

控制与决策

Control and Decision

基于最佳相位匹配的减摇鳍低航速控制策略

宋吉广, 侯立阳, 梁利华, 刘彦文

引用本文:

宋吉广, 侯立阳, 梁利华, 等. 基于最佳相位匹配的减摇鳍低航速控制策略[J]. *控制与决策*, 2021, 36(4): 940–946.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

输出误差约束下四旋翼无人机预定性能反步控制

Prescribed performance backstepping control for quadrotor UAV with output error constraint

控制与决策. 2021, 36(5): 1059–1068 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1249>

基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

基于模型依赖驻留时间的异步切换控制

Asynchronous switching control based on mode-dependent average dwell time

控制与决策. 2021, 36(3): 609–618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0645>

脉冲控制下多智能体系统的保性能双向编队控制

Guaranteed cost bipartite formation problem of multi-agent systems with impulse control

控制与决策. 2021, 36(1): 180–186 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0854>

基于反演算法的严格反馈非线性系统固定时间跟踪控制

Fixed-time tracking control for strict-feedback nonlinear systems based on backstepping algorithm

控制与决策. 2021, 36(1): 173–179 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0658>

基于最佳相位匹配的减摇鳍低航速控制策略

宋吉广¹, 侯立阳², 梁利华^{1†}, 刘彦文¹

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 昆明广播电视网络有限责任公司, 昆明 650100)

摘要: 为了满足工程船舶对低航速下减摇的需求, 提高船舶在锚泊和低航速下的耐波性, 提出减摇鳍在低航速下的控制策略, 重点针对低航速下升力与鳍角之间相位关系对航速十分敏感的问题和船舶横摇模型的不确定性问题进行研究. 通过数值迭代解决低航速下升力相位对航速的敏感性和升力与鳍角的非线性关系问题, 相位调节器可以克服航速测量误差的影响, 保证最佳的相位匹配; 利用分数阶鲁棒控制器保证模型参数变化时整个系统的控制性能. 对所设计的控制策略进行数值仿真, 仿真数据表明, 在随机海洋环境干扰下, 减摇鳍可以获得满意的低航速减摇能力. 进行船模水池试验, 试验结果也表明, 所设计的控制策略可以使减摇鳍在锚泊和低航速下产生满意的减摇效果.

关键词: 减摇鳍; 低航速减摇; 相位匹配; 分数阶控制器; 数值迭代; 遗传算法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1028

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 宋吉广, 侯立阳, 梁利华, 等. 基于最佳相位匹配的减摇鳍低航速控制策略[J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 940-946.

Best phase matching based control strategy for ship stabilizer at low speed

SONG Ji-guang¹, HOU Li-yang², LIANG Li-hua^{1†}, LIU Yan-wen¹

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Kunming Radio and Television Network Co., Ltd., Kunming 650100, China)

Abstract: In order to stabilize the engineering ships under low speed and improve its seakeeping at anchor and low speed, the control strategy of a fin stabilizer at low speed is proposed. Two main problems, such as the phase between the fin angle and the lift is very sensitive at low speed and the ship roll model has uncertainty, are studied. A numerical iterative method is introduced to solve the phase sensitivity at low speed and the nonlinear relationship between the lift and the fin angle. The phase adjuster can overcome the influence of speed measurement error to ensure the best phase matching. A fractional order robust controller is used to ensure the control performance of the fin stabilizer system when the model parameters are varying. A numerically simulate of the proposed control strategy is done, and the simulation data show that under the random ocean environment disturbance, the fin stabilizer can obtain satisfactory stabilizing effect under low speed. Finally, ship model testes in towing tank are carried out, and the test results also show that the designed control strategy can provide satisfactory anti-rolling effect at anchor and low speed.

Keywords: fin stabilizer; anti-rolling at low speed; phase matching; fractional order controller; numerical iterative; genetic algorithm

0 引言

在翼型确定的基础上, 常规减摇鳍的升力由攻角和来流速度决定并近似与攻角和速度的平方成比例. 因此, 只有在中高航速时, 才能提供足够的控制力矩, 有效减摇. 而在低航速至零航速的范围内, 提供的力矩较小甚至为零, 使常规减摇鳍在低航速下几乎没有减摇效果. 然而在低航速下, 船舶的横摇阻尼变小, 导致船舶比中高航速时的横摇幅度还要大, 恶劣海况

下剧烈的摇晃, 严重降低了船舶和船上人员执行任务的效率.

伴随海洋开发、科学考察和反潜等任务以及人员舒适性的需求, 需要在低航速(包含锚泊状态)下减小摇晃的船舶非常多, 同时随着科学技术的发展, 减摇鳍在零航速或锚泊状态下减摇已经成为现实, 并将成为减摇水舱的有力竞争对手^[1]. 然而, 现有的研究大多集中在理想的零航速状态: 文献[2-5]先后对

收稿日期: 2019-07-18; 修回日期: 2019-10-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50575048, 50879012); 哈尔滨工程大学教改项目(JG2019B65).

†通讯作者. E-mail: lianglihua@hrbeu.edu.cn.

