

引用格式: 刘志全, 金鸿章. 基于航速保持的舵减摇控制方法[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(1): 128-133.

LIU Z Q, JIN H Z. Method for rudder roll stabilization control by maintaining ship speed[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(1): 128-133.

基于航速保持的舵减摇控制方法

刘志全¹, 金鸿章²

1 上海海事大学 航运技术与控制工程交通行业重点实验室, 上海 201306

2 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要: 船舶航行受阻力影响引起航速和能量损耗。研究船舶在静水和波浪中的附加阻力, 给出船舶航行时的总体航速损失的计算方法。设计带有航速损失约束的自动舵控制系统, 依据舵角协同控制方法设计航向和舵减摇滑模控制规律。综合讨论“航向”与“航向+减摇”两种工作情况, 包括横摇稳定、航向精度、航速保持、操舵能量消耗。仿真结果表明: 该方法可以有效保持航速; 从航行经济性的角度, 对于同时安装有减摇鳍和自动舵的船舶, 不推荐采用舵鳍联合减摇的控制方法。

关键词: 船舶; 运动控制; 舵减摇; 自动舵; 附加阻力; 航速损失; 滑模控制

中图分类号: U664.7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2017.01.019

Method for rudder roll stabilization control by maintaining ship speed

LIU Zhiquan¹, JIN Hongzhang²

1 Key Laboratory of Marine Technology and Control Engineering, Ministry of Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

2 College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: A ship navigating on the surface of the water may experience greater resistance, adversely affecting its speed and leading to energy loss. The added resistance of surface ships in both still water and waves are investigated, and the computation method of total speed loss is presented. An autopilot system is introduced to constrain the speed loss, and course keeping and rudder roll stabilization sliding mode control laws are proposed according to a compact control strategy. The two working conditions of "heading" and "heading plus anti-roll" are discussed, including roll stabilization, heading error, speed maintenance and rudder abrasion. The results show that the speed can be effectively maintained using this method, and from a commercial point of view, the fin-rudder roll stabilization control is not recommended for vessels equipped with both fins and rudders.

Key words: ship motion control; rudder roll stabilization; autopilot; added resistance; speed loss; sliding mode control

0 引言

为了按照指定航向前进, 自动舵及其控制系

统是每艘船舶都必须具备的, 自动舵不仅可以控制船舶的航向和艏摇运动, 也可以用于辅助减摇控制^[1-2]。基于经济成本和安装空间的原因, 小型

收稿日期: 2016-07-12

网络出版时间: 2016-12-28 15:23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279039)

作者简介: 刘志全(通信作者), 男, 1986年生, 博士, 讲师。研究方向: 船舶运动控制。

E-mail: liuzhiquan215@sina.com

金鸿章, 男, 1946年生, 教授, 博士生导师。研究方向: 船舶运动控制, 船舶特辅装置。

E-mail: heujnhz@163.com



船舶基本上不安装减摇鳍。舵减摇技术出现之后,为小型船舶的航向及减摇控制技术研究提供了新的发展空间,并诞生了各种系列的商用舵减摇控制系统^[3]。国内舵减摇的研究开始于上世纪80年代,随着国民经济和科学技术的发展,研究也逐步深入,能够验证舵减摇的实用性并结合现代控制理论针对舵机非线性饱和、舵速不足、模型非线性耦合等缺陷进行控制律设计^[4-8]。

对于航行中船舶的航向控制节能问题,在上世纪就已开展了相关研究工作。Akinal^[9]提出一个航向控制最优PID控制器用于最小化推进损失,最多可以节省燃料5%;Grimble等^[10]根据船舶前进运动方程扩展了航向损失评价方程,提出了最小能量损耗的船舶航向LQG控制问题;Katebi等^[11]在文献[10]的控制方法基础上,针对多项式船舶航向控制系统,提出了可应用于各种气候条件下的最小阻力增加航向控制方法;Miloh等^[12]针对船舶转向航速损失问题,提出了一个用于船舶避障控制的变速模型。因此,选择适当的自动舵系统控制策略也能够降低船舶航速损失。

