

波浪作用下船舶航向自抗扰控制设计及参数配置

李荣辉[†], 曹峻海, 李铁山

(大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对具有内部参数不确定性和外部扰动的海上船舶设计了航向自抗扰控制器, 并解决了舵机模型中舵角的限幅和限速问题, 基于滑模控制理论提出了反馈控制带宽的计算方法. 采用频域分析的方法, 系统地分析了自抗扰控制器对外部波浪扰动的抑制能力、模型参数不确定时的鲁棒性; 结合作者实船工作经验以及系统动态特性与控制参数的关系, 提出了船舶航向控制器参数的配置规律; 最后以一艘 57000 吨级散货船为控制对象, 验证了航向控制器的鲁棒性和本文所述参数配置规律的有效性. 为将自抗扰控制算法应用于船舶自动舵设计提供理论依据和实践参考.

关键词: 自抗扰控制; 船舶航向; 扩张状态观测器; 参数配置; 带宽

引用格式: 李荣辉, 曹峻海, 李铁山. 波浪作用下船舶航向自抗扰控制设计及参数配置. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 1601 – 1609

中图分类号: TP13 文献标识码: A

Active disturbance rejection control design and parameters configuration for ship steering with wave disturbance

LI Rong-hui[†], CAO Jun-hai, LI Tie-shan

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

Abstract: A novel active disturbance rejection controller (ADRC) of ship steering control is designed under the internal parameter uncertainties and external disturbances. Based on the sliding mode theory, a method to calculate the feedback control bandwidth is proposed and the limitation of rudder amplitude and rate is also resolved. The performance of the wave-rejection of the proposed controller is analyzed systematically in frequency domain, as well as the robustness to the model uncertainties. Taking the personal experience as a caption into consideration, the parameters configuration strategy of the ship steering controller is proposed, based on relationship between the system dynamic characteristics and controller parameters. Extensive simulation experiments are conducted on a 57,000t bulk carrier to validate the efficiency of the proposed controller and the parameter configuration. So as to provide the theoretical basis and the practical reference for the ship autopilot control design.

Key words: active disturbance rejection control; ship steering; extended state observer; parameter configuration; bandwidth

Citation: LI Ronghui, CAO Junhai, LI Tieshan. Active disturbance rejection control design and parameters configuration for ship steering with wave disturbance. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(11): 1601 – 1609

1 引言(Introduction)

目前, 海上船舶正朝着高速化、大型化、自动化和无人化的方向发展. 航行于海上的船舶受到风、浪、流等复杂外界干扰和船舶本身不确定复杂要素(如吃水、装载状态、船速、水线下船体形状等)的影响, 使船舶航向控制成为一个具有挑战性的问题. 船舶航向控制是解决很多船舶自动控制问题(如动力定位、船舶航迹控制及自动避碰等)的基础, 也是实现船舶无人

化关键环节.

众所周知, 1922年PID控制算法是针对船舶的航向控制问题被提出并被首次应用的, 直到现在大部分船舶所配装的航向保持自动舵依然以PID算法为主, 但PID控制器表现出对不断变化的船舶动态特性和航行环境的适应性不强, 针对因高频海浪而操舵次数过多的问题采取的“死区”非线性控制方法, 会导致周期性偏航、船舶航行阻力增大、推进能耗增加等问题.

收稿日期: 2018-04-30; 录用日期: 2018-09-27.

[†]通信作者. E-mail: lironghui@163.com; Tel.: +86 411-84724461.

本文责任编辑: 苏剑波.

国家自然科学基金项目(51379026, 61751202)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51379026, 61751202).

随着自动舵技术的发展和控制理论研究的不断深入,很多新型控制理论如自适应控制^[1]、自校正控制^[2]、优化控制^[3]、神经网络控制^[4]、模糊逻辑控制^[5]、滑模控制^[6]等不断被引入到航向控制的设计中,但这些方法通常对被控对象的数学模型精度要求比较高,需要内部不确定和外部扰动的先验信息,在工程实现上存在较大难度.不断探索精度更高、抗扰性能更强、算法相对容易实现的船舶航向控制算法是控制界和航海界共同奋斗的目标.

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)的思想和方法由韩京清先生于20世纪80-90年代提出,其核心思想是将系统的外部扰动和内部未建模动态合在一起看成总扰动,然后对总扰动进行实时估计和补偿^[7-8].文献[9]利用带宽概念将自抗扰控制器线性化,将非线性自抗扰简化为线性自抗扰(linear ADRC, LADRC)形式并且实现了参数化,克服了非线性ADRC调参难的瓶颈.近年来,ADRC的理论研究和实际应用成果日益增加.文献[11]分析了受控对象模型动态大范围未知情况下线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)的收敛性.文献[12]分析了典型二阶系统LADRC的稳定性与参数选取的关系,并给出了典型系统的稳定域;文献[13]将LESO对不确定动态的估计收敛性推广到了不连续情形;文献[14]从频域分析方法入手,分析了LESO的跟踪估计能力和ADRC的稳定性、对外部扰动的抑制能力和模型参数不确定性的鲁棒性及其噪声传递特性. ADRC已经实际应用于Parker Hannifin高分子材料挤压生产线、美国德州仪器的运动控制芯片及机器人产品中.

目前已经有学者将自抗扰控制算法应用于海上船舶航向或航迹控制.文献[15]将自抗扰控制器与Smith预测器结合,解决了在不确定时滞下的船舶航向控制问题.本文作者在文献[16]中将ADRC与滑模理论结合,设计了考虑风、流干扰的路径跟踪控制器.文献[17]针对货船设计了航向控制器,其将舵机特性部分作为总扰动的一部分处理.但目前ADRC在船舶航向控制上应用的研究主要采用时域分析方法,且大都未对系统的动态响应特性进行理论分析,也未结合波浪谱分析LADRC对波浪的抑制能力,而事实上波浪是影响控制器效果的重要因素.

为此,本文首先针对考虑舵机特性和波浪干扰的船舶航向系统,基于LADRC算法设计船舶航向控制器,并解决舵角限幅和限速问题,提出应用滑模控制理论计算ADRC控制带宽的方法;然后基于闭环传递函数和频带特性曲线,分析LADRC对外部波浪干扰的动态抑制能力、模型参数大范围变化时的鲁棒性,据此提出航向LADRC控制器的参数配置规律;最后进行了实船仿真验证.