鳍在零航速下的升力模型进行了研究和改进;之后,文献[6]借助非线性分离策略,设计了零航速减摇鳍的两步主从控制器;文献[7]基于改进遗传算法模糊控制器实现了最小能量消耗下的零航速减摇控制问题.这些研究为零航速减摇鳍的应用提供了基础和支持,但几乎没有考虑更为复杂的低航速情况.

在使用范围更广更有实际意义的低航速状态下,为了提高鳍上的升力,将会综合利用自身主动拍动和船舶推进航速的能量,不仅比常规减摇鳍的升力模型复杂许多,而且比理想的零航速下的升力模型也要复杂很多.同时,船舶装载情况和海况等各种因素也会影响横摇非线性方程,使其具有很大的不确定性.这些情况的存在导致低航速时船舶在波浪等扰动下的减摇控制问题变得复杂.

因为常规减摇鳍一般设置在6kn至最高航速范围内工作,同时通过仿真和试验也已经验证了当航速高于6kn时,鳍上产生的升力基本与鳍角保持同相位^[8],所以在航速高于6kn时,采用原有的常规控制方法是可行的.本文主要研究减摇鳍在0~6kn的低航速范围内的减摇问题.针对低航速下升力与鳍角之间相位对航速十分敏感的问题和横摇模型的不确定性问题展开研究,以使减摇鳍可以在全部正向航速(实际应用中包含零航速和较小的负向航速)范围内工作.

1 船舶横摇运动模型

1.1 横摇运动方程

当船舶航速降低时,其横摇运动阻尼变小,在相同的海况下横摇角增大,此时采用线性横摇运动方程会导致较大误差^[8],因此这里采用如下的非线性方程描述船舶横摇运动:

$$(I_x + \Delta I_x) \frac{d^2\phi}{dt^2} + B_1 \frac{d\phi}{dt} + B_2 \left| \frac{d\phi}{dt} \right| \frac{d\phi}{dt} + C_1\phi + C_3\phi^3 + C_5\phi^5 = -K_\omega - K_c. \quad (1)$$

其中: I_x 、 ΔI_x 为船舶绕纵轴的转动惯量和附加转动惯量, $B_1(d\phi/dt) + B_2|d\phi/dt|(d\phi/dt)$ 为船舶横摇角速度运动引起的阻尼力矩, $C_1\phi + C_3\phi^3 + C_5\phi^5$ 为船舶本身的恢复力矩, K_ω 为海洋环境扰动力矩, K_c 为减摇鳍提供的控制力矩, ϕ 为船舶的横摇角.

1.2 环境扰动力矩

环境扰动力矩 $K_\omega = K_{\text{wind}} + K_{\text{wave}} + K_{\text{current}}$. 其中: K_{wind} 是由海风对船舶上层建筑和水线以上的船体产生的干扰力矩,可以认为是一个非零均值的随机信号,在仿真和控制器设计中仅考虑其均值的影响^[9]; K_{current} 是由海流对船舶水线以下的船

体产生的干扰力矩,主要由潮汐、风和海水密度不同等因素引起,通常海流的变化是非常缓慢的,因此在仿真和控制器的设计中可以认为是一个稳定的定常干扰; K_{wave} 是最主要的影响,是由波浪对船体压力的变化引起的干扰力矩,船体将波升转化为力矩,该力矩由船体的几何外形、装载情况(质量分布)和波升决定.波升可以认为是高斯分布的零均值的随机过程,因此波浪的干扰力矩谱可由波升的功率谱描述^[9-10]:

$$S_\alpha(\omega_e) = \frac{\omega^4}{g^2} K^2(\omega) \frac{\sin^2 \mu}{1 + \frac{v \cos \mu}{g}} S_\xi(\omega). \quad (2)$$

其中: ω 为海浪频率, μ 为浪向角, $K(\omega)$ 为修正系数, v 为船舶航速, $S_\xi(\omega)$ 为海浪(波升)功率谱, ω_e 为遭遇频率. $S_\xi(\omega)$ 可采用ITTC单参数谱,即

$$S_\xi(\omega) = \frac{8.1 \times 10^{-3} g^2}{\omega^5} \exp\left(-\frac{3.11}{h_{1/3}^2 \omega^4}\right), \quad (3)$$

其中 $h_{1/3}$ 为有义波高.

1.3 控制力矩

假设船舶安装一对减摇鳍,此时鳍所产生的控制力矩 $K_c = 2Fl$. 其中: F 为单鳍上产生的升力, l 为鳍上升力中心至船体重心的垂向距离.

不同于减摇鳍在中高航速下的升力方程,鳍在低航速下的升力模型要复杂得多.为了简化分析过程,以NACA矩形鳍为例,考虑鳍绕自身的鳍轴以角速度 ω 进行旋转运动,同时受到线速度为 v 的来流速度影响,合并所有可确定的变量后鳍在低航速下产生的升力最终可简化为^[4,11]

$$F(\alpha) = (k_a \omega |\omega| / 3 + k_b v v \sin \alpha \operatorname{sign} \omega + k_c v^2 \sin \alpha |\sin \alpha|) \cos \alpha + k_d \dot{\omega} \cos \alpha. \quad (4)$$

其中: k_a, k_b, k_c, k_d 为相应的系数, α 为鳍角.可见在低航速下,鳍上的升力与鳍角、角速度、角加速度和航速均有关,无法仅凭当前时刻的 α 和 v 确定升力的大小,式(4)是一个具有记忆效应的非线性方程.

