

文章编号: 1006-2467(2023)08-0972-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.076

# 船舶纵向运动多输入多输出不稳定系统的非线性反馈控制

曹 添, 张显库

(大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

**摘 要:** 为了提高多输入多输出(MIMO)不稳定系统控制器的鲁棒性与节能效果, 以大连海事大学教学实习船“育鲲”轮在波浪上纵摇和升沉运动的数学模型为研究对象, 将数学模型的分子分母具有不稳定零极点过程使用根轨迹成形技术以及引用数学工具加权矩阵将其根轨迹拉到左半平面. 之后运用闭环增益成形算法设计控制器的思路, 以成形后的模型用一阶闭环增益成形算法设计鲁棒控制器, 再引入双极性 S 函数驱动的非线性反馈代替原有的误差线性反馈. 从仿真结果可以看出, 在模型产生摄动时, 非线性反馈控制改进了升沉和纵摇, 控制能量大幅减少, 对模型干扰具有鲁棒性能. 该方案求解过程简单, 并且整个系统控制器与被控对象物理意义明确, 设计所得的控制器阶次较低, 且补充完善了 MIMO 不稳定系统的控制器设计方法.

**关键词:** 多输入多输出不稳定系统; 根轨迹成形; 非线性反馈; 鲁棒控制器; 减纵摇

**中图分类号:** U 664.82

**文献标志码:** A

## Nonlinear Feedback Control of MIMO Unstable System for Ship Longitudinal Motion

CAO Tian, ZHANG Xianku

(Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to improve the robustness and energy saving of the controller for multiple input multiple output (MIMO) unstable systems, the mathematical model of pitching and the heave motion of the scientific ship “YUKUN” of Dalian Maritime University is taken as the research plant, and the root locus of the transfer function mathematical model with unstable zero-pole and zero-pole processes is pulled to the left half plane by using the root locus shaping technique and weighting matrix. The first-order closed-loop gain shaping algorithm is used to design the robust controller, and the nonlinear feedback driven by the bipolar S function is introduced to replace the original error linear feedback. The simulation results show that the nonlinear feedback control improves heave and pitching when the model is perturbed, greatly reduces the control energy, and is robust to model disturbance. The solution process of the scheme is simple, and the physical significance of the controller and the controlled object of the whole system is clear. The order of the controller design is low, and the controller design method of the MIMO unstable system is supplemented and perfected.

**收稿日期:** 2022-03-22 **修回日期:** 2022-07-23 **录用日期:** 2022-07-27

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51679024), 大连市重点领域创新团队支持计划(2020RT08), 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132021139)

**作者简介:** 曹 添(1997-), 硕士生, 主要从事船舶运动控制方面的研究.

**通信作者:** 张显库, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 0411-84729572; E-mail: zhangxk@dlmu.edu.com.

**Key words:** multiple input multiple output (MIMO) unstable system; root locus shaping; nonlinear feedback; robust controller; reduction of pitch

船舶运动控制是海洋工程的热点研究领域,是实现船舶自动导航的核心。船舶在海上航行时由于受到风浪流等环境因素、螺旋桨舵等船舶自身的各种推动和控制作用会产生复杂的运动。船舶的船体结构很复杂,与流体之间的作用也很复杂。并且,船舶在海上航行受到海浪等扰动的作用时,会产生航向与航迹的偏移以及船舶的摇摆。船舶的摇摆中,纵摇和横摇的影响尤为严重,而船舶纵摇控制与横摇控制是船舶运动控制的重点组成部分。

在船舶运动控制中,研究艏摇航向保持和航迹保持的最多<sup>[1-3]</sup>,其次是减横摇<sup>[4]</sup>,而研究纵摇的相对较少<sup>[5-6]</sup>。“育鲲”轮是大连海事大学的实习船,学生或研究者上船实习或实验时发现,其纵摇比横摇严重,而一般情况下,船舶都是横摇较为严重。大的纵摇会增加船舶航行的阻力,造成船舶的失速,且主机功率得不到充分的利用,甚至严重冲击船首的船体结构,造成结构损坏与船体颠簸。为了提高在风浪中的航行性能,有必要改善船舶的减纵摇性能,故从机理上研究减纵摇对于实际应用具有重大意义。

不稳定系统的控制问题在工业发展中占据重要位置,而不稳定系统控制器的设计至关重要。目前针对不稳定系统的控制研究,主要研究内容有不稳定系统的镇定、鲁棒控制器设计以及系统模型不稳定过程的控制实例仿真<sup>[7]</sup>。主要思路是把不稳定的控制过程转换为稳定的控制过程。其中文献[8]中采用经典的内模控制法,能够将不稳定的过程转换为稳定的控制过程;文献[9]中也针对单输入单输出(SISO)不稳定系统的鲁棒控制器设计给出了系列研究成果。此外,船舶航向保持也是一个典型的 SISO 问题,在文献[10]中提出了一种基于非线性正弦函数修饰的闭环增益成形算法的鲁棒积分反推控制方法,仿真结果表明控制器具有合理的操舵频率和良好的节能效果。文献[11]中基于二阶闭环增益成形算法设计出具有强鲁棒性的线性控制器,并使用双极性 S 函数对线性控制律进行修饰,进一步增强了系统抗高频干扰能力和节能效果。但是对于多输入多输出(MIMO)的不稳定系统,前述控制方法的控制效果并不好。文献[12]中以水翼艇的纵向运动数学为研究对象,对 MIMO 鲁棒控制器进行改善,提高了鲁棒性和节能效果,但其研究传递函数数学模型具有稳定的零极点,因此其控制器设计方法不适

