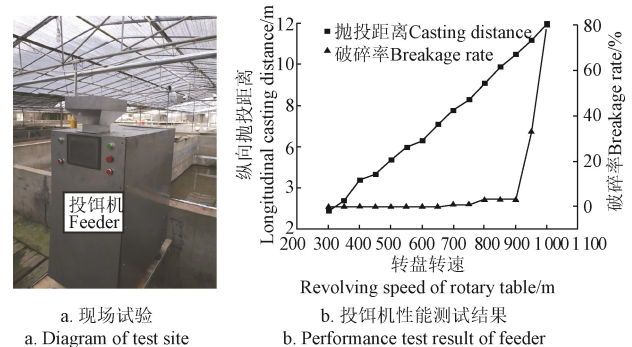


图 10 现场试验及投饵机性能测试结果

Fig.10 Diagram of test site and performance test result of feeder

4.2 投饵性能测试

生鲜饵料由转盘抛出, 速度过大时饵料易破碎, 饵料破碎率过大易导致水体污染, 故性能测试对象为该投饵机饵料破碎率, 结果如图 10b。转盘速度大于 900 r/min 时饵料破碎率激增; 转盘速度 900 r/min 时平均饵料破碎率为 3.3%, 小于水产行业标准要求的 5%^[31]。测试结果表明该投饵机最大有效转速为 900 r/min, 最大有效纵向投饵距离为 900 r/min 转速下的 10.5 m, 即投饵距离超过 10.5 m 的环境不适宜此投饵机。

5 结 论

1) 针对凶猛肉食性品种的低密度、生鲜饵料投喂养殖环境, 设计生鲜饵料离散式投饵机, 实现抛投速度、方向、仰角的实时可调, 并设计多段程投饵模式实现饵料的离散抛投。

2) 对抛投仰角控制系统中的电动推杆—连杆机构进行了静力学分析, 确定推杆最小负载力为 22.7 N, 并使用复数矢量法计算推杆运行轨迹, 得出仰角-推杆运行时间关系曲线接近一次函数曲线, 可使用 PLC 定时器实现抛投仰角精准控制。

3) 饵料落点试验结果表明, 多段程投饵模式可实现纵向抛投距离 1.8~8.0 m, 横向抛投距离 0~3.9 m, 抛投面积约为 26.0 m² 可覆盖 81.2% 的养殖池面积, 满足虎斑乌贼养殖需求, 能实现离散投饵, 饵料落点不聚集, 不易引起乌贼的夺食行为。

本研究重点是对生鲜饵料离散式投饵机的结构、控制系统设计, 满足离散式投饵的基本需求, 未对多段程投饵模式进行深度优化, 同时后续将进行远程无线实时监控系统的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 李建平, 蒋霞敏, 赵晨曦, 等. 虎斑乌贼室内规模化养殖技术研究[J]. 生物学杂志, 2019, 36(2): 68-72.
Li Jianping, Jiang Xiamin, Zhao Chenxi, et al. Research on the indoor scale breeding technique of *Sepia pharaonis*[J]. Journal of Biology, 2019, 36(2): 68-72. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王鹏帅, 蒋霞敏, 阮鹏, 等. 虎斑乌贼的胚胎耗氧率[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2357-2362.
Wang Pengshuai, Jiang Xiamin, Ruan Peng, et al. Oxygen consumption rate of *Sepia pharaonis* embryos[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(7): 2357-2362. (in Chinese with English abstract)
- [3] 莫新. 虎斑乌贼养殖技术[J]. 科学养鱼, 2015(6): 42-43.
Mo Xin. Cultivation technology of *Sepia pharaonis*[J]. Scientific Fish Farming, 2015(6): 42-43. (in Chinese with English abstract)
- [4] Peng R B, Jiang M W, Huang C, et al. Toxic effects of ammonia on the embryonic development of the cuttlefish

Sepia pharaonis[J]. Aquaculture Research, 2019, 50(2): 505-512.

