# 基于扩张观测器的欠驱动船舶轨迹跟踪低频学习 自适应动态面输出反馈控制

# 沈智鹏<sup>†</sup>, 邹天宇, 王 茹

(大连海事大学船舶电气工程学院,辽宁大连116026)

摘要: 针对速度不可测的三自由度欠驱动船舶轨迹跟踪控制问题,考虑船舶存在模型参数不确定项以及外界环 境干扰未知情况,提出一种基于扩张观测器的欠驱动船舶轨迹跟踪低频学习自适应动态面输出反馈控制策略. 该策 略构造扩张观测器估计船舶速度向量,利用神经网络算法逼近模型参数不确定项,然后采用动态面控制技术避免对 虚拟控制律直接求导,简化控制律计算过程,并引入低频增益学习技术消除外界扰动导致控制信号产生高频振荡, 最后选取李雅普诺夫函数证明该控制律能够保证船舶跟踪闭环系统中所有误差信号一致最终有界. 仿真结果表明, 本文所设计控制器对船舶模型参数不确定项及外界环境干扰具有较强的鲁棒性,能够实现对船舶轨迹的有效跟踪. 关键词: 欠驱动船舶;轨迹跟踪;扩张观测器;自适应动态面控制;输出反馈控制;低频学习;控制系统稳定性 引用格式: 沈智鹏,邹天宇,王茹. 基于扩张观测器的欠驱动船舶轨迹跟踪低频学习自适应动态面输出反馈控制. 控制理论与应用, 2019, 36(6): 867 – 876

DOI: 10.7641/CTA.2018.80063

# Extended state observer based adaptive dynamic surface output feedback control for underactuated surface vessel trajectory tracking with low-frequency learning

SHEN Zhi-peng<sup>†</sup>, ZOU Tian-yu, WANG Ru

(School of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

**Abstract:** To solve the trajectory tracking problem of 3–DOF underactuated surface vessel with immeasurable velocity vectors, an extended state observer based adaptive dynamic surface output feedback control method with low frequency learning is proposed in the presence of uncertain ship model parameters and unknown external environmental disturbances. In this strategy, the extended state observer is designed to estimate ship velocity vector, and a neural network is introduced to approximate the model uncertainty. Then the dynamic surface control technology is applied to avoid direct derivation of the virtual control law and simplify the control law calculation process, and the low frequency learning method is introduced to eliminate the high frequency oscillation control signal caused by external disturbance. Finally, the application of a Lyapunov function proves that all signals in the closed-loop tracking system can be guaranteed the uniformly ultimate boundedness by the proposed control law. Simulation results show that the controller has strong robustness against model uncertainty and unknown external environmental disturbances, as well as the ship trajectory can be tracked effectively.

**Key words:** underactuated surface vessel; trajectory tracking; extended state observer; adaptive dynamic surface control; output feedback control; low–frequency learning; control system stability

**Citation:** SHEN Zhipeng, ZOU Tianyu, WANG Ru. Extended state observer based adaptive dynamic surface output feedback control for underactuated surface vessel trajectory tracking with low-frequency learning. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(6): 867 – 876

# 1 引言

近年来,随着海洋装备和航运业的快速发展,工程 应用对船舶操纵性能和控制精度的要求越来越高,同 时对欠驱动船舶运动控制的研究也带来新的挑战.欠 驱动船舶没有侧向推进器,通过螺旋桨推力控制纵向 速度,其横向位移及航向角度依靠船舵的转向力矩控 制. Xiang X等<sup>[1]</sup>仅依靠螺旋桨推力和舵角转矩调节 的两自由度控制输入,实现了船舶在二维平面内三自

收稿日期: 2018-01-20; 录用日期: 2018-07-23.

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>通信作者. E-mail: shenbert@dlmu.edu.cn; Tel.: +86 13478437961.

本文责任编委:武玉强.

国家自然科学基金项目(51579024), 辽宁省自然科学基金项目(201602072), 中央高校基本科研业务费项目(3132016311)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51579024), the Natural Science Foundation of Liaoning Province of China (201602072) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (3132016311).

由度的运动控制,说明欠驱动船舶系统可以减少船舶 重量、节约生产成本,因此对欠驱动船舶运动的研究 一直备受各国学者的广泛关注.

Breivik M等<sup>[2]</sup>在传统的船舶控制方法中,将船舶 运动分为:镇定控制、路径跟踪和轨迹跟踪.目前,欠 驱动船舶运动控制方面已有诸多研究成果. 董早鹏 等<sup>[3]</sup>针对非对称欠驱动水面无人艇的镇定控制问题, 在极坐标系下,采用backstepping技术设计控制律,实 现了对欠驱动无人艇的镇定控制.廖煜雷等<sup>[4]</sup>同时引 入动态面控制(dynamic surface control, DSC)技术和 最少学习参数(minimum learning parameter, MLP)技 术设计轨迹跟踪控制律,其中DSC技术用于消除反步 法控制器设计过程中对虚拟控制律求导引起的"微分 爆炸"问题; MLP技术以单参数在线学习代替所有权 值在线学习,减少控制器的计算量,避免出现"维数灾 难"问题. Yu R等<sup>[5-6]</sup>针对欠驱动船舶轨迹跟踪控制 问题,考虑船舶模型参数不确定项和外界干扰均已知 上界的情况,设计关于纵向速度误差的一阶滑模面和 关于横向速度误差的二阶滑模面,提出了欠驱动船舶 滑模轨迹跟踪控制律,实现了对船舶的轨迹跟踪控制. 以上文献均属于状态反馈控制范畴,考虑实际工程中 船舶速度不易测得的情况,若直接对船舶位置和艏摇 角微分获得船舶速度,其结果不够准确;若使用传感 器测得各速度分量,会增加设备监测成本,且传感器 测量精度会受到测量噪声等干扰影响,另考虑传感器 失灵状况,所以设计带有状态观测器的船舶轨迹跟踪 输出反馈控制器具有实际工程应用价值. Bidikli B 等[7]针对船舶速度不可测问题,结合反演法设计了自 适应输出反馈控制律,并引用状态观测器估测船舶航 行速度,实现了对动力定位船舶轨迹跟踪的有效控制. 杜佳璐等[8]将高增益观测器估计出来的船舶速度值用 于船舶动力定位输出反馈控制中,结合反演法和动态 面技术,有效地解决了船舶跟踪控制系统中的速度不 可测问题. Wondergem M等<sup>[9]</sup>针对船舶轨迹跟踪控制 问题,利用状态观测器估计船舶的速度向量,并根据 速度估计值设计基于观测器的轨迹跟踪输出反馈控 制律,对椭圆参考轨迹进行跟踪验证所设计控制律的 有效性.

文献[7-9]均以船舶模型已知为前提,但在实际工 况中,船舶模型因受到外界因素的影响会发生一定的 参数摄动,从而导致系统存在未知不确定部分.孙国 法等<sup>[10]</sup>针对一类非线性系统状态未测量反馈控制问 题,构造神经网络自适应观测器估计所需未知状态信 息,避免了高增益观测器由于反馈参数取值过高而产 生的抖振问题,从而提高了系统的跟踪性能.Qian Y等<sup>[11-12]</sup>针对典型欠驱动海上吊臂起重机,提出了一 种自适应重复学习控制策略,通过引入周期标识符来 补偿未知周期性扰动,所获得的结果被学习算法用来

估计周期性扰动,且提出了自适应律和鲁棒控制来解 决有关系统参数和其他未知干扰的不确定性,实现了 将有效负载驱动到预期位置,并有效抑制有效负载摆 动. Fu M等<sup>[13]</sup>针对欠驱动船舶路径跟踪控制问题,构 造扩张状态观测器(extended state observer, ESO)来估 计船舶模型不确定性和外部干扰构成的复合扰动,设 计基于ESO的欠驱动船舶动态面路径跟踪控制策略. 刘晓东[14]将扩张观测器应用于一类存在模型不确定 的多输入多输出系统,仿真结果验证了所设计控制律 的有效性. 但文献[11-15]均未考虑船舶在实际工程 中因外界因素的影响易使系统控制信号产生高频振 荡的情况,因此,Yucelen T等<sup>[15]</sup>提出了一种低频增益 学习技术,有效地过滤了自适应律中存在的高频信息, 验证了所提方法的有效性. Hao 等<sup>[16]</sup>等针对船舶协同 路径跟踪控制问题,设计了神经网络自适应动态面控 制律,并引入低频增益技术避免了因复合扰动的影响 导致控制信号产生高频震荡的问题. Zhang G等<sup>[17]</sup>将 该方法应用于更新补偿执行器非线性增益自适应律 中,进一步滤除了超恶劣环境干扰的影响,有效地解 决了船舶路径跟踪控制问题.