使用自动舵的主要目的在于保持船舶航向和航迹跟踪,但是舵减摇控制会降低航向保持的精度,同时也会增加舵机转动频率。从航行节能的角度,并不能确定风浪中航行的船舶在舵减摇控制时如何影响航速。本文的目的是将波浪中阻力增加与静水中阻力增加结合起来考虑,利用滑模控制方法设计低航速损失的船舶自动舵控制系统,同时分析航向控制系统增加舵减摇控制作用后对航速的影响。

1 数学模型

1.1 船舶运动模型

对于恒速前进的船舶,受海洋环境扰动作用时重心移动,作为刚体分别产生沿轴向的平行移动和围绕轴向转动的六自由度振荡运动。根据牛顿定律,建立水平面船舶横荡、横摇、艏摇的三自由度非线性动力学方程如下:

$$m(\dot{v} + ur) - mz_G \dot{p} + mx_G \dot{r} = Y_{\text{hyd}} + Y_\delta \delta \quad (1)$$

$$-mz_G(\dot{v} + ur) + I_{xx} \dot{p} = K_{\text{hyd}} + K_\delta \delta \quad (2)$$

$$mx_G(\dot{v} + ur) + I_{zz} \dot{r} = N_{\text{hyd}} + N_\delta \delta \quad (3)$$

$$\dot{\phi} = p \quad (4)$$

$$\dot{\psi} = r \cos(\phi) \quad (5)$$

式中: m 为船体质量; I_{xx} , I_{zz} 分别为横摇和艏摇转动惯量; u , v , r , p , ϕ , ψ 分别为纵荡速度、

横荡速度、横摇角速度、艏摇角速度、横摇角和艏摇角; x_G , y_G , z_G 为船舶连体坐标系中的重心位置; δ 为舵转角; Y_{hyd} , K_{hyd} , N_{hyd} 分别为船舶横荡、横摇、艏摇水动力方程,表达式如下:

$$Y_{\text{hyd}} = Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\dot{p}} \dot{p} + Y_{|u|v} |u|v + Y_{ur} ur + Y_{|v|v} v|v| + Y_{|v|r} v|r| + Y_{|r|v} r|v| + Y_{\phi uv} \phi |uv| + Y_{\phi ur} \phi |ur| + Y_{\phi uu} \phi u^2 \quad (6)$$

$$K_{\text{hyd}} = K_{\dot{v}} \dot{v} + K_{\dot{p}} \dot{p} + K_{|u|v} |u|v + K_{ur} ur + K_{|v|v} v|v| + K_{|v|r} v|r| + K_{|r|v} r|v| + K_{\phi uv} \phi |uv| + K_{\phi ur} \phi |ur| + K_{\phi uu} \phi u^2 + K_{|u|p} |u|p + K_{|p|p} |p| + K_p p + K_{\phi \phi \phi} \phi^3 - \rho g \Delta \overline{GM} \phi \quad (7)$$

$$N_{\text{hyd}} = N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{|u|v} |u|v + N_{|u|r} |u|r + N_{|r|r} r|r| + N_{|r|v} r|v| + N_{\phi uv} \phi |uv| + N_{\phi ur} \phi |ur| + N_p p + N_{|p|p} |p| + N_{|u|p} |u|p + N_{\phi uu} \phi u^2 \quad (8)$$

式中: $Y_{(\cdot)}$, $K_{(\cdot)}$, $N_{(\cdot)}$ 为水动力导数; ρ 为海水密度; g 为重力加速度常量; \overline{GM} 为横摇稳心高; Δ 为排水量。

转舵作用产生的横荡、横摇和艏摇运动的扶正力/矩系数如下:

$$Y_\delta = \frac{1}{2} \rho A_R C_L U^2 \quad (9)$$

$$K_\delta = \frac{1}{2} \rho A_R C_L U^2 l_z \quad (10)$$

$$N_\delta = -\frac{1}{2} \rho A_R C_L U^2 LCG \quad (11)$$

式中: A_R 为舵表面积; C_L 为舵翼面升力系数; LCG 为重心到舵的距离; U 为设计航速; l_z 为横摇力臂。

1.2 海浪模型

水面船舶受到的波浪干扰主要是一阶作用力,本文采用的长峰波海浪模型为ITTC双参数谱描述,如下式:

$$S_\zeta(\omega) = \frac{173 H_{1/3}^2}{T^4 \omega^5} \exp\left(-\frac{691}{T^4 \omega^4}\right) \quad (12)$$

