

韩昊,夏英凯,李家伟,等.海水养殖网箱沉浮运动协同控制研究[J].华中农业大学学报,2025,44(4):269-279.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.04.026

## 海水养殖网箱沉浮运动协同控制研究

韩昊<sup>1</sup>,夏英凯<sup>1,2</sup>,李家伟<sup>1</sup>,吴哲<sup>1</sup>,郭政江<sup>1</sup>

1. 华中农业大学工学院,武汉 430070; 2. 农业农村部水产养殖设施工程重点实验室,武汉 430070

**摘要** 针对海水养殖网箱沉浮控制问题,开展建模和协同控制策略研究。首先,基于网箱结构、执行机构等对象特性进行分析,建立沉浮动力学模型;其次,基于并联驱动原理,提出一种双闭环主从协同网箱沉浮运动控制策略:外环基于PID主从同步策略实现多压载水舱的协同进水规划;内环依据模糊滑模控制与李雅普诺夫理论,设计高效的进水控制器。最后,通过多工况数字仿真,对压载舱进水控制算法和网箱沉浮协同运动控制方案进行验证。结果表明,提出的控制算法可实现压载舱高效进水控制,且能在不同海浪扰动下实现高精度的沉浮协同控制,可为实际应用提供技术支撑。

**关键词** 海水养殖网箱;主从同步控制;模糊滑模;海浪干扰

**中图分类号** TP242 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)04-0269-11

开放海域的海水养殖网箱为鱼类提供安全适应的环境并可降低水体污染概率。根据结构形式的不同,海水养殖网箱一般分为重力式网箱、锚张式网箱以及自张式网箱<sup>[1]</sup>。重力式网箱是现代渔业中广泛使用的一种网箱形式,依靠网箱重力和浮力抵抗风浪流等外部扰动力。锚张式网箱与作用于网箱上的沉浮力无太大关系,使用锚链固定网箱位置,可有效避免因海流等因素造成的漂移。自张式网箱主要特点在于能够通过内部结构的特殊设计实现自我定位和稳定,在较高流速冲击下网箱本体也不易发生变形<sup>[2]</sup>。在海水养殖网箱的实际应用中,沉浮控制技术占据至关重要的地位,以确保养殖生物的健康水平并提高养殖效率。该技术通过对网箱的沉浮深度进行调节,可以有效地控制养殖生物处于最适宜的水层中。此外在面对诸如台风等极端天气时,沉浮控制系统可以将网箱调整至较深的水层,以减少表层风浪带来的物理损害,从而提高了养殖系统的安全性。

现阶段国内外对于网箱沉浮控制系统算法的研究尚少。Kim等<sup>[3]</sup>采用PID算法对网箱深度进行控制,但网箱的振荡幅值随着深度增加也在增大。Molnar等<sup>[4]</sup>对复杂环境因素下网箱的模糊控制进行研究,并制定出模糊控制的输出变量以及规则库,但

对模拟有扰动海洋环境中系泊系统的重力、浮力以及锚链张力仍存在困难。Lee等<sup>[5-6]</sup>将人工智能算法用于网箱养殖中,推动了智慧海洋装备的发展,但在算法优化方面仍有较大的改进空间。王剑鸿<sup>[7]</sup>基于反步法滑模控制设计网箱控制器,经试验验证网箱在各工作模式下均具备可靠性与稳定性,但对不同海况下海浪干扰力的变化仍可进行进一步研究。付宗国<sup>[8]</sup>基于Takagi-Sugeno模糊模型,设计了深水移动网箱的控制系统,并在模型样机上进行了实验验证,但方差被动约束控制等先进的控制理论还未转化为操作算法,且网箱运动数学模型仍需优化。

大型海洋平台的沉浮策略亦可为养殖网箱控制提供参考。徐根等<sup>[9]</sup>针对水下大型平台提出了基于改进偏差耦合控制的多绞车协同控制策略。谭跃等<sup>[10]</sup>通过分步控制实现海洋平台升降过程中的八种倾斜矫正。汪鸣明等<sup>[11]</sup>采用速度-速度控制并进行转矩限幅以确保平台升降安全。姬文超<sup>[12]</sup>设计了基于倾角补偿的均值同步方法以减小负载变化和波浪扰动的影响。何新霞等<sup>[13]</sup>提出速度-位置偏差耦合结构的电机群控制方案以实现协同运作。孙俊<sup>[14]</sup>通过结合环形耦合策略的改进广义预测控制算法来优化平台轨迹跟踪。史蕾<sup>[15]</sup>提出适用于平台升降的多电机速度-位置偏差耦合控制方式并验证可行。

收稿日期:2024-07-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52001132);南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)项目(0220230659)

韩昊,E-mail:18795882878@163.com

通信作者:夏英凯,E-mail:ykxia@mail.hzau.edu.cn

刘乾坤等<sup>[16]</sup>针对四桩腿多电机驱动自升式海洋平台提出了速度-倾角偏差耦合同步控制策略以解决平台平衡问题。金奎等<sup>[17]</sup>针对水下平台压载水系统为MIMO型且存在多变量耦合的情况,采用模糊解耦的方法进行解耦分析并基于模糊控制算法提出了一种平台进水下潜过程的控制方法。

现有关于网箱沉浮控制系统的研究尚不充分,本研究针对一种新型海水养殖网箱的沉浮问题进行研究。针对多压载水舱的协同控制问题,基于控制目标特性分析建立海水养殖网箱、电磁阀及压载水舱的数学模型,构建基于PID控制器的主从同步控制结构;针对单压载水舱的进水控制问题,设计模糊滑模控制算法,实现进水的高效控制;针对海浪干扰问题对海况进行分析,并在仿真中引入海浪扰动项,以验证控制策略的抗干扰能力。最终通过Matlab/Simulink软件仿真测试,验证在海水养殖网箱多种工作模式下所提出控制算法的有效性和可靠性,以期对网箱沉浮控制的执行提供可靠的技术保障。

## 1 材料与方法

### 1.1 海水养殖网箱建模

1)网箱数学建模。海水养殖网箱的结构与相对坐标系如图1所示。该海水养殖网箱由4个压载水舱构成(T1~T4),均采用桶形立柱结构,每个压载水舱内部均安装有1台电磁阀,通过调节电磁阀电流大小来控制其开度,进而完成对压载水舱的进水控制,最终实现网箱整体吃水深度及姿态的调节。

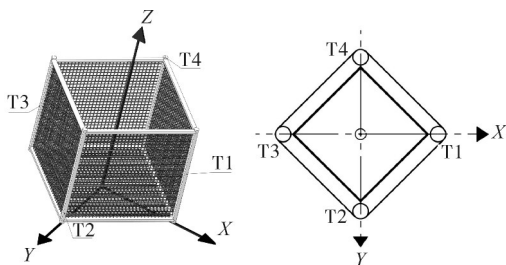


图1 海水养殖网箱结构与相对坐标系示意图

Fig.1 Schematic diagram of structure and relative coordinate system of mariculture cage