基于以上文献的启发,本文针对欠驱动单桨单舵 船舶速度向量不可测问题,设计一种基于扩张观测器 的欠驱动船舶轨迹跟踪低频学习自适应动态面输出 反馈控制策略.通过构造扩张观测器对复合扰动(模型 参数不确定部分和外界环境干扰)和船舶各速度分量 进行实时估计,引入神经网络算法逼近模型参数不确 定部分,并与低频增益学习技术相结合,避免因外界 扰动影响导致控制信号产生高频振荡.最后以新加坡 海关的一艘"BAY CLASS"号远程巡逻船为对象进 行仿真研究,验证所设计轨迹跟踪输出反馈控制器的 有效性.

#### 2 问题描述

针对单桨单舵船舶,考虑船舶的前进、横漂和艏 摇3个自由度的水平面运动,忽略船舶的升沉、纵摇和 横摇运动,欠驱动船舶的非线性数学模型可描述为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = J(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu}, \\ M\dot{\boldsymbol{\nu}} = -C(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} - D\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{w}, \end{cases}$$
(1)

式中:  $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \psi]^{\mathrm{T}}$ 为船舶惯性坐标系下的实际位置(x, y)和航向角 $\psi, \boldsymbol{\nu} = [u \ v \ r]^{\mathrm{T}}$ 为船舶附体坐标系下的前进速度、横漂速度和艏摇角速度,

$$J(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0\\ \sin\psi & \cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

为惯性坐标系与附体坐标系的转换矩阵,且满足  $J^{-1}(\boldsymbol{\eta}) = J^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\eta}). M = \text{diag}\{m_{11}, m_{22}, m_{33}\}$ 为船舶 的惯性参数矩阵, 第6期

$$C(\boldsymbol{\nu}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix}$$

为科里奧利和向心力矩阵,  $D = \text{diag}\{d_{11}, d_{22}, d_{33}\}$ 为阻尼参数矩阵, 假设M已知,  $C(\nu)$ 和D均未知.  $\tau = [\tau_{u} \ 0 \ \tau_{r}]^{T}$ 为船舶的控制力和力矩,  $\tau_{u}, \tau_{r}$ 分别表示船舶的纵向推进力和转向力矩, 单桨单舵船舶没有横向推进器, 属于典型欠驱动系统.  $\tau_{w} = [\tau_{wu} \ \tau_{wv} \ \tau_{wr}]^{T}$ 为外界环境因素产生的未知时变干扰, 包括风、浪、流引起的干扰以及测量噪声.

为实现欠驱动船舶轨迹跟踪输出反馈控制器的设计,引入以下假设:

**假设 1**<sup>[19]</sup> 船舶的参考轨迹(*x*<sub>d</sub>, *y*<sub>d</sub>)是光滑可微的,且存在一阶、二阶导数.

**假设 2**<sup>[9]</sup> 作用在欠驱动船舶上的未知外界干扰  $\tau_{wu}, \tau_{wv}, \tau_{wr}$ 为光滑有界,满足 $|\tau_{wu}| \leq \tau_{wu}^*, |\tau_{wv}| \leq \tau_{wv}^*,$  $|\tau_{wr}| \leq \tau_{wr}^*$ .其中 $\tau_{wu}^* > 0, \tau_{wv}^* > 0, \tau_{wr}^* > 0$ 为船舶外 界环境干扰的上界且界值未知.

**假设3**<sup>[7-8]</sup> 欠驱动船舶仅位置(*x*, *y*)和航向 角*ψ*是可测的,速度*u*, *v*和角速度*r*均不可测.

控制目标:针对三自由度欠驱动船舶非线性数学 模型(1),在满足假设1-3的条件下,考虑船舶存在模型 参数不确定项和遭受未知外界环境干扰的情况,设计 船舶前向推进力*τ*<sub>u</sub>和转向力矩*τ*<sub>r</sub>使得欠驱动船舶能够 沿着参考轨迹航行,并保证船舶跟踪控制闭环系统中 轨迹跟踪误差信号一致最终有界,实现对欠驱动船舶 轨迹跟踪的有效控制.

#### 3 扩张观测器设计

由欠驱动船舶数学模型(1)可得

$$\begin{split} \ddot{\boldsymbol{\eta}} &= J(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\nu}} + J(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu} = \\ &J(\boldsymbol{\eta})M^{-1}\left[-C(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} - D\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{\tau}_{w}\right] + \\ &\dot{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu} + J(\boldsymbol{\eta})M^{-1}\boldsymbol{\tau}. \end{split}$$
(2)

 $\begin{aligned} & \diamond \Theta = J(\boldsymbol{\eta}) M^{-1} \left[ -C(\boldsymbol{\nu}) \boldsymbol{\nu} - D \boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{\tau}_{w} \right] + \dot{J}(\boldsymbol{\eta}) \boldsymbol{\nu}, \\ & B = J(\boldsymbol{\eta}) M^{-1}. \ \mathbf{x}(2) 可表示为 \end{aligned}$ 

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} = \Theta + B\boldsymbol{\tau}.\tag{3}$$

通常模型参数不确定部分为内部扰动,外界环境 干扰为外部扰动.采用扩张观测器估计时不区分内部 扰动和外部扰动,而是估计由内部扰动和外部扰动构 成的复合扰动 $\Theta$ .由式(3)可知,船舶运动模型变为了 一个积分串联型系统. 令 $x_1 = \eta, x_2 = \dot{\eta}$ ,设计如下 扩张观测器:

$$\hat{\boldsymbol{x}}_1 = \hat{\boldsymbol{x}}_2 + \beta_1 \left( \boldsymbol{x}_1 - \hat{\boldsymbol{x}}_1 \right), \qquad (4a)$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}_2 = \hat{\boldsymbol{x}}_3 + B\boldsymbol{\tau} + \beta_2 \left( \boldsymbol{x}_1 - \hat{\boldsymbol{x}}_1 \right),$$
 (4b)

$$\hat{\boldsymbol{x}}_3 = \beta_3 \left( \boldsymbol{x}_1 - \hat{\boldsymbol{x}}_1 \right), \tag{4c}$$

式中:  $\hat{x}_1 \in \eta$ 的观测值,  $\hat{x}_2 \in \dot{\eta}$ 的观测值,  $\hat{x}_3 \in \lambda$ 系统 复合扰动 $\Theta$ 的估计值,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ 为常值对角矩阵. 下 面证明扩张观测器(4)观测误差的收敛性.

