

文章编号:1000-4653(2025)04-0152-08

恶劣海况下基于双重非线性反馈的超大型船舶减纵摇控制

宋纯羽, 乔琦, 隋江华

(大连海洋大学 航海与船舶工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:为研究恶劣海况下超大型船舶减纵摇性能,以“KVLCC2”油轮为研究对象,利用加权矩阵使其传递函数数学模型稳定并使用根轨迹成型法验证其模型稳定性。而后利用简化后的一阶闭环增益成型算法设计鲁棒控制器,同时提出双重非线性反馈控制算法并将其加入控制系统中,进一步提高减纵摇性能。为验证双重非线性反馈控制系统减纵摇性能,在系统中加入7级和8级风浪模型及扰动环节仿真试验。结果表明,当时滞常数为0.15时,双重非线性反馈控制系统在恶劣海况下亦能提高船舶的减纵摇性能。所提双重非线性反馈控制系统可为超大型船舶在变化海况下平稳、高效航行提供技术支撑。

关键词:恶劣海况;超大型船舶;双重非线性反馈;闭环增益成型算法;减纵摇控制

中图分类号:U664.82 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.017

Anti-pitch control of very large ships based on dual nonlinear feedback under severe sea conditions

SONG Chunyu, QIAO Qi, SUI Jianghua

(Navigation and Engineering College, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: To study the pitching stabilization performance of super-large ships under severe sea conditions, this paper takes the tanker "KVLCC2" as the research object. A weighting matrix is utilized to stabilize its transfer function model in Mathematica, and the stability of the model is verified using the root trajectory shaping method. Subsequently, a simplified first-order closed-loop gain-shaping algorithm is applied to design the robust controller. In addition, a dual nonlinear feedback control algorithm is proposed to be incorporated into the control system to further enhance its pitching stabilization performance. To validate the effectiveness of the dual nonlinear feedback control system for pitching stabilization, wind scale of 7 and 8 wind and wave models along with perturbation links are introduced into the system for simulation experiments. The experimental results demonstrate that even with a time lag constant of 0.15, the dual nonlinear feedback control system effectively improves the ship's pitching stabilization performance under rough sea conditions. The proposed dual nonlinear feedback control system can provide technical support for the smooth and efficient navigation of super-large ships in varying sea conditions.

Key words: rough sea conditions; super large vessels; dual nonlinear feedback; closed-loop gain shaping algorithm; pitching stabilization control

收稿日期:2024-11-21

基金项目:辽宁省教育厅2023年度高校基本科研项目(JYTQN2023131);辽宁省科技计划项目(600024003)资助

第一作者:宋纯羽(1996—),男,讲师,博士,研究方向为船舶控制和船舶辨识建模。E-mail:scy_dllou@163.com

通信作者:隋江华(1976—),女,教授,博士,研究方向为船舶运动控制。E-mail:sjh@dlo.u.edu.cn

引用格式:宋纯羽,乔琦,隋江华.恶劣海况下基于双重非线性反馈的超大型船舶减纵摇控制[J].中国航海,2025,48(4):152-159.

SONG C Y, QIAO Q, SUI J H. Anti-pitch control of very large ships based on dual nonlinear feedback under severe sea conditions[J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 152-159. (in Chinese)

全球贸易和经济的快速发展推动着船舶运输行业不断向前发展。目前海上运输行业所使用的船舶种类繁多,主要有集装箱船、矿砂船、油轮和液化天然气船等。当船舶在海上作业时,容易受到风、浪和流等外界环境的扰动,从而会产生纵摇和垂荡运动^[1]。强烈的纵摇运动会降低船员的舒适度,导致船体受到不均匀的力;同时会破坏船体的稳定性,对船舶的安全航行构成潜在威胁^[2]。因此研究船舶减纵摇性能具有实际意义。

针对船舶在海上航行时的纵摇运动,原新等^[3]利用 T 型翼和压浪板来减小纵摇和垂荡对船体运动性能的影响,通过仿真验证该装置的减纵摇效果。该装置具有安装相对简单,且容易维护和修理的优点,但需要较大的功率才能实现减纵摇功能。

近些年学者们提出的模糊控制^[4]、自适应控制^[5]和非线性反馈^[6-7]等控制算法弥补了上述减摇装置的不足,提高了船舶减纵摇控制系统的效率。张军等^[8]提出一种计算量少的解析预测控制方法,通过对研究对象的模型进行预测,利用数值积分法得到连续预测控制律,减小模型纵摇和升沉运动误差,进而达到预期的减纵摇效果。同样,LI 等^[9]针对高速船体设计出一种新的卡尔曼滤波器用来预测模型的升沉速度和纵摇角速度,同时又提出一种新型代数模型预测控制算法降低船舶的纵摇角速度和升沉速度,从仿真结果来看其减纵摇效果显著。但该算法对模型准确性要求较高,故而增加了控制器的设计难度。CAO 等^[10]以大连海事大学“育鲲”轮作为研究对象,提出非线性修饰控制算法用来提高船舶减纵摇性能并减少控制器的能量耗损,从其仿真结果图可以看出控制系统减纵摇性能显著提高。胡聪聪等^[11]提出一种自控式截流板减纵摇系统,以过渡型艇为对象开展仿真试验,结果显示控制系统在 3 级和 5 级海况下减纵摇效果良好。