式中: $H_{1/3}$ 为有义波高; T 为海浪固有周期; ω 为海浪固有频率。

在波浪谱的主要频率范围内将其分成若干个频率相叠加,本文等分为60个,将每个频率波的力矩累加,利用切片原理计算出船体的总扰动力/矩。

2 航速计算

2.1 波浪中阻力增加

船舶航行过程中会受到流体阻力作用,为了

维持前进速度,通常在静水阻力估算条件下,需要设计有足够的推力以克服这种阻力。在波浪的作用下,阻力较静水中增加,即二阶波浪力。此时,主机不可避免地会消耗多余能量,造成航速下降。Loukakis等^[13]从能量守恒的角度描述了斜浪条件下波浪阻力增加的计算原理。

假设船舶以恒速 U 前进,忽略纵荡运动。如图1所示,船舶在遭遇角 β 方向受到的水平方向二阶波浪力 R_T 沿 x 轴方向的分量 R_x 为波浪引起的阻力增加,沿着 y 轴方向的分量 R_y 为横向漂移力。

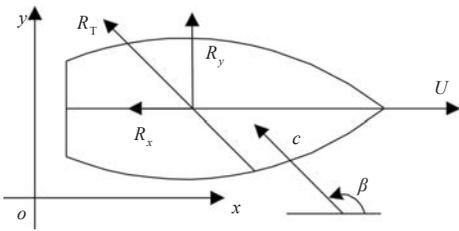


图1 波浪增阻与漂移力

Fig.1 Definition of added resistance and drift force

波浪引起阻力增加的实质是船舶摇摆时自身能量损耗,能量主要通过船体运动引起的绕射波浪向外扩散。根据辐射做功与能量守恒原理,在每个海浪遭遇周期内,遭遇海浪方向二阶波浪力的做功 P 可表示如下:

$$P = R_T(c + U \cos \beta)T_e \quad (13)$$

式中: c 为波速; U 为船舶的设计航速; T_e 为海浪遭遇周期; β 为航向遭遇角。

将各船舶切片产生的能量沿船长方向积分,在一个海浪遭遇周期内,在船舶五自由度简谐运动及其耦合与流体相互作用下产生的阻尼力所辐射的能量 P 表示如下:

$$P_{35} = \frac{\pi}{\omega_e} \int_0^L b_{35} |U_{RZ}|^2 dx \quad (14)$$

$$P_4 = \frac{\pi}{\omega_e} \int_0^L b_4 |p|^2 dx \quad (15)$$

$$P_{24} = P_{42} = \frac{\pi}{\omega_e} \int_0^L b_{24} |p U_{RY}| dx \quad (16)$$

$$P_{26} = \frac{\pi}{\omega_e} \int_0^L b_{26} |U_{RY}|^2 dx \quad (17)$$

式中: P 为辐射能量,其中下标分别代表船体五自由度运动模态,即横荡、纵荡、横摇、艏摇和纵摇; p 为船体各切片横摇角速度; U_{RZ} 为船体各切片的垂向相对速度; U_{RY} 为船体各切片的横向相对速度; ω_e 为海浪遭遇频率; b 为船体各切片相应运动的阻尼系数,数字下标代表相应运动自由度模态。