2 船舶航向响应模型及海浪模型(Ship steering model and sea wave model)

2.1 船舶航向与舵机模型(Ship steering model and rudder model)

在船舶航向自动舵设计中,通常采用的线性转首响应方程,即野本(Nomoto)方程为

$$G(s) = \frac{\varphi(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{s(1+sT)}. \quad (1)$$

其时域内的方程形式为

$$T\ddot{\varphi} + \dot{\varphi} = K\delta. \quad (2)$$

考虑外部干扰的时域内方程可以表示为

$$\ddot{\varphi} = -\frac{1}{T}\dot{\varphi} + w(t) + \frac{K}{T}\delta, \quad (3)$$

式中: φ 为船首向角; $r = \dot{\varphi}$ 为船舶转首角速度; δ 为控制舵角; K 和 T 为船舶操纵性指数,即分别为旋回性指数和追随性指数,其大小与船长、船宽、吃水、排水体积、水线下方形系数、舵叶浸水面积、船速和船舶重心位置等因素有关,具体计算方法见文献[18].

考虑到船舶舵机伺服系统的延迟、饱和、滞后、死区等非线性特性对船舶航向控制系统的影响,一般情况下,舵机系统可以用一阶惯性模型^[18]描述为

$$\frac{\delta}{\delta_r} = \frac{1}{T_E s + 1}, \quad (4)$$

该惯性模型时域内可表述为

$$T_E \dot{\delta} = \delta_r - \delta, \quad (5)$$

式中: T_E 为舵机时间常数,一般约为2.5 s; δ_r 为命令舵角; δ 为实际舵角或称为控制舵角,通常 $|\delta| \leq 35^\circ$ 为舵角的机械限幅,该限幅是舵机能够达到的最大机械舵角; $|\dot{\delta}| \leq 3 \sim 6(^{\circ})/s$ 为舵角的限速.

2.2 海浪模型(Sea wave model)

为研究自抗扰控制算法中的线性扩张状态观测器和控制器对海浪的抑制能力,本小节介绍海浪模型,计算得到浪高与海浪峰值频率对应表,并给出不同波高对应的波浪谱.实际的海面波浪所呈现出高度不规则且大量随机性的特点,所以通常被处理为随机过程,可以用随机海浪谱来描述海浪内部能量在各个波浪单元的分布及其内在分布特征.现在常用的海浪谱有PM谱、Bretschneider谱、ITTC单参数谱、ITTC双参数谱及JONSWAP谱等. PM谱用于描述充分成长的风生成的海浪^[19],其在船舶工程中广泛采用,表达式为

$$S(\omega) = A\omega^{-5}\exp(-B\omega^{-4}), \quad (6)$$

其中: ω 是海浪频率, $A = 8.1 \times 10^{-3}g^2$, $B = 0.74(g/V_{19.4})^4 = 3.11/H_s^2$, g 是重力加速度, H_s 表示浪高, $V_{19.4}$ 表示海平面以上19.4 m高度处的风速, H_s 与 $V_{19.4}$

的关系可以表示为

$$H_s = \frac{2.06}{g^2} V_{19.4}^2 \quad (7)$$

一阶海浪干扰力作用在船上体现为与波高成线性关系且同频的波浪力, 其线性化近似响应为

$$\frac{y(s)}{w(s)} = h(s) = \frac{K_w s}{s^2 + 2\lambda\omega_p s + \omega_p^2}, \quad (8)$$

式中: $y(s)$ 为波浪运动, $w(s)$ 为零均值高斯白噪声, K_w 为增益, λ 是阻尼系数, ω_p 为海浪峰值频率, 其计算表达式为

$$\omega_p = \sqrt[4]{\frac{4B}{5}}. \quad (9)$$

根据式(6)和式(9)计算得到对应不同浪高的峰值频率, 如表1所示.

表 1 浪高与峰值频率对应表

Table 1 Wave height vs. peak frequency

$V_{19.4}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	11.8	13.7	15.3	16.7	18.1
H_s/m	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
$\omega_p/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.725	0.628	0.562	0.513	0.475

定义状态变量 $\dot{x}_{w1} = x_{w2}$, $x_{w2} = y_w$, 将式(8)写成状态空间表达式的形式为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{w1} \\ \dot{x}_{w2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_p^2 & -2\lambda\omega_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{w1} \\ x_{w2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_w \end{bmatrix} w, \quad (10)$$

$$y_w = [0 \ 1] \begin{bmatrix} x_{w1} \\ x_{w2} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中: x_{w1} 和 x_{w2} 为波浪运动状态, w 为零均值高斯白噪声.

根据式(6)和表1, 可以得到不同浪高时对应的波浪谱如图1所示. 由图1可以直观地看出波浪谱的频率分布.

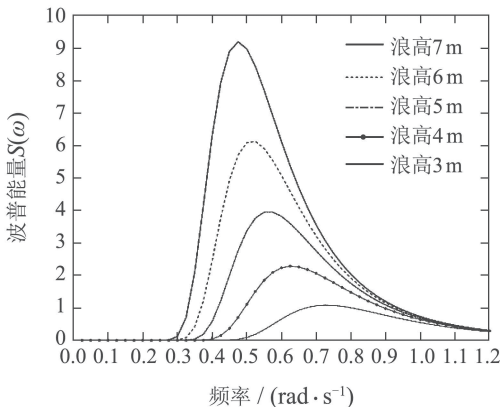


图 1 不同浪高对应的波浪谱

Fig. 1 Spectrum corresponding different wave height

3 船舶航向控制设计 (The ship steering control design)

为更具一般性, 存在海浪等外部扰动和模型参数不确定的船舶航向系统非线性数学模型可以写成

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = r, \\ \dot{r} = f(r) + w(t) + b\delta, \end{cases} \quad (12)$$

其中: b 为控制增益, $f(r)$ 为系统的内部不确定性动态, $w(t)$ 为外部扰动, 控制目标为船首向 φ 跟踪期望值 φ_d .

二阶船舶航向系统式(12)与一阶舵机系统式(5)构成三阶系统. 通常商船的时间常数为几十秒至几百秒, 舵机的时间常数约为2.5 s, 舵机时间常数相对于船舶来说很小, 所以本文在船舶航向控制设计时首先忽略舵机影响, 针对二阶航向系统采用ADRC算法设计中间控制律并将其作为舵机系统的期望舵角 δ_d ; 然后针对舵机系统, 设计最终控制律得到命令舵角 δ_r 使实际舵角 δ 跟踪期望舵角 δ_d , 本文控制设计总体结构如图2所示.