上述研究多采用高速船体作为研究对象,且仅讨论 3 级和 5 级海况下的减纵摇控制,对于恶劣海况下低速船及大型船舶的减纵摇效果则存在一定局限性。基于以上分析,以超大型“KVLCC2”油轮为研究对象,针对其大惯性、长时滞等特性,突破以往单一非线性反馈理念,提出双重非线性反馈控制算法,进一步提高船舶减纵摇性能。将改进后的控制系统置于 7 级和 8 级海况下开展试验,结果显示改进后的控制系统在恶劣海况下可以有效降低船舶模型的升沉位移、纵摇角度以及纵摇频率。本文所提

双重非线性反馈控制系统可进一步应用到实际工程中,为船舶在恶劣海况下航行提供安全保障。未来可继续研究超恶劣海况下超大型船舶的减纵摇问题。

1 船舶数学模型

本文结合牛顿力学定理和船舶在海上航行时运动特性建立超大型“KVLCC2”油轮纵摇运动数学模型。以船舶重心 G 为坐标原点; X 轴位于船舶的中线面内且平行于其基线,正方向指向船首; Y 轴垂直于 X 轴,指向右舷为正; Z 轴与水平面相互垂直,向上为正方向^[12],如图 1 所示。

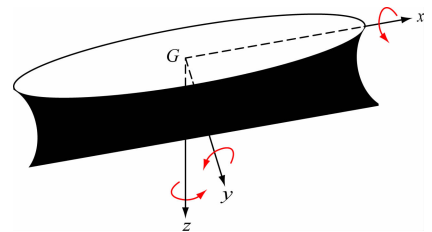


图 1 船舶运动坐标系

Fig. 1 Ship motion coordinate system

建立船舶升沉-纵摇运动方程^[13]:

$$\begin{cases} (M + a_{zz})\ddot{z}_G + b_{zz}\dot{z}_G + c_{zz}z_G + a_{z\theta}\ddot{\theta} + b_{z\theta}\dot{\theta} + c_{z\theta}\theta = \\ F_{zc}\cos\omega_e t + F_{zs}\sin\omega_e t \\ (I_{\theta\theta} + a_{\theta\theta})\ddot{\theta} + b_{\theta\theta}\dot{\theta} + c_{\theta\theta}\theta + a_{\theta z}\ddot{z}_G + b_{\theta z}\dot{z}_G + c_{\theta z}z_G = \\ M_{\theta c}\cos\omega_e t + M_{\theta s}\sin\omega_e t \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: M 为船体质量; I 为船体质量对 y 轴的惯性矩; a_{ij} 为附加质量或附加质量惯性矩; b_{ij} 为与运动线速度或角速度相联系的阻尼系数; c_{ij} 为复原力或复原力矩系数; \ddot{z}_G 、 \dot{z}_G 、 z_G 分别为垂荡加速度、速度和幅值; $\ddot{\theta}$ 、 $\dot{\theta}$ 、 θ 分别为纵摇角加速度、角速度和角度; F_z 、 M_θ 分别为垂荡力和纵摇力矩; ω_e 为波浪遭遇角。控制向量 $U^T = [F \quad M]$, F 、 M 分别为控制船舶纵摇和升沉运动提供的力和力矩。

设系统的输出为纵摇角度 θ 和升沉位移 h , 则船舶模型的传递函数数学模型 G 为

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

根据文献[14],可得出传递函数数学模型的四个基本参数。

$$\begin{cases}
 G_1 = s^4 - 0.005 1s^3 + 0.851 7s^2 + 0.007 1s + 0.155 4 = \\
 (s - 0.015 5 - 0.767 0i)(s - 0.015 5 + 0.767 0i) \\
 (s + 0.013 0 - 0.513 6i)(s + 0.013 0 + 0.513 6i) \\
 a_{11} = 1.606 8 \times 10^{-6} s^2 - 5.077 6 \times 10^{-8} s + 9.446 \times \\
 10^{-7} = 1.606 8 \times 10^{-6} (s - 0.015 8 - 0.766 6i) \\
 (s - 0.015 8 + 0.766 6i) \\
 a_{12} = 2.499 1 \times 10^{-9} s^2 + 1.044 4e - 10s + 1.413 3 \times \\
 10^{-9} = 2.499 1 \times 10^{-9} (s + 0.020 9 + 0.751 7i) \\
 (s + 0.020 9 - 0.751 7i) \\
 a_{21} = 2.064 5 \times 10^{-9} s^2 - 1.894 9 \times 10^{-9} s + 1.329 8 \times \\
 10^{-9} = 2.064 5 \times 10^{-9} (s - 0.458 9 - 0.658 4i) \\
 (s - 0.458 9 + 0.658 4i) \\
 a_{22} = 4.988 7 \times 10^{-10} s^2 + 1.044 4 \times 10^{-11} s + 1.329 8 \times \\
 10^{-10} = 4.988 7 \times 10^{-10} (s + 0.010 5 - 0.516 2i) \\
 (s + 0.010 5 + 0.516 2i)
 \end{cases} \quad (3)$$