**证** 定义观测误差
$$e = [e_1 \ e_2 \ e_3]^{\mathrm{T}}$$
,其中:  
 $e_1 = x_1 - \hat{x}_1, \ e_2 = x_2 - \hat{x}_2, \ e_3 = \Theta - \hat{x}_3,$   
 $\Theta = [\Delta F_n \ \Delta F_n \ \Delta F_n]^{\mathrm{T}}.$ 

结合式(4)可得

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\beta_1 e_1 + e_2, \\ \dot{e}_2 = -\beta_2 e_1 + e_3, \\ \dot{e}_3 = -\beta_3 e_1 + \dot{\Theta}. \end{cases}$$
(5)

令 $\beta_1 = \frac{a_1}{\varepsilon}, \beta_2 = \frac{a_2}{\varepsilon^2}, \beta_3 = \frac{a_3}{\varepsilon^3}, \varepsilon > 0$ 为设计参数. 则观测误差状态方程可写为

$$\dot{\boldsymbol{e}} = A\boldsymbol{e} + B\dot{\boldsymbol{\Theta}},\tag{6}$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{a_1}{\varepsilon} & 1 & 0\\ -\frac{a_2}{\varepsilon^2} & 0 & 1\\ -\frac{a_3}{\varepsilon^3} & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0\\ 0\\ 1 \end{bmatrix}.$$

矩阵A的特征方程为

$$s_i^3 + a_1 s_i^2 + a_2 s_i + a_3 = \prod_{j=1}^3 (s_i + \lambda_i) = 0,$$
 (7)

其中:  $\lambda_i = [\lambda_{1i} \ \lambda_{2i} \ \lambda_{3i}]^T$ 为互不相等的正实数, i = 1, 2, 3. 对于矩阵*A*, 存在范德蒙德矩阵*N*满足如下关系:

$$A = N \operatorname{diag} \{ -\frac{\lambda_{1i}}{\varepsilon}, -\frac{\lambda_{2i}}{\varepsilon}, -\frac{\lambda_{3i}}{\varepsilon} \} N^{-1}, \quad (8)$$

定义 $\lambda_{\min} = \min \{ \lambda_{1i}, \lambda_{2i}, \lambda_{3i} \}, i = 1, 2, 3.$  对微分方 程 $\dot{\boldsymbol{e}}_i = A \boldsymbol{e}_i + B \dot{\Theta}$ 进行求解,可得

$$\boldsymbol{e}_{i}(t) = \exp(At)\boldsymbol{e}_{i}(0) + \int_{0}^{t} \exp\left[A(t-\boldsymbol{\tau})\right] \dot{\boldsymbol{\Theta}} \mathrm{d}\boldsymbol{\tau} B.$$
(9)

根据上述论述可知, 假设船舶系统的复合扰动 $\Theta$ 有界 且上界未知, 其一阶导数 $\dot{\Theta}$ 存在且有界, 即 $|\dot{\Theta}| \leq S$ ,  $S = [S_1 \ S_2 \ S_3]^{\mathrm{T}}, 0 < S_i < +\infty$ . 因此, 将式(9)变换 可得

$$\begin{split} \|e_i(t)\| \leqslant \\ \|\exp(At)\| \|e_i(0)\| + S\| \int_0^t \exp[A(t-\tau)] d\tau \| \|B\| \leqslant \\ \|N \operatorname{diag} \{ \exp(-\frac{\lambda_{1i}}{\varepsilon} t), \exp(-\frac{\lambda_{2i}}{\varepsilon} t), \\ \exp(-\frac{\lambda_{3i}}{\varepsilon} t) \} N^{-1}\| \times \|e_i(0)\| + \\ S\| \int_0^t \exp[A(t-\tau)] \| \| d\tau \| \|B\| \\ \|N\| \|N^{-1}\| S \int_0^t \exp[-\frac{\lambda_{\min}}{\varepsilon} (t-\tau)] d\tau \|B\| \leqslant \end{split}$$

$$\|N\| \|N^{-1}\| \{ \exp(-\frac{\lambda_{\min}}{\varepsilon}t) \|e_i(0)\| + S\frac{\varepsilon}{\lambda_{\min}} [1 - \exp(-\frac{\lambda_{\min}}{\varepsilon}t)] \|B\| \},$$
(10)

由||B||=1可知,  $\lim_{\varepsilon \to 0^+} ||\mathbf{e}_i(t)|| = 0$ . 根据式(10)得出,  $||\mathbf{e}_i||$ 的收敛速度跟参数 $\varepsilon$ 有关,  $\varepsilon$ 越小,  $||\mathbf{e}_i||$ 收敛速度 越快, 最终趋于零, 即 $\hat{\boldsymbol{\nu}} \to \boldsymbol{\nu}$ . 综合上述, 扩张观测器 的观测误差是收敛的, 且最终收敛于零. 证毕.

根据扩张观测器(4),结合数学模型(1)可得

$$\hat{\eta} = \hat{x}_1, \ \hat{\nu} = J^{-1}\hat{x}_2,$$
 (11)

其中:  $\hat{\boldsymbol{\eta}} = [\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{\psi}]^{\mathrm{T}}$ 为船舶的位置观测向量,  $\hat{\boldsymbol{\nu}} = [\hat{u} \ \hat{v} \ \hat{r}]^{\mathrm{T}}$ 为速度观测向量. 定义速度观测误差向量为

$$\tilde{\boldsymbol{\nu}} = \hat{\boldsymbol{\nu}} - \boldsymbol{\nu}.$$

#### 4 输出反馈控制器设计

# 4.1 虚拟控制律设计

定义船舶位置跟踪误差变量为

$$\begin{aligned} x_{\rm e} &= x - x_{\rm d}, \\ y_{\rm e} &= y - y_{\rm d}, \end{aligned} \tag{12}$$

其中 $(x_d, y_d)$ 为船舶的参考轨迹.

定义速度跟踪误差变量为

$$u_{\rm e} = \hat{u} - \alpha_{\rm u}, v_{\rm e} = \hat{v} - \alpha_{\rm v},$$
(13)

其中 $\alpha_u, \alpha_v$ 为虚拟速度控制量.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \end{bmatrix}.$$
 (14)

为了使得船舶轨迹跟踪位置误差趋于零,设计如 下虚拟控制律:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{\rm u} \\ \alpha_{\rm v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{x_{\rm d} - kx_{\rm e}}{\sqrt{x_{\rm e}^2 + y_{\rm e}^2 + a}} \\ \frac{\dot{y}_{\rm d} - ky_{\rm e}}{\sqrt{x_{\rm e}^2 + y_{\rm e}^2 + a}} \end{bmatrix}.$$
 (15)

其中k > 0, a > 0均为设计参数. 由式(12)-(15)可得

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{\rm e} \\ \dot{y}_{\rm e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-kx_{\rm e}}{\sqrt{x_{\rm e}^2 + y_{\rm e}^2 + a}} \\ \frac{-ky_{\rm e}}{\sqrt{x_{\rm e}^2 + y_{\rm e}^2 + a}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} - \alpha_{\rm u} \\ \hat{v} - \alpha_{\rm v} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

由上式可知,当 $\hat{u}$ 趋于 $\alpha_{u}$ , $\hat{v}$ 趋于 $\alpha_{v}$ 时, $x_{e}$ , $y_{e}$ 也会收敛于零,即实现对船舶位置的跟踪控制.

**注1** 之所以将虚拟速度控制律设计为式(15),而不用如下式(17).因为当|*x*<sub>e</sub>|和|*y*<sub>e</sub>|较大时,虚拟速度控制律α<sub>u</sub>和α<sub>v</sub>可能会超出船舶最大航行速度范围,造成船舶系统产生振

荡甚至发散,使得系统的控制输入 $\tau_u$ , $\tau_r$ 无法设计,进而导致 不能有效地对船舶轨迹跟踪进行控制.

$$\begin{bmatrix} \alpha_{\rm u} \\ \alpha_{\rm v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{\rm d} - kx_{\rm e} \\ \dot{y}_{\rm d} - ky_{\rm e} \end{bmatrix}.$$
 (17)

#### 4.2 纵向推力和转向力矩控制律设计

设计关于前进速度误差u<sub>e</sub>的一阶滑模面和横漂速 度误差v<sub>e</sub>的二阶滑模面分别为

$$s_1(t) = u_e + \lambda_1 \int_0^t u_e(\tau) \mathrm{d}\tau, \qquad (18)$$

$$s_2(t) = \dot{v}_{\rm e} + \lambda_2 v_{\rm e},\tag{19}$$

其中 $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$ 为设计常数. 由于欠驱动船舶没 有横向推进装置, 为使 $\dot{s}_2(t)$ 中出现转向力矩 $\tau_r$ , 故设 计 $s_2(t)$ 为二阶滑模面.