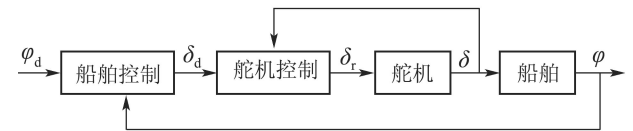


图 2 船舶航向控制设计总体结构

Fig. 2 The general structural diagram of ship steering control design

3.1 船舶航向自抗扰控制设计 (The ship steering ADRC design)

本小节针对式(12), 应用LADRC算法设计船舶航向系统的控制律并将其作为舵机系统的期望舵角 δ_d , 控制系统结构如图3所示, 图中 G_p 表示船舶与舵机控制系统的模型.

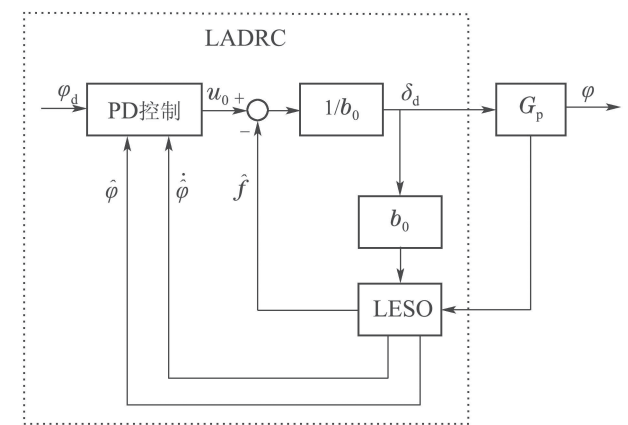


图 3 船舶航向自抗扰控制系统结构图

Fig. 3 The structural diagram of the ship steering ADRC control

针对式(12), 取 $b_0 \approx b$, b_0 为控制增益的估计值, 其可作为控制器参数, 再取 $f = f(r) + w(t) + (b - b_0)\delta$

作为系统的总扰动,若 f 有界或 \dot{f} 有界,式(12)可以写成

$$\ddot{\varphi} = f + b_0\delta. \quad (13)$$

根据LADRC理论^[10],系统(13)的LESO表示为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\varphi}}_1 = \hat{\varphi}_2 - l_1(\hat{\varphi}_1 - \varphi), \\ \dot{\hat{\varphi}}_2 = \hat{f} - l_2(\hat{\varphi}_1 - \varphi) + b_0\delta, \\ \dot{\hat{f}} = -l_3(\hat{\varphi}_1 - \varphi), \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\hat{\varphi}_1 \rightarrow \varphi$, $\hat{\varphi}_2 \rightarrow \dot{\varphi}$, $\hat{f} \rightarrow f$; l_1, l_2, l_3 为观测器增益. 根据文献[11]分析结论,当系统中 f 有界且受控对象模型动态大范围未知,LESO对不确定性的估计具有收敛性;文献[13]将LESO对不确定动态的估计收敛性推广到了不连续情形,即仅需满足 f 有界或 \dot{f} 有界. LESO能实现对系统中各状态变量的实时跟踪.

为调参方便,将观测器的极点配置在 $-\omega_o$ 处^[9],其特征方程为

$$\lambda_0(s) = s^3 + l_1s^2 + l_2s + l_3 = (s + \omega_o)^3, \quad (15)$$

式中: ω_o 为观测带宽, $l_1 = 3\omega_o$, $l_2 = 3\omega_o^2$, $l_3 = \omega_o^3$.

取航向控制系统的控制律作为舵机系统的期望舵角 δ_d 为

$$\delta_d = \frac{-k_p(\hat{\varphi}_1 - \varphi_d) - k_d(\hat{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_d) + \ddot{\varphi}_d - \hat{f}}{b_0}, \quad (16)$$

其中: φ_d 为期望船首向角; $\delta_d \rightarrow \delta$.

忽略 \hat{f} 对 f 的估计误差,若控制舵角 $\delta = \delta_d$,代入二阶控制系统(12),又由于 $\dot{\hat{\varphi}}_2 = \dot{\hat{\varphi}}_1$,得到

$$\ddot{\varphi} = -k_p(\hat{\varphi}_1 - \varphi_d) - k_d(\dot{\hat{\varphi}}_1 - \dot{\varphi}_d) + \ddot{\varphi}_d, \quad (17)$$

令 $\varphi_e = \varphi - \varphi_d$ 及 $\dot{\varphi}_e = \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_d$,则式(17)可以写成

$$\ddot{\varphi}_e = -k_p\hat{\varphi}_e - k_d\dot{\hat{\varphi}}_e. \quad (18)$$

选择控制增益的参数 k_p 和 k_d 使 $s^2 + k_d s + k_p$ 满足Hurwitz条件,则当 $t \rightarrow +\infty$ 时, $\varphi_e(t) \rightarrow 0$,系统(18)显然是稳定的. 令

$$u_0 = -k_p\hat{\varphi}_e - k_d\dot{\hat{\varphi}}_e. \quad (19)$$

显然,式(19)为PD反馈控制律的标准形式. 按文献[9-11],可以令 $s^2 + k_d s + k_p = (s + \omega_c)^2$,则取 $k_p = \omega_c^2$, $k_d = 2\omega_c$,其中 ω_c 为控制带宽.

根据文献[11,20]的分析结论,调节LESO的带宽 ω_o 和控制带宽 ω_c ,可使闭环系统(12)(14)和(16)具有收敛性,在整个动态过程中其动态特性逼近参考系统的动态过程,且LESO的估计误差在短时间内可收敛到小量. 因为系统(14)和(16)不依赖对象的具体模型信息,因此,ADRC结构简单,控制参数仅为控制带宽及观测带宽,控制带宽可以调节参考轨迹的收敛特性,观测带宽调节闭环系统对参考轨迹的跟踪精度^[21].