2 低航速减摇控制器设计

2.1 横摇减摇原理

由式(1)可知,如果能够使鳍上产生的控制力矩 K_c 恒等于环境对船体的扰动力矩 K_ω 且相位相差 180° ,即 K_c 与 K_ω 的幅值相等符号相反,则可以使 $\phi = \dot{\phi} = \ddot{\phi} = 0$. 在实际控制器的设计中,鉴于 K_ω 并不能直接测量,所以通常会采用 $\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}$ 或者它们的组合来产生 K_c , 令

$$K_c = A\phi + B\dot{\phi} + C\ddot{\phi}, \quad (5)$$

其中 A, B 和 C 为控制系数. 如果这些系数满足

$$\frac{A}{C_e} = \frac{B}{2N_e} = \frac{C}{I_x + \Delta I_x} = K, \quad (6)$$

其中 C_e 和 N_e 为由式(1)获得的等效恢复力矩系数和阻尼力矩系数,则减摇鳍的效用相当于把 K_ω 减小到原来的 $1/(1+K)$ 。

2.2 低速减摇控制器设计难点

在中高航速下,鳍上产生的升力^[10-11]为

$$F = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_L(\alpha). \quad (7)$$

其中: ρ 为流体密度, A 为鳍的面积, $C_L(\alpha)$ 为升力系数. 鳍角与升力近似成比例且保持同相位,因此可以直接根据式(5)和(7)来控制鳍角 α 获得 K_c . 然而,不同于中高航速下的控制问题,在低航速下减摇鳍的控制中,主要面临以下问题:

1) 升力与鳍角的非线性关系.

不同于式(7),在低航速下的升力模型(4)与 α 、 $\dot{\alpha}$ 和 $\ddot{\alpha}$ 均有关,是具有记忆效应的非线性复杂方程. 不能根据对 F 的要求确定唯一的鳍角 α .

2) 升力与鳍角相对航速敏感.

在低航速下,鳍上产生升力的幅值与船舶的航速 v (来流速度)和鳍拍动的角速度 ω 直接相关,且在不同的航速下,升力与鳍角的相位关系是不同的. 图1展示了鳍以 40° 做周期5s的正弦转动,分别在0.0kn、1.5kn、3.5kn和5.5kn航速下鳍上的升力与鳍角的相位关系. 在图1中,为了更清楚地展现升力与鳍角的相位关系,把升力进行归一化处理,即任何航速下的最大升力为1.

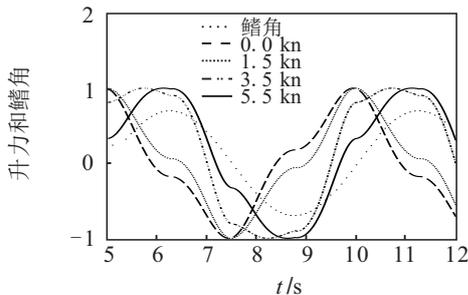


图1 不同航速下升力与鳍角的相位关系

从图1中可以看出,在低航速下,升力的相位是超前角度相位的,且航速越低,超前值越大. 同时在1.5~5.5kn航速下,相位关系对航速十分敏感,如果不能有效解决这个问题而导致相位错误,则不仅不能减摇,而且还有可能造成增摇.

3) 横摇方程中参数的不确定性和时变性.

为了获得较好的减摇效果,需要控制力矩 K_c 中的参数满足式(6)的关系式. 然而,横摇运动方程中的参数 $I_x + \Delta I_x$ 、 C_e 和 N_e 不仅与船舶本身的结构有关,还与船舶装载情况、环境干扰的大小和频率、浪向和流向、航速和流速、横摇幅度等参数有关,这就造成横

摇运动方程中的参数存在很大的不确定性和时变性,使按照式(6)设计的综合力矩的控制方式有时还劣于单独按照横摇角速度的控制方式.

2.3 减摇鳍控制器设计

随着分数阶微积分理论不断发展,其研究和实践已经逐渐渗透到许多领域^[12-14]. 作为分数阶控制器的典型代表, $PI^\lambda D^\mu$ 控制器是传统的整数阶PID控制器的推广,在保持控制器结构基本相同的情况下,变整数积分为分数阶次(λ)积分,变整数微分为分数阶次(μ)微分,使得分数阶控制器的参数调整更加细腻,同时也具有更高精度和更强鲁棒性. 文献[15]提出了另一种形式的分数阶控制器,即著名的CRONE (commande robuste d'ordre non entier) 控制策略.