式中： G_1 为传递函数的分母， a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} 、 a_{22} 为具有工程意义的四个参数； s 代表拉普拉斯算子； i 代表虚数算子。

超大型油轮“KVLCC2”的参数见表1。

表1 KVLCC2 油轮基本参数

Tab.1 Basic parameters of KVLCC2 tanker

参数	数值
两柱间长 L/m	320.0
船宽 B/m	58.0
重心距中心距离 X_C/m	11.2
舵叶面积 A_δ/m^2	112.26
航速 v/kn	15.8
排水体积 ∇/m^3	312 600.0
船舳吃水 D/m	20.8

2 研究方法

通过分析数学模型中四个基本参数可得分母中有一对虚根，同时可以判断出 a_{11} 和 a_{21} 有部分根在虚轴右半平面，因此系统整体不稳定且容易发散。根据根轨迹成型原理^[15]，取被控对象 $G(s)$ 根轨迹成型的权函数

$$L(s) = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ 0 & L_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

设计权函数系数矩阵

$$\lambda = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & b_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： $a_1 = 100\ 000$ ； $b_1 = 200\ 000$ 。

根据权函数成型原则^[16]可得

$$L_{11}(s) = \frac{3s + 4}{s + 4} \quad (6)$$

$$L_{22}(s) = \frac{50(0.5s + 1)(s + 0.1)}{s + 4} \quad (7)$$

L_{11} 和 L_{22} 中包含了一个极点和两个零点。综上所述可得广义被控对象

$$P(s) = L(s)G(s)\lambda = \begin{bmatrix} L_{11}G_{11} & L_{11}G_{12} \\ L_{22}G_{21} & L_{22}G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 L_{11}G_{11} & b_1 L_{11}G_{12} \\ a_1 L_{22}G_{21} & b_1 L_{22}G_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

经权函数成型后传递函数数学模型的根轨迹如图2所示。通过观察 P_{11} 、 P_{12} 、 P_{21} 、 P_{22} 的根轨迹可以看到所有的零极点都位于虚轴的左半平面，因此改进后的模型整体稳定。

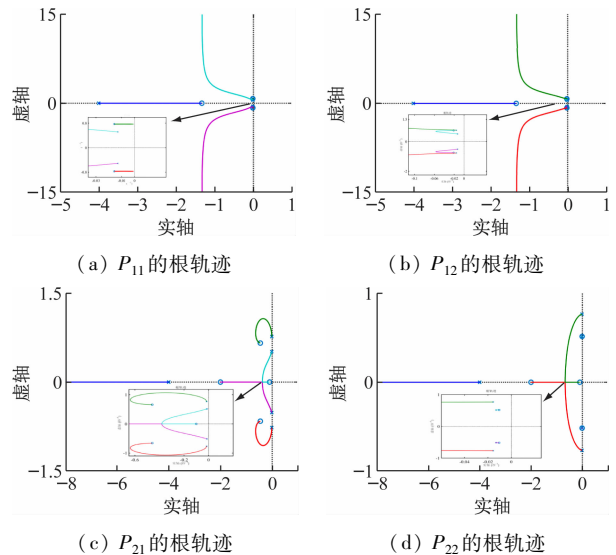


图2 成型后稳定根轨迹

Fig.2 Stable root trajectory diagram after molding

3 鲁棒控制器的设计

当船舶在实际航行时会因风浪干扰产生纵摇和升沉运动，因此在设计控制器时用白噪声来模拟风浪干扰输入 r 。本研究利用简化后的闭环增益成型算法设计鲁棒控制器 K ，通过其积分环节和成型系统的稳态输出值 G' 构成闭环传递函数，进而提高控制器的鲁棒性。简捷鲁棒控制器设计框架见图3。