于具有不稳定极点的数学模型。而“育鲲”轮的纵摇模型属于 MIMO 不稳定系统,针对其鲁棒控制器的设计尤其是具有一对靠近虚轴不稳定极点的情况,还没有相关研究结果报道。

基于上述分析,提出一种具有良好减纵摇效果的简捷鲁棒控制器,并通过理论分析和多种条件下的仿真实验对其有效性进行验证。首先给出了“育鲲”轮纵摇严重的机理解释,并针对 MIMO 不稳定系统控制器设计难点提出一种新思路,最后使用双极性 S 函数非线性反馈技术代替线性反馈,进一步提升系统的鲁棒性与节能效果。

## 1 船舶模型

船舶航行时受到风浪等环境因素的影响,同时由于螺旋桨舵等船舶自身的各种推动和控制作用,会产生复杂的运动。船舶的船体结构与外形比较复杂,因此在水中运动时船舶和流体之间的作用也比较复杂,且船舶在海上航行时受到风浪等扰动的影响时会产生航向与航迹的偏移,其中船舶的横摇和纵摇更为严重。以牛顿动力学定理为基础,结合船舶运动控制的特点分析讨论船舶纵向运动方程的建立。图 1 所示为“育鲲”轮运动坐标系。

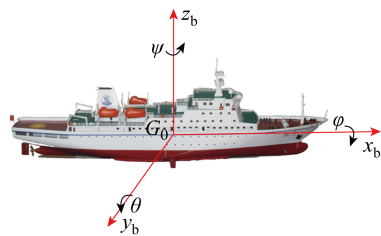


图 1 “育鲲”轮运动坐标系

Fig. 1 Motion coordinate system of “YUKUN” ship

船舶运动坐标系  $G_0 x_b y_b z_b$ , 坐标系原点取在船的重心  $G_0$  上, 坐标轴与船体中心的惯性主轴重合。 $G_0 y_b$  轴在船的中线面内且平行于基线, 指向船首为正;  $G_0 x_b$  轴垂直于中线面, 指向右舷为正;  $G_0 z_b$  轴在船的中线面内且垂直于  $G_0 x_b$  轴, 向上为正。结合坐标系, 船舶在任意时刻的运动可以分解为沿着 3 个坐标轴的直线运动与绕 3 个坐标轴的转动, 因此形成往复运动分别为横摇  $\varphi$ 、纵摇  $\theta$  和艏摇  $\psi$ 。

参考文献[13]对船舶在波浪中的运动特征的描述, 得出船舶纵摇运动的数学模型如下:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{h} + k_{hh_1} \dot{h} + k_{hh} h + k_{h\theta_1} \dot{\theta} + k_{h\theta_0} \theta &= \\ F_h(t) + F(t) \\ \ddot{\theta} + k_{\theta\theta_1} \dot{\theta} + k_{\theta\theta_0} \theta + k_{\theta h_1} \dot{h} + k_{\theta h_0} h &= \\ M_\theta(i) + M(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $h$ 为船舶的升沉位移； $\theta$ 为纵摇角度； $k_{hh}$ 、 $k_{hh_1}$ 、 $k_{h\theta_1}$ 、 $k_{h\theta_0}$ 、 $k_{\theta\theta_1}$ 、 $k_{\theta\theta_0}$ 、 $k_{\theta h_1}$ 、 $k_{\theta h_0}$ 为流体动力系数； $F_h(t)$ 为深沉运动的波浪干扰力， $t$ 为时间； $M_\theta(i)$ 为纵摇运动的波浪干扰力矩；控制向量  $U = [F \ M]^T$ ，分别为控制船舶升沉和纵摇外加的力和力矩。为了更直观地分析 MIMO 不稳定系统成形传递函数的设计，将波浪干扰力与波浪干扰力矩等效为一种简单的线性模型，即白噪声干扰。

- 为简化数学模型设计，做出如下基本假定：
- (1) 假定船体是刚体，忽略它的弹性变性。
  - (2) 对于船舶减纵摇控制系统，忽略纵荡、横荡、首摇和横摇等船舶运动，只考虑纵摇与垂荡。

如果输出  $h$  和  $\theta$ ，则传递函数型数学模型  $G$  为

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{G_1} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

基于文献[13]以及表 1 中的“育鲲”轮基本参数得到式(2)中的参数：

$$G_1 = s^4 + 0.593\,6\,s^3 + 1.581\,9\,s^2 + 0.747\,1\,s + 0.672\,3 = (s - 0.087\,2 + 1.050\,1i) \times (s - 0.087\,2 - 1.050\,1i)(s + 0.384\,0 + 0.676\,8i)(s + 0.384\,0 - 0.676\,8i)$$

$$a_{11} = s^2 + 0.264\,9\,s + 0.533\,9 = (s + 0.132\,5 + 0.718\,6i)(s + 0.132\,5 - 0.718\,6i)$$

$$a_{12} = -11.764\,s - 12.689 = -11.764(s + 1.079)$$

$$a_{21} = 0.011\,s + 0.018 = 0.011(s + 1.636)$$

$$a_{22} = s^2 + 0.328\,6\,s + 0.831\,4 = (s + 0.164\,3 + 0.896\,9i)(s + 0.164\,3 - 0.896\,9i)$$

其中： $s$ 为拉普拉斯算子； $i$ 为虚数单位。

表 1 “育鲲”轮参数

Tab. 1 Parameters of “YUKUN” ship

| 参数                    | 满载取值  | 参数                       | 满载取值    |
|-----------------------|-------|--------------------------|---------|
| 两柱间长 $L/\text{m}$     | 105   | 航速 $v/\text{kn}$         | 16.7    |
| 船宽 $B/\text{m}$       | 18    | 排水体积 $\nabla/\text{m}^3$ | 5 735.5 |
| 重心距船舶距离 $x_c$         | -0.51 | 船舶吃水 $d_M/\text{m}$      | 5.2     |
| 舵叶面积 $A_R/\text{m}^2$ | 11.46 | 方形系数 $C_b$               | 0.559 5 |