对于一个具有 a 阶积分且增益为 K 的单位负反馈系统,其开环传递函数可描述为

$$F(s) = K/s^a, \quad 0 < a < 2. \quad (8)$$

该函数的相位裕度为 $\pi - a\pi/2$ 且与频率无关,其幅频特性曲线是一条斜率为 $-20a$ dB/dec 的直线. 这些特性保证了该函数恒定的相位裕量和无穷大的增益裕量,使闭环系统的谐振峰值和阻尼比与系统增益 K 无关,而仅与阶次 a 相关,因此该函数具有较强的鲁棒性,被称为伯德理想传递函数.

第3代CRONE控制器的基本思想是采用下式结构形式来近似伯德理想传递函数:

$$L(s) = k(\omega_l/s + 1)^{n_l} \left(C_0 \frac{1 + s/\omega_l}{1 + s/\omega_h} \right)^\alpha \times \cos \left[-b \text{Log} \left(C_0' \frac{1 + s/\omega_l'}{1 + s/\omega_h'} \right) \right] \frac{1}{(s/\omega_h + 1)^{n_h}}. \quad (9)$$

同时考虑被控对象不同类型的不确定性,使得被控对象参数在已知范围内变化时,系统的阻尼比不低于某个特定值或闭环增益不超过某个特定值^[16-17],其设计指标则根据被控对象和对系统性能的具体要求而定.

式(9)中有9个参数,分别为 $k, \omega_l, \omega_h, \omega_l', \omega_h', a, b, n_l$ 和 n_h . k 为增益,整个减摇控制系统的相位曲线幅值和增益曲线斜率由实数阶微分 a 决定,而增益曲线幅值和相位曲线斜率由虚数阶微分 b 确定. 为了保证闭环系统的稳定性,低频段要包含被控对象的积分项,因此整数 n_l 要大于或等于被控对象的积分项数目. 整数 n_h 保证了对高频干扰的拟制性能,保护机械系统免于过度磨损. 这样可以保证系统在频段 $[\omega_l, \omega_h]$ 中有固定的相位,在频段 $[\omega_l', \omega_h']$ 中有固定的幅值. 令 $\omega_u = (\omega_l \omega_h)^{1/2}$, $\omega_u' = (\omega_l' \omega_h')^{1/2}$, 则

$$C_0 = \omega_u / \omega_h, C'_0 = \omega'_u / \omega'_h.$$

船舶低航速减摇鳍控制器设计的关键在于对上

述3个问题的有效解决. 为此采用基于第3代CRONE的控制策略,如图2所示.

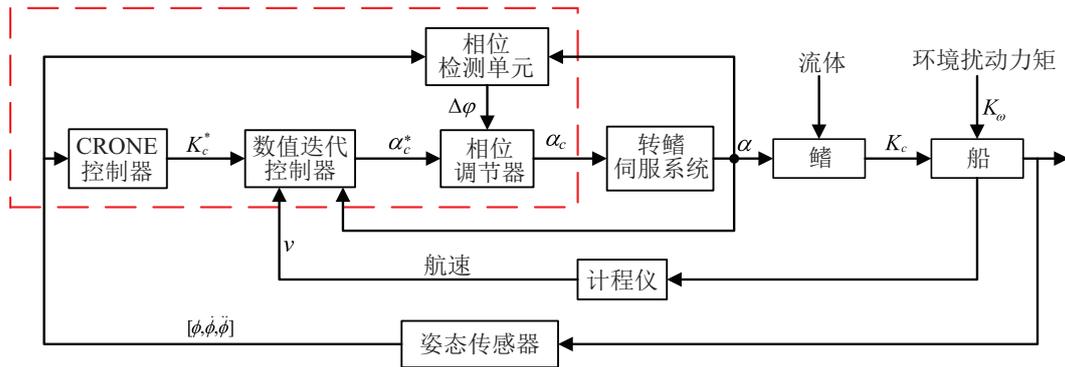


图2 低航速减摇鳍控制策略

合理选择 $L(s)$ 中参数可以保证系统的鲁棒性,使被控对象参数在已知范围内变化时,系统的阻尼比不低于某个特定值. 减摇系统的阻尼直接决定了海洋环境干扰下的减摇效果,因此通过合理选择参数,可以保证船舶横摇运动模型中参数在已知范围内变化时的减摇效果,这样可以解决第3个问题.

由于实际应用中并不能直接进行鳍上控制力矩的反馈而只能通过转鳍伺服系统控制鳍角,并依靠鳍角与流体的相互作用产生升力进而形成控制力矩 K_c . 图2中: K_c^* 是CRONE控制器计算的减摇所需的控制力矩, α_c^* 是数值迭代控制器计算的鳍角控制量, α_c 是最终的传递给转鳍伺服系统的鳍角指令.

在低航速下,如果像常规减摇鳍一样,使鳍保持类似正弦的运动(图1),则升力非常小,因此必须采用急速拍动增加角速度^[4-5,11],利用水的阻力形成“升力”(实际是使用的阻力原理而非升力原理,为了与高航速下的升力一致,在不引起误会的前提下统称为升力),但受制于鳍机械角度限制,导致鳍保持类似梯形的运动方式. 该运动方式决定了在一个横摇周期内,只能提供短暂的控制力矩. 为了获得最佳的减摇效果,希望控制力矩在环境扰动力矩最大位置附近起作用. 因此在鳍角的运动上会有一个与扰动频率相关的相位差.