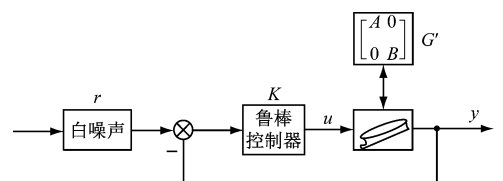


图3 简捷鲁棒控制器设计框架

Fig.3 Simple robust controller design framework

在设计控制器 K 时,设其对角线元素为 0,则

$$K = \begin{bmatrix} \frac{C}{T_{11}s} & 0 \\ 0 & \frac{C}{T_{22}s} \end{bmatrix}, C = \frac{1}{A}, D = \frac{1}{B} \quad (9)$$

式中: A 、 B 分别表示成型模型稳定输出值; C 、 D 分别表示控制器设计参数; T_{11} 、 T_{22} 分别表示控制器参数, $T_{11} = T_{22}$ 。

通过式(9)可推出其传递函数为

$$\frac{y}{r} = \frac{KP}{1+KP} = \begin{bmatrix} \frac{AC}{T_{11}s} & 0 \\ 0 & \frac{BD}{T_{22}s} \end{bmatrix} \left/ \left[1 + \begin{bmatrix} \frac{AC}{T_{11}s} & 0 \\ 0 & \frac{BD}{T_{22}s} \end{bmatrix} \right] \right. = \begin{bmatrix} \frac{AC}{T_{11}s} & 0 \\ 0 & \frac{BD}{T_{22}s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{T_{11}s+AC}{T_{11}s} & 0 \\ 0 & \frac{T_{22}s+BD}{T_{22}s} \end{bmatrix}^{-1} \quad (10)$$

进一步化简可得

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

式(11)为简化后的鲁棒控制算法,通过该算法可得阶次较低的控制器。

4 双重非线性反馈改进

图4为双重非线性反馈系统的设计结构图, r 为白噪声, K 为第三小节设计的简捷鲁棒控制器, P 为船舶模型。通过在控制器 K 前加入双重非线性反馈算法,进一步提高整个控制系统的减纵摇性能。

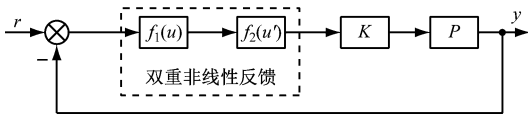


图4 双重非线性反馈系统结构

Fig. 4 Double nonlinear feedback system structure

本文所选用的双重非线性函数分别为:

$$\begin{cases} f_1(u) = \cos(ae) \\ f_2(u') = \arctan(be) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $a=0.5$; $b=0.02$ 。

根据泰勒公式可得

$$\begin{aligned} \cos(ae) &\approx 1 - \frac{(ae)^2}{2} + \frac{(ae)^4}{4!} - \dots + \\ &(-1)^n \frac{2(ae)^{2n}}{2n!} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\arctan(be) \approx (be) - \frac{(be)^3}{3} + \frac{(be)^5}{5} - \dots +$$

$$(-1)^n \frac{(be)^{2n+1}}{2n+1} \quad (14)$$

将式(13)保留到二阶得

$$\cos(a \cdot e) = 1 - \frac{(ae)^2}{2} \quad (15)$$

将式(14)保留到三阶得

$$\arctan(b \cdot e) = be - \frac{(be)^3}{3} \quad (16)$$

将(15)和(16)二式相乘可得

$$\begin{aligned} f(e) &= \cos(ae) \cdot \arctan(be) = \\ &be - \left(\frac{b^3}{3} + \frac{a^2b}{2} \right) e^3 + \frac{a^2b^3}{6} e^5 \end{aligned} \quad (17)$$

误差 e 的大小将会直接影响整个控制系统的输出,因此分别对以下两种情况进行理论分析。

1) 当误差 e 值较小时, $f(e) \approx be = 0.02e$ 。令 $\omega = 0.02 < 1$,根据终值定理来计算稳态误差 e_{ss} 。

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sX(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + N_{KP}} \frac{r}{s} \quad (18)$$

$$N_{KP} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{11}s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{22}s} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{r}{1 + \begin{bmatrix} \frac{\omega}{T_{11}s} & 0 \\ 0 & \frac{\omega}{T_{22}s} \end{bmatrix}} = 0 \quad (20)$$

从式(20)的结果可以看出, e_{ss} 输出值为0。因此当误差较小时,双重非线性反馈控制不会对系统产生额外影响。

2) 当误差 e 值较大时, $f(e) \approx be = 0.02e$ 将不成立。对系统重新进行以下分析。

将式(13)保留到四阶得

$$\cos(ae) = 1 - \frac{(ae)^2}{2} + \frac{(ae)^4}{4!} \quad (21)$$

将式(14)保留至五阶得

$$\arctan(be) = (be) - \frac{(be)^3}{3} + \frac{(be)^5}{5} \quad (22)$$

将式(21)和(22)相乘,可得

$$\begin{aligned} f(e) &= \cos(ae) \cdot \arctan(be) = \\ &be - \left(\frac{a^2b}{2} + \frac{b^3}{3} \right) e^3 + \left(\frac{b^5}{5} + \frac{a^2b^3}{6} + \frac{a^4b}{24} \right) e^5 - \\ &\left(\frac{a^4b^3}{72} + \frac{a^2b^5}{10} \right) e^7 + \frac{a^4b^5}{120} e^9 \end{aligned} \quad (23)$$