- [5] Peng R B, Wang P S, Jiang M W, et al. Effect of salinity on embryonic development of the cuttlefish *Sepia pharaonis*[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2017, 48(4): 666-675.
- [6] 徐皓, 张建华, 丁建乐, 等. 国内外渔业装备与工程技术研究进展综述[J]. 渔业现代化, 2010, 37(2): 1-8.
Xu Hao, Zhang Jianhua, Ding Jianle, et al. The review of the research progress of fishery equipment and engineering technology at home and abroad[J]. Fishery Modernization, 2010, 37(2): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [7] 庄保陆, 郭根喜. 水产养殖自动投饵装备研究进展与应用[J]. 南方水产科学, 2008, 4(4): 67-72.
Zhuang Baolu, Guo Genxi. The evolution and application of automatic feeding system in aquaculture[J]. South China Fisheries Science, 2008, 4(4): 67-72. (in Chinese with English abstract)
- [8] 葛一健. 我国投饵机产品的发展与现状分析[J]. 渔业现代化, 2010, 37(4): 63-65.
Ge Yijian. Analysis of development and present situation of feeding machine in China[J]. Fishery Modernization, 2010, 37(4): 63-65. (in Chinese with English abstract)
- [9] 宋协法, 路士森. 深水网箱投饵机设计与试验研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2006(3): 405-409.
Song Xiefa, Lu Shisen. Design and experimental study of a new feeder for deep sea cages[J]. Repriodical of Ocean University of China: Natural Science, 2006(3): 405-409. (in Chinese with English abstract)
- [10] Aarseth K A, Perez V, Bøe J K, et al. Reliable pneumatic conveying of fish feed[J]. Aquacultural Engineering, 2006, 35(1): 14-25.
- [11] Papandroulakis N, Dimitris P, Pascal D. An automated feeding system for intensive hatcheries[J]. Aquacultural Engineering, 2002, 26(1): 13-26.
- [12] 袁凯. 投饵机器人关键技术研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013.
Yuan Kai. Research on the Key Technology of Feeding Robot[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [13] Gundogdu M Y. Design improvements on rotary valve particle feeders used for obtaining suspended airflows[J]. Powder Technology, 2004, 139(1): 76-80.
- [14] Papandroulakis N, Dimitris P, Pascal D. An automated feeding system for intensive hatcheries[J]. Aquacultural Engineering, 2002, 26(1): 13-26.

- [15] 孟祥宝, 黄家怿, 谢秋波, 等. 基于自动巡航无人驾驶船的水产养殖在线监控技术[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 276-281.
Meng Xiangbao, Huang Jiayi, Xie Qiubo, et al. Online monitoring for agriculture based on unmanned automatic cruise boat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 276-281. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孙月平, 赵德安, 洪剑青, 等. 河蟹养殖船载自动均匀投饵系统设计与效果试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 31-39.
Sun Yueping, Zhao Dean, Hong Jianqing, et al. Design of automatic and uniform feeding system carried by workboat and effect test for raising river crab[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(11): 31-39. (in Chinese with English abstract)
- [17] 胡昱, 郭根喜, 汤涛林, 等. 基于 MCGS 的深水网箱自动投饵远程控制系统的的设计[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(6): 110-115.
Hu Yu, Guo Xigen, Tang Taolin, et al. Design of auto-feeding system for deep water net cage based on MCGS[J]. Progress in Fishery Science, 2010, 31(6): 110-115. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张振国. PLC 技术在电气工程自动化控制中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2015(9): 163.
Zhang Zhenguo. Application of PLC technology in electrical engineering automation control[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2015(9): 163. (in Chinese with English abstract)
- [19] 邹伟, 杨平, 徐德. 基于 MCGS 组态软件的上位机控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2008, 30(12): 103-108.
Zou Wei, Yang Ping, Xu De. Host computer control system design based on MCGS configuration software[J]. Manufacturing Automation, 2008, 30(12): 103-108. (in Chinese with English abstract)
- [20] Duan Zheng, Hu Haigang, Wei Pengbo. Study on external excitation of oscillating screen system of feeding machine[C]//2019 14th IEEE International Conference on Electric Measurement & Instruments, 2019: 1228-1233.
- [21] 张万忠. 可编程控制器入门与应用实例: 西门子 S7-200 系列[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [22] 张豪. 基于 MODBUS 通讯协议的三菱 PLC 控制台达变频器的研究[J]. 科技资讯, 2009, 26: 16-17.
Zhang Hao. Research on mitsubishi PLC control system based on MODBUS communication protocol[J]. Science & Technology Information, 2009, 26: 16-17. (in Chinese with English abstract)
- [23] 申永胜. 机械原理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [24] 同长虹, 黄建龙, 张小栋, 等. 基于复数矢量法的游梁式抽油机位置精度分析[J]. 机械设计与制造, 2009(1): 35-37.
Tong Changhong, Huang Jianlong, Zhang Xiaodong, et al. The position accuracy analysis on rocker-type oil pumping unit based on complex-vector method[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(1): 35-37. (in Chinese with English abstract)
- [25] 吕华芳, 杨汉波, 丛振涛, 等. 基于 PLC 控制的室内降雨入渗自动测定系统[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 144-149.
Lv Huafang, Yang Hanbo, Cong Zhentao, et al. Indoor automatic measurement system for rainfall infiltration based on PLC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 144-149. (in Chinese with English abstract)
- [26] 于蒙, 邹志云, 赵丹丹, 等. 基于 PLC 和触摸屏的自动阀门测试控制系统设计[J]. 石油化工自动化, 2013, 49(3): 38-40.
Yu Meng, Zou Zhiyun, Zhao Dandan, et al. Design of automatic valve test control system based on PLC and touch screen[J]. Automation in Petro-chemical Industry, 2013, 49(3): 38-40. (in Chinese with English abstract)
- [27] Zhou L, Chen J, Xu L. The research and application of freeport communication of SIEMENS PLC[C]//2008 International Seminar on Future BioMedical Information Engineering. IEEE, 2008: 318-321.
- [28] Zhu Y, Wu K. S7-200 PPI Host-Slave Communication[J]. Techniques of Automation and Applications, 2006(5): 21-23.
- [29] 闫琴, 李斌. 有阻尼斜抛物体运动的分析[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2004, 22(6): 522-524.
Yan Qin, Li Bin. Movement analysis of oblique tossed object with damping[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2004, 22(6): 522-524. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张健. 考虑空气阻力和风速影响的斜抛运动的数值分析[J]. 科技风, 2017(14): 251-254.
Zhang Jian. Numerical analysis of oblique projectile motion considering the effects of air resistance and wind speed[J]. Techonlogy Wind, 2017(14): 251-254. (in Chinese with English abstract)
- [31] 中华人民共和国水产行业标准: SC/T 6023—2011[S]. 北京: 中国农业出版社, 2011.