网箱作为一个具有大惯性的系统,其沉浮运动较为缓慢,因此可根据静力学原理进行分析<sup>[18]</sup>。当网箱各压载水舱的液位高度不一,或受到海浪干扰导致倾斜时,网箱重力与浮力相对位置的变动将直接影响网箱能否恢复到平衡状态<sup>[19]</sup>。现将网箱的相对坐标系设置在网箱底部,并用 $(x_{rG}, y_{rG}, z_{rG})$ 表示网箱在该坐标系中的重心坐标,其计算公式如下:

$$\begin{cases} x_{rG} = \frac{(L/2) \cdot (m_1 - m_3)}{M_0 + \sum_{i=1}^4 m_i} \\ y_{rG} = \frac{(L/2) \cdot (m_2 - m_4)}{M_0 + \sum_{i=1}^4 m_i} \\ z_{rG} = \frac{M_0 \cdot Z_{G0} + 1/2 \cdot \sum_{i=1}^4 m_i \cdot h_{wi}}{M_0 + \sum_{i=1}^4 m_i} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $L$ 为对角压载水舱间的距离, $m_i$ 表示每个压载水舱内压载水质量(其中, $i$ 表示压载水舱编号,下同), $M_0$ 为未进水时网箱自身质量, $Z_{G0}$ 为未进水时网箱自身在 $Z$ 方向的重心坐标, $h_{wi}$ 为每个压载水舱内液位高度。

单个压载水舱设计为圆柱体立柱形式,故 $m_i$ 计算公式如下:

$$m_i = \rho \pi r_1^2 h_{wi} \quad (2)$$

式(2)中, $\rho$ 为网箱所处海水密度, $r_1$ 为压载水舱内径。

现将网箱的绝对坐标系设置在水底,则绝对坐标系与相对坐标系之间的坐标转换可以通过旋转矩阵的形式来表示,具体如下:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} & X_0 \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} & Y_0 \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式(3)中, $(X, Y, Z)$ 表示绝对坐标系中的坐标, $(X_0, Y_0, Z_0)$ 为相对坐标系原点在绝对坐标系中的坐标, $(x, y, z)$ 表示相对坐标系中的坐标, $A$ 则表示相对坐标到绝对坐标的旋转矩阵。

在相对坐标系下,4个压载水舱的底部形心坐标表示为 $(x_i, y_i, z_i)$ 。现定义T1~T4压载水舱底部形心分别为 $C_1 \sim C_4$ ,其坐标分别表示为:

$$\begin{cases} C_1 = (L/2, 0, 0) \\ C_2 = (0, L/2, 0) \\ C_3 = (-L/2, 0, 0) \\ C_4 = (0, -L/2, 0) \end{cases} \quad (4)$$

在网箱沉浮运动分析中,主要考虑压载水舱底部形心在绝对坐标系中 $Z$ 方向的坐标,矩阵运算如下所示:

$$\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 \end{pmatrix} = (a_{13} \ a_{23} \ a_{33} \ Z_0) \cdot \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

网箱工作水域水深为 $H_0$ ,则网箱中4个压载水舱的没入水深依次表示为:

$$\begin{cases} h_1 = (H_0 - Z_1)/a_{33} \\ h_2 = (H_0 - Z_2)/a_{33} \\ h_3 = (H_0 - Z_3)/a_{33} \\ h_4 = (H_0 - Z_4)/a_{33} \end{cases} \quad (6)$$

根据上述描述,可以计算网箱浮心的相对坐标,其3个方向的坐标分别可以通过以下计算得出:

$$\begin{cases} x_{rF} = \frac{(L/2) \cdot (h_1 - h_3)}{\sum_{i=1}^4 h_i} \\ y_{rF} = \frac{(L/2) \cdot (h_2 - h_4)}{\sum_{i=1}^4 h_i} \\ z_{rF} = \frac{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + h_4^2}{2(h_1 + h_2 + h_3 + h_4)} \end{cases} \quad (7)$$

依据公式(3)中的坐标系旋转矩阵,可以计算出网箱在绝对坐标系中重心与浮心的坐标,计算公式如下:

$$\begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{rG} \\ y_{rG} \\ z_{rG} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} X_F \\ Y_F \\ Z_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{rF} \\ y_{rF} \\ z_{rF} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}$$

式(8)中, $(X_G, Y_G, Z_G)$ 代表网箱在绝对坐标系中的重心坐标; $(X_F, Y_F, Z_F)$ 代表网箱在绝对坐标系中的浮心坐标。

网箱处于漂浮状态时,受到重力和浮力2个力的作用,这2个力大小相等,方向相反,并且作用在同一铅垂线上。可以用公式具体表示如下:

$$\begin{cases} X_G = X_F \\ Y_G = Y_F \\ G = F \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, $G$ 代表网箱受到的重力, $F$ 代表网箱受到的浮力。海水养殖网箱的下潜控制要求为:在网箱初始存在姿态倾斜或者受到海浪干扰的情况下,下潜过程中能够实现姿态调节,并最终达到目标吃水深度。

某一时刻网箱的吃水深度、横倾角、纵倾角均可计算求得,具体公式如下:

$$\begin{cases} H = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4} \\ \alpha = \arctan\left(\frac{h_2 - h_4}{L}\right) \\ \beta = \arctan\left(\frac{h_3 - h_1}{L}\right) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中, $\alpha$ 代表网箱横倾角, $\beta$ 代表网箱纵倾角。

2)电磁阀及压载水舱数学建模。海水养殖网箱的压载水舱进水依托电磁阀来实现。本研究重点考虑网箱沉浮动力学建模及对多压载舱进水的协同控制,因而对电磁阀模型做适当简化处理,认为在负载压力波动不大的情况下,电磁阀流量 $Q_L(S)$ 与开度 $X(S)$ 成正比关系,并将电磁比例方向阀视作二阶环节<sup>[20]</sup>,其传递函数表述如下:

$$\frac{Q_L(S)}{I(S)} = \frac{K_q}{\frac{S^2}{W_{sv}^2} + \frac{2\xi_{sv}S}{W_{sv}} + 1} \quad (11)$$

式(11)中, $K_q$ 代表电磁阀的流量增益; $\xi_{sv}$ 代表电磁阀的阻尼比,取值范围为0.5~0.7; $W_{sv}$ 代表电磁阀固有频率。将上述传递函数转换为状态空间模型,具体形式如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -W_{sv}^2 & -2\xi_{sv}W_{sv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \\ y = [K_q W_{sv}^2 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, $u$ 代表电磁阀的输入信号; $x_1, x_2$ 为状态变量; $y$ 代表电磁阀的输出信号。压载水舱液位高度变化率 $v$ 可以由下式计算得到:

$$v = \frac{Q_L}{S_A} = \frac{y}{\pi r_1^2} = \frac{K_q W_{sv}^2 x_1}{\pi r_1^2} \quad (13)$$

式(13)中, $S_A$ 代表压载水舱内部横截面积。

## 1.2 海水养殖网箱同步下潜控制算法设计

1)基于主从同步的沉浮协同运动控制策略。为了实现海水养殖网箱多压载水舱的同步控制,设计一种主从同步控制策略,其具体控制框图如图2所示。该控制策略由压载舱进水规划器、同步控制器和模糊滑模液位控制器组成。压载舱进水规划器根据液位高度误差设定期望液位高度变化率;同步控制器负责提供压载水舱进水补偿值 $\epsilon_{li}$ ;模糊滑模液位控制器则确保压载水舱实现进水的高效控制。