3.2 滑模反馈控制律及舵幅限制 (Sliding mode feed back control law and rudder angle amplitude limitation)

本小节应用线性滑模理论阐述确定误差反馈控制律的控制带宽 ω_c 的方法. 取 $k_p = \omega_c^2$, $k_d = 2\omega_c$,另外忽略 $\hat{\varphi}_e$ 对 φ_e 的估计误差,用 φ_e 替换 $\hat{\varphi}_e$,式(19)可写成

$$u_0 = -2\omega_c\left(\frac{\omega_c}{2}\varphi_e + \dot{\varphi}_e\right). \quad (20)$$

定义变量

$$\sigma = \frac{\omega_c}{2}\varphi_e + \dot{\varphi}_e. \quad (21)$$

令 $\sigma = 0$,解得

$$\varphi_e(t) = c \cdot \exp\left(-\frac{\omega_c}{2}t\right), \quad (22)$$

其中 c 为常数. 显然, $\varphi_e(t)$ 以指数规律收敛于零,时间常数 $T_1 = 2/\omega_c$. 因此, σ 可以看作是 φ_e 和 $\dot{\varphi}_e$ 相平面上的相轨迹,系统(18)的镇定控制等价于对 σ 的镇定控制. 设初始船首向为 φ_0 ,又由于期望船首向为 φ_d ,则有

$$\varphi(t) = \varphi_d - (\varphi_d - \varphi_0)\exp\left(-\frac{t}{T_1}\right). \quad (23)$$

式(23)中,当 $t \rightarrow +\infty$ 时, $\varphi(t) \rightarrow \varphi_d$, $\varphi(t)$ 是一条初始值为 φ_0 并以指数规律上升趋近于 φ_d 的曲线. 可以用时间常数 T_1 去度量收敛速度,若 $\varphi_0 = 0$,当 $t = T_1, 2T_1, 3T_1$ 和 $4T_1$ 时, $\varphi(t)$ 分别达到期望航向角的0.632, 0.865, 0.95和0.982倍.

对于船舶航向控制问题, T_1 可以看作系统收敛的时间常数,其决定了船舶达到期望船首向的快慢. 在选择参数前,可以预估船舶首向到达期望值所需的时间,如船舶从初始船首向角至期望船首向需转向 1 rad,计划达到其98.2%的时间约为200s,则时间常数 $T_1 = 50$ s,进而得到 $\omega_c = 0.04$. ω_c 增大,船舶转向速度加快,就需要使用大舵角,所以可以通过减小控制带宽 ω_c 来限制船舶转向过程中的舵角幅度.

航海实践中,在非紧急情况下,为了平稳转向,减小转向造成的横倾,海上正常航行的船舶通常尽可能避免使用特别大的舵角转向,特别是自动舵转向时,可以人为限制控制输出的舵角最大幅值,即舵角控制限幅 δ_0 ,通常舵角控制限幅值要小于前文公式(5)中的舵角机械限幅.

对于船舶响应模型系统(2),转首角速度 $r(t)$ 对阶跃舵角 δ_0 的时间响应为

$$r(t) = K\delta_0(1 - \exp(-\frac{t}{T})). \quad (24)$$

显然,船舶最大转首角速度发生在定常旋回阶段,即当 $t \rightarrow +\infty$,有

$$|r_{\max}| \rightarrow |K\delta_0| \text{ 且 } |r_{\max}| < |K\delta_0|. \quad (25)$$

若 φ_d 为常数,对式(23)求导得到船舶从初始船首向趋近于期望船首向的角速度为

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{\varphi_d - \varphi_0}{T_1} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right). \quad (26)$$

船舶最大转首角速度发生在从初始船首向趋近于期望船首向的初始阶段, 当 $t = 0$, 有

$$\left| \frac{d\varphi(t)}{dt} \right|_{\max} = \left| \frac{\varphi_d - \varphi_0}{T_1} \right| = \left| \frac{\omega_c(\varphi_d - \varphi_0)}{2} \right|. \quad (27)$$

实践中由于船舶和舵机都存在延迟环节, 船舶最大转首角速度发生在 $t = 0$ 的稍后时刻.

综合式(25)和式(27)有

$$\left| \frac{\omega_c(\varphi_d - \varphi_0)}{2} \right| < |K\delta_0|. \quad (28)$$

据此, 可初步确定控制带宽 ω_c 与舵角控制限幅 δ_0 的关系为

$$\omega_c < \left| \frac{2K\delta_0}{\varphi_d - \varphi_0} \right|. \quad (29)$$

为了避免当 $|\varphi_d - \varphi_0| \rightarrow 0$ 时式(29)出现奇异值问题, 结合航海实践, 可以设定当 $|\varphi_d - \varphi_0| \leq 5^\circ$ 时, 取 $|\varphi_d - \varphi_0| = 0.09 \text{ rad}$. 由式(29)可见, 为了解决控制舵角限幅问题, 可以通过减小控制带宽 ω_c 实现, 无需在控制器设计阶段单独处理舵角限幅问题.

3.3 舵机控制(Rudder control)

本节针对舵机模型式(5), 将期望舵角 δ_d 作为舵机系统的参考输入, 设计控制律得到命令舵角 δ_r . 令

$$\delta_e = \delta - \delta_d. \quad (30)$$

设计控制律为

$$\delta_r = T_E g(\delta_e) + \delta. \quad (31)$$

再设计

$$g(\delta_e) = -k_1 \tanh(k_2 \delta_e), \quad (32)$$

式中: $k_1 > 0$, 且 $k_1 = |\dot{\delta}_{\max}|$, $\dot{\delta}_{\max}$ 为期望的最大舵角速率, 所以 $|\dot{\delta}_e| < k_1$, 其限制了实际舵角趋近于期望舵角的最大速率; $k_2 > 0$, 用于调整舵角速率的收敛速度. 将式(30)–(31)和式(32)代入舵机模型(5)得到

$$\dot{\delta} = -k_1 \tanh(k_2(\delta - \delta_d)). \quad (33)$$

显然, 当 $(\delta - \delta_d) \rightarrow 0$, 则 $\dot{\delta} \rightarrow 0$, 所设计的控制律能够使舵机系统稳定, 且保证了舵角速率不超过设定参数 k_1 .

4 LADRC 抗扰频域特性分析 (Disturbance rejection frequency domain characteristics analysis of LADRC)

4.1 LADRC 抗外扰频域特性分析 (Frequency domain analysis of LADRC for external disturbance rejection)

在考虑海浪干扰影响时, 航向控制系统可以简化为如图4^[14]所示的模型.