2 研究方法

2.1 “育鲲”轮纵摇严重的机理分析

分析“育鲲”轮的纵摇数学模型的各项参数， $G_1$ 中有一对虚根在右半平面，不稳定，且非常靠近虚轴。并且  $a_{11}$ 的零点也非常靠近虚轴，系统模型很容易发散。船舶的纵向运动模型是 MIMO 的多变量系统，尤其输入是由不规则波浪产生的力与力矩引起的纵摇，情况较为复杂。船舶纵摇模型的传递函数根轨迹如图 2 所示。

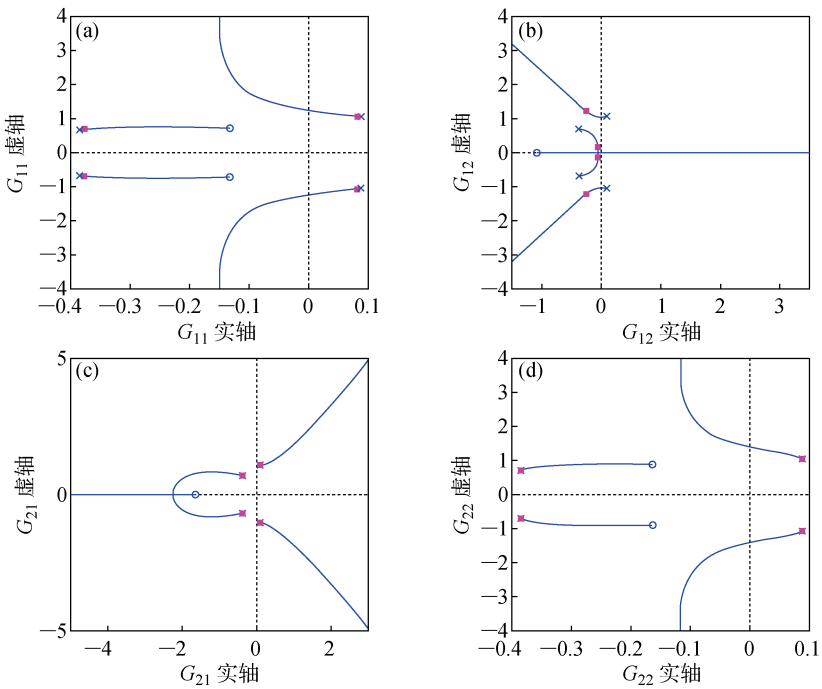


图 2 系统开环传递函数的根轨迹

Fig. 2 Root trajectories of open-loop transfer functions of the system

由上图可以分析得出  $G_{12}$ 、 $G_{21}$ 、 $G_{22}$  的根都在右半平面,左半平面的极点也非常靠近虚轴,且  $G_{12}$  和  $G_{21}$  的根轨迹都是发散的,不稳定.由此可知,“育鲲”轮的纵向运动数学模型极易不稳定,这也是纵摇严重的机理.

2.2 不稳定系统的根轨迹成形原理

已知根轨迹理论是在复平面上由开环零极点的分布状况来研究闭环特征根的轨迹随开环增益的变化而变化的理论,不同开环增益决定了在根轨迹上有不同位置的闭环极点及相应的系统动态性能.控制系统的稳定性完全由其特征方程的根决定,而特征方程的根又与系统参数紧密相关,可见根轨迹成形原理就是基于变增益的概念而来.

根据上述原理,取被控对象  $G(s)$  根轨迹成形的权函数为

$$L(s) = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ 0 & L_{22} \end{bmatrix} \tag{3}$$

且设计权函数系数矩阵为  $\lambda$ ,取  $a=50$ .

$$\lambda = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

2.3 设计权函数参数并验证其稳定性

根据权函数成形原则,取  $L_{11}(s)$  与  $L_{22}(s)$  为

$$L_{11}(s) = \frac{s+10}{0.5s+12} \tag{5}$$

$$L_{22}(s) = \frac{50(s+2)(s+0.5)}{0.5s+12} \tag{6}$$

$L_{11}$  与  $L_{22}$  包含两个零点和一个极点,且再乘以权函数系数矩阵得到的广义被控对象  $P$  为

$$P(s) = L(s)G(s)\lambda = \begin{bmatrix} L_{11}G_{11} & L_{11}G_{12} \\ L_{22}G_{21} & L_{22}G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aL_{11}G_{11} & L_{11}G_{12} \\ aL_{22}G_{21} & L_{22}G_{22} \end{bmatrix} \tag{7}$$

将根轨迹增益变小,乘以系数 0.05,成形后得出根轨迹如图 3 所示.图中  $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 、 $P_{21}$ 、 $P_{22}$  为根轨迹图.观察分析根轨迹图,可得出成形之后的所有根