Design and experiment of discrete feeder for fresh feed

Hu Haigang¹, Wei Pengbo¹, Duan Zheng¹, Tang Chao¹, Qian Yunxia²

(1. Department of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Department of Marine Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Fish feeding is a key process in fishery industry. With the advancement of fishery modernization, traditional manual feeding has been replaced by mechanized feeders. But most of existing feeders are designed for pellet feed, which are not quite suit for carnivorous aquatic species such as weevers, groupers, squids etc. Those species mainly feed frozen little fishes and shrimps called fresh feed. Taking *Sepia pharaonis* for example, the intensive droppoints of fresh feed caused by traditional feeders will make squids to fight for food and result in injury and death. Such phenomenon highly raises the cost and reduces the production efficiency. In this study, the design idea of feeder with discrete casting for fresh feed was put forward. Firstly, in order to ensure that the feeder had a good effect on discrete droppoints of fresh feed, the multi-stage casting mode was specially designed. In this mode, the casting speed, direction and elevation angle of feeder can be adjusted in real time, which made the droppoints of fresh feed relatively uniform and not gather in small area. In addition, to ensure feeding automation, the feeder was equipped with Siemens PLC and MCGS touching screen as the control core and human machine interface for user to adjust and monitor above running parameters. The static analysis of the electric pusher was done to ensure the necessary maximum load. And the complex-vector method was used to calculate the relation curve between running time of electric pusher and elevation angle to realize the accurate control of casting elevation angle. The relationship between elevation angle and pusher running time was close to the straight line. Furthermore, MATLAB was used to simulate the droppoints of the multi-stage casting mode and determine running parameters in the mode and the test was held in squid breeding site to confirm the basic performance and effect of the casting mode. The multi-stage casting mode test results showed that the feeder could realize the discrete casting with longitudinal casting distance range from 1.8 to 8.0 m, crosswise casting distance range from 0 to 3.9 m, the casting area 26 m². And this mode can cover 81.2 % of 8 m×4 m indoor breeding pool. Since the test was held in dry pool and fresh feed slide in the ground, the casting area was greater than that shown in the simulation of 17.95 m². The performance test results showed that the average feed breakage rate was 3.3% when the rotating speed of the feeding machine was less than 900 r/min, while the rotating speed was higher than 900 r/min the breakage rate increased rapidly. Therefore, the maximum effective throwing distance was 10.5 m in speed of 900 r/min. The results showed the feeder and multi-stage casting mode were effective to realize the discrete casting with relatively uniform droppoint distribution, which reduced the behavior of fighting for food to death. The study can provide references for feeders design and discrete feeding.

Keywords: agricultural machinery; design; test; feeder; fresh feed; discrete casting; complex-vector method