此外,由于计程仪的原理决定了其在低航速下测量误差较大,使按照反演控制器获得的鳍角只是理论上的最佳相位匹配. 更进一步,转鳍伺服系统也会带来一定的相位滞后,因此在控制策略中设计了相位检测单元和相位调节器,在保证控制器稳定裕度的前提下,可以在一定范围内对输出的鳍角控制指令进行相位调整. 相位调节器采用基于Kalman滤波器的设计,根据前一个周期的相位差 $\Delta\varphi$,对当前周期的相位差 $\Delta\varphi^*$ 进行预报,并进行滚动更新. 这样就可以使控制

力矩的相位和扰动力矩的相位保持最佳的匹配,同时解决了第1个和第2个问题.

2.4 数值迭代控制器设计

令求解的方程为

$$g(x) = K_c^* - F(\alpha_c^*) = 0. \quad (10)$$

数值迭代控制器的作用是在 $[\alpha_1, \alpha_2]$ 内利用式(4)进行数值迭代,计算鳍角控制量,使式(10)成立,其中

$$\begin{cases} \alpha_1 = \max(\alpha - \Delta\alpha, -\alpha_L), \\ \alpha_2 = \min(\alpha + \Delta\alpha, \alpha_L). \end{cases} \quad (11)$$

这里: α 为当前鳍角, $\Delta\alpha$ 为根据转鳍伺服系统性能计算的每个伺服周期允许的鳍角变化量, α_L 为机械允许的鳍角最大值.

由于通常的数值迭代算法(如牛顿-瑞弗森迭代法、割线法等)都要求函数在 $[\alpha_1, \alpha_2]$ 范围内单调有解,但式(4)不仅与 α 有关,还与其导数和二阶导数有关,并不能保证其单调性,同时式(10)也往往是无解的,只能获得 $|K_c^* - F(\alpha_c^*)|$ 在 $[\alpha_1, \alpha_2]$ 范围内的最小值,为此设计两种方法:

1) 第1种是最原始的方法,从 α_1 到 α_2 的范围内,以0.001 rad为步长,求解 $|K_c^* - F(\alpha_c^*)|$ 的最小值,求解过程如下:

step 1: 初始化,令循环变量 $k = 0$, 鳍角控制量的最优解 $\text{BestJ} = \alpha_1$, 最优解的数值 $\text{Bestg} = |K_c^* - F(\alpha_1 + k \times 0.001)|$.

step 2: 令 $k = k + 1$, 判断 $\alpha_1 + k \times 0.001$ 是否大于 α_2 , 如果大于则退出循环到step 4, 否则执行step 3.

step 3: 计算新的 $\text{BestgN} = |K_c^* - F(\alpha_1 + k \times 0.001)|$ 的数值, 如果 BestgN 小于 Bestg , 则令 $\text{BestJ} = \alpha_1 + k \times 0.001$, $\text{Bestg} = \text{BestgN}$, 否则保持 BestJ 和

Bestg的值不变. 跳转到step 2.

step 4: 输出 $\alpha_c^* = \text{BestJ}$.

2) 第2种是利用实数编码的遗传算法(GA)求解 $|K_c^* - F(\alpha_c^*)|$ 的最小值.

作为一种结构简单且高效的优化算法, 遗传算法非常适合于求解复杂的非线性问题. 而采用实数编码方式的GA可以克服二进制编码方式引起的海明悬崖问题, 使对问题求解时可以达到非常高的精度^[18-19]. 本文也尝试采用该方式对式(10)进行求解, 其计算过程如下.

step 1: 初始化, 设置种群数量PS, 最大优化数MG, 交叉概率PX, 变异概率PM, α_c^* 的上下界AcUB和AcLB, 在上下界范围内随机产生初始种群Pop, 令循环变量 $k = 0$;

step 2: 计算染色体的适应度并记录最优个体BestJ;

step 3: 分别进行选择、交叉和变异操作, 形成新的种群Pop;

step 4: 判断是否满足终止条件 ($|K_c^* - F(\alpha_c^*)| < \text{预设值}$ 或者 $k > \text{MG}$), 如果满足, 则退出循环到step 5, 否则跳转到step 2;

step 5: 输出 $\alpha_c^* = \text{BestJ}$.

由于现在的计算机性能已经足够好, 经过测试, 这两种算法都可以在伺服周期内完成计算. 同时第2种方法花费的时间要小于第1种方法, 因此, 设计中采用基于遗传算法的数值迭代法.