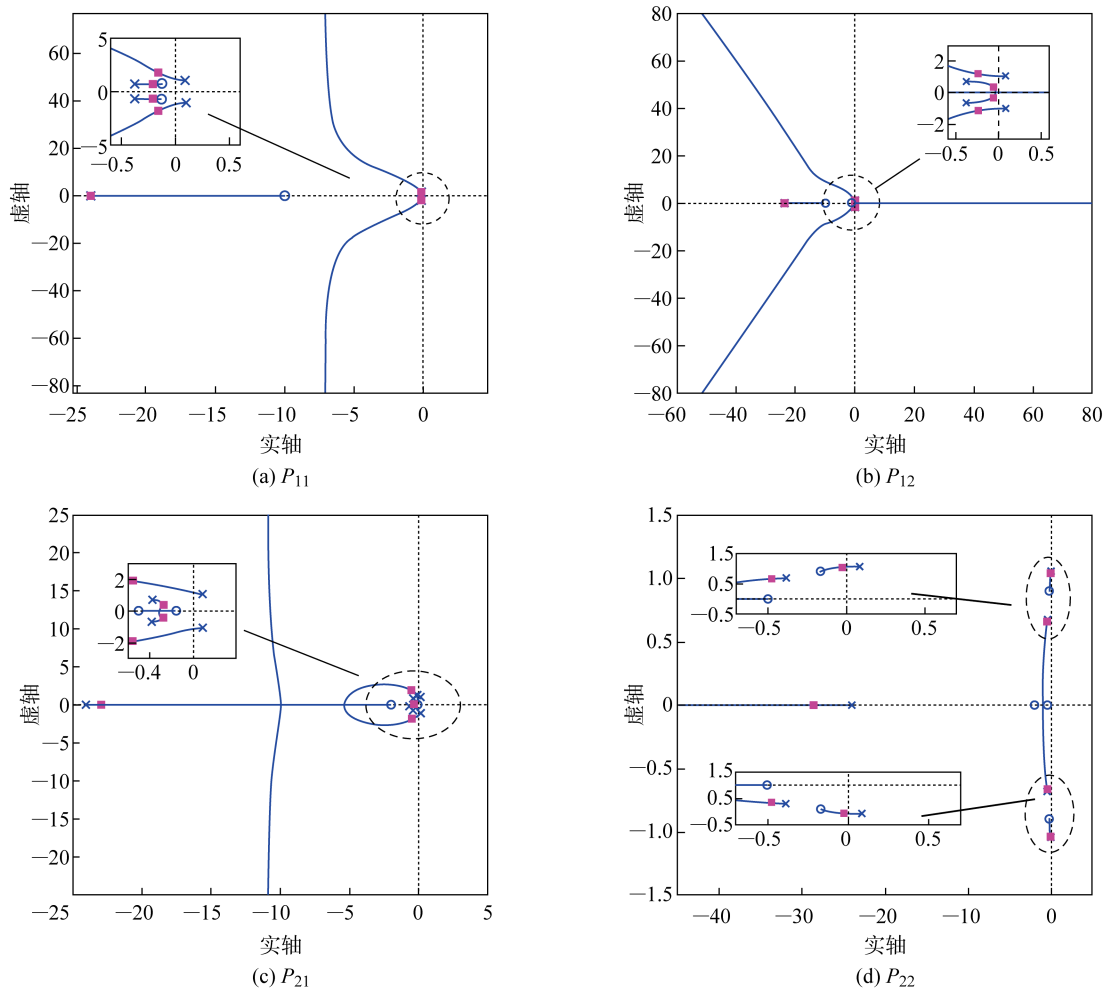


图 3 成形后的广义被控对象根轨迹图

Fig. 3 Root locus diagram of generalized controlled plant after forming

都被拉回到左半平面,可知这个系统整体就是稳定的.

## 2.4 MIMO 不稳定系统的鲁棒控制器设计

船舶减纵摇控制图如图 4 所示.图中: $r$  为白噪声干扰; $u$  为控制器输出信号; $G'$  为不稳定系统成形后的稳态输出值.

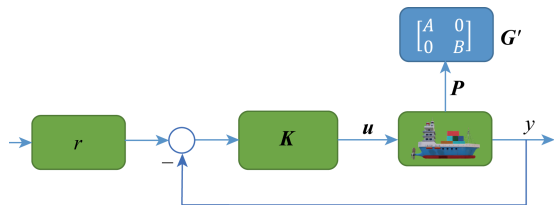


图 4 简明鲁棒控制器设计图

Fig. 4 Design diagram of a concise robust controller

基于船舶在航行中受波浪的作用而产生纵摇和升沉运动,使用白噪声模拟波浪干扰输入,控制器  $K$  的原理为运用闭环增益成形算法设计控制器的思路,以简单的积分环节与不稳定系统成形后的稳态输出值  $G'$  构成的闭环传递函数,从而避免了高阶控制器鲁棒性差的问题.其中积分环节本身就可以消除持续恒定干扰和慢时变干扰对系统性能的影响,而且大大减小控制输出切换的频率和幅值,减少对成形后的广义被控对象  $P$  的影响,并且能有效减少波浪对船舶纵摇角和沉深位移的影响.

对于一个 MIMO 系统,在设计控制器  $K$  时,令其非对角线元素为 0,则  $K$  阵的形式如下:

$$K = \begin{bmatrix} \frac{C}{T_{11}s} & 0 \\ 0 & \frac{D}{T_{22}s} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C = \frac{1}{A}$$

$$D = \frac{1}{B}$$

设  $A, B$  为成形后广义被控对象单位阶跃信号激励后的稳定输出值,进一步推导得出其传递函数为

$$\frac{y}{r} = \frac{KP}{I + KP} = \frac{\begin{bmatrix} \frac{AC}{T_{11}s} & 0 \\ 0 & \frac{BD}{T_{22}s} \end{bmatrix}}{I + \begin{bmatrix} \frac{AC}{T_{11}s} & 0 \\ 0 & \frac{BD}{T_{22}s} \end{bmatrix}} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{AC}{T_{11}s} & 0 \\ 0 & \frac{BD}{T_{22}s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{T_{11}s + AC}{T_{11}s} & 0 \\ 0 & \frac{T_{22}s + BD}{T_{22}s} \end{bmatrix}^{-1} \quad (9)$$

最终化简得到:

$$\frac{y}{r} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{11}s + 1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{22}s + 1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)为一阶闭环增益成形算法的情况<sup>[14]</sup>,属于一种简单的鲁棒控制算法.