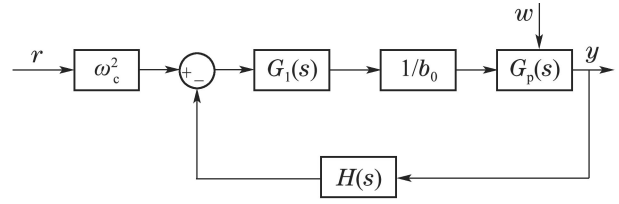


图 4 闭环系统简化模型

Fig. 4 Simplified model of the closed-loop control system

图4中: $G_1(s)$ 表示反馈控制器, 其传递函数为

$$G_1(s) = \frac{(s + \omega_o)^3}{(s + \omega_o)^3 + 2\omega_c s^2 + (\omega_c^2 + 6\omega_c \omega_o)s - \omega_o^3}; \quad (34)$$

$H(s)$ 表示LESO, 其等效传递函数为

$$H(s) = \frac{(3\omega_c^2 \omega_o + 6\omega_c \omega_o^2 + \omega_o^3)s^2}{(s + \omega_o)^3} + \frac{(3\omega_c^2 \omega_o^2 + 2\omega_c \omega_o^3)s + \omega_c^2 \omega_o^3}{(s + \omega_o)^3}. \quad (35)$$

由式(1)和式(4), $G_p(s)$ 表示船舶与舵机控制系统的模型, 其传递函数为

$$G_p(s) = \frac{K}{(2.5s + 1)(Ts + 1)s}. \quad (36)$$

根据式(34)–(36)船舶航向自抗扰控制系统的闭环传递函数为

$$G_{cl}(s) = \frac{\omega_c^2 G_1(s) G_p(s) / b_0}{1 + G_1(s) G_p(s) H(s) / b_0}. \quad (37)$$

根据图4, 当存在海浪干扰时的传递函数可表示为

$$\frac{y}{w} = \frac{G_1(s) G_p(s) H(s) / b_0}{1 + G_1(s) G_p(s) H(s) / b_0}. \quad (38)$$

当 $\omega_c = 0.1$ 时, 取 ω_o 分别取 0.01, 0.1, 1 和 10 时, 其频域特性曲线如图5; 当 $\omega_o = 0.1$ 时, 取 ω_c 分别取 0.01, 0.1, 1 和 10 时, 其频域特性曲线如图6.

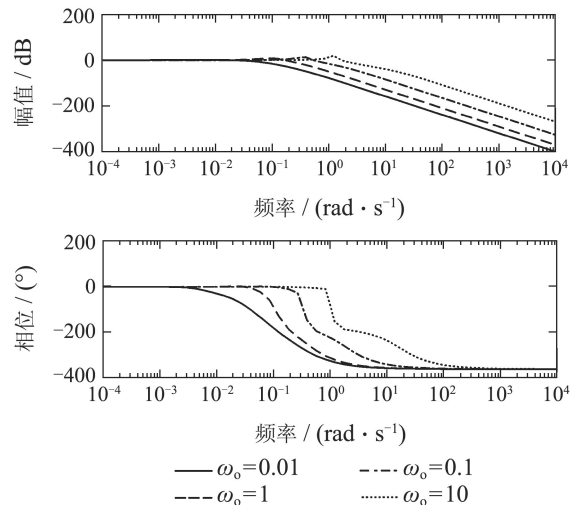


图 5 ω_o 变化时外扰频域特性曲线

Fig. 5 Frequency domain characteristics of the external disturbance with ω_o variation

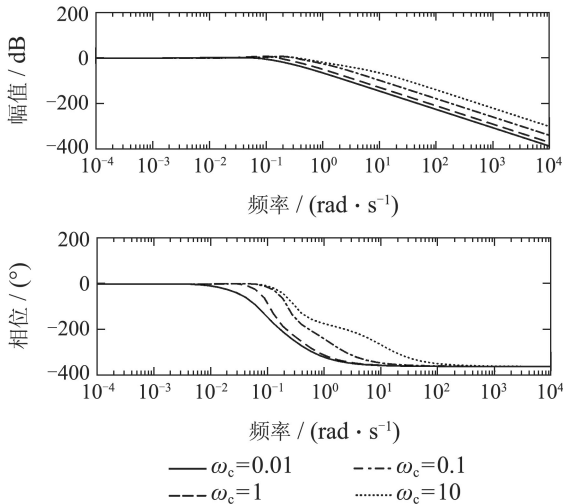


图6 ω_c 变化时外扰频域特性曲线

Fig. 6 Frequency domain characteristics of the external disturbance with ω_c variation

由图5可以发现随着观测带宽的增加, LESO幅值曲线向右移动, 截止频率增大, 剪切率变小, 系统响应速度加快. 过大的观测带宽会导致高频海浪信号进入控制系统, 从而使LESO的负担过重, 同时系统响应速度加快, 导致舵机动作过于频繁, 机械磨损增大, 甚至会超过舵机机械系统的执行能力, 造成整个系统的不稳定. 图5也说明LESO本身属于一个低通滤波器, 对输入信号的高频扰动有一定的滤波作用. 如果观测带宽过小, 高频海浪几乎全部被滤掉, LESO无法估计出高频海浪, 导致船舶控制器无法对高频海浪作出反应, 波浪中的船舶就会随波逐流.

综合图5和图6可以计算出闭环截止频率随参数变化的情况, 见表2.

表2 ω_c 和 ω_o 变化时的闭环截止频率

Table 2 Close-loop cutoff frequency with changing ω_c and ω_o

ω_c	ω_o			
	0.01	0.1	1	10
0.01	0.0047	0.0626	0.4359	1.6061
0.1	0.0168	0.1681	0.5037	1.64
1	0.0154	0.3273	0.7889	1.7329
10	0.0151	0.3734	1.2372	0.0588

由图5-6和表2可以发现: 当 ω_o 和 ω_c 分别增大时, 都将使系统闭环截止频率增加, 即系统带宽增大, 对海浪的过滤能力下降, 同时系统响应速度加快. 如果所选取的两个带宽参数组合导致截止频率过大, 高频海浪将会进入系统, 从而使船舶动舵频繁. 反之, ω_o 或 ω_c 越小, 则系统带宽越小, 只有较低频率的海浪才能通过, 但系统的相应速度降低. 如果所选取的两个带

宽参数组合导致截止频率过小, 则舵机动作缓慢, 可能会造成船舶失控.