系统中非线性环节在 $x(t) = A\sin(\omega t)$ 作用下的输出可近似用一阶谐波分量来表示,进而利用函数

描述法对稳态输出 $y(t)$ 进行谐波分析^[17], 对其进行一阶傅里叶级数展开可得

$$y(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega_0 t) + B_1 \sin(\omega_0 t) \quad (24)$$

式中: A_0 代表直流分量; A_1 、 B_1 代表一阶谐波分量。

$$\begin{cases} A_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) d(\omega_0 t) \\ A_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \cos(\omega_0 t) d(\omega_0 t) \\ B_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \sin(\omega_0 t) d(\omega_0 t) \end{cases} \quad (25)$$

在输入 $e = A \sin(\omega_0 t)$ 的作用下, $f(e)$ 可转换为

$$\begin{aligned} f(t) = & bA \sin(\omega_0 t) - \left(\frac{a^2 b}{2} + \frac{b^3}{3} \right) A^3 \sin^3(\omega_0 t) + \\ & \left(\frac{b^5}{5} + \frac{a^2 b^3}{6} + \frac{a^4 b}{24} \right) A^5 \sin^5(\omega_0 t) - \\ & \left(\frac{a^4 b^3}{72} + \frac{a^2 b^5}{10} \right) A^7 \sin^7(\omega_0 t) + \\ & \frac{a^4 b^5}{120} A^9 \sin^9(\omega_0 t) \end{aligned} \quad (26)$$

非线性系统的描述函数可为

$$N(A) = \frac{B_1 + jA_1}{A} \quad (27)$$

通过式(25)计算得出 $A_0 = 0, A_1 = 0$ 。

$$\begin{aligned} B_1 = & \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[bA \sin(\omega_0 t) - \left(\frac{a^2 b}{2} + \frac{b^3}{3} \right) A^3 \sin^3(\omega_0 t) + \right. \\ & \left. \left(\frac{b^5}{5} + \frac{a^2 b^3}{6} + \frac{a^4 b}{24} \right) A^5 \sin^5(\omega_0 t) - \right. \\ & \left. \left(\frac{a^4 b^3}{72} + \frac{a^2 b^5}{10} \right) A^7 \sin^7(\omega_0 t) + \right. \\ & \left. \frac{a^4 b^5}{120} A^9 \sin^9(\omega_0 t) \right] \cdot \sin(\omega_0 t) d(\omega_0 t) = \\ & \frac{b}{2} A - \frac{3}{8} \left(\frac{a^2 b}{2} + \frac{b^3}{3} \right) A^3 + \\ & \frac{5}{16} \left(\frac{b^5}{5} + \frac{a^2 b^3}{6} + \frac{a^4 b}{24} \right) A^5 - \\ & \frac{35}{128} \left(\frac{a^4 b^3}{72} + \frac{a^2 b^5}{10} \right) A^7 + \frac{21 a^4 b^5}{10 240} A^9 \end{aligned} \quad (28)$$

考虑到正弦函数中 A 值很小, 因此高阶次数均可忽略, 故 $B_1 \approx (b/2)A$, 则

$$N(A) = \frac{B_1}{A} = 0.01 \quad (29)$$

$N(A)$ 为固定值, 故而当误差为较大值时, 双重非线性反馈算法亦能确保整个系统稳定。

5 仿真试验及结果分析

5.1 外界干扰模型建模

海浪是引起船舶产生纵摇和垂荡运动的主要原

因, 因此本文利用白噪声来驱动二阶传递函数来模拟海浪干扰。其原理是将 ITTC 单参数谱线性近似为 $y(s) = h(s) \cdot \omega(s)$, $\omega(s)$ 代表零均值高斯白噪声过程^[18], 功率谱取 1.0。二阶波浪传递函数可表示为

$$h(s) = \frac{2\xi\omega_n\sigma_\omega s}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (30)$$

式中: $\sigma_\omega = \sqrt{0.018 5 T_\omega} h_{1/3}$, 指波浪强度的常数; ξ 为阻尼系数; $\omega_n = 4.85/T_\omega$, 指波浪频率; T_ω 为波浪周期。

根据式(30)分别计算出 7 级和 8 级风况对应的二阶波浪传递函数, 见表 2。再将其分别加在控制系统中, 以此来验证系统在变化海况下的减纵摇性能。

表 2 不同风力等级下的二阶波浪传递函数

Tab. 2 Second-order wave transfer function under different wind levels

风力等级	计算风级/kn	有义波高/m	波浪周期/s	二阶波浪传递数
7	30.5	7.01	8.7	$\frac{1.254 2s}{s^2 + 0.446s + 0.310 8}$
8	37	11.28	10.5	$\frac{2.296 4s}{s^2 + 0.461 9s + 0.213 4}$