为避免传统Backstepping控制方法对 $\dot{\alpha}_{u}, \dot{\alpha}_{v}$ 求时 产生"微分爆炸"问题,依据动态面控制算法思想,引 入新变量 $X = [X_1 \ X_2]^T \in \mathbb{R}^2$ 作为 $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_u \ \alpha_v]^T$ 的 一阶低通滤波器的输出,其数学表达式为

$$T\dot{X} + X = \boldsymbol{\alpha}, \ X(0) = \boldsymbol{\alpha}(0), \tag{20}$$

其中T为滤波器时间常数.由上式可得

$$\dot{X} = \frac{(\boldsymbol{\alpha} - X)}{T}.$$
(21)

定义系统边界层误差

$$Y = X - \alpha. \tag{22}$$

对式(18)--(19)求导可得

$$\dot{s}_{1} = \frac{1}{m_{11}} \left( m_{22} vr - d_{11} u + \tau_{\rm u} + \tau_{\rm wu} \right) + \\ \dot{\tilde{u}} - \dot{X}_{1} + \lambda_{1} u_{\rm e}, \tag{23}$$

其中 $\tilde{u} = \hat{u} - u$ 为前进速度的估计误差变量.

$$\dot{s}_{2} = \ddot{v} + \ddot{\tilde{v}} - \ddot{\alpha}_{v} + \lambda_{2}(\dot{v} - \dot{X}_{2}) = \ddot{v} + \ddot{\tilde{v}} + \dot{r}\alpha_{u} + r\dot{X}_{1} - \dot{P} + \lambda_{2}(\dot{v} - \dot{X}_{2}) = \frac{\alpha_{u}}{m_{33}}[(m_{11} - m_{22})uv - d_{33}r + \tau_{r} + \tau_{wr}] + \ddot{v} + \ddot{\tilde{v}} + r\dot{X}_{1} - \dot{P} + \lambda_{2}(\dot{v} - \dot{X}_{2}),$$
(24)

其中 $\tilde{v} = \hat{v} - v$ 为横漂速度的估计误差变量;

$$\begin{split} P = &\cos(\psi) [\ddot{y}_{\rm d} + k(w^{-1} - w^{-3}y_{\rm e}{}^2)\dot{y}_{\rm e} - \\ &kw^{-3}x_{\rm e}y_{\rm e}\dot{x}_{\rm e}] - \sin \ \psi [k(w^{-1} - w^{-3}x_{\rm e}{}^2)\dot{x}_{\rm e} + \\ &\ddot{x}_{\rm d} - kw^{-3}x_{\rm e}y_{\rm e}\dot{y}_{\rm e}], \end{split}$$

其中 $w = \sqrt{x_{\mathrm{e}}^2 + y_{\mathrm{e}}^2 + a}.$ 

由于船舶数学模型(1)中C(v)和D均是未知的,所 以本文采用神经网络算法对未知函数 $F_u: \Omega_u \to \mathbb{R}$ ,  $F_r: \Omega_r \to \mathbb{R}$ 进行逼近,其表达式为

$$F_{\rm u} = W_{\rm u}^{*{\rm T}} h_{\rm u}(z_{\rm u}) + \varsigma_{\rm u} = -m_{22}vr + d_{11}u - \lambda_1 m_{11}u_{\rm e} - m_{11}\dot{\tilde{u}}, \quad (25)$$
$$F_{\rm r} = W_{\rm r}^{*{\rm T}} h_{\rm r}(z_{\rm r}) + \varsigma_{\rm r} =$$

$$\frac{-m_{33}(\ddot{v}+\ddot{\tilde{v}}+r\dot{X}_1-\dot{P}+\lambda_2\dot{v})}{\alpha_{\rm u}} - (m_{11}-m_{22})\,uv + d_{33}r.$$
(26)

式(25)和式(26)中:  $z_{\rm r} = [u \ v \ r \ \alpha_{\rm u}; \dot{X}_1 \ \dot{v} \ \ddot{v} \ \dot{P}]^{\rm T}; z_{\rm u}$ =  $[u \ v, r \ u_{\rm e}]^{\rm T}$ 为神经网络的输入;

第6期

$$m{h}_{i}(z_{i}) = \exp(-rac{\|z_{i} - c_{j}\|^{2}}{2{b_{j}}^{2}})$$

为神经网络的高斯基函数输出, 下标*i*表示*u*, *r*, *b<sub>j</sub>*>0 为高斯基函数的宽度, *j*个隐层神经元的中心点向量 值, 与输入向量*z<sub>i</sub>*的维数相同; *s*<sub>u</sub>, *s*<sub>u</sub>为神经网络的逼 近误差, 且满足*s*<sub>u</sub>  $\leq s_{U}$ , *s*<sub>r</sub>  $\leq s_{R}$ , *s*<sub>R</sub> > 0, *s*<sub>U</sub> > 0为误 差界值; *W<sub>i</sub>*\*表示隐含层到输出层的理想权值向量, 并 取为对于*z<sub>i</sub>*  $\in \Omega_i$  使得|*s<sub>i</sub>*(*z<sub>i</sub>*)|最小向量*W<sub>i</sub>*的值, 下标*i* 表示*u*, *r*, 其表达式为

$$W_i^* = \arg\min_{W \in \mathbb{R}^n} \{ \sup_{z_i \in \Omega_i} |F_i - W_i^{\mathrm{T}} h_i(z_i)| \}, \quad (27)$$

其中下标*i*表示*u*, *r*. 在实际应用中, 理想权值 $W_u^* n W_r^*$ 是无法得到的, 所以在控制律设计中需要采用 $W_u^*$ 和 $W_r^*$ 的估计值 $\hat{W}_u n \hat{W}_r^*$ , 假设用于逼近系统未知函数的神经网络权值 $W_u^* n W_r^*$ 有界, 即存在大于零的常数 $W_U n W_R$ , 使得 $||W_u^*|| \leq W_U$ ,  $||W_r^*|| \leq W_R$ . 设计纵向推力 $\tau_u$ 和转向力矩 $\tau_r$ 为

$$\tau_{\rm u} = W_{\rm u}^{\rm T} \boldsymbol{h}_{\rm u}(\hat{z}_{\rm u}) + m_{11} X_1 - \eta_1 s_1 - \hat{\tau}_{\rm wu}^* \phi(s_1), (28)$$
  
$$\tau_{\rm r} = \hat{W}_{\rm r}^{\rm T} h_{\rm r}(\hat{z}_{\rm r}) + \frac{\lambda_2 m_{33} \dot{X}_2}{\alpha_{\rm r}} - \eta_2 s_2 - \hat{\tau}_{\rm wr}^* \varphi(s_2),$$
(29)

其中:  $\eta_1 > 0$ ,  $\eta_2 > 0$ 为设计常数;  $\hat{\tau}_{wu}^*$ ,  $\hat{\tau}_{wr}^*$ 分别为 $\tau_{wu}^*$ ,  $\tau_{wr}^*$ 的界估计;  $\phi(s_i) = \tanh(s_i/\xi_i)$ , i = 1, 2;  $\xi_i > 0$ 为 设计常数;

$$\begin{cases} \dot{\hat{\tau}}_{wu}^* = \gamma_1 [s_1 \phi(s_1) - \sigma_1 \left( \hat{\tau}_{wu}^* - \tau_{wu}^0 \right)], \\ \dot{\hat{\tau}}_{wr}^* = \gamma_2 [s_2 \phi(s_2) - \sigma_2 \left( \hat{\tau}_{wr}^* - \tau_{wr}^0 \right)], \end{cases}$$
(30)

其中 $\gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0, \sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0$ 为设计常数,且 $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ 为很小的值;  $\tau_{wu}^0, \tau_{wr}^0$ 为 $\hat{\tau}_{wu}^*, \hat{\tau}_{wr}^*$ 的先验估计值.