定义T1压载水舱为主动执行单元,T2~T4压载水舱为从动执行单元,则液位高度跟随误差为:

$$e_{hli} = h_{wi} - h_{wi} \quad (14)$$

式(14)中: $e_{hli}$ 为T1压载水舱与Ti压载水舱液

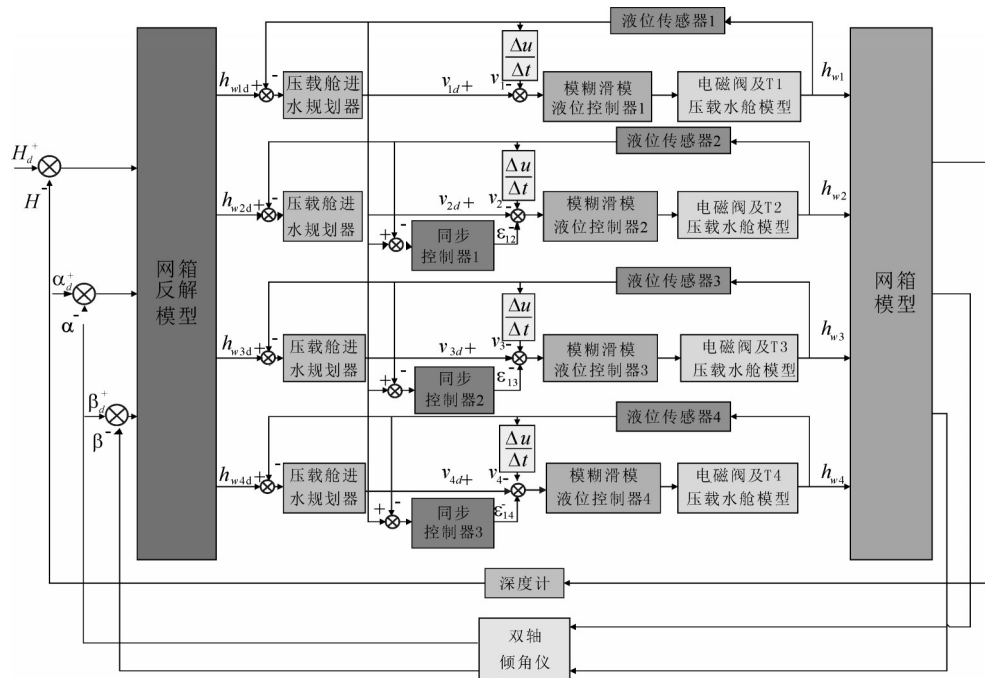


图2 基于多压载水舱协同的海水养殖网箱同步下潜控制

Fig.2 Synchronous submergence control of mariculture cages based on multi-ballast tanks coordination

位高度跟随误差;  $h_{w1}$  为 T1 压载水舱液位高度;  $h_{wi}$  为 Ti 压载水舱液位高度。

同步控制器的输出信号  $\epsilon_{1i}$ , 具体计算如下所示:

$$\begin{cases} \epsilon_{12} = K_{p12} \left( e_{h12} + \frac{1}{T_{I12}} \int_0^t e_{h12} dt + T_{D12} \frac{de_{h12}}{dt} \right) \\ \epsilon_{13} = K_{p13} \left( e_{h13} + \frac{1}{T_{I13}} \int_0^t e_{h13} dt + T_{D13} \frac{de_{h13}}{dt} \right) \\ \epsilon_{14} = K_{p14} \left( e_{h14} + \frac{1}{T_{I14}} \int_0^t e_{h14} dt + T_{D14} \frac{de_{h14}}{dt} \right) \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中:  $\epsilon_{12}$ 、 $\epsilon_{13}$ 、 $\epsilon_{14}$  分别为同步控制器 1、同步控制器 2、同步控制器 3 的输出信号;  $K_{p12}$ 、 $K_{p13}$ 、 $K_{p14}$  均为可调整比例系数;  $T_{I12}$ 、 $T_{I13}$ 、 $T_{I14}$  均为积分时间常数;  $T_{D12}$ 、 $T_{D13}$ 、 $T_{D14}$  均为微分时间常数。

2) 压载舱进水规划器设计。定义单个压载水舱液位高度误差为:

$$e_h = h_w - h_{wd} \quad (16)$$

式(16)中:  $e_h$  为单个压载水舱液位高度误差;  $h_w$  为当前压载水舱液位高度;  $h_{wd}$  为当前压载水舱期望液位高度。

为使压载水舱液位高度  $h_w$  最终能够平稳趋近并达到期望值  $h_{wd}$ , 并且不发生超限现象。现设定期望液位高度变化率  $v_d$  如下所示:

$$\begin{cases} v_d = 3 & e_h < -2 \text{ m} \\ v_d = -\frac{3}{4} e_h^2 - 3e_h - 2 & -2 \leq e_h \leq 0 \text{ m} \\ v_d = 0 & e_h > 0 \text{ m} \end{cases} \quad (17)$$

3) 单压载水舱滑模液位控制器设计。取控制目标  $v \rightarrow v_d$ , 定义液位高度变化率误差为:

$$e_v = v_d - v = v_d - \frac{K_q W_{sv}^2 x_1}{\pi r_1^2} \quad (18)$$

则:

$$\begin{cases} \dot{e}_v = \dot{v}_d - \dot{v} = \dot{v}_d - \frac{K_q W_{sv}^2 \dot{x}_1}{\pi r_1^2} = \\ \dot{v}_d - \frac{K_q W_{sv}^2 x_2}{\pi r_1^2} \\ \ddot{e}_v = \ddot{v}_d - \ddot{v} = \ddot{v}_d - \frac{K_q W_{sv}^2 \dot{x}_2}{\pi r_1^2} = \\ \ddot{v}_d - \frac{K_q W_{sv}^2 (-W_{sv}^2 x_1 - 2\xi_{sv} W_{sv} x_2 + u)}{\pi r_1^2} \end{cases} \quad (19)$$

众所周知, 滑模控制器的核心是滑模面  $s$  的设计, 轨迹被强制保持在滑模面上, 此处将滑模面的函数定义如下:

$$s = ce_v + \dot{e}_v + k \int e_v dt \quad (20)$$

式(20)中,  $c$ 、 $k$  均为大于零的常数。对式(20)求得得到:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c\dot{e}_v + \ddot{e}_v + ke_v \\ &= \frac{K_q W_{sv}^2 (-W_{sv}^2 x_1 - 2\xi_{sv} W_{sv} x_2 + u)}{\pi r_1^2} + \\ &\quad k \left( v_d - \frac{K_q W_{sv}^2 x_1}{\pi r_1^2} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