根据上式推导得出  $AC = 1, BD = 1$ ,所以可得出  $K_{11} = \frac{C}{T_{11}s}, K_{22} = \frac{D}{T_{22}s}$ ,  $T_{11}$  和  $T_{22}$  为控制器参数.整个控制系统等价于一个一阶闭环增益成形算法.闭环增益成形算法是利用  $H_{\infty}$  鲁棒控制理论的结果使用具有工程意义的 4 个参数构造出闭环系统传递函数,进而反推出鲁棒控制器的算法<sup>[14]</sup>.

常规的闭环增益成形算法的核心是直接利用构造的成形系统闭环传递函数矩阵的表示式设计控制器,而本文鲁棒控制器的设计思路是基于—阶闭环增益成形算法原理进行简化设计,进而得到阶次较低的控制器.针对—阶鲁棒控制器的稳定性,文献[11]与文献[15]中已经给出详细的证明过程,本文不再赘述.

## 2.5 双极性 S 函数非线性反馈改进

如图 5 所示,使用双极性 S 函数对控制器式(8)进行改进,图中非线性函数与一般的方框图绘制所表达的含义不同.其中:设  $e' = r - y$ ,所要表达的数学关系为  $u = Kf(e')$ ,而不是常规的结构表达式  $u = Kf(e')e'$ .取非线性反馈常数  $\gamma = 1.2$ ,并针对 MIMO“育鲲”轮控制系统的两个通道都使用相同的非线性反馈进行仿真研究.引入非线性反馈理论后,并不改变原有控制器的结构,只是用非线性函数代替原来的误差反馈到控制器的输入端,具有明显的节能优点.对于系统的稳定性,稳态值以及动态性能的影响已在文献[16]中证明,并未产生不利影响.

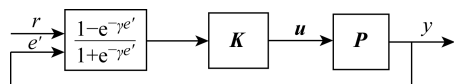


图 5 双极性 S 函数驱动的非线性反馈结构图

Fig. 5 Nonlinear feedback structure driven by bipolar S-function

## 3 仿真实验和结果分析

为了验证所设计成形后广义被控对象的稳定性

与控制器的有效性,在 MATLAB 中用 Simulink 进行仿真实验.

3.1 基于 MIMO 根轨迹成形模型稳定性实验验证

使用“育鲲”轮纵向运动数学模型验证成形后的

稳定性,通过分析纵摇控制向量  $U$ ,可令系统输入为单位阶跃信号  $\delta_F$  与  $\delta_M$ ,可以仿真得出系统的最终输出稳定值,且稳定值  $A = 0.35, B = 0.47$ . 模型稳定实验验证框图如图 6 所示,其实验结果如图 7 所示.

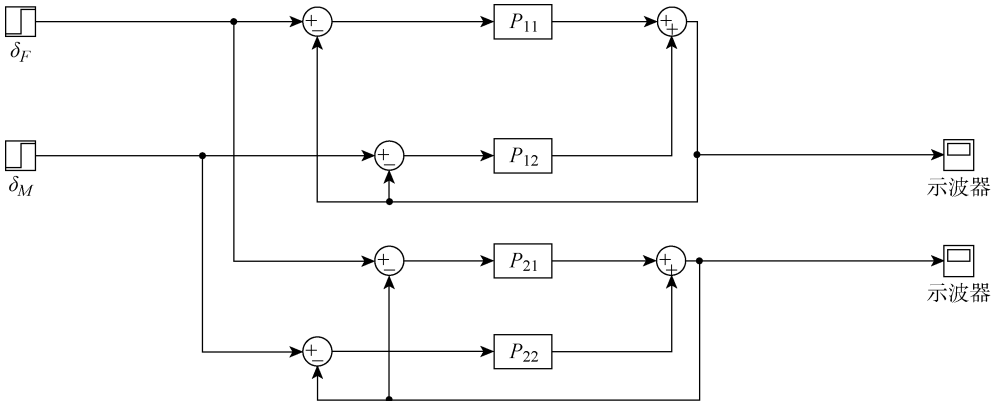


图 6 模型稳定性验证图

Fig. 6 Verification of model stability

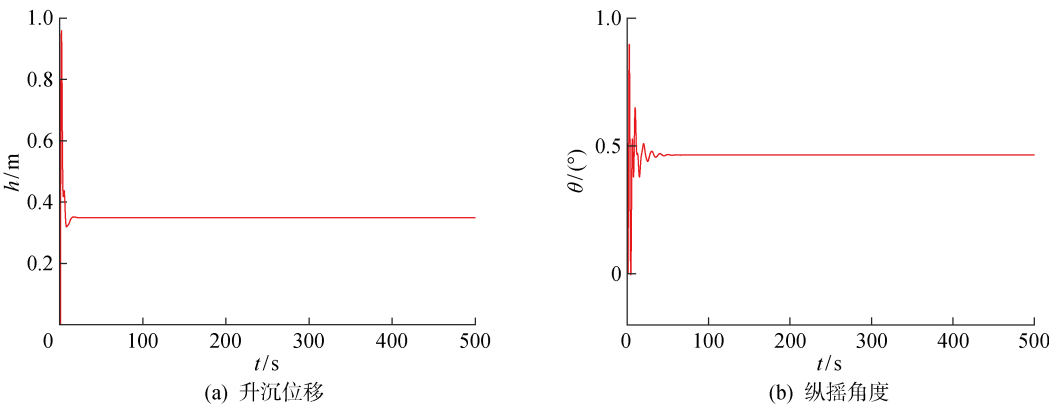


图 7 Simulink 验证

Fig. 7 Simulink validation

经过上图用 Simulink 搭建模块实验验证之后可知,使用根轨迹成形法以及乘以对称矩阵的设计思路是有效的.