3 数值仿真和船模试验

3.1 数值仿真研究

以某600t巡逻船为例, 其排水量 $D = 610\text{t}$, 船长 $L = 65.0\text{m}$, 船宽 $B = 9.5\text{m}$, 吃水 $H = 2.5\text{m}$, 稳心高 $\text{GM}_h = 1.178\text{m}$, 重心高 $\text{CG}_h = 3.526\text{m}$, 谐摇周期 $T_\phi = 6.4\text{s}$. 要求在有义波高 $h_{1/3} = 2.5\text{m}$ 的海况下, 在 $0 \sim 6\text{kn}$ 航速范围内, 启动减摇装置后船的剩余横摇角有义值不大于 5° . 为此该船设计安装一对固定式减摇鳍, 单鳍面积 3.0m^2 , 翼型为NACA-0015, 展弦比0.5.

图3显示了0kn时扰动力矩与控制力矩的对比, 从图3中可以看出, 当扰动力矩较大时, 控制力矩经常处于饱和状态.

图4显示了3.5kn时减摇前后横摇角的对比, 减摇后船舶剩余横摇角的有义值为 1.69° , 其他不同工况下的剩余横摇角列于表1中, 可以看出, 在低航速下, 随着航速的升高, 可利用的推进系统的能量越大, 减摇效果越好. 不同航速下均满足设计要求.

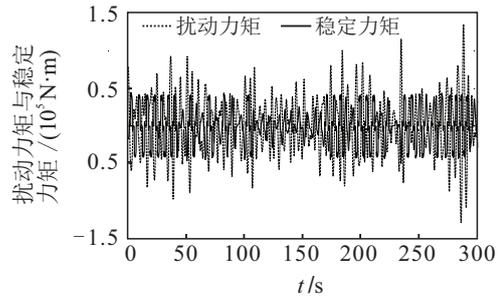


图3 0.0kn时的扰动力矩和稳定力矩

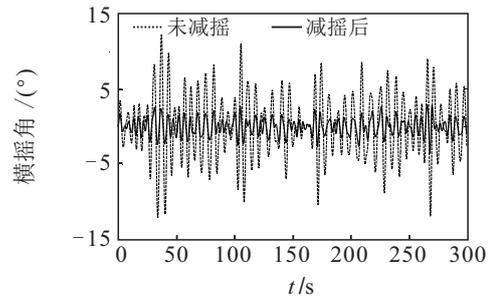


图4 3.5 kn时横摇角对比

表1 不同航速下横摇角有义值

序号	航速/kn	$\phi_u / (^\circ)$		$\phi_s / (^\circ)$		减摇效果/%	
		仿真	试验	仿真	试验	仿真	试验
1	0.0	12.27	12.34	4.61	4.01	62.43	67.50
2	1.5	11.62	11.51	3.91	3.44	66.35	70.11
3	3.5	10.98	09.13	2.67	1.30	75.68	85.76
4	5.5	09.78	07.81	1.66	0.99	83.03	87.32
5	0.0	12.96	-	4.73	-	63.50	-
6	0.0	11.72	-	4.60	-	60.75	-
7	3.5	08.09	-	2.56	-	68.36	-

3.2 船模试验

船模试验是研究船舶操纵性和耐波性的重要且有效的手段. 因为船模尺度小、成本低、建造容易, 同时水池试验还有利于重复试验环境, 使用便利的测量设备, 所以船模水池试验是目前世界上普遍采用的船舶性能研究方法.

为了对设计的控制策略进行验证, 进行船模水池试验. 限于试验条件, 只进行规则波条件下的减摇试验.

图5(a)为0kn时的船模横摇角曲线, 在11s左右关闭减摇鳍, 在相同的扰动下, 减摇鳍关闭后横摇角迅速增大. 图5(b)为3.5kn(对应实船速度)时的船模横摇角曲线, 在20s左右开启减摇鳍, 在相同的扰动下, 鳍开启后横摇角逐渐减小. 统计结果同样列于表1中, 表1中数据进行统计时, 扣除了在鳍开启/关闭时曲线的不稳定段.

从表1中第1~4行可以看出, 在 $0 \sim 5.5\text{kn}$ 航速下, 仿真的剩余横摇角最大值为 4.61° , 最小值为 1.66° , 船模试验的剩余横摇角最大值为 4.01° , 最小值

为 0.99° ,且随着航速升高,减摇效果得到提高,同时船舶自身阻尼增大,剩余横摇角越来越小.可以预见,该船可以满足 $0\sim 6\text{kn}$ 航速范围内,启动减摇装置后船的剩余横摇角有义值不大于 5° 的要求.

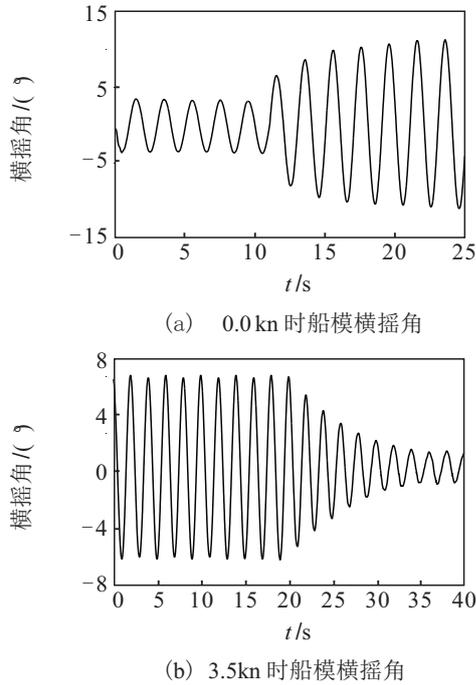


图5 船模横摇角曲线

注1 ϕ_u 和 ϕ_s 分别为减摇前后横摇角有义值.