设计控制器如下所示:



$$u=c\left(\frac{\pi r_1^2}{K_q W_{sv}^2}\dot{v}_d-x_2\right)+\frac{\pi r_1^2}{K_q W_{sv}^2}\ddot{v}_d+\\W_{sv}^2x_1+2\xi_{sv}W_{sv}x_2+kx_1-\\k\frac{\pi r_1^2}{K_q W_{sv}^2}v_d+\frac{\pi r_1^2}{K_q W_{sv}^2}\rho\operatorname{sgn}(s)\\ \dot{V}=s\dot{s}\\ =s\left[c\left(\dot{v}_d-\frac{K_q W_{sv}^2x_2}{\pi r_1^2}\right)+\ddot{v}_d-\frac{K_q W_{sv}^2(-W_{sv}^2x_1-2\xi_{sv}W_{sv}x_2+u)}{\pi r_1^2}\right.\\ \left.+k\left(v_d-\frac{K_q W_{sv}^2x_1}{\pi r_1^2}\right)\right]\\ =-\rho\operatorname{sgn}(s)s\\ <0\end{array}\tag{22}$$

式(22)中, $\rho$ 为大于零的常数。为了验证设计控制器的稳定性,选择 Lyapunov 函数为  $V=\frac{1}{2}s^2$ ,则其导数表示为:

$$\tag{23}$$

对于任意非零向量  $s$ ,均有  $V>0, \dot{V}<0, V$  是正定的,  $\dot{V}$  是负定的。因此表明该控制器具有渐近稳定性,从而确保了控制系统的稳定性。

4) 针对滑模控制系数的模糊控制器设计。为解决滑模控制在滑模面附近产生较大抖动的问题,本研究采用将模糊控制与滑模控制结合的方法,通过不断调整切换项系数导数  $\dot{\rho}$ ,使得系统状态在远离滑模面时拥有较大增益,而在靠近滑模面时减小增益,有效减少系统在滑模面附近的抖振,从而提高了控制系统的稳定性和响应性。

在模糊控制单元的具体设计中,输入是滑模面函数  $s$  与其导数  $\dot{s}$  的乘积  $s\dot{s}$ ,输出则是切换项  $\operatorname{sgn}(s)$  前系数变化率  $\dot{\rho}$ 。这些输入和输出均由 5 个模糊区间组成,沿论域值由小到大方向依次为 NB(负大)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)和 PB(正大)。在确保系统稳定性的条件下,提出了模糊规则,具体定义如表 1 所示。

表 1 模糊规则表  
Table 1 Fuzzy reasoning table

			$\dot{s}\dot{s}$		
$\dot{\rho}$	NB	NS	ZO	PS	PB
	NB	NS	ZO	PS	PB

2 结果与分析

2.1 单压载水舱液位高度变化率控制仿真

为了评估所设计的模糊滑模控制器的控制性能,特别引入传统 PID 算法、传统滑模算法进行比较分析。同时,将实际进水时的液位高度变化率曲线(见公式(17))确定为理想液位高度变化率曲线,以此比较分析 3 种控制策略的效果。初始状态设置为  $v=0$ ,控制曲线如图 3 所示,控制仿真结果如表 2 所示。

从图 3 可以看出,传统 PID 控制、传统滑模控制以及本研究提出的模糊滑模控制都能成功执行实际

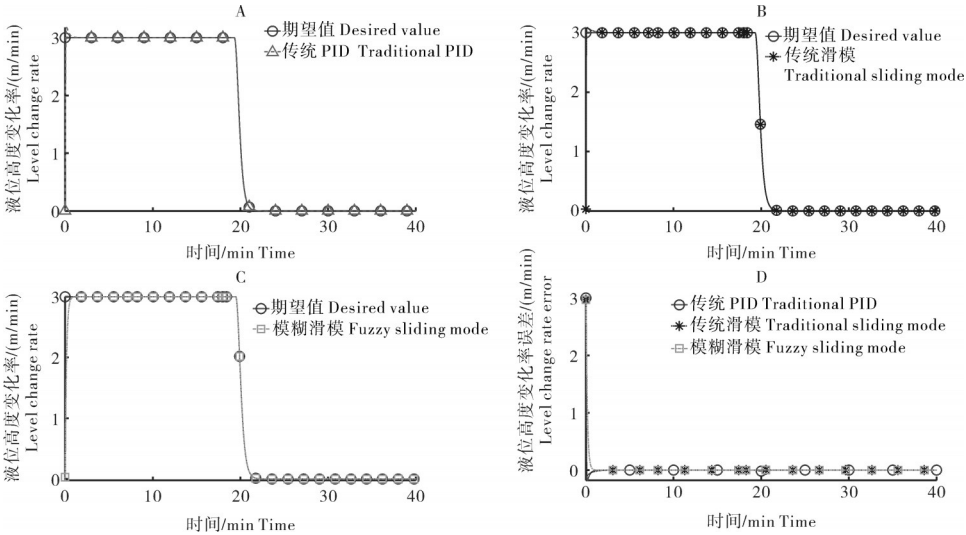


图 3 实际进水时液位高度变化率跟踪控制仿真曲线  
Fig.3 Simulation curve of liquid level height change rate tracking control in actual water inlet

表 2 实际进水时液位高度变化率跟踪控制仿真结果  
Table 2 Simulation results of liquid level height change rate tracking control in actual water inlet

控制模式 Control mode	调整时间/min Adjustment time	平均稳态误差/ (m/min) Average steady-state error	超调量/% Overshoot
传统PID Tradition PID	0.704	0.001 31	5.92
传统滑模 Traditional sliding mode	0.850	0.007 04	2.98
改进模糊滑模 Improved fuzzy sliding mode	0.694	0.000 27	0.93

进水时的液位高度变化率控制任务。由表 2 可知,本研究提出的模糊滑模控制算法相较于传统 PID 控制算法和传统模糊控制算法,超调量更小,且响应速度更加迅速、平均稳态误差更小(稳态范围设置为±1%)。因此,在压载水舱进水控制方面,本研究提出的模糊滑模控制算法显示出了更优的性能。

2.2 海水养殖网箱同步控制仿真

海水养殖网箱分为迁移、半潜、全潜 3 种工作模式,以适应不同的海洋条件和养殖需求。根据实际

工作情形,现设定迁移、半潜和全潜模式下目标吃水深度分别为 10.67、19.31、34.67 m。同时为验证海水养殖网箱在下潜过程中能否实现同步控制,现给定 4 个压载水舱不同的初始液位高度,T1~T4 压载水舱初始液位高度分别设定为 5、0、3、10。不同工作模式下同步控制的曲线如图 4~图 6 所示。

根据图 4~图 6 可知,在不同工作模式下,海水养殖网箱在初始姿态存在倾斜的情况下,通过本研究设计的同步控制策略,最终都能使网箱吃水深度达到目标值,并且在下潜过程中将姿态调平。在此过程中,各压载水舱的液位高度及其变化率最终都趋于一致。

在海水养殖网箱的工作过程中,波浪力对其稳态产生干扰,尤其是二阶波浪力会对网箱的运动状态产生显著影响,本研究采用低频二阶干扰力的模型进行分析<sup>[21]</sup>。在建立海浪仿真的数学模型方面,通过一个标准的二阶振荡环节,由均值为零的高斯白噪声  $w(s)$  驱动,来模拟海浪对网箱产生的干扰力<sup>[22-24]</sup>,具体公式如下所示:

$$y(s)=H(s)w(s)$$
 (24)