设计权值自适应律为

$$\begin{cases} \hat{W}_{\mathrm{u}} = \Gamma_{1}[-s_{1}\boldsymbol{h}_{\mathrm{u}}(\hat{z}_{\mathrm{u}}) - \vartheta_{1}\hat{W}_{\mathrm{u}}], \\ \dot{\hat{W}}_{\mathrm{r}} = \Gamma_{2}[-s_{2}\boldsymbol{h}_{\mathrm{r}}(\hat{z}_{\mathrm{r}}) - \vartheta_{2}\hat{W}_{\mathrm{r}}], \end{cases}$$
(31)

其中:  $\Gamma_1 > 0$ ,  $\vartheta_1 > 0$ ,  $\Gamma_2 > 0$ ,  $\vartheta_2 > 0$ 为设计常数. 权 值自适应律(31)中的 $\vartheta_1 \hat{W}_u \eta \vartheta_2 \hat{W}_r \eta \eta x d \vartheta_1 (\hat{W}_u - W_u^*)$ ,  $\vartheta_2 (\hat{W}_r - W_r^*)$ , 但实际工程中理想权值 $W_u^*$ 无法 获得, 假设 $W_u^* = 0$ 得到式(31). 考虑因外界因素的影 响使得控制信号产生高频振荡, 易导致船舶闭环控制 系统遭到破坏, 进而使得对船舶轨迹跟踪控制失效, 故引入低频学习技术<sup>[18]</sup>, 即采用 $\hat{W}_{uf}$ ,  $\hat{W}_{rf}$ 视为 $\hat{W}_r$ , Ŵ<sub>r</sub>的一阶低通滤波输出并代替W<sub>u</sub><sup>\*</sup>, W<sub>r</sub><sup>\*</sup>, 进一步滤除 了自适应律中存在的高频信息, 提高系统跟踪控制器 的鲁棒性. 改进后的神经网络权值的低频增益学习自 适应律为

$$\begin{cases} \hat{W}_{u} = \Gamma_{1}[-s_{1}h_{u}(\hat{z}_{u}) - \vartheta_{1}(\hat{W}_{u} - \hat{W}_{uf})], \\ \dot{\hat{W}}_{uf} = \Gamma_{f1}(\hat{W}_{u} - \hat{W}_{uf}), \end{cases}$$
(32)  
$$\begin{cases} \dot{\hat{W}}_{r} = \Gamma_{2}[-s_{2}h_{r}(\hat{z}_{r}) - \vartheta_{2}(\hat{W}_{r} - \hat{W}_{rf})], \\ \dot{\hat{W}}_{rf} = \Gamma_{f2}(\hat{W}_{r} - \hat{W}_{rf}), \end{cases}$$
(33)

其中 $\hat{W}_{uf}, \hat{W}_{rf}$ 分别为 $\hat{W}_{u}, \hat{W}_{r}$ 的低频滤波估计. 根据 文献[18]给出的引理可知, 低频增益学习技术的引入, 不改变原有系统的稳定性.

### 5 系统稳定性分析

**定理1** 针对欠驱动船舶非线性数学模型(1),考虑船舶存在模型参数不确定项、速度不可测和外界环境干扰未知的情况,在假设1-3成立的情况下,采用神经网络算法逼近模型参数不确定部分,设计参数自适应律(30)估计外界环境干扰的界值,并考虑基于低频增益学习的权值自适应律(32)和(33),在控制律(28)和(29)作用下,通过设计适当的参数k,η<sub>1</sub>,η<sub>2</sub>,λ<sub>1</sub>,λ<sub>2</sub>,γ<sub>1</sub>,γ<sub>2</sub>,Γ<sub>1</sub>,Γ<sub>2</sub>,Γ<sub>1</sub>,Γ<sub>1</sub>和滤波器时间常数T,可保证船舶跟踪控制闭环系统中轨迹跟踪误差一致最终有界.

**证** 选取如下Lyapunov函数:  

$$V = \frac{1}{2}m_{11}s_{1}^{2} + \frac{1}{2}Y^{T}Y + \frac{1}{2}m_{33}s_{2}^{2} + \frac{1}{2\gamma_{1}}\tilde{\tau}_{wu}^{*}{}^{2} + \frac{1}{2\gamma_{2}}\tilde{\tau}_{wr}^{*}{}^{2} + \frac{1}{2\Gamma_{1}}\tilde{W}_{u}^{T}\tilde{W}_{u} + \frac{1}{2\Gamma_{2}}\tilde{W}_{r}^{T}\tilde{W}_{r} + \frac{\vartheta_{1}}{2\Gamma_{f1}}\tilde{W}_{uf}^{T}\tilde{W}_{uf} + \frac{\vartheta_{2}}{2\Gamma_{f2}}\tilde{W}_{rf}^{T}\tilde{W}_{rf}, \qquad (34)$$

其中:  $\tilde{\tau}_{wu}^* = \hat{\tau}_{wu}^* - \tau_{wu}^*, \tilde{\tau}_{wr}^* = \hat{\tau}_{wr}^* - \tau_{wr}^*$ 为干扰估计 误差;  $\tilde{W}_i = \hat{W}_i - W_i^*$ 为权值估计误差;  $\tilde{W}_{uf} = \hat{W}_{uf} - W_u^*, \tilde{W}_{rf} = \hat{W}_{rf} - W_u^*$ 为低频增益误差.

对式(34)关于时间t求导可得

$$\dot{V} = m_{11}s_{1}\dot{s}_{1} + Y^{\mathrm{T}}\dot{Y} + m_{33}s_{2}\dot{s}_{2} + \frac{1}{\gamma_{1}}\tilde{\tau}_{\mathrm{wu}}^{*}\dot{\tilde{\tau}}_{\mathrm{wu}}^{*} + \frac{1}{\gamma_{2}}\tilde{\tau}_{\mathrm{wr}}^{*}\dot{\tilde{\tau}}_{\mathrm{wr}}^{*}^{2} + \frac{1}{\Gamma_{1}}\tilde{W}_{\mathrm{u}}^{\mathrm{T}}\dot{\tilde{W}}_{\mathrm{u}} + \frac{1}{\Gamma_{2}}\tilde{W}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{T}}\dot{\tilde{W}}_{\mathrm{r}} + \frac{\vartheta_{1}}{\Gamma_{\mathrm{f1}}}\tilde{W}_{\mathrm{uf}}^{\mathrm{T}}\dot{\tilde{W}}_{\mathrm{uf}} + \frac{\vartheta_{2}}{\Gamma_{\mathrm{f2}}}\tilde{W}_{\mathrm{rf}}^{\mathrm{T}}\dot{\tilde{W}}_{\mathrm{rf}}, \qquad (35)$$

对Y<sup>T</sup>Ý项根据式(22)对Y关于时间求导可得

$$\dot{Y} = \dot{X} - \dot{\alpha} = -\frac{Y}{T} + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{x}_{d}} \ddot{x}_{d} + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_{d}} \ddot{y}_{d} + \frac{\partial \alpha}{\partial x_{e}} \dot{x}_{e} + \frac{\partial \alpha}{\partial y_{e}} \dot{y}_{e} + \frac{\partial \alpha}{\partial \psi} \dot{\psi} = -\frac{Y}{T} + \beta_{1} (\dot{x}_{d}, \ddot{x}_{d}, \dot{y}_{d}, \ddot{y}_{d}, x_{e}, \dot{x}_{e}, y_{e}, \dot{y}_{e}, \psi, \dot{\psi}).$$

对于给定的正数 $B_0, \varpi_0,$ 考虑如下紧集:

$$Y^{\mathrm{T}}\dot{Y} \leqslant -\frac{Y^{\mathrm{T}}Y}{T} + \alpha_{1}Y^{\mathrm{T}}Y + \frac{N_{\mathrm{u}}^{2}}{4\alpha_{1}},\qquad(36)$$

式中 $\alpha_1$ 为正常数.