5.2 验证模型稳定性

利用 simulink 仿真软件验证成型后的广义被控对象的稳定性, 具体流程如图 5 所示。根据船舶纵摇控制向量 U , 设整个系统的输入为单位阶跃信号 δ_F 与 δ_M 。

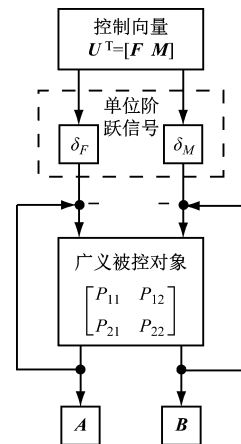
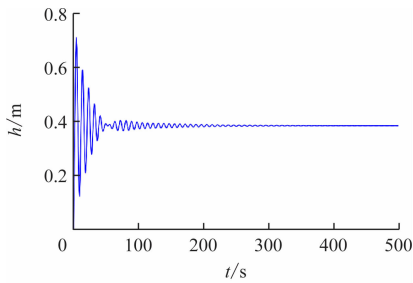


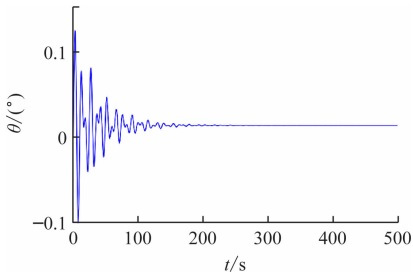
图 5 稳定性验证图

Fig. 5 Stability verification chart

根据仿真试验可得系统稳定输出值 $A = 0.387$, $B = 0.013$, 如图 6 所示。故根轨迹成型法以及权函数法则对不稳定的多输入多输出数学模型有效。



(a) 单位阶跃作用力下的船舶升沉情况



(b) 单位阶跃作用力下的船舶纵摇情况

图6 成型模型输出

Fig. 6 Molding model output diagram

5.3 验证双重非线性反馈算法

控制器在实现减纵摇过程中,会存在一定的纯滞后环节。这种纯滞后环节可能会导致系统响应时间变慢以及对扰动或变化的适应性下降,进而影响控制效果。为验证双重非线性反馈控制算法,在系统中加入风浪干扰的前提下,引入一个纯滞后环节 $e^{-\tau s}$,如图7所示。

在控制系统中加入时滞常数 τ ,分别在7级和8级海况下开展仿真试验。设置时滞常数 $\tau = 0.15$,时间设置为300 s。令 h_m 为升沉最大位移, θ_m 为最

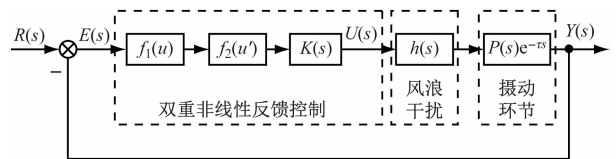


图7 控制系统框图

Fig. 7 Control system block diagram

大纵摇角度, h_a 为总升沉位移能量指标, θ_b 为总纵摇角度能量指标。

$$h_a = \frac{|h_1| + |h_2| + \dots + |h_{300}|}{300} \quad (31)$$

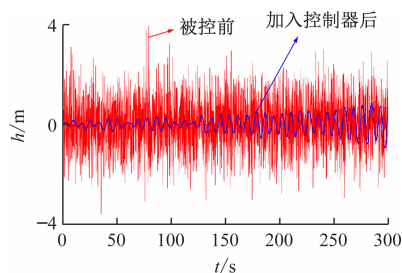
$$\theta_b = \frac{|\theta_1| + |\theta_2| + \dots + |\theta_{300}|}{300} \quad (32)$$

由仿真图8~图11可得变化海况下的性能参数,结果见表3,分析表中数据可知控制系统中加入双重非线性反馈控制算法后,系统的减纵摇性能显著提高。通过对比图8和图9可得双重非线性反馈控制系统在7级海浪环境下,其最大升沉位移值比线性反馈控制提高了92%,最大纵摇角度提高了64%,升沉位移能量指标提高了92%,纵摇角度能量指标提高了52%。观察图10可得线性反馈控制的模型在8级海浪干扰下,升沉位移和纵摇角度的幅值和频率均明显增加。分析图11可知在系统中加入双重非线性反馈算法后,其升沉位移和纵摇角度的输出值以及频率均减小。其升沉位移降为线性反馈的89%,纵摇角度降为线性反馈的41%;升沉位移和纵摇角度能量指标分别提高了87%和20%。故而双重非线性反馈控制算法在7级和8级海浪干