表1中第5行数据是 0kn 航速下阻尼减小 10% 的仿真结果,第6行数据是 0kn 航速下阻尼增加 15% 的仿真结果,从这两行数据与第1行的对比可以看出,剩余横摇角变化很小.由于阻尼的变化引起未减摇时横摇角有较小的变化,进而导致减摇效果有所变化.在仿真中,由于每次仿真都会随机地生成一组新的环境扰动信号,该信号的不同也会造成统计结果有稍许误差.表1中第7行是 3.5kn 航速下谐摇周期变化至 7.04s 、横摇模型中转动惯量增加 21% 、阻尼增加 10% 时的仿真数据,从与第3行的对比可以看出,剩余横摇角变化不大.由于转动惯量和阻尼的变化引起未减摇时横摇角有较大的变化,进而导致减摇效果有所变化.由于在进行CRONE控制器设计时,是以剩余横摇角为目标进行设计的,从第5~第7行可以看出,所设计的控制器具有较强的鲁棒性.

从表1中还可以看出,船模试验减摇效果要高于仿真效果.这主要是由以下两点原因造成的:一是船模试验的干扰频率是船模的谐摇频率,在这个频率点减摇鳍的减摇效果最好,而仿真中所用的随机干扰包含不同频率的成分,对于离谐摇频率比较远的干扰信号,减摇效果变差;二是试验条件下航速准确且正弦干扰信号频率固定,此时即使没有Kalman滤波器也可以做到控制力矩与干扰力矩的相位几乎完全匹

配,而在随机干扰下,干扰信号的过零周期是随机变化的,对相位差的估计只能达到滤波器效果下的“最佳”,而不是完全匹配.

文献[6]在零航速状态下设计了变约束模型预测控制器,由于采用的船型和鳍面积不同,且无法根据文献[6]中给出的船舶基本尺度参数获得其横摇运动方程,直接对比减摇效果意义不大.为了对比不同控制器间的性能差异,定义如下评价指标:

$$Pe = (\phi_u - \phi_s)/A. \quad (12)$$

该指标为单位鳍面积可以减少的横摇角度幅值,间接表征了对鳍(或鳍上可以提供的升力)的利用效果,直接与控制方法有关.表2中对该指标进行了对比,由于文献[6]只对理想的零航速情况进行了设计,用表1中的第1行数据与其对比,同时在表2中增加了一行有义波高为 2.0m 时的仿真数据.因为本文仿真的船舶吨位较文献[6]大,在 1.0m 波高时未减摇时的横摇角比较小,所以 1.0m 波高时的数据不具有代表意义,故未给出.需要注意的是表2将文献[6]中横摇角的标准差转换为横摇角的有义值以方便对比.

表2 不同控制器下单位鳍面积提供的减摇能力

控制器	$h_{1/3}/\text{m}$	A/m^2	$\phi_u/(\circ)$	$\phi_s/(\circ)$	$Pe/(\circ/\text{m}^2)$
文献[6]	1.00	3.76	10.97	3.13	2.09
文献[6]	2.00	3.76	18.96	10.30	2.30
本文	2.00	3.00	9.98	2.35	2.54
本文	2.50	3.00	12.27	4.61	2.55

文献[6]的鳍采用了 0.4 的展舷比,小于本文中的 0.5 ,在零航速下单位鳍面积可以提供更大的升力^[11].但从对比结果可以看出,利用分数阶鲁棒控制器可以提供更大的 Pe ,且在不同的海况下,对鳍的利用效率基本相同,高海况时减摇效果变差最主要的原因是鳍上提供的升力有限.从文献[6]中的图4可以看出:在剩余横摇角有义值为 3.13° 时,其鳍角基本未达到饱和,在剩余横摇角有义值达到 10.30° 时, Pe 仅增加了 10% ,由此可以推测,在 2.0m 有义波高时,其鳍角饱和率仍然很小,具有进一步提升减摇效果的可能.或者可能文献[6]的作者认为减摇效果已经达到了要求,对控制器的参数进行了保守设计.