总的能量守恒方程为

$$R_T(c + U \cos \beta)T_e = P_{35} + P_4 + P_{26} + 2P_{24} \quad (18)$$

因此,斜浪条件下,水平方向二阶波浪力 R_T 、波浪增阻 R_x 、横向漂移力 R_y 的最终表达式如下:

$$|R_T| = \frac{k}{\omega_e} (P_{35} + P_4 + P_{26}) + \frac{2k}{\omega_e} P_{24} \quad (19)$$

$$|R_x| = |R_T \cos \beta| \quad (20)$$

$$|R_y| = |R_T \sin \beta| \quad (21)$$

式中, k 为波数。

2.2 静水中阻力增加

实际上,转向艏摇运动不仅在波浪中会引起阻力增加,在静水中也同样会引起船舶航行阻力增加,也称“静水增阻”或者“惯性阻力”。艏摇运动可以视为船舶持续做转向运动,船体在转向时额外产生纵向的离心阻力,造成推进能量损耗,最后使航速下降。

根据操舵转向原理和牛顿运动定律,在船体坐标系框架下,船体前进运动方程可由下式表示^[14]:

$$M(\dot{u} - vr) = X_u \dot{u} - R_t(u) + (1 - \tau)T(u, n) + X_{vv} v^2 + X_{vr} vr + X_{rr} r^2 + X_{\delta\delta} \delta^2 \quad (22)$$

式中: X_u , X_{vv} , X_{vr} , X_{rr} , $X_{\delta\delta}$ 为船体和舵的水动力导数; M 为船体总质量; $R_t(u)$ 为船体静水阻力; τ 为螺旋桨推力损失系数; n 为螺旋桨转数; $T(u, n)$ 为敞水条件下的螺旋桨推力。

对式(22)分析可知,静水增阻由式中的质量作用项和附加质量作用力项 Mvr 和 $X_{vr}vr$ 决定, X_{vr} 实际上等于横荡附加质量。对于其他项,静水阻力 $R_t(u)$ 和螺旋桨推力 $T(u, n)$ 是独立于转向运动而存在的。根据势流理论,假设船体左右对称,则水动力项 X_{vv} 和 X_{rr} 为0;等式右端最后一项 $X_{\delta\delta}\delta^2$ 是舵在转角 δ 作用下产生的附加阻力,这部分阻力数量级较小,可以忽略不计。因此,由艏摇转向运动引起的静水增阻 R_{yaw} 可由下式表示。

$$R_{yaw} = (M + X_{vr})vr \quad (23)$$

2.3 航速损失

水面船舶在前进过程中所受到的阻力由其几何形状和航速等因素决定,因此,为了保证船舶恒速前进状态,需要给船舶施加相应的推进作用力。船舶设计的有效推进功率是根据裸船静水阻力的估算值确定,按照牛顿定律受力平衡原理,则设计的有效推进功率 P_E 表示为

$$P_E = R_t(u)U \quad (24)$$

假设船舶以恒定功率推进航行时,遭受波浪增阻、静水增阻和静水阻力共同作用下的推进功

率为

$$P_E = [R_t(u) + R_x + R_{yaw}]U_0 \quad (25)$$

船舶实际航速 U_0 可由下式计算。

$$U_0 = \frac{R_t(u)}{R_t(u) + R_x + R_{yaw}}U \quad (26)$$

因此,航速损失就是设计航速 U 与实际航速 U_0 的差值,即 $\Delta U = U - U_0$ 。

3 控制器设计

根据上节对波浪附加阻力和静水附加阻力分析可知,船舶航行时的总阻力增加是由横荡速度 v 、横摇角速度 r 和艏摇角速度 p 决定,同时为保持航行稳定性,横摇角 ϕ 和艏摇角 ψ 的控制是要首先考虑的,因此,在航向控制中需要控制 v, r, ψ 这3个状态,舵减摇工况时则需要加入对状态 p, ϕ 的控制。

由于滑膜控制良好的鲁棒性能,本文采用该控制规律设计方法。对于研究的三自由度运动模型,自动舵控制系统为一个单入多出系统,有鉴于此,采用特征值分解方法设计航向和横摇滑膜控制规律^[15-16]。

3.1 航向控制规律

航向动力学模型需要提取式(1),式(2),式(6),式(8),消去非线性强耦合项,忽略纵荡运动,则 $u = U$, 且 $\dot{u} = 0$ 。当航速 U 固定为设计航速时,航向动力学模型可视为一个线性模型,将模型转化为标准状态空间格式 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}\delta$ 的形式。