式(24)中, $H(s)$ 代表二阶波浪传递函数,具体计

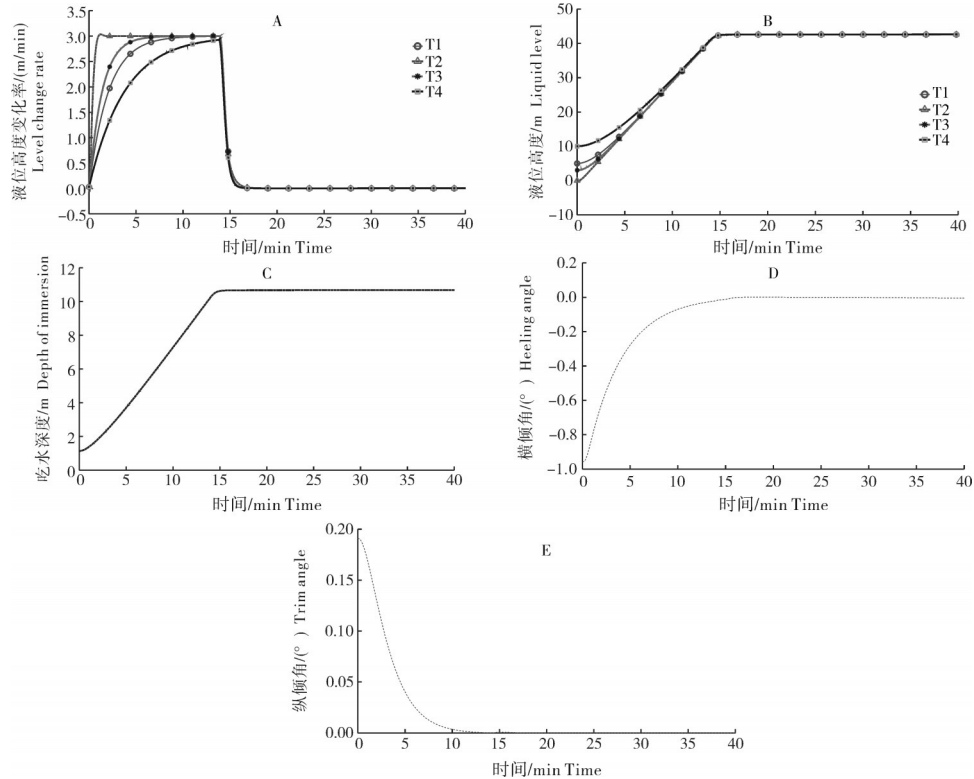


图 4 迁移模式下液位高度变化率(A)、液位高度(B)、吃水深度(C)、横倾角(D)和纵倾角(E)  
Fig.4 Liquid level height change rate(A),liquid level height(B),draft depth(C),heeling angle(D), and trim angle(E) in migration mode

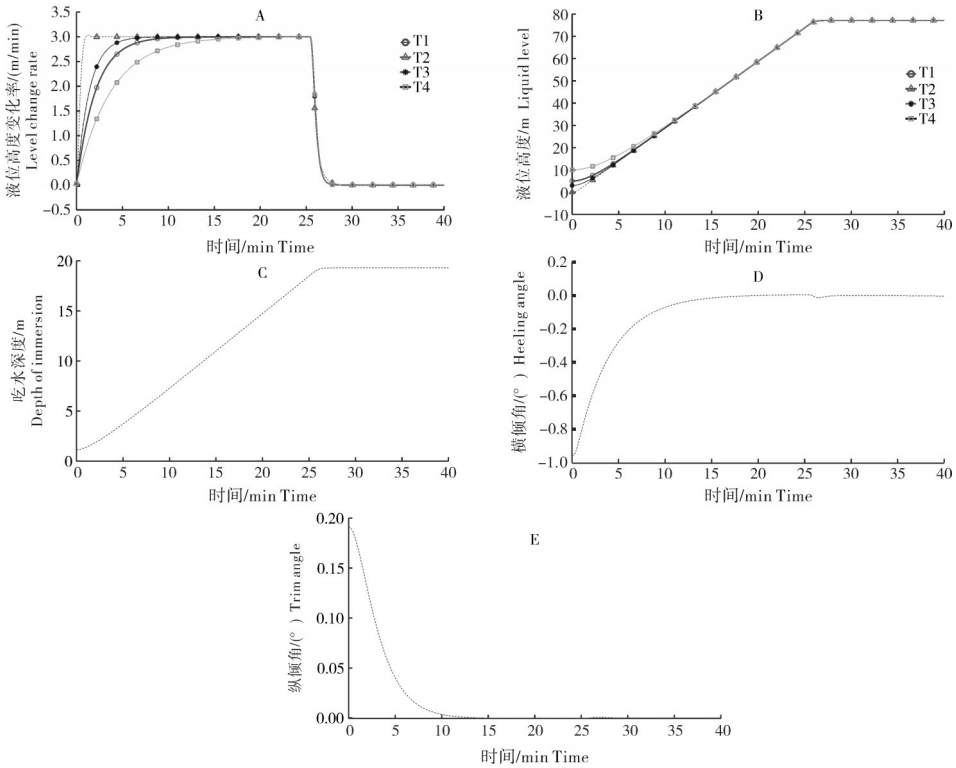


图5 半潜模式下液位高度变化率(A)、液位高度(B)、吃水深度(C)、横倾角(D)及纵倾角(E)  
Fig.5 Liquid level height change rate(A), liquid level height(B), draft depth(C), heeling angle(D), and trim angle(E) in semi-submersible mode