根据图1可以发现, 当浪高不超过7 m时, 波谱能量主要分布在频率大于0.33 rad/s的区域, 为了减少海浪干扰信号进入控制系统, 应适当选取控制带宽和观测带宽的参数组合. 如为滤掉浪高7 m及以下的波浪, 需要选取的参数组合应使系统截止频率小于0.33 rad/s. 根据式(38)计算得到, 当 $\omega_o = 0.3, \omega_c = 0.04$ 时, 对应幅频特性曲线值为-3 dB时的频率为0.267 rad/s, 当 $\omega_o = 0.3, \omega_c = 0.08$ 时, 对应幅频特性曲线值为-3 dB时的频率为0.313 rad/s. 可见取值如上述两组参数时, 理论上LADRC对于7 m浪高及以下的海浪的过滤作用十分明显.

4.2 模型参数不确定时的频域分析 (Frequency domain analysis considering model parameter uncertainty)

由式(2), 不考虑外扰和舵机特性的船舶线性模型为

$$\ddot{\varphi} = -\frac{1}{T}\dot{\varphi} + \frac{K}{T}\delta, \quad (39)$$

假设 K, T 未知, 由于被控对象和控制器都是线性的, 故可以用频率响应指标评价系统的鲁棒性. 如果LESO能够估计出内部不确定项, 那么当 K, T 变化时, 系统仍能保持稳定. 为了能用频率响应来测试系统鲁棒性, 需要应用系统的开环传递函数.

由LADRC的传递函数可导出为2自由度闭环系统结构如图7^[12]. 图中: $R(s)$ 为参考信号, $U(s)$ 为控制信号, $Y(s)$ 为输出信号.

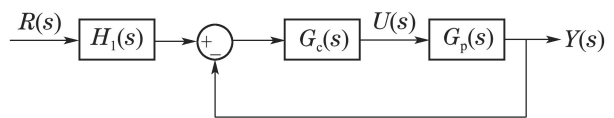


图7 考虑模型参数不确定时系统结构

Fig. 7 System structure with model parameter uncertainty

$G_p(s)$ 为船舶和舵机控制系统的模型, 与式(36)一致.

LADRC方程的传递函数为

$$G_c(s) = \frac{1}{b_0 s} \cdot \frac{C_{n2}s^2 + C_{n1}s + C_{n0}}{C_{d2}s^2 + C_{d1}s + C_{d0}}, \quad (40)$$

$$H_1(s) = \omega_c^2 \cdot \frac{H_{n3}s^3 + H_{n2}s^2 + H_{n1}s + H_{n0}}{H_{d2}s^2 + H_{d1}s + H_{d0}}, \quad (41)$$

式中:

$$C_{n2} = 3\omega_c^2\omega_o + 6\omega_c\omega_o^2, \quad C_{n1} = 3\omega_c^2\omega_o^2 + 2\omega_c\omega_o^3,$$

$$C_{n0} = \omega_c^2\omega_o^3, \quad C_{d2} = 1, \quad C_{d1} = 2\omega_c + 3\omega_o,$$

$$C_{d0} = \omega_c^2 + 3\omega_o^3 + 6\omega_c\omega_o, \quad H_{n3} = 2, \quad H_{n2} = 3\omega_o,$$

$$H_{n1} = 3\omega_o^2, \quad H_{n0} = \omega_o^3, \quad H_{d2} = C_{n2},$$

$$H_{d1} = C_{n1}, H_{d0} = C_{n0}.$$

考虑模型参数不确定时系统的闭环传递函数为

$$G_{YR}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{H_1(s)G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)}. \quad (42)$$

闭环系统的稳定性由式(42)的极点位置决定. 由于 $H(s)$ 的分母各阶系数均为正, 满足Hurwitz条件. 故系统闭环稳定性可由式(43)来确定:

$$G_{cl}(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)}. \quad (43)$$

根据式(36)与式(40), 得系统的开环传递函数为

$$G_o(s) = G_p(s) \cdot G_c(s). \quad (44)$$

当 $\omega_o = 0.3$, $\omega_c = 0.04$, 此时系统的幅值裕度为 37089, 相角裕度为 89.99.

$T(i)$ 分别取 $2T$, $4T$, $8T$, $16T$ 和 $32T$ 时, 系统的频域特性曲线的稳定裕度, 见表 3.

表 3 参数 T 变化时系统的稳定裕度

Table 3 Stability margin with T variation

	$2T$	$4T$	$8T$	$16T$	$32T$
幅值裕度	74037	147940	295730	591330	1182500
相角裕度	89.96	89.91	89.81	89.62	89.22

$K(i)$ 分别取 $2K$, $4K$, $8K$, $16K$ 和 $32K$ 时, 系统的频域特性曲线的稳定裕度, 见表 4.

表 4 参数 K 变化时系统的稳定裕度

Table 4 Stability margin with K variation

	$2K$	$4K$	$8K$	$16K$	$32K$
幅值裕度	18544	9272.2	4636.1	2318	1159
相角裕度	89.97	89.94	89.88	89.77	89.53

由表 3 与表 4 可以发现, 系统内部参数 K 和 T 分别在 1 至 32 倍范围内变化时, 闭环系统的稳定裕度始终为正值, 说明 LADRC 对内部扰动的鲁棒性很强.

5 航向控制器参数配置 (Parameters configuration for the ship steering controller)

以上分析表明本文设计的船舶航向控制器参数物理意义明确, 配置方便. 其中, 控制增益参数 b_0 取船舶旋回性指数 K 与追随性指数 T 的比值; 对于舵机控制律的两个设计参数, k_1 为舵速限制值, k_2 用于调整舵速的收敛速度, 通常 k_2 取 k_1 的倒数即可. 控制带宽 ω_c 和观测带宽 ω_o 需要在控制性能和海浪干扰容限度之间做出权衡, 选择能使截止频率低于干扰频带范围内

的参数值, 尽可能避免干扰信号进入控制系统带宽之内, 从而实现控制器对高频波浪干扰的滤波作用. ω_c 的取值除了考虑滤波作用外, 还需要应用第 3.2 节理论, 根据式(29)计算出控制带宽 ω_c 的上限值, 同时利用 $2/\omega_c$ 为船舶向期望船首向收敛的时间常数的概念大致计算出控制带宽 ω_c . 基于以上分析思路, 结合作者航海工作经验, 提出船舶航向控制器的各个参数的配置规律如下:

1) 确定舵角控制律的参数 k_1 和 k_2 , k_1 取舵角最大速率 $|\dot{\delta}_{\max}|$, 如 $|\dot{\delta}_{\max}| = 3(^{\circ})/s$, $k_1 = 3\pi/180 = 0.052$, k_2 取值范围较宽, 通常令 $k_2 \approx 1/k_1$ 即可;

2) 根据船舶状态确定控制增益 $b_0 = K/T$;

3) 初步选取 ω_o 和 ω_c 的值, 根据设定的转向过程中预计使用的最大舵角 δ_0 , 采用式(29)计算出 ω_c 的上限值 $(\omega_c)_{\max}$, 然后根据船舶旋转能力和转向幅度, 预估出船首向由初始值至期望值收敛的时间常数值 $2/\omega_c$, 该时间常数先略取大一些, 计算出控制带宽 ω_c . 参数整定时, 先固定 ω_c , 然后调整 ω_o , 从 $\omega_o = \omega_c$ 开始逐步增大, 直到航向信号输出达到航向控制指标的要求;

4) 如果需要增大响应速度, 可以慢慢增加 ω_c 的取值, 但始终确保 ω_c 小于 $(\omega_c)_{\max}$, 当发现干扰的影响导致航向波动超过 1° 时, 减小 ω_o , 略增大 ω_c , 重复此过程直到航向输出信号波动在 1° 范围或者更小、且舵角输出平稳;

5) 控制带宽和观测带宽交替调节过程中, 取值组合始终使系统闭环截止频率低于高频波浪干扰的主值频带.

6 船舶航向控制仿真实例 (Case simulation study for a ship)

6.1 仿真船舶介绍 (Introduction of simulated ship)

以 2017 年作者任职船长的一艘载重吨为 57000 T 级固体散货“M 轮”为仿真对象, 船舶主要数据如下: 垂线间 185 m, 型宽 32.26 m, 满载航速 13.5 kn (6.945 m/s), 压载速度 14.0 kn (7.2 m/s), 最大满载吃水 12.8 m, 满载排水体积 65773.5 m³. 舵叶总面积 35.977 m², 舵高 9.25 m, 所以当船舶吃水小于 9.25 m, 部分舵叶会露出水面. 当船尾吃水小于 6.30 m 时, 部分螺旋桨会露出水面, 所以压载状态时的船舶最小吃水为 6.30 m. 对应于不同吃水状态下船舶参数及计算出的操纵性指数如表 5.

该船实际配有日本产、品牌为 YOKOGAWA 的自动舵, 该自动舵按船舶吃水分成压载、半载和满载 3 种可选择的状态.

表5 “M轮”不同装载状态的参数表

Table 1 Parameters of different loading conditions for ship M

装载状态	吃水/m	排水体积/m ³	重心距中/m	方形系数	舵叶面积/m ²	船速/(m·s ⁻¹)	K	T
压载	6.3	30046.3	4.852	0.7791	25.6515	7.2	0.1385	166.191
	6.8	32655	4.291	0.8046	27.4015	7.2	0.1663	202.6424
	8	39011.6	2.642	0.8171	31.6015	7.2	0.412	525.1182
半载	9.5	47165.7	0.302	0.8319	35.977	7.07	0.4359	616.5128
	10	49934.8	-0.599	0.8367	35.977	7.07	0.2285	343.1596
	10.5	52729.8	-1.34	0.8415	35.977	7.07	0.1567	248.712
满载	10.9	54979.4	-1.71	0.8452	35.977	6.945	0.1258	215.5702
	11.4	57803.8	-2.058	0.8496	35.977	6.945	0.1033	185.6271
	12.8	65773.5	-2.701	0.861	35.977	6.945	0.0702	141.6738

6.2 安排设定航向的过渡过程 (Transient profile for setting heading)

由于船舶属于大惯性系统,跳变的信号会造成初始误差很大,易引起超调,为解决“快速性”和“超调”之间的矛盾,应用模型参考技术为跳变的设定航向信号安排过渡过程,用期望船首向 φ_d 代替航向变化剧烈的设定参考船首向 φ_r . 通常使用

$$\frac{\varphi_d}{\varphi_r} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (45)$$

其中 ξ 和 ω_n 是描述闭环系统行为的设计参数. 由于本次仿真对象为一艘大型散货船,所以取 $\xi = 1$, $\omega_n = 0.03$.

6.3 仿真验证 (Simulation verification)

本次仿真的波浪状况为7 m,由表1可知波浪峰值频率 $\omega_p = 0.475$ rad/s,根据文献[18],经计算得到波浪模型中的参数分别为 $\lambda = 0.2567$, $K_w = 0.743$.

设定参考信号 φ_r 为1 rad(57.3°)的阶跃信号,假定船舶状态分别为吃水 $D = 12.8$ m, 9.5 m和6.8 m,对应3种船舶装载状态,LADRC的状态观测器带宽、反馈控制律带宽和控制增益取同一组参数,即 $\omega_o = 0.3$, $\omega_c = 0.04$.由表5可知,对应于吃水12.8 m, 9.5 m和6.8 m时对应的 K/T 分别为0.0005, 0.0007和0.0008,但本次仿真3种吃水状态的控制增益调节参数都取 $b_0 = 0.00065$.在舵机控制环节取 $k_1 = 0.05$, $k_2 = 20$.仿真结果如图8.

仿真结果表明:在浪高7 m的波浪作用下,对应于船舶满载、半载和压载状态,自抗扰控制器使用同一组观测带宽、控制带宽和控制增益参数,船首向输出曲线无明显差别,表现出良好的跟踪效果,说明自抗扰控制器对船舶的外部扰动和模型参数不确定具有很强的鲁棒性;船首向角输出曲线光滑平稳,表明自抗扰控制器对外界波浪干扰具有较好滤波特性,理论上能够抑制浪高7 m的海浪高频干扰;随着船舶吃水增大,转向初始阶段舵角输入较大,在航向保持阶段

舵角输入较小,这是因为船舶吃水大时具有较大惯性,若与半载或压载要求同样的收敛速度,则需要用大舵角转向,但大吃水船舶本身带宽较低,能够抑制浪级更高的海浪,该结果与作者船长实际工作体会相符.