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (27)$$

根据三自由度运动姿态误差定义滑膜面函数 s 如下:

$$s = \mathbf{h}^T(\mathbf{x} - \mathbf{x}_d) \quad (28)$$

式中: $\mathbf{h} = (h_1, h_2, h_3)^T$, 为权重向量; $\mathbf{x}_d = (0, 0, \psi_d)^T$, 为姿态设定向量。

为稳定横荡与艏摇运动,且由于式(27)中存在一个纯积分环节,定义状态反馈向量 $\mathbf{k} = (k_1, k_2, 0)^T$, 则得到状态矩阵为

$$\mathbf{A}_c = \mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{k}^T = \begin{bmatrix} a_{11} - b_1k_1 & a_{12} - b_1k_2 & 0 \\ a_{21} - b_2k_1 & a_{22} - b_2k_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

令 \mathbf{h} 为矩阵 \mathbf{A}_c^T 的右特征向量, λ 为相应的右特征值。由于 \mathbf{A}_c 存在一个纯积分通道,因此一定存在一个特征值 $\lambda = 0$, 使得下式成立,

$$\mathbf{A}_c^T \mathbf{h} = 0 \quad (30)$$

由式(30)可求得滑膜面的系数向量,利用非线性切换规律抵消海浪干扰,则航向滑膜控制规律可由下式表示。

$$\delta = -\mathbf{k}^T \mathbf{x} - (\mathbf{h}^T \mathbf{b})^{-1} \eta \tanh(s/\Omega) - (k_1v + k_2r) - (h_1b_1 + h_2b_2)^{-1} \eta \tanh(s/\Omega) \quad (31)$$

式中: η 为切换增益; Ω 为边界层厚度。

3.2 舵减摇控制规律

由式(1)~式(8)得到三自由度耦合运动线性模型的状态空间形式如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (32)$$

定义滑膜面函数 s 如下式:

$$s = h_1v + h_2p + h_3r + h_4\phi + h_5(\psi - \psi_d) \quad (33)$$

由于横摇运动存在恢复力项,因此,状态矩阵 \mathbf{A}_c 仍然只存在一个纯积分通道,按照上一节的推导过程,可以得到航向横摇滑膜控制规律为

$$\delta = -(k_1v + k_2p + k_3r + k_4\phi) - (h_1b_1 + h_2b_2 + h_3b_3 + h_4b_4)^{-1} \eta \tanh(s/\Omega) \quad (34)$$

4 仿真分析

本文研究的船型及参数取自文献[17],主要参数如下:船长 51.5 m,船宽 8.6 m,吃水 2.3 m,航速 15 kn;安装有双舵,弦长 1.5 m,展长 1 m,最大舵转角 40°。仿真研究时,采用 4 m 有义波高,长峰波海浪扰动的平均周期为 7 s,航行遭遇角为 135°;航向控制参数 $\mathbf{k} = (-10, -100, 0)^T$, $\eta = 1.0512$, $\Omega = 1$;航向横摇控制参数 $\mathbf{k} = (-5, -200, -100, -10, 0)^T$, $\eta = 0.0751$, $\Omega = 0.5$ 。仿真结果如图 2 所示。

由图 2 可知,舵减摇作用的增加虽然可以在一定程度上减小横摇,减摇率为 21.46%,但却是以牺牲航向控制的精度为代价获得的,更重要的是由此引起航速保持能力下降。以“航向”的平均航速 13.28 kn、“航向+减摇”的平均航速 12.93 kn 为例,与单纯航向控制相比,下降程度达 2.33%。由此可知,航速下降程度对于船舶远洋航行的能量损耗是不可忽略的;其次,在操舵运动方面,由于要对抗横摇扰动作用,舵减摇增加了操舵幅度和频率,所以无疑还会增加舵机磨损。