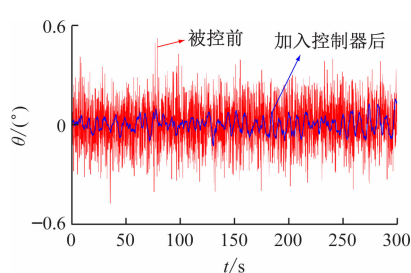
表3 变化海况下的性能参数

Tab. 3 Performance parameters under changing sea state

风力等级	线性反馈				双重非线性反馈			
	h_m	θ_m	h_a	θ_b	h_m	θ_m	h_a	θ_b
7	0.845	0.155	0.231	0.351	0.071	0.056	0.019	0.168
8	1.008	0.189	0.263	0.475	0.111	0.112	0.033	0.379



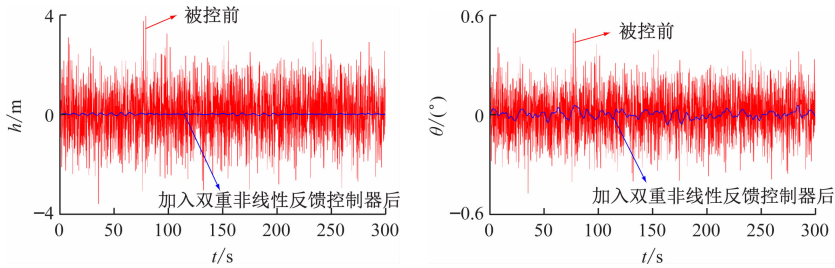
(a) 升沉位移变化曲线



(b) 纵摇角度变化曲线

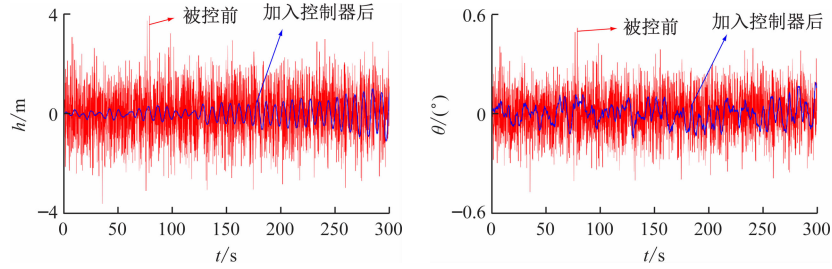
图8 7级海况下的线性反馈($\tau = 0.15$)

Fig. 8 Linear feedback under 7 sea conditions ($\tau = 0.15$)



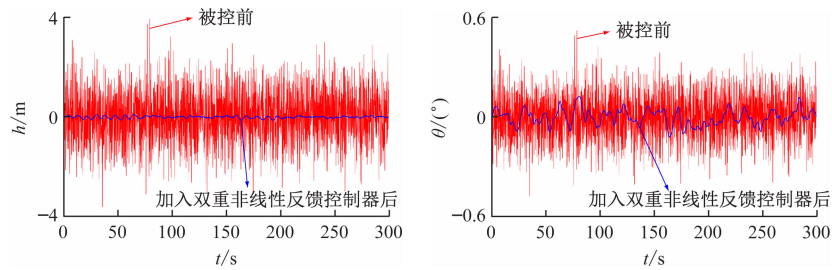
(a) 升沉位移变化曲线

(b) 纵摇角度变化曲线

图9 7级海况下的非线性反馈($\tau=0.15$)Fig. 9 Nonlinear feedback under 7 sea conditions ($\tau=0.15$)

(a) 升沉位移变化曲线

(b) 纵摇角度变化曲线

图10 8级海况下的线性反馈($\tau=0.15$)Fig. 10 Linear feedback under 8 sea conditions ($\tau=0.15$)

(a) 升沉位移变化曲线

(b) 纵摇角度变化曲线

图11 8级海况下的非线性反馈($\tau=0.15$)Fig. 11 Nonlinear feedback under 8 sea conditions ($\tau=0.15$)

扰下均能实现减纵摇的控制效果。

6 结论

本文以超大型“KVLCC2”油轮为研究对象,采用加权矩阵和根轨迹成型法使其传递函数数学模型趋于稳定。利用改进后的闭环增益成型算法设计简洁鲁棒控制器,解决高阶控制器鲁棒性差的问题。同时在控制系统中加入双重非线性反馈控制算法,提高系统的减纵摇性能,并引入7级和8级风力等级下的二阶波浪传递函数及摄动环节开展仿真试验。结果显示双重非线性反馈控制系统在恶劣海况下减纵摇性能较好,进一步提高了船舶在海上航行的安全性。所提算法可为国内外超大型船舶在恶劣海况下航行提供技术支撑,同时对超大型船舶的发展起到推进作用。