3.2 基于船舶减纵摇鲁棒控制器性能验证

基于成形模型稳定输出值  $A$  与  $B$ ,即可推出控制器设计参数  $C = 1/0.35, D = 1/0.47$ ,再取控制器参数  $T_{11} = T_{22} = 10$ ,保证闭环系统将海浪频谱阻挡在带宽范围之外.而对于海浪干扰,将其等效为一种简单的线性模型,即用白噪声加在系统输入上,仿真时间设置为 200 s.实验控制效果如图 8 和 9 所示.

为了定量比较控制效果,定义总升沉位移误差  $e_{TDDE}$  与总纵摇角度误差  $e_{TPAE}$  两个指标进行分析.定量分析结果如表 2 所示.

$$\left. \begin{aligned} e_{TDDE} &= \frac{1}{t_{\infty} - t_0} \int_{t_0}^{t_{\infty}} |h(t)| dt \\ e_{TPAE} &= \frac{1}{t_{\infty} - t_0} \int_{t_0}^{t_{\infty}} |\theta(t)| dt \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中:  $h(t)$  为  $t$  时刻所对应的升沉位移;  $\theta(t)$  为  $t$  时刻所对应的纵摇角度.

| 表 2 闭环性能比较                                   |                            |                     |            |            |
|--|----------------------------|---------------------|------------|------------|
| Tab. 2 Performance comparison of closed-loop |                            |                     |            |            |
| 控制方法   | $\theta_{\max}/(^{\circ})$ | $h_{\max}/\text{m}$ | $e_{TDDE}$ | $e_{TPAE}$ |
| 被控之前   | 5.21                       | 3.94                | 11.72      | 15.48      |
| 加入鲁棒控制器                                      | 2.43                       | 0.33                | 1.44       | 9.73       |
| 非线性反馈改进鲁棒控制器                                 | 1.09                       | 0.16                | 0.78       | 4.35       |