4 结论

此前对减摇鳍的研究大多针对常规的中高航速应用和理想的零航速应用进行,在低航速状态下的应用基本未涉及.鉴于船舶低航速下对减摇的需求,提出并设计了相应的控制策略,文中对减摇鳍在低航速下控制的难点问题进行了分析.在低航速状态下,鳍上的升力模型具有非线性、记忆性和对航速变化敏感的问题.同时船舶横摇运动方程也具有较大的非

线性和不确定性(在其他航速下也存在该问题)。

针对减摇鳍在低航速下控制的上述难点问题,提出了有效的解决方法。通过数值迭代解决了低航速下升力相位对航速十分敏感的问题;利用分数阶鲁棒控制器保证了模型参数在一定范围内变化时整个系统的减摇性能。

为了对所设计的控制策略进行验证,分别进行了仿真和船模试验,仿真数据和试验结果均满足巡逻船的设计指标要求。下一步将在有条件的水池进行随机波下的减摇试验,以进一步对控制策略进行验证和改进,以期早日可以进行实船试验。

参考文献(References)

- [1] Dallinga R P. Roll stabilization at anchor: Hydrodynamic aspects of the comparison of anti-roll tanks and fins[R]. Amsterdam: Maritime Research Institute Netherlands Manager Seakeeping Department, 2002: 1-5.
- [2] 金鸿章, 罗延明, 綦志刚, 等. 基于Weis-Fogh机构的零航速减摇鳍升力特性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(7): 762-767.
(Jin H Z, Luo Y M, Qi Z G, et al. Investigation of the lifting force of a zero speed fin stabilizer with Weis-Fogh mechanism[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(7): 762-767.)
- [3] 金鸿章, 王龙金, 李冬松, 等. 零航速减摇鳍升力模型分析及系统仿真研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(5): 775-778.
(Jin H Z, Wang L J, Li D S, et al. Research on lift model of zero speed fin stabilizer system and its simulation[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2008, 32(5): 775-778.)
- [4] Wang F, Jin H Z, Qi Z G. Modeling for active fin stabilizers at zero speed[J]. Ocean Engineering, 2009, 36(17/18): 1425-1437.
- [5] 金鸿章, 王帆. 零航速仿生减摇鳍水动力模型改进[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 89-92.
(Jin H Z, Wang F. Improving hydrodynamic model for zero speed bionic fin stabilizer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(23): 89-92.)
- [6] 金鸿章, 王帆, 马玲, 等. 零航速减摇鳍两步主从控制律设计[J]. 自动化学报, 2012, 38(6): 1059-1064.
(Jin H Z, Wang F, Ma L, et al. Design a two-step master-slave control law for zero-speed fin stabilizers[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(6): 1059-1064.)
- [7] 张晓飞. 船舶零航速减摇鳍建模与控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2008.
(Zhang X F. Research on modeling and control of fin stabilizer at zero speed[D]. Harbin: College of Automation, Harbin Engineering University, 2008.)
- [8] 马鉴恩, 汤振明. 减摇鳍动态水动力性能水池模型实验报告[R]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学船模水池实验室, 2003: 3-10.
(Ma J E, Tang Z M. Dynamic hydrodynamic report of fin stabilizer by tank model test[R]. Harbin: Harbin Engineering University Ship Model and Tank Laboratory, 2003: 3-10.)
- [9] Mc Cue L. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2016, 36(1): 78-79.
- [10] Tristan P, Mogens B. Mathematical ship modeling for control applications[R]. Lyngby: Technical University of Denmark, 2016: 1-22.
- [11] 宋吉广, 金鸿章, 孟令卫. 全航速减摇鳍型优化设计[J]. 中国造船, 2013, 54(2): 1-10.
(Song J G, Jin H Z, Meng L W. Optimum design of aerofoil for fin stabilizer at whole speed range[J]. Shipbuilding of China, 2013, 54(2): 1-10.)
- [12] Lei S Y, Wang D J, Fan Y J. Pole placement with fractional-order controllers for time-delay systems[J]. Control and Decision, 2015, 30(6): 1131-1134.
- [13] Podlubny I. Fractional-order systems and controller[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(1): 208-214.
- [14] Wang C Y, Sun J, Xiao B, et al. Disturbance observation fractional order control method for airborne photoelectric stabilized platform[J]. Control and Decision, 2020, 35(8): 1902-1908.
- [15] Oustaloup A, Sabatier J, Lanusse P, et al. An overview of the CRONE approach in system analysis, modeling and identification, observation and control[C]. Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control. Seoul: IEEE, 2008: 14254-14265.
- [16] Oustaloup A, Levron F, Mathieu B, et al. Frequency-band complex noninteger differentiator: Characterization and synthesis[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2000, 47(1): 25-39.
- [17] Fahim S M, Ahmed S, Imtiaz S A. Fractional order model identification using the sinusoidal input[J]. ISA Transactions, 2018, 83: 35-41.
- [18] Shah P, Singh B. Robust EnKF with improved RCGA-based control for solar energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 7728-7740.
- [19] Song Y Y, Wang F L, Chen X X. An improved genetic algorithm for numerical function optimization[J]. Applied Intelligence, 2019, 49(5): 1880-1902.

作者简介

宋吉广(1976—), 男, 讲师, 博士, 从事船舶多翼面综合姿态控制、非线性控制的研究, E-mail: songjg@vip.163.com;

侯立阳(1976—), 男, 高级经济师, 从事数据处理、广电网络运行与管理等研究, E-mail: 397840412@qq.com;

梁利华(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事船舶操纵、智能控制等研究, E-mail: lianglihua@hrbeu.edu.cn;

刘彦文(1976—), 女, 副教授, 博士, 从事鲁棒控制等研究, E-mail: liuyanwen@hrbeu.edu.cn.