由式(32)-(33)可得如下表达式:

$$\begin{cases} \tilde{\tilde{W}}_{u} = \Gamma_{1}[-s_{1}\boldsymbol{h}_{u}(\hat{z}_{u}) - \vartheta_{1}(\tilde{W}_{u} - \tilde{W}_{uf})], \\ \tilde{\tilde{W}}_{uf} = \Gamma_{f1}(\tilde{W}_{u} - \tilde{W}_{uf}). \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{W}}_{r} = \Gamma_{2}[-s_{2}\boldsymbol{h}_{r}(\hat{z}_{r}) - \vartheta_{2}(\tilde{W}_{r} - \tilde{W}_{rf})], \\ \dot{\tilde{W}}_{rf} = \Gamma_{f1}(\tilde{W}_{r} - \tilde{W}_{rf}). \end{cases}$$
(37)

将式(23)-(24)(28)-(30)(36)-(38)代入式(35), 化简可得

$$\dot{V} \leqslant -\eta_{1}s_{1}^{2} + s_{1}W_{u}^{*T} [\boldsymbol{h}_{u}(\hat{\boldsymbol{z}}_{u}) - \boldsymbol{h}_{u}(\boldsymbol{z}_{u})] - \varsigma_{u}s_{1} - (\frac{1}{T} - \alpha_{1})Y^{T}Y + \frac{N_{u}^{2}}{4\alpha_{1}} - \eta_{2}s_{2}^{2} + s_{2}W_{r}^{*T} [\boldsymbol{h}_{r}(\hat{\boldsymbol{z}}_{r}) - \boldsymbol{h}_{r}(\boldsymbol{z}_{r})] - \varsigma_{r}s_{2} + \tau_{wu}^{*} [|s_{1}| - s_{1}\phi(s_{1})] + \tau_{wu}^{*} [|s_{2}| - s_{2}\phi(s_{2})] + \sigma_{1} (\tau_{wu}^{*} - \hat{\tau}_{wu}^{*}) (\hat{\tau}_{wu}^{*} - \tau_{wu}^{0}) + \sigma_{2} (\tau_{wr}^{*} - \hat{\tau}_{wr}^{*}) (\hat{\tau}_{wr}^{*} - \tau_{wr}^{0}).$$
(39)

根据文献[20],有

$$\boldsymbol{h}_i(\hat{\boldsymbol{z}}_i) - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{z}_i) = \bar{\iota}\boldsymbol{h}_i, \qquad (40)$$

其中:  $\bar{\iota} > 0$ ,  $h_i$ 为有界向量函数, 下标i表示u, r.

应用文献[21]中的引理, 对于任意的 $\xi_i > 0, \varpi_i \in \mathbb{R},$ i = 1, 2, 有

$$0 \leq |\varpi_i| - \varpi_i \phi(\varpi_i) = |\varpi_i| - \tanh(\frac{\varpi_i}{\xi_i}) \leq 0.2785\xi_i,$$
(41)

则式(39)可表示为

$$\dot{V} \leqslant -\eta_{1} s_{1}^{2} + \bar{\iota} s_{1} W_{u}^{*T} h_{u} - (\frac{1}{T} - \alpha_{1}) Y^{T} Y - \eta_{2} s_{2}^{2} + \bar{\iota} s_{2} W_{r}^{*T} h_{u} - \varsigma_{u} s_{1} - \varsigma_{r} s_{2} + \frac{N_{u}^{2}}{4\alpha_{1}} + 0.2785 \xi_{1} \tau_{wu}^{*} + 0.2785 \xi_{2} \tau_{wr}^{*} + \sigma_{1} (\tau_{wu}^{*} - \hat{\tau}_{wu}^{*}) (\hat{\tau}_{wu}^{*} - \tau_{wu}^{0}) + \sigma_{2} (\tau_{wr}^{*} - \hat{\tau}_{wr}^{*}) (\hat{\tau}_{wr}^{*} - \tau_{wr}^{0}).$$
(42)

考虑如下不等式:

$$-\varsigma_{u}s_{1} \leqslant \frac{s_{1}^{2}}{2} + \frac{\varsigma_{u}^{2}}{2} \leqslant \frac{s_{1}^{2}}{2} + \frac{\varsigma_{U}^{2}}{2}, \qquad (43)$$

$$\bar{\iota}s_1 W_{\mathrm{u}}^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{h}_{\mathrm{u}} \leqslant \frac{s_1^2}{2} + \frac{\bar{\iota}^2 W_{\mathrm{U}}^2 \|\boldsymbol{h}_{\mathrm{u}}\|^2}{2},$$
 (44)

$$(\hat{\tau}_{wu}^{*} - \tau_{wu}^{*}) (\hat{\tau}_{wu}^{*} - \tau_{wu}^{0}) \leqslant -\frac{1}{2} (\hat{\tau}_{wu}^{*} - \tau_{wu}^{*})^{2} + \frac{1}{2} (\tau_{wu}^{*} - \tau_{wu}^{0})^{2},$$
 (45)

同理,

$$\varsigma_{\rm r} s_2 \leqslant \frac{s_2^2}{2} + \frac{\varsigma_{\rm r}^2}{2} \leqslant \frac{s_2^2}{2} + \frac{\varsigma_{\rm R}^2}{2},$$
(46)

$$\bar{\iota}s_{2}W_{r}^{*T}\boldsymbol{h}_{r} \leqslant \frac{s_{2}^{2}}{2} + \frac{\bar{\iota}^{2}W_{R}^{2}\|\boldsymbol{h}_{r}\|^{2}}{2}, \qquad (47)$$

$$(\boldsymbol{\tau}^{*} - \boldsymbol{\hat{\tau}}^{*})(\boldsymbol{\hat{\tau}}^{*} - \boldsymbol{\tau}^{0}) \leqslant$$

$$(\tau_{\rm wr} - \tau_{\rm wr}) (\tau_{\rm wr} - \tau_{\rm wr}) \leqslant - \frac{1}{2} (\hat{\tau}_{\rm wr}^* - \tau_{\rm wr}^*)^2 + \frac{1}{2} (\tau_{\rm wr}^* - \tau_{\rm wr}^0)^2.$$
 (48)

将以上各式代入到式(42)可得

$$V \leqslant -(\eta_{1}-1) s_{1}^{2} - (\eta_{2}-1) s_{2}^{2} - (\frac{1}{T} - \alpha_{1}) Y^{\mathrm{T}} Y - \frac{\sigma_{1}}{2} (\hat{\tau}_{\mathrm{wu}}^{*} - \tau_{\mathrm{wu}}^{*})^{2} - \frac{\sigma_{2}}{2} (\hat{\tau}_{\mathrm{wr}}^{*} - \tau_{\mathrm{wr}}^{*})^{2} + \frac{\varsigma_{\mathrm{U}}^{2}}{2} + \frac{\varsigma_{\mathrm{R}}^{2}}{2} + 0.2785 \xi_{1} \tau_{\mathrm{wu}}^{*} + 0.2785 \xi_{2} \tau_{\mathrm{wr}}^{*} + \frac{N_{u}^{2}}{4\alpha_{1}} + \frac{\sigma_{1}}{2} (\tau_{\mathrm{wu}}^{*} - \tau_{\mathrm{wu}}^{0})^{2} + \frac{\sigma_{2}}{2} (\tau_{\mathrm{wr}}^{*} - \tau_{\mathrm{wr}}^{0})^{2} + \frac{\bar{\iota}^{2} W_{\mathrm{U}}^{2} \|\boldsymbol{h}_{1}\|^{2}}{2} + \frac{\bar{\iota}^{2} W_{\mathrm{R}}^{2} \|\boldsymbol{h}_{2}\|^{2}}{2} \leqslant -\mu (s_{1}^{2} + s_{2}^{2} + Y^{\mathrm{T}} Y + \tilde{\tau}_{\mathrm{wu}}^{*2} + \tilde{\tau}_{\mathrm{wr}}^{*2}) + C, \quad (49)$$