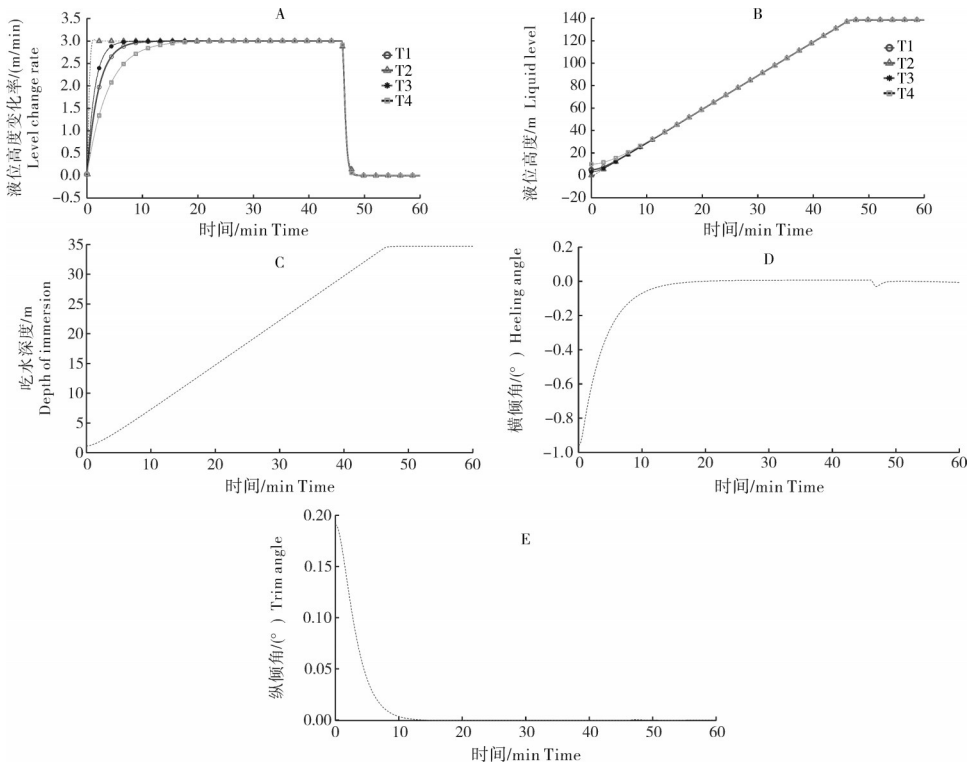


图6 全潜模式下液位高度变化率(A)、液位高度(B)、吃水深度(C)、横倾角(D)及纵倾角(E)  
Fig.6 Liquid level height change rate(A), liquid level height(B), draft depth(C), heeling angle(D), and trim angle(E) in full submersible mode

算公式如下<sup>[25]</sup>:

$$H(s) = \frac{K_w s}{s^2 + 2\lambda\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (25)$$

式(25)中,  $K_w$ 代表线性海浪模型增益系数,  $\lambda$ 代表海浪阻尼系数,  $\omega_0$ 代表主导海浪频率。

在选择适用于常见海况的波浪谱后, 这些波浪谱拟合函数被用作网箱下潜仿真中的波浪谱传递函数, 详细信息见表3<sup>[26]</sup>。

在海洋环境下, 水面波浪一般比较大。随着深度的增加, 波浪逐渐减小。所以在仿真中, 较浅海域使用较大的有效波高参数, 较深海域使用较小的有效波高参数。在不同工作模式下引入波浪干扰的同步

表3 不同海况下波浪谱拟合函数表

Table 3 Wave spectrum fitting function table under different sea conditions

有效波高/m Significant wave height	波浪频率/(rad/min) wave frequency	波浪谱参数 Wave spectrum parameters	传递函数 Transfer function
1.2	54.0	MPM	$H(s) = \frac{0.1755s}{s^2 + 0.4639s + 0.81}$
2.5	43.8	MPM	$H(s) = \frac{0.3284s}{s^2 + 0.3752s + 0.5329}$

控制曲线如图7~图9所示。

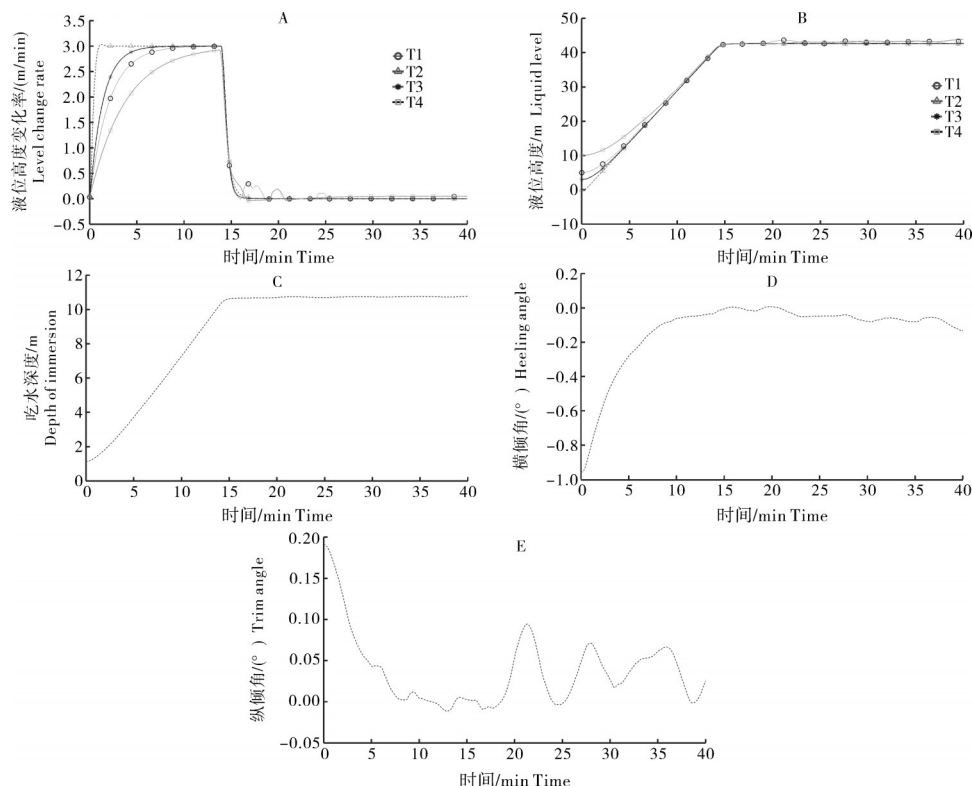


图7 迁移模式下受波浪干扰时液位高度变化率(A)、液位高度(B)、吃水深度(C)、横倾角(D)及纵倾角(E)

Fig.7 Liquid level height change rate(A), liquid level height(B), draft depth(C), heeling angle(D), and trim angle(E) under wave interference in migration mode

由图7~图9可知, 在不同工作模式下, 尽管海水养殖网箱初始时存在倾斜并面临各种海浪干扰, 通过本研究设计的同步控制策略, 网箱的吃水深度最终成功达到预设目标值, 同时姿态在小范围内波动。在此过程中, 各压载水舱的液位高度及其变化率的波动幅度也都较小, 并逐渐趋于一致。

### 3 讨论

采用桶形立柱结构的海水养殖网箱, 在实现高精度同步沉浮控制方面仍面临诸多挑战。在波浪作

用下, 网箱会经历周期性的振荡和倾斜力矩冲击, 这使得多压载水舱的同步控制变得尤为复杂和关键。由于各压载舱受到的波浪冲击和载荷分布可能不平衡, 需要持续调整各个舱室的进排水量, 以确保网箱整体的稳定平衡。不均匀载荷还可能增加某些压载水舱的单舱进水控制难度, 必须及时准确地调节, 以避免造成倾侧效应和应力集中, 从而维持网箱的稳定性。精确的多压载水舱同步控制与单压载水舱进水调节是保障网箱稳定的重要手段。本研究面向一种海洋养殖网箱进行了同步下潜控制研究, 主要研