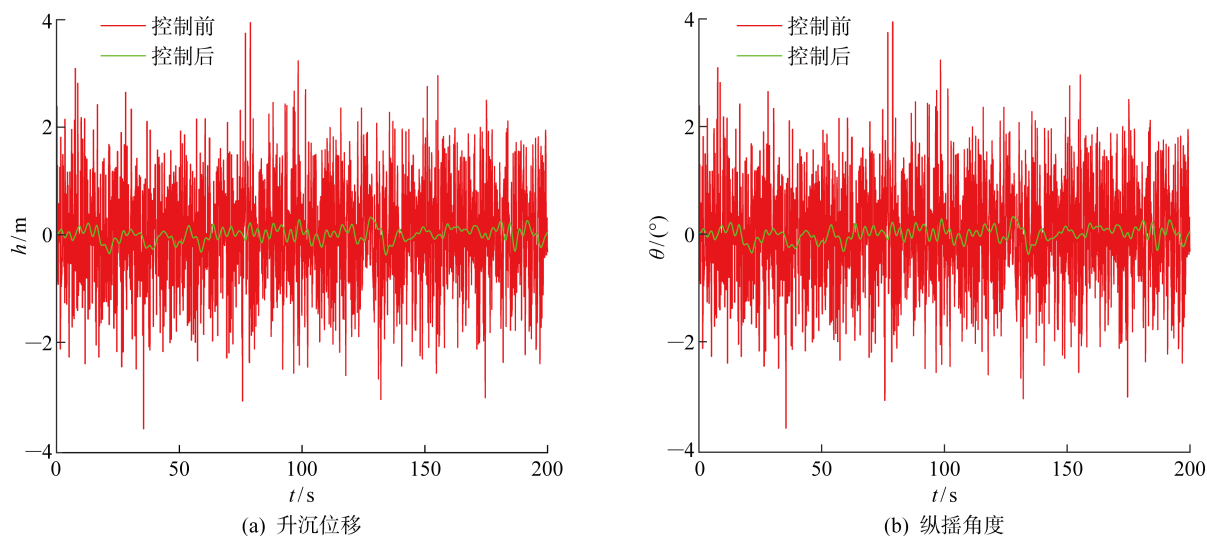


图 8 未加入非线性反馈函数比较控制效果图

Fig. 8 Comparison control effect without adding nonlinear feedback function

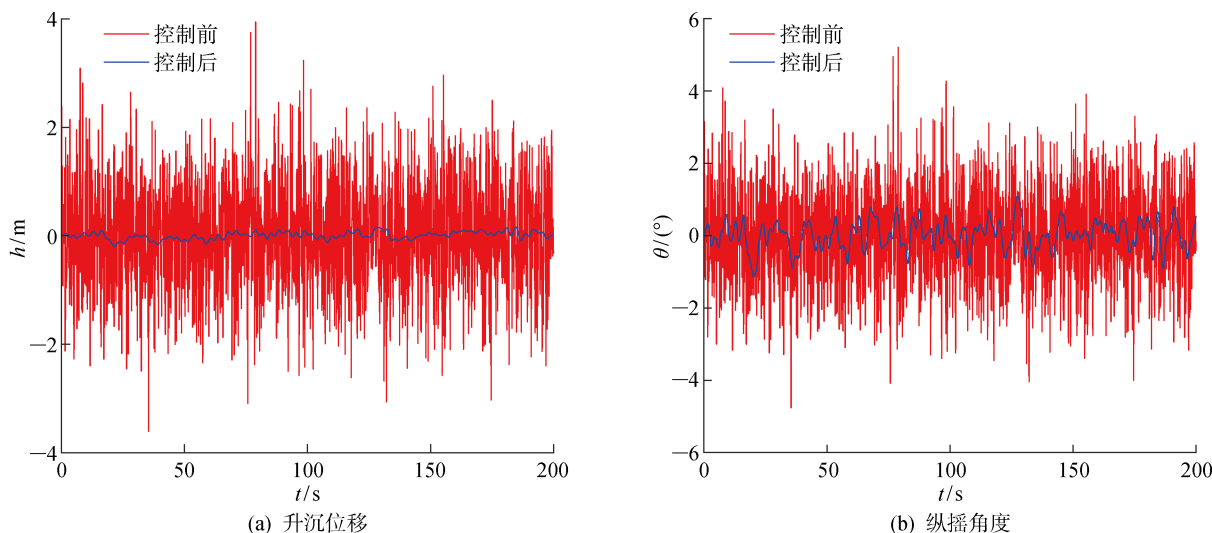


图 9 加入非线性反馈函数比较控制效果图

Fig. 9 Comparison control effect of adding nonlinear feedback function

为了进一步验证控制器的鲁棒性,给模型加入摄动,相当于在原模型上加入一个数值为 0.15 的纯滞后环节  $e^{-0.15s}$ ,可得摄动模型  $\mathbf{P}'(s)$ . 图 10 给出了模型产生摄动时的仿真结果.

$$\mathbf{P}'(s) = \mathbf{P}(s)e^{-0.15s} \quad (12)$$

通过上述实验比较可知,对广义模型加入鲁棒控制器之后很明显地改进了船舶的升沉和纵摇效果,升沉位移最大值降为被控前最大值的 8.0%,纵摇角最大值降为被控前最大值的 46.6%,且综合对比  $e_{TDDE}$  与  $e_{TPAE}$ ,分别改进了 87.71% 和 37.14%. 对控制器进行非线性反馈改进之后,升沉位移的最大值降为被控之前的 4.0%,纵摇角最大值降为被控前的 19.1%,对比  $e_{TDDE}$  与  $e_{TPAE}$ ,分别改进 93.4% 与

71.9%.

模型摄动时,鲁棒控制的升沉位移最大值为 0.23 m,纵摇角的最大值为  $1.19^\circ$ ,且  $e_{TDDE}$  与  $e_{TPAE}$  分别为 1.02 与 4.02. 从表 2 中可以看出其控制效果基本与广义模型基本相同,说明控制器具有一定的鲁棒性. 仿真结果表明,所设计的鲁棒控制器简捷有效,控制效果更优,而非线性反馈改进的鲁棒控制器具有明显的节能效果,补充完善了 MIMO 不稳定过程的控制器的设计方法.

进一步从控制器的角度来分析,控制器  $\mathbf{K}$  属于  $2 \times 2$  对角矩阵形式的一阶惯性系统,在海上航行时高频的波浪干扰是引起船舶升沉和纵摇变化的主要原因,而一阶鲁棒控制器的引入有效地抑制了高频

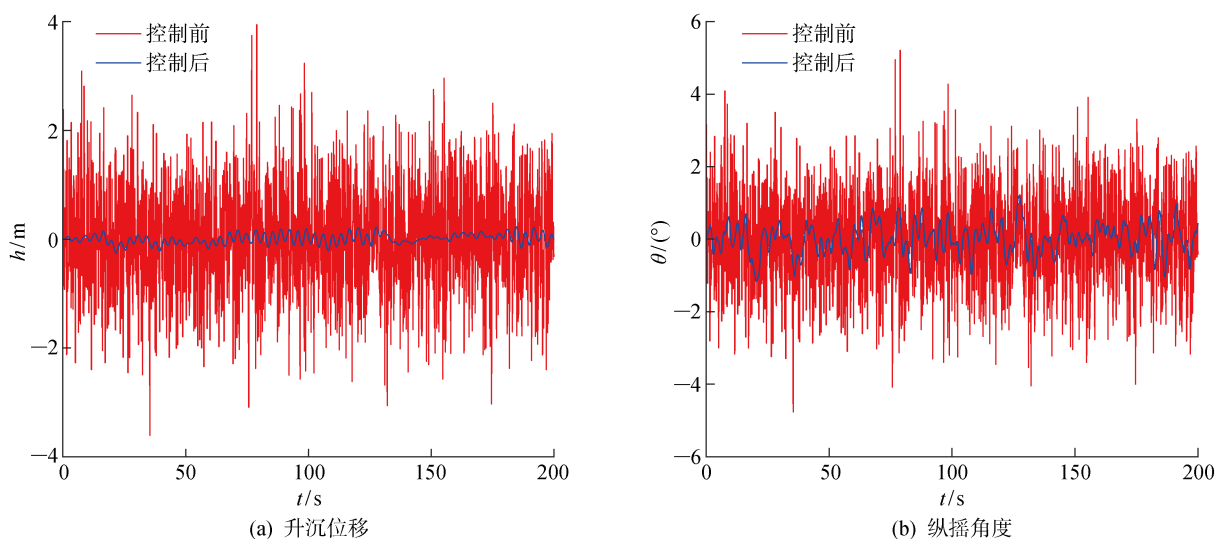


图10 模型产生扰动时的仿真结果

Fig. 10 Simulation results when the model generates perturbations

干扰,使系统有很强的鲁棒性.