其中:

$$\mu = \min\{2(\eta_1 - 1), 2(\frac{1}{T} - \alpha_1), 2(\eta_2 - 1), \sigma_1, \sigma_2, \},$$
(50)  

$$C = \frac{\varsigma_{\rm U}^2}{2} + \frac{\varsigma_{\rm R}^2}{2} + 0.2785\xi_1\tau_{\rm wu}^* + 0.2785\xi_2\tau_{\rm wr}^* + \frac{\sigma_1}{2}(\tau_{\rm wu}^* - \tau_{\rm wr}^0)^2 + \frac{\sigma_2}{2}(\tau_{\rm wr}^* - \tau_{\rm wr}^0)^2 + \frac{N_{\rm u}^2}{4\alpha_1} + \frac{\tau^2 W_{\rm c}^2 \|\boldsymbol{h}_1\|^2}{\tau^2 W_{\rm c}^2 \|\boldsymbol{h}_2\|^2} = \tau^2 W_{\rm c}^2 \|\boldsymbol{h}_2\|^2$$

$$\frac{\bar{\iota}^2 W_{\rm U}^2 \|\boldsymbol{h}_1\|^2}{2} + \frac{\bar{\iota}^2 W_{\rm R}^2 \|\boldsymbol{h}_2\|^2}{2}.$$
 (51)

选取如下参数:

$$\eta_1 - 1 > 0,$$
 (52)

$$\eta_2 - 1 > 0, \tag{53}$$

$$\frac{1}{T} - \alpha_1 > 0, \tag{54}$$

由式(49)可得, 当 $|s_1|$ ,  $|s_2|$ ,  $|\tilde{\tau}^*_{wu}|$ ,  $|\tilde{\tau}^*_{wr}|$ , ||Y|| 任意一项 大于 $\sqrt{C/\mu}$ 时, 可得 $\dot{V}(t) < 0$ , 系统稳定, 所以船舶闭 环系统中的信号 $s_1, s_2, \tilde{\tau}^*_{wu}, \tilde{\tau}^*_{wr}, Y$  一致最终有界(界 值为 $\sqrt{C/\mu}$ ), 进而可知 $u_e$ 和 $v_e$ 也是有界的, 再由式(16) 可保证船舶轨迹跟踪误差一致最终有界. 证毕.

#### 6 仿真研究

为了验证本文所设计的基于扩张观测器的欠驱动

船舶轨迹跟踪低频学习自适应动态面输出反馈控制 律的有效性,以新加坡海关的一艘名为"BAY CLA-SS"号远程巡逻船R<sup>[22]</sup>为研究对象,进行仿真实验. 该船长为38 m,质量为 $m = 118 \times 10^3$  kg,其他的参 数如下:  $m_{11} = 120 \times 10^3$  kg,  $m_{22} = 177.9 \times 10^9$  kg,  $m_{33} = 636 \times 10^5$  kg,  $d_{11} = 215 \times 10^2$  kg/s,  $d_{22} =$ 147 × 10<sup>3</sup> kg/s,  $d_{33} = 802 \times 10^4$  kg/s. 为模拟风浪干 扰, 仿真过程中加入文献[23]的扰动模型.

设定参考轨迹为

 $x_{\rm d} = 300\sin(0.03t), y_{\rm d} = 300\cos(0.03t),$ 

期望轨迹的起始点为 $(x_{d0}, y_{d0}) = (300, 0)$ ,选取船舶 的初始位置为x(0) = 0 m, y(0) = 0 m,  $\psi(0) = 0$  rad, u(0) = 0 m/s, v(0) = 0 m/s, r(0) = 0.3 rad/s. 控制参 数选取为

$$\begin{split} k &= 2.0, \ \lambda_1 = 1, \ \lambda_2 = 1, \ \eta_1 = 1 \times 10^2, \\ \eta_2 &= 1 \times 10^3, \ \gamma_1 = 2 \times 10^4, \ \gamma_2 = 5 \times 10^4, \\ \sigma_1 &= 3 \times 10^{(-9)}, \ \sigma_2 = 7 \times 10^{(-9)}, \ \xi_1 = 0.1, \\ \xi_2 &= 0.1, \ \Gamma_1 = 2 \times 10^5, \ \Gamma_2 = 1 \times 10^7, \\ \vartheta_1 &= 1 \times 10^{(-6)}, \ \vartheta_2 = 1 \times 10^{(-7)}, \\ \Gamma_1 &= 0.15, \ \Gamma_2 = 0.05. \end{split}$$

浪的有义波高h = 2.75 m, 遭遇频率 $\omega_e = 0.65$  Hz.

本文对船舶轨迹跟踪欠驱动控制律的分步设计思路与文献[6]类似,在相同海况下,将本文设计的低频 学习自适应动态面控制算法与文献[6]的滑模算法对船舶轨迹跟踪状况进行比较,仿真结果如图1–2所示. 图1为xy—平面内的参考轨迹和2种算法作用下的欠驱动船舶实际轨迹,由于参考轨迹的起始位置为( $x_{do}$ ,  $y_{do}$ ) = (300,0),与船舶实际轨迹的初始位置( $x_0, y_0$ ) = (0,0)距离较远,经过一段时间调节后2个控制律控制下的船舶都可沿参考轨迹航行,但本文设计的控制 算法相较与滑模算法跟踪速度更快.图2给出了分别 采用2种控制律的船舶轨迹跟踪的位置误差收敛曲线, 其中位置误差的计算公式

$$\eta_{\rm e} = \sqrt{(x - x_{\rm d})^2 + (y - y_{\rm d})^2},$$

可知本文算法大约在140 s可以使船舶跟踪上期望位置,而滑模算法则在180 s才能跟踪上参考轨迹,且本 文的位置跟踪误差小于滑模算法.为了更加清晰的看 出各曲线变化情况,图3-6仅给出前100 s的仿真曲线, 图3为船舶前进速度u,横漂速度v,艏摇角速度r及观 测器估计曲线.图4为船舶复合干扰以及扩张观测器 估计值变化曲线.从图3-4可以看出本文设计的扩张 观测器能够有效地估计船舶系统的各速度分量和复 合干扰,具有较高的观测精度和较强的抗干扰能力. 图5为船舶的外部环境干扰 $\tau_{wu}^*$ , $\tau_{wr}^*$ 以及其界估计值  $\hat{\tau}_{wu}^*$ , $\hat{\tau}_{wr}^*$ ,历时曲线,可见选取适当的自适应参数能够 有效地对外部环境干扰的界值进行实时估计.



图 1 xy-平面内船舶实际轨迹和参考轨迹(圆轨迹)





图 2 船舶轨迹跟踪的位置误差收敛曲线(圆轨迹)

Fig. 2 Position tracking errors of ship (round track)



- 图 3 船舶前进速度u、横漂速度v、艏摇角速度r及观测器估 计值历时曲线(圆轨迹)
- Fig. 3 Curves of surge velocity u, sway velocity v, yaw rate r and observer estimation versus time (round track)



874

图 4 船舶的复合干扰及观测器估计值历时曲线(圆轨迹)

Fig. 4 Curves of compound disturbance and observer estimation versus time (round track)





Fig. 5 Curves of the bounds of external environment disturbances, and their bounds of estimations, verse time with proposed controller (round track)

图6为加入低频学习前后的控制器输出变化曲线, 由控制器输出曲线可知加入低频增益学习技术后的 输出曲线较加入低频学习前平滑,更加符合船舶工程 实践的要求.