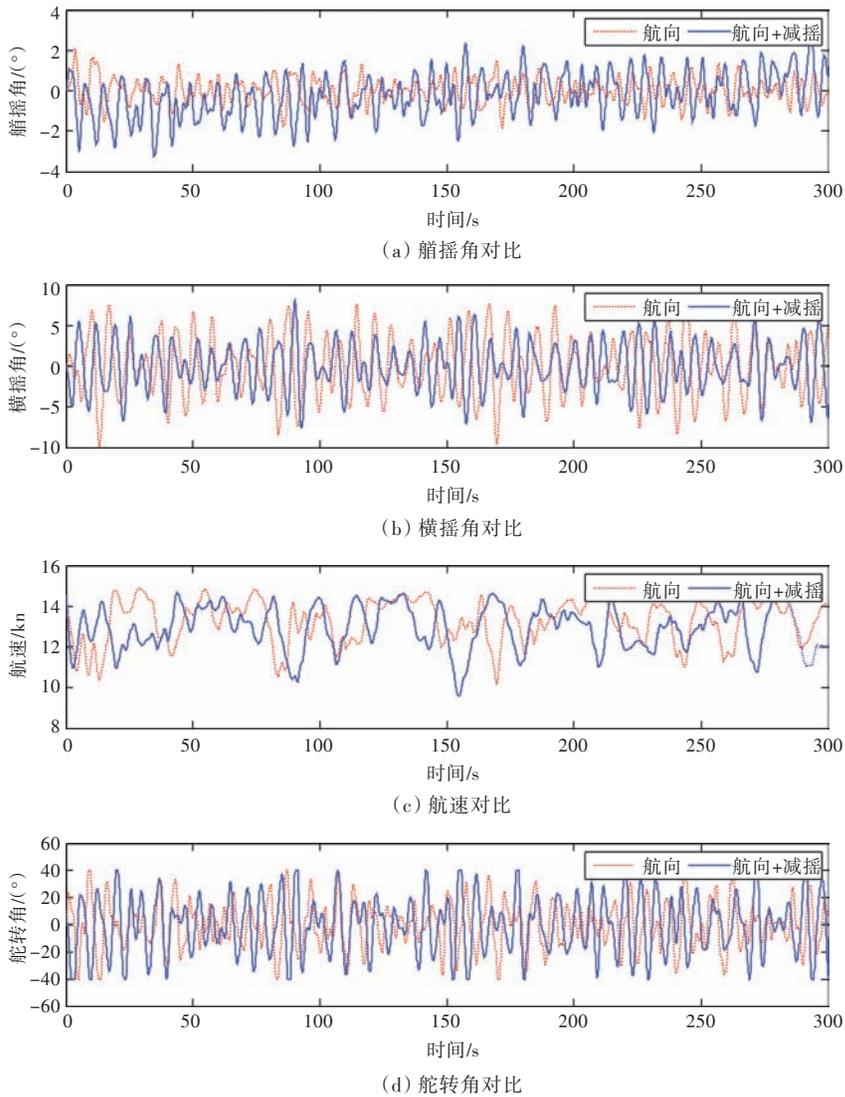


图2 分别采用“航向”与“航向+减摇”控制的船舶性能对比

Fig.2 Comparison of ship performance by 'heading' and 'heading+anti-roll' control mode

船舶航行阻力增加由横荡速度、艏摇角速度和横摇角速度决定,由于操舵对横荡运动的控制能力十分有限,航速下降的可控因素仅为艏摇和横摇角速度。因此,舵减摇控制降低了船舶航速的保持能力是因为在减小横摇角速度的同时增加了艏摇角速度,从而引起了阻力增加,这也间接地说明了艏摇运动引起的阻力增加要高于横摇运动。

5 结 语

本文分析了船舶在静水和波浪中阻力增加的机理,给出船舶航速下降的计算方法,找到影响船舶航速的关键控制因素。通过采用协同控制方法设计了舵减摇滑膜控制规律,分析了舵减摇功能的增加对船舶性能的影响,尤其是对航速保持能力的影响。研究表明:舵减摇在达到一定减摇效果的同时降低了航速保持能力,增加了舵机磨损。因此,对于有能力安装减摇鳍的大型船舶,

不推荐采用舵鳍联合减摇控制方法;而对于没有能力和空间安装减摇鳍的小型船舶,应根据航行需求来平衡航速保持和减摇效果的匹配问题。

参考文献:

- [1] FOSSEN T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control [M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [2] SGOBBO J N, PARSONS M G. Rudder/fin roll stabilization of the USCG WMEC 901 class vessel [J]. Marine Technology, 1999, 36(3): 157-170.
- [3] ALARÇIN F, GULEZ K. Rudder roll stabilization for fishing vessel using neural network approach [J]. Ocean Engineering, 2007, 34(13): 1811-1817.
- [4] 朱文蔚, 缪国平, 王文富, 等. 舵减摇仿真研究 [J]. 中国造船, 1997(1): 33-42.
ZHU W W, MIAO G P, WANG W F, et al. Simulational analysis on rudder roll stabilization [J]. Ship-building of China, 1997(1): 33-42. (in Chinese).

- [5] 魏纳新, 赵希人. 舵减横摇技术实船应用研究[J]. 船舶工程, 2007, 29(4): 1-4.
WEI N X, ZHAO X R. Study on practical use of rudder roll stabilization[J]. Ship Engineering, 2007, 29(4): 1-4 (in Chinese).
- [6] 刘胜. 现代船舶控制工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [7] 涂建军, 何汉林. 保吸引子的扰动抑制及其在舵减摇中的应用[J]. 工程力学, 2013, 30(2): 443-450.
TU J J, HE H L. Guaranteed attractor disturbance rejection and its application in rudder roll stabilization[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(2): 443-450 (in Chinese).
- [8] 徐国平, 张显库. 船舶自动舵研究综述[J]. 中国造船, 2013, 54(2): 191-200.
XU G P, ZHANG X K. An overview of ship autopilot research[J]. Shipbuilding of China, 2013, 54(2): 191-200 (in Chinese).
- [9] AKINSAL V. Surface ship fuel savings with an optimized autopilot [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1985.
- [10] GRIMBLE M J, KATEBI M R. LQG design of ship steering control systems [J]. Signal Processing for Control, 1986, 79: 387-413.
- [11] KATEBI M R, BYRNE J C. LQG adaptive ship autopilot[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 1988, 10(4): 187-197.
- [12] MILOH T, PACHTER M. Ship collision-avoidance and pursuit-evasion differential games with speed-loss in a turn [J]. Computers & Mathematics with Applications, 1989, 18(1/2/3): 77-100.
- [13] LOUKAKIS T A, SCLAVOUNOS P D. Some extensions of the classical approach to strip theory of ship motions, including the calculation of mean added forces and moments [J]. Journal of Ship Research, 1978, 22(1): 1-19.
- [14] FALTINSEN O M. Hydrodynamics of high-speed marine vehicles [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [15] FANG M C, LUO J H. On the track keeping and roll reduction of the ship in random waves using different sliding mode controllers [J]. Ocean Engineering, 2007, 34(3/4): 479-488.
- [16] HEALEY A J, LIENARD D. Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1993, 18(3): 327-339.
- [17] PEREZ T. Ship motion control: course keeping and roll stabilisation using rudder and fins [M]. London: Springer, 2005.



(上接第 106 页)

- [10] 徐双喜. 大型水面舰船舷侧复合多层防护结构研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
XU S X. Research on the composite and multilayer defensive broadside structure for large surface ship [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010 (in Chinese).
- [11] 陈长海, 朱锡, 侯海量, 等. 近距离空爆载荷作用下固支方板的变形及破坏模式[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(4): 368-375.
CHEN C H, ZHU X, HOU H L, et al. Deformation and failure modes of clamped square plates under close-range air blast loads [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(4): 368-375 (in Chinese).



(上接第 115 页)

- 2002, 89(12): 124301.
- [6] WILLIAMS E G. Fourier acoustics: sound radiation and nearfield acoustical holography [M]. San Diego: Academic Press, 1999.
- [7] HARKER B M, ANDERSON B E. Optimization of the array mirror for time reversal techniques used in a half-space environment [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133(5): EL351-EL357.
- [8] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声呐技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000.
- [9] FINK M, PRADA C. Acoustic time-reversal mirrors [J]. Inverse Problems, 2001, 17(1): R1-R38.