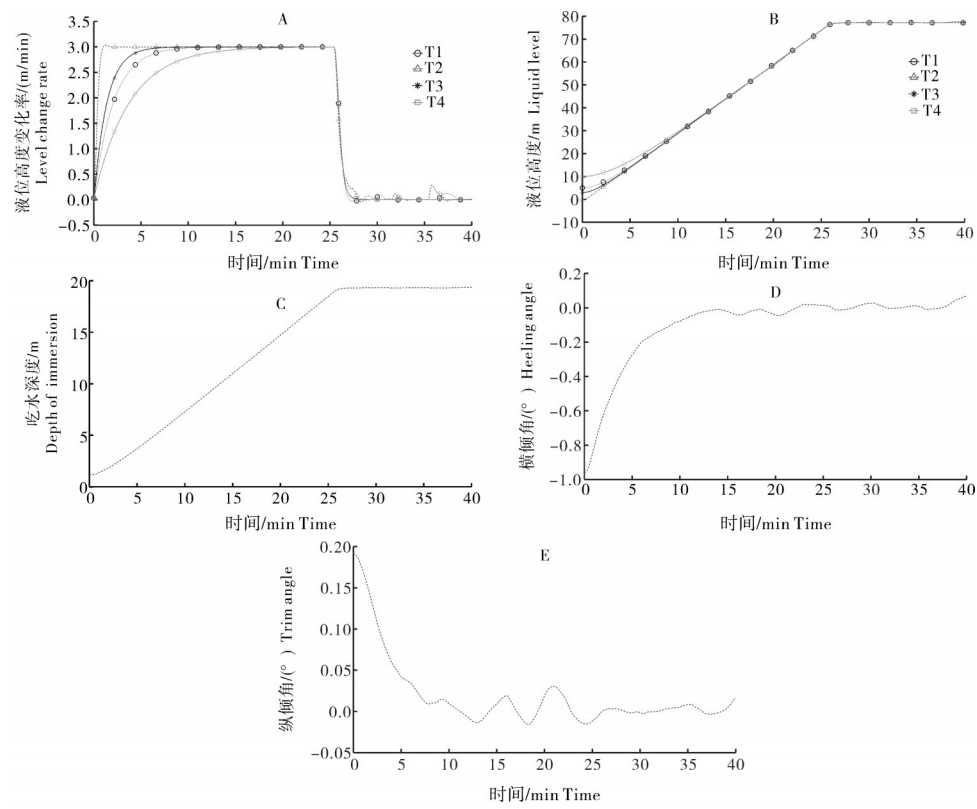


图8 半潜模式下受波浪干扰时液位高度变化率(A)、液位高度(B)、吃水深度(C)、横倾角(D)及纵倾角(E)  
Fig.8 Liquid level height change rate(A), liquid level height(B), draft depth(C), heeling angle(D), and trim angle(E) under wave interference in semi-submersible mode

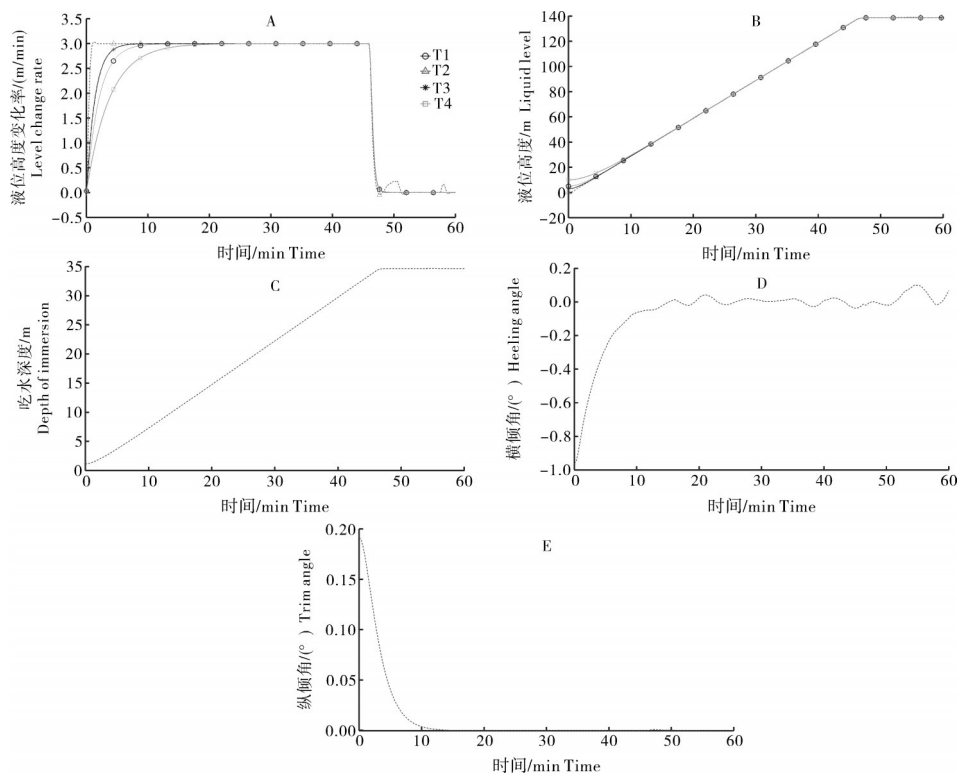


图9 全潜模式下液位受波浪干扰时高度变化率(A)、液位高度(B)、吃水深度(C)、横倾角(D)及纵倾角(E)  
Fig.9 Liquid level height change rate(A), liquid level height(B), draft depth(C), heeling angle(D), and trim angle(E) under wave interference in full submersible mode

究内容包括多压载水舱的协同控制与单压载水舱的进水控制。针对多压载水舱的协同控制问题,本研究提出了一种基于主从同步的沉浮协同运动控制策略。在面对压载水舱初始压载水量不同以及海浪干扰的情况下,应用同步控制器,实现网箱下潜深度达到预设值,在此过程中姿态小幅度波动,并且各压载水舱液位高度同步误差接近零,为海洋养殖网箱的沉浮控制提供了重要支持。针对单个压载水舱的进水控制,提出了模糊滑模液位控制器,具有高效性。最后,通过数值仿真,验证了所提出控制策略的效果。未来研究将关注在多参数影响下的海洋养殖网箱多压载水舱协同控制问题,以进一步稳定大型海洋养殖网箱的沉浮操作。