参考文献

- [1] ZHANG G Q, ZHANG X K. A novel DVS guidance principle and robust adaptive path-following control for underactuated ships using low frequency gain-learning [J]. ISA Transactions, 2015, 56:75-85.
- [2] ZHANG G Q, LI J Q, JIN X, et al. Robust adaptive neural control for wing-sail-assisted vehicle via the multiport event-triggered approach [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(12): 12916-12928.
- [3] 原新,张欣. 三体船纵向减摇附体设计及减摇效果分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017,41(4):554-558.
YUAN X, ZHANG X. The design of longitudinal damping appendage and the effect on trimaran [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2017, 41

- (4): 554-558. (in Chinese)
- [4] 冯永孝,张显库. 非线性修饰与模糊控制船舶航向保持控制比较[J]. 中国航海,2018,41(4):12-15.
FENG Y X, ZHANG X K. Comparison between nonlinear decoration and fuzzy control for course-keeping control[J]. Navigation of China, 2018, 41(4): 12-15. (in Chinese)
- [5] 张强,王琪文,孟祥飞,等. 考虑不确定扰动的欠驱动船舶鲁棒自适应有限时间控制[J]. 中国航海,2023,46(1):16-23.
ZHANG Q, WANG Q W, MENG X F, et al. Robust adaptive finite-time trajectory tracking of underactuated ship[J]. Navigation of China, 2023, 46(1): 16-23. (in Chinese)
- [6] 李博,张国庆,张显库,等. 基于鲁棒自适应控制算法的船舶航迹舵机设计与开发[J]. 大连海事大学学报, 2024,50(2):23-30.
LI B, ZHANG G Q, ZHANG X K, et al. Design and development of ship navpilot prototype based on the robust adaptive control [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2024, 50(2):23-30. (in Chinese)
- [7] SONG C Y, ZHANG X K, ZHANG G Q. Nonlinear identification for 4-DOF ship maneuvering modeling via full-scale trial data[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(2): 1829-1835.
- [8] 张军,温昊,刘志林,等. 高速多体船的解析预测控制减纵摇方法[J]. 兵工学报,2021,42(9):1962-1971.
ZHANG J, WEN H, LIU Z L, et al. An analytical predictive control anti-pitching method for a high-speed multi-hulled vessel [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(9):1962-1971. (in Chinese)
- [9] LI W, ZHANG J, XU W. High-speed multihull anti-pitching control based on heave velocity and pitch angular velocity estimation [J]. ISA Transactions, 2024,146:380-391.
- [10] CAO T, ZHANG X K. Nonlinear decoration control based on perturbation of ship longitudinal motion model [J]. Applied Ocean Research, 2023, 130:103412.
- [11] 胡聪聪,毛筱菲,齐健璋. 随机海况下自控式截流板减纵摇研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2024,48(5):890-895.
HU C C, MAO X F, QI J Z. Study on pitch reduction of self-control interceptor under random seas [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2024, 48(5): 890-895. (in Chinese)
- [12] LI J Q, ZHANG G Q, ZHANG W J, et al. Cooperative path following control of USV-UAVs considering low design complexity and command transmission requirements [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles,2024, 9(1):715-724.
- [13] SONG C Y, ZHANG X K, ZHANG G Q. Attitude prediction of ship coupled heave-pitch motions using nonlinear innovation via full-scale test data[J]. Ocean Engineering, 2022, 264:112524.
- [14] 张显库. 水翼艇纵向运动多变量鲁棒控制[J]. 中国造船,2009,50(4):203-207.
ZHANG X K. Multivariable robust control of the longitudinal motion of hydrofoil [J]. Shipbuilding of China, 2009,50(4):203-207. (in Chinese)
- [15] 吴理,李自成,罗敬崴,等. 控制工程中 MATLAB 的时域分析与根轨迹绘制应用探究[J]. 现代工业经济和信
息化,2024,14(2):144-147.
WU L, LI Z C, LUO J W, et al. Application of MATLAB time domain analysis and root locus drawing in control engineering[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2024, 14(2): 144-147. (in Chinese)
- [16] 张显库,曹添. 基于反正切函数非线性反馈的船舶减纵摇控制[J]. 广东海洋大学学报,2022,42(6):30-37.
ZHANG X K, CAO T. Ship pitch reduction control based on arctangent function nonlinear feedback [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2022, 42(6): 30-37. (in Chinese)
- [17] LI J Q, ZHANG G Q, ZHANG X K, et al. Integrating dynamic event-triggered and sensor-tolerant control: application to USV-UAVs cooperative formation system for maritime parallel search[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(5): 3986-3998.
- [18] 张显库,张国庆. 非线性反馈理论及其在船舶运动控制中的应用[M]. 大连:大连海事大学出版社,2020.
ZHANG X K, ZHANG G Q. Nonlinear feedback theory and its application to ship motion control[M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2020. (in Chinese)