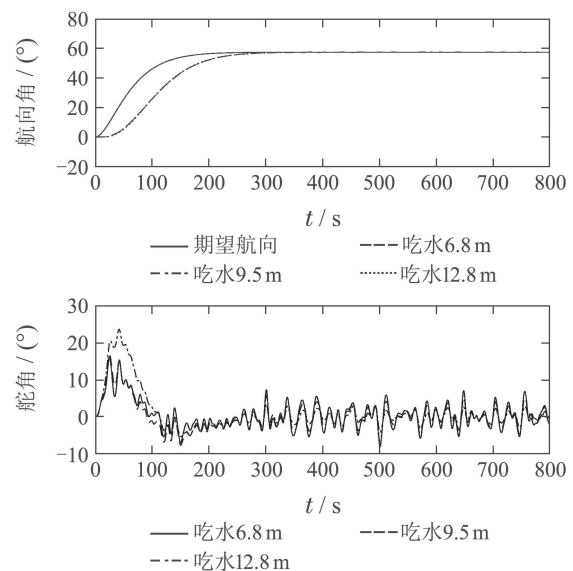


图8 3种吃水状态的船首向输出和命令舵角输入

Fig. 8 Heading output and command rudder angle input for 3 loaded conditions

7 结论 (Conclusions)

针对考虑舵机特性船舶航向系统,论文采用LADRC算法设计了船舶航向控制器,提出了应用滑模理论确定控制带宽的方法,通过选择控制带宽参数解决了舵幅限制问题,对舵机系统单独设计控制器解决了舵速限制问题.对船舶航向线性自抗扰控制器进行了频域分析和仿真试验,结果表明:LADRC控制器具有很强的滤波作用,能够抑制较强海浪对船舶的高频扰动,同时LADRC对模型参数不确定所造成的内部扰动具有很强的鲁棒性.论文提出了船舶航向控制器的参数配置规律,为应用ADRC算法开发新一代船舶自动舵产品打下基础.

参考文献(References):

- [1] PENG Xiuyan, HU Zhonghui. Adaptive nonlinear output feedback control with wave filter for ship course [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(7): 863 – 868.
(彭秀艳, 胡忠辉. 带有海浪滤波器的船舶航向反步自适应输出反馈控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(7): 863 – 868.)
- [2] LEE S D, TZENG C Y, HUANG W W. Ship steering autopilot based on anfis framework and conditional tuning scheme [J]. *Maritime Engineering Frontiers*, 2013, 1(3): 53 – 62.
- [3] JOHANSEN T A, FUGLSETH T P, FOSSEN T I. Optimal constrained control allocation in marine surface vessels with rudders [J]. *Control Engineering Practice*, 2008, 16(4): 457 – 464.
- [4] WEI H, ZHAO Y, SUN C Y. Adaptive neural network control of a marine vessel with constraints using the asymmetric barrier Lyapunov function [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 7(47): 1641 – 1651.
- [5] XIANG X, YU C, LAPIERRE L. Survey on fuzzy-logic-based guidance and control of marine surface vehicles and underwater vehicles [J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2018, 20(2): 572 – 586.
- [6] XIAO Hairong, YAN Honghua, MA Ronglin, et al. Design and simulation of ship course discrete-time sliding mode controller based on RBFNN [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(s1): 12 – 15.
(肖海荣, 闫红华, 马荣琳, 等. 基于RBFNN的船舶航向离散滑模控制器设计与仿真[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(s1): 12 – 15.)
- [7] HAN Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
(韩京清. *自抗扰控制技术* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.)
- [8] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [9] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based on control tuning [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Denver, Colorado: IEEE, 2003: 4989 – 4996.
- [10] GAO Z Q. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design [C] // *Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis*. Minnesota, USA: IEEE, 2006: 2399 – 2405.
- [11] ZHENG Q, LINDA Q, GAO Z Q. On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics [C] // *Proceedings of the 46th IEEE Control and Decision Conference*. New Orleans: IEEE, 2007: 3501 – 3506.
- [12] TIAN G, GAO Z Q. Frequency response analysis of active disturbance rejection based control system [C] // *Proceedings of the 16th International Conference on Control Applications, Part of IEEE Multi Conference on Systems and Control*. Singapore: IEEE, 2007: 1595 – 1599.
- [13] YANG X X, HUANG Y. Capabilities of extended state observer for estimating uncertainties [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Louis: IEEE, 2009: 3700 – 3705.
- [14] YUAN Dong, MA Xiaojun, ZENG Qinghan, et al. Research on frequency-band characteristics and parameters configuration of linear active disturbance rejection control for second-order systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1630 – 1640.
(袁东, 马晓军, 曾庆含, 等. 二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1630 – 1640.)
- [15] LEI Z, GUO C. Disturbance rejection control solution for ship steering system with uncertain time delay [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 95(1): 78 – 83.
- [16] LI R H, LI T S, BU R X, et al. Active disturbance rejection with sliding mode control based course and path following for underactuated ships [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, (1): 1 – 9.
- [17] SHARMA A, ZHENG Q, NOEL M M. Active disturbance rejection control for cargo ship steering [C] // *American Automatic Control Council*. New York: IEEE, 2015: 3956 – 3961.
- [18] JIA Xinle, YANG Yansheng. *Ship Motion Mathematical Model-Mechanism Modeling and Identification Modeling* [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 1999: 234 – 241.
(贾欣乐, 杨益生. *船舶运动数学模型——机理建模与辨识建模* [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999: 234 – 241.)
- [19] FOSSEN T I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control* [M]. New York: Wiley, 2011: 199 – 221.
- [20] XUE W C, HUANG Y. Stability analysis of adrc for nonlinear systems with unknown dynamics and disturbances [M] // *Theory and Applications of Complex Systems and Robust Control*. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 99 – 118.
- [21] HUANG Yi, XUE Wenchao, ZHAO Chunzhe. Active disturbance rejection control: methodology and theoretical analysis [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2011, 31(9): 1111 – 1129.
(黄一, 薛文超, 赵春哲. 自抗扰控制纵横谈 [J]. *系统科学与数学*, 2011, 31(9): 1111 – 1129.)

作者简介:

李荣辉 (1976–), 男, 博士, 教授, 船长, 目前研究方向为船舶运动控制、航海技术, E-mail: lironghui@163.com;

曹峻海 (1996–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为船舶运动控制, E-mail: caypysls@gmail.com;

李铁山 (1968–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为船舶运动控制及非线性控制, E-mail: tieshanli@126.com.