Fig. 6 Curves of controller outputs before and after lowfrequency learning versus time (round track)

为进一步验证本文算法的有效性,本文选取梳形 轨迹(直线和半圆)进行控制跟踪,初始点位置坐标 为(-300 m, 0 m),仿真结果如图7-9所示.其中:图7 为船舶的参考轨迹和实际轨迹曲线图,从仿真图可以 看出本文所设计的控制器可以快速跟踪直线和圆的 梳形轨迹,且控制精度高;图8为船舶前进速度u、横 漂速度v、艏摇角速度r及观测器估计曲线;图9为加 入低频学习前后的控制器输出变化曲线.仿真结果表 明本文设计的控制律引入低频学习技术在一定程度 上降低了外界因素引起控制信号产生高频振荡的可 能,并且对模型参数不确定和未知外界环境干扰具有 较强的鲁棒性.



图 7 xy-平面内船舶实际轨迹和参考轨迹(梳形轨迹)







图 8 船舶前进速度u、横漂速度v、艏摇角速度r及观测器估 计值历时曲线(梳形轨迹)

Fig. 8 Curves of surge velocity u, sway velocity v, yaw rate r and observer estimation versus time (the combshaped)





Fig. 9 Curves of controller outputs before and after lowfrequency learning versus time (the combshaped)

## 7 结论

针对速度不可测的欠驱动船舶轨迹跟踪控制问题, 考虑船舶存在模型参数不确定和未知外界环境干扰 的情况,提出了一种基于扩张观测器的欠驱动船舶轨 迹跟踪低频学习自适应动态面输出反馈控制方法.通 过构造扩张观测器估计船舶系统的速度向量和复合 干扰,采用神经网络算法逼近模型参数不确定部分, 设计带有σ-修正项的参数自适应律估计未知外界干 扰的界值,降低了文献[6]中模型参数不确定项和外界 干扰均己知界的局限性,并引入动态面控制技术避免 了对虚拟控制量直接求导,再与低频学习技术相结合, 消除了由于外界因素影响导致控制信号产生高频振 荡的现象,对模型参数不确定和未知外界干扰具有较 强的鲁棒性,可为工程应用提供有效的理论指导和实 践参考.

### 参考文献:

 XIANG X B, XU G H. Suvery on control of underactuated ships: point stabilization and path tracking. *Chinese Control Conference*. Hefei, China: IEEE, 2012: 4312 – 4317.

- [2] BREIVIK M V E, HOVSTEIN, FOSSSEN T I. Straight-Line target tracking for unmanned surface vehicles modeling. *Identification and Control*, 2018, 29(4): 131 – 149.
- [3] DONG Zaopeng, WAN Lei, LI Yueming, et al. Block backstepping stabilization control of underactuated USV in polar coordinate system. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, 15(4): 61 – 68.

(董早鹏,万磊,李岳明,等.极坐标系下的欠驱动无人艇分块反步镇定控制.交通运输工程学报,2015,15(4):61-68.)

- [4] SHEN Zhipeng, WANG Ru. Adaptive sliding mode trajectory tracking control of underactuated ship based on DSC-MLP. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(3): 643 651.
  (沈智鹏, 王茹. 基于DSC和MLP的欠驱动船舶自适应滑模轨迹跟踪控制. 系统工程与电子技术, 2018, 40(3): 643 651.)
- [5] YU R T, ZHU Q D, XIA G H, et al. Sliding mode tracking control of an underactuated surface vessel. *Iet Control Theory & Applications*, 2012, 6(3): 461 – 466.
- [6] ZHU Qidan, YU Ruiting, XIA Guihua, et al. Sliding-mode robust tracking control for underactuated surface vessels. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(7): 959 964.
  (朱齐丹,于瑞亭,夏桂华,等.风浪流干扰及参数不确定欠驱动船舶 航迹跟踪的滑模鲁棒控制. 控制理论与应用, 2012, 29(7): 959 964.)
- [7] BIDIKLI B, TATLICIOGLU E, ZERGEROGLU E. Observer based output feedback tracking control of dynamically positioned surface vessels. *American Control Conference*. Washington, DC, USA: IEEE, 2013: 554 – 559.
- [8] DU Jialu, YANG Yang, GUO Chen, et al. Output feedback control for dynamic positioning system of a ship based on a high gain observer. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(11): 1486 – 1491. (杜佳璐, 杨杨, 郭晨, 等. 基于高增益观测器的船舶动力定位系统的 输出反馈控制. 控制理论与应用, 2013, 30(11): 1486 – 1491.)
- [9] WONDERGEM M, LEFEBER E, PETTERSEN K Y, et al. Output feedback tracking of ships. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(2): 442 – 448.
- [10] SUN Guofa, TIAN Yu, WANG Suzhen. Adaptive neural output feedback control for strict feedback nonlinear system. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(3): 375 382.
  (孙国法,田宇,王素珍.严格反馈非线性系统的自适应神经网络输出反馈控制. 控制理论与应用, 2017, 34(3): 375 382.)
- [11] QIAN Y Z, FANG Y C, LU B. Adaptive repetitive learning control for an offshore boom crane. *Automatica*, 2017, 82: 21 – 28.
- [12] QIAN Y Z, FANG Y C. Dynamics analysis of an offshore shipmounted crane subject to sea wave disturbances. *Proceedings of 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*. Guilin, China: IEEE, 2016: 1251 – 1256.
- [13] FU M Y, YU L L, LI M Y, et al. Nonlinear extended state observer for path following control of underactuated marine surface vessel. *IEEE Chinese Control Conference*. Hangzhou, China: IEEE, 2015: 453 – 458.
- [14] LIU Xiaodong. Multi-variable linear extended state observer for a class of nonlinear systems and its convergence analysis. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(11): 1758 1764.
  (刘晓东. 针对一类非线性系统的多变量线性扩张状态观测器及其收敛性分析. 自动化学报, 2016, 42(11): 1758 1764.)
- [15] YUCELEN T, HADDAD W M. Low-frequency learning and fast adaptation in model reference adaptive control. *IEEE Transactions* on Automatic Control, 2013, 58(4): 1080 – 1085.
- [16] WANG H, WANG D, PENG Z H. Adaptive dynamic surface control for cooperative path following of underactuated marine surface vehicles via fast learning. *IET Control Theory & Applications*, 2013, 7(15): 1888 – 1898.

- [17] 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. *ISA Transactions*, 2015, 56: 75 – 85.
- [18] YANG Y, DU J L, LIU H, et al. A trajectory tracking robust controller of surface vessels with disturbance uncertainties. *IEEE Transactions* on Control Systems Technology, 2014, 22(4): 1511 – 1518.
- [19] ZHANG T, GE S S, HANG C C. Adaptive neural network control for strict-feedback nonlinear systems using backstepping design. *Automatica*, 2000, 36(12): 1835 – 1846.
- [20] POLYCARPOU M M. Fault accommodation of a class of multivariable nonlinear dynamical systems using a learning approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(5): 736 – 742.
- [21] DO K D, JIANG Z P, PAN J. Robust adaptive path following of underactuated ships. *Automatica*, 2004, 40(6): 929 – 944.
- [22] SHEN ZhiPeng, DAI Changsheng. Iterative sliding mode control based on reinforced learning and used for path tracking of under-

actuated ship. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(5): 697 – 704.

(沈智鹏,代昌盛. 欠驱动船舶路径跟踪的强化学习迭代滑模控制. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(5): 697 – 704.)

作者简介:

**沈智鹏** 博士, 教授, 目前研究方向为载运工具系统非线性控制理 论与应用, E-mail: shenbert@dlmu.edu.cn;

**邹天宇**硕士研究生,目前研究方向为船舶运动非线性控制理论, E-mail: 3331204591@qq.com;

王 茹 硕士研究生,目前研究方向为船舶运动非线性控制理论,

E-mail: 453867844@qq.com.