### 参考文献 References

- [1] 袁军亭,周应祺.深水网箱的分类及性能[J].上海水产大学学报,2006,15(3):3350-3358. YUAN J T, ZHOU Y Q. Classification of offshore fish cages and their performances[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2006, 15(3): 3350-3358 (in Chinese with English abstract).
- [2] 郭根喜.我国深水网箱养殖产业化发展存在的问题与基本对策[J].南方水产,2006,2(1):66-70. GUO G X. The existing problem and basic countermeasure in the industrialization development of deep-water net cage culture in China[J]. South China fisheries science, 2006, 2(1): 66-70 (in Chinese with English abstract).
- [3] KIM T H, YANG K U, HWANG K S, et al. Automatic submerging and surfacing performances of model submersible fish cage system operated by air control[J]. Aquacultural engineering, 2011, 45(2): 74-86.
- [4] MOLNAR L, TOAL D. A control system development for submersible sea cage system[C]//OCEANS 2007. September 29-October 4, 2007. Vancouver, BC. New York: IEEE, 2007: 1-11.
- [5] LEE P G. Process control and artificial intelligence software for aquaculture[J]. Aquacultural engineering, 2000, 23(1/2/3): 13-36.
- [6] LEE P G, LEA R N, DOHMANN E, et al. Denitrification in aquaculture systems: an example of a fuzzy logic control problem[J]. Aquacultural engineering, 2000, 23(1/2/3): 37-59.
- [7] 王剑鸿.新型可潜降深水网箱控制系统研究[D].杭州:浙江大学,2022. WANG J H. Research on a new control system of submersible deep water cage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [8] 付宗国.深水可移动网箱模糊控制系统研究[D].舟山:浙江海洋学院,2014. FU Z G. Research on fuzzy control system of deep-water movable cage[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [9] 徐根,夏英凯,李家伟,等.大型水下并联机器人的多绞车协同控制[J].船舶工程,2023,45(8):15-25. XU G, XIA Y K, LI J W, et al. Multi-winch collaborative control of large-scale underwater parallel robot[J]. Ship engineering, 2023, 45(8): 15-25 (in Chinese with English abstract).
- [10] 谭跃,邱赤东,姜培元.自升式海洋平台自动平衡控制的研究[J].大连海事大学学报,2000,26(2):95-97. TAN Y, QIU C D, JIANG P Y. A research on automatic balance control of sea-flat[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2000, 26(2): 95-97 (in Chinese with English abstract).
- [11] 汪鸣明,黄建忠,蒋莹莹.海上钻井平台升降系统的控制方案研究[J].机电一体化,2013,19(7):34-39. WANG M M, HUANG J Z, JIANG Y Y. Research of offshore drilling platform lift system control program[J]. Mechatronics, 2013, 19(7): 34-39 (in Chinese with English abstract).
- [12] 姬文超.自升式海洋平台多电机升降同步控制系统研究[D].湛江:广东海洋大学,2022. JI W C. Research on synchronous control system of multi-motor lifting of jack-up offshore platform[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [13] 何新霞,史蕾.自升式海洋钻井平台升降装置同步控制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(1):149-156. HE X X, SHI L. Synchronous control of jacking system of jack-up offshore drilling platform[J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2018, 42(1): 149-156 (in Chinese with English abstract).
- [14] 孙俊.基于改进GPC多桩腿海洋平台升降同步控制系统研究[D].湛江:广东海洋大学,2021. SUN J. Research on synchronous control system of multi-leg offshore platform lifting based on improved GPC[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [15] 史蕾.自升式海洋平台升降系统同步控制研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2015. SHI L. Lift system of jack-up platform synchronization control study[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘乾坤,刘峰春,罗艳媚,等.自升式海洋平台平衡升降控制策略及试验[J].船舶工程,2020,42(3):100-104. LIU Q K, LIU H C, LUO Y M, et al. Equilibrium lifting control strategy and test of jack-up offshore platform[J]. Ship engineering, 2020, 42(3): 100-104 (in Chinese with English abstract).
- [17] 金奎,徐国华,赵寅,等.水下平台进水下潜过程的稳定性控制[J].船舶工程,2015,37(3):78-82. JIN K, XU G H, ZHAO Y, et al. Stable control of ballast-filling process of underwater platform[J]. Ship engineering, 2015, 37(3): 78-82 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李蔚,时忠民,谭家华.桶形基础平台海上沉放安装[J].海洋工程,2001,19(1):19-23. LI W, SHI Z M, TAN J H. Self-ballast submergence installation of bucket-foundation platform at sea[J]. The ocean engineering, 2001, 19(1): 19-23 (in Chinese with English abstract).
- [19] 吴海彬.基于半物理仿真的海上平台沉浮运动研究[D].杭

- 州:浙江大学,2002.WU H B.Research on ups and downs of offshore platforms based on semi-physical simulation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002 (in Chinese with English abstract).
- [20] 强宝民,刘保杰.电液比例阀控液压缸系统建模与仿真[J].起重运输机械,2011(11):35-39. QIANG B M, LIU B J. Electro-hydraulic proportional valve hydraulic cylinder system modeling and simulation [J]. Hoisting and conveying machinery, 2011(11):35-39 (in Chinese with English abstract).
- [21] 董秋军.基于Kalman滤波器的动力定位系统非线性控制方法[D].大连:大连海事大学,2017.DONG Q J. Nonlinear control method of dynamic positioning system based on Kalman filter [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [22] 叶松,陈永冰,周岗,等.海浪干扰对船舶航向影响规律研究[J].舰船电子工程,2015,35(1):65-67. YE S, CHEN Y B, ZHOU G, et al. Effect of waves interference on ship course [J]. Ship electronic engineering, 2015, 35(1):65-67 (in Chinese with English abstract).
- [23] FAN Y S, SUN X J, WANG G F, et al. On fuzzy self-adaptive PID control for USV course [C]//2015 34th Chinese Control Conference (CCC). July 28-30, 2015. Hangzhou, China. Hangzhou: IEEE, 2015: 8472-8478.
- [24] 徐雪峰,王益民,赵光.海浪干扰主频率辨识算法研究[C]//2018年数字化造船学术交流会议.广州:中国造船工程学会,2018:432-436. XU X F, WANG Y M, ZHAO G. Research on the main frequency identification algorithm of ocean wave interference [C]//2018 Digital Shipbuilding Academic Exchange Conference. Guangzhou: CSNAME, 2018: 432-436 (in Chinese with English abstract).
- [25] 车志宣.高海况船舶航向控制方法研究[D].荆州:长江大学,2023.CHE Z X. Research on course control method of ships in high sea conditions [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李文正,何治斌,张洪富,等.四种海况下船舶推进电机建模与仿真[J].计算机应用与软件,2023,40(5):90-96. LI W Z, HE Z B, ZHANG H F, et al. Modeling and simulation of marine propulsion motor under four sea conditions [J]. Computer applications and software, 2023, 40(5):90-96 (in Chinese with English abstract).

## Cooperatively controlling sinking and floating of mariculture cages

HAN Hao<sup>1</sup>, XIA Yingkai<sup>1,2</sup>, LI Jiawei<sup>1</sup>, WU Zhe<sup>1</sup>, GUO Zhengjiang<sup>1</sup>

1.College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Aquaculture Facilities Engineering, Wuhan 430070, China

**Abstract** The control of sinking and floating is an important means to improve the quality of mariculture cages and ensure the safety of aquaculture. However, it is difficult to achieve the accurate control of sinking and floating due to multiple factors including the complex conditions of sea and uneven loads. Modeling and strategies for coordinated control were studied to solve the problem of controlling the sinking and floating of mariculture cages. A dynamic model of sinking and floating was established based on analyzing the characteristics of the structure of cages, actuator, and other objects. A dual closed-loop master-slave strategy for cooperatively controlling the floating of cages was proposed based on the principle of parallel drive. The outer loop implemented collaborative water inflow planning of multi-ballast tanks based on PID master-slave synchronization strategy. An efficient water inlet controller was designed for the inner loop based on fuzzy sliding mode control and Lyapunov theory. The water inlet control algorithm of the ballast tank and the scheme of cooperatively controlling the sinking and floating of cages were verified by digitally simulating the multiple conditions of working. The results showed that the control algorithm proposed achieved efficient water inflow control of ballast tanks and coordinated control of sinking and floating with high-precision under different disturbances of wave. It will provide technical support for the practical applications of the coordinated control of sinking and floating of mariculture cages.

**Keywords** mariculture cages; master-slave synchronous control; fuzzy sliding mode; disturbance of wave

(责任编辑:陆文昌)