## 4 结语

基于 MIMO 不稳定系统提出了一种船舶减纵摇的新型节能控制方案. 该方案首先以大连海事大学教学实习船“育鲲”轮的纵摇数学模型为研究对象,对“育鲲”轮纵摇严重的机理进行了分析. 随后对系统模型使用根轨迹成形法,以及引用数学工具加权矩阵  $L(s)$  使不稳定系统的模型趋于稳定. 控制器的设计思路是闭环增益成形算法的一种衍生,并且使用双极性 S 函数进行非线性改进. 通过 Simulink 工具箱验证了在一般海况下控制器对高频波浪的抑制作用,且效果良好. 之后对成形后广义被控对象模型加入非线性反馈改进的控制器进行仿真实验,并与原有控制器对广义被控对象的控制效果对比. 实验结果表明,改进后控制器的模型最大升沉位移降为被控之前的 4.0%,最大纵摇角降为被控之前的 19.1%,且  $e_{TDDE}$  与  $e_{TPAE}$  分别改进了 93.4% 与 71.9%. 随后给出了模型产生扰动时的仿真结果,基本与广义模型相同,表明本文所设计控制器在一般海况下具有较好的减纵摇效果,并且非线性反馈改进的控制器具有明显的节能效果. 最后对本文控制器具有良好的控制效果的原因给出了理论分析. 本文所设计研究方案简单有效且节能,弥补了 MIMO 不稳定系统控制器设计的空白. 在未来的研究中,将结合本文的控制算法设置特定的纵倾角控制装置,并将该装置运用到船舶自身的动力控制系统当中,产生抵抗纵摇的阻尼力矩以及恢复力矩以达到减缓纵向运动的目的.

## 参考文献:

- [1] 张显库,韩旭. 大型油轮摇混沌现象的仿真与滑模控制[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(1): 40-47.  
ZHANG Xianku, HAN Xu. Modeling and sliding mode control for chaotic yawing phenomenon of large oil tanker[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2021, 55(1), 40-47.
- [2] ISLAM M M, SIFFAT S A, AHMAD I. Robust integral backstepping and terminal synergetic control of course keeping for ships [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 221: 108532.
- [3] DO K D. Global robust adaptive path-tracking control of underactuated ships under stochastic disturbances [J]. *Ocean Engineering*, 2016, 111: 267-278.
- [4] 涂建军,何汉林. 反步鲁棒镇定及其在舵减横摇中的应用[J]. 华中科技大学学报, 2012, 40(7): 19-23.  
TU Jianjun, HE Hanlin. Back-stepping robust stabilization and its application in rudder roll stabilization [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2012, 40(7): 19-23.
- [5] 胡波,沈继红,李大龙,等. 船舶纵摇-升沉运动系统的解耦[J]. 华中科技大学学报, 2011, 39(11): 19-23.  
HU Bo, SHEN Jihong, LI Dalong, *et al.* The decoupling of ship pitching and heaving motion [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2011, 39(11): 19-23.
- [6] 孙一方,宗智,姜宜辰. 船舶在波浪上纵向运动与控制研究综述[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(1): 1-12.  
SUN Yifang, ZONG Zhi, JIANG Yichen. Review of longitudinal motion and control of ships on waves[J].



- Chinese Journal of Ship Research**, 2020, 15(1): 1-12.
- [7] VAZQUEZ-GUERRA R J, MARQUEZ-RUBIO J F, NOVELLA-RODRÍGUEZ D F. Control of unstable delayed recycling systems[J]. **Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering**, 2019, 14(2): e2290.
- [8] 蒋起峰. 结构不稳定系统的智能控制方法及其应用[J]. **农业装备与车辆工程**, 2021, 59(1): 72-75.  
JIANG Qifeng. Intelligent control method of structurally unstable system and its application[J]. **Agricultural Equipment & Vehicle Engineering**, 2021, 59(1): 72-75.
- [9] CAO J, ZHANG X, YANG G. Robust control of pressure for LNG carrier cargo handling system via mirror-mapping approach [J]. **Complexity**, 2018, 2018: 1-11.
- [10] ZHANG X, HAN X, GUAN W. Improvement of integrator backstepping control for ships with concise robust control and nonlinear decoration[J]. **Ocean Engineering**, 2019, 189: 106349.
- [11] MIN B, ZHANG X, WANG Q. Energy saving of course keeping for ships using CGSA and nonlinear decoration [J]. **IEEE Access**, 2020, 8: 141622-141631.
- [12] 张显库. 基于非线性反馈的水翼艇纵向运动鲁棒控制[J]. **中国航海**, 2016, 39(1): 60-63.  
ZHANG Xianku. Robust control of longitudinal motion for hydrofoils based on nonlinear feedback[J]. **Navigation of China**, 2016, 39(1): 60-63.
- [13] WANG H D, QIAN P, LIANG X F. Vertical plane motion control of an S-SWATH vehicle with flapping foil stabilisers sailing in waves[J]. **Ocean Engineering**, 2016, 121: 184-195.
- [14] 张显库. 船舶运动简捷鲁棒控制[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
ZHANG Xianku. Simple and robust control of ship motion[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [15] ZHANG X K, ZHANG Q, REN H X. Linear reduction of backstepping algorithm based on nonlinear decoration for ship course-keeping control system[J]. **Ocean Engineering**, 2018, 147: 1-8.
- [16] 张显库, 杨光平, 张强. 一种双极性 S 函数修饰的非线性船舶航向保持算法[J]. **大连海事大学学报**, 2016, 42(3): 15-19.  
ZHANG Xianku, YANG Guangping, ZHANG Qiang. A kind of bipolar sigmoid function decorated nonlinear ship course keeping algorithm[J]. **Journal of Dalian Maritime University**, 2016, 42(3): 15-19.

(本文编辑: 王一凡)