

文章编号: 1001-0920(2011)09-1343-05

全航速升力反馈减摇鳍控制策略研究

宋吉广^a, 金鸿章^{a,b}, 梁利华^a, 王经甫^a

(哈尔滨工程大学 a. 自动化学院, b. 船舶控制工程教育部工程研究中心, 哈尔滨 150001)

摘要: 提出全航速减摇鳍控制策略, 对低航速和中航速切换策略进行研究. 采用升力反馈封装鳍角到升力的不确定性, 避免在零航速和低航速下复杂的控制规律; 同时, 基于 T-S 模型将横摇非线性不确定系统转化为线性时变系统, 并将控制中的约束非线性优化问题转化为二次规划问题, 避免了预测控制中的非线性优化在线求解. 以某船为例, 给出了低中航速的切换控制策略, 仿真结果表明了该方法可以使减摇鳍满足全航速减摇要求.

关键词: 全航速减摇鳍; 升力反馈控制; 模糊模型; 模型预测控制

中图分类号: U664.7

文献标识码: A

Study on control strategy for ship stabilizer with lift feedback at all speed

SONG Ji-guang^a, JIN Hong-zhang^{a,b}, LIANG Li-hua^a, WANG Jing-fu^a

(a. College of Automation, b. Engineering Research Center of Ship Control Engineering of Ministry of Education, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. Correspondent: SONG Ji-guang, E-mail: songjiguang@hrbeu.edu.cn)

Abstract: This paper presents a control strategy of all-speed fin stabilizer, and studies the switch principle between low speed and medium speed. To avoid the complicated control law in zero or low speed, lift force feedback is adopted to eliminate the uncertainty which exists during the transformation from fin angle to lift force. The ship rolling motion model, which is a nonlinear uncertain system, is linearized to time-varying system by T-S model. The constrained nonlinear optimizing problem is transformed to quadratic programming problem. Thus, the online nonlinear optimizing for predictive control is avoided. The control strategy and switch principle are proposed based on the design of all-speed fin stabilizer for a ship. Simulation results show that this method is able to satisfy the requirement of all-speed stabilization.

Key words: all-speed fin stabilizer; lift force feedback control; fuzzy model; model predictive control

1 引言

减摇鳍是目前应用最成功的船舶减摇装置, 减摇效果可达 90% 以上^[1], 但传统的减摇鳍在零航速或低航速情况下几乎不能提供稳定的力矩. 为了使船舶在全航速情况下都能很好地减摇, 有些船舶既安装减摇水舱又安装减摇鳍. 但安装两套减摇设备不但经济性能欠佳, 而且还占用了船舶内部宝贵的空间和排水量. 为实现船舶在各种航速下经济有效的减摇, 迫切需要一种具有零航速、低航速和中高航速工作模式的新型全航速减摇鳍系统.

为此, 荷兰的 Maritime 研究院和美国的 Quantum Controls 公司对零航速减摇鳍进行了相关研究, 证明零航速减摇鳍减摇效果要明显优于被动式减摇水舱, 效果可达 63%~75%^[2-3]. 国内零航速减摇鳍的研究主要集中在升力产生机理和功率优化上, 并形成了一定

的研究成果^[4-5]. 因为中高航速减摇鳍技术已非常成熟, 所以零航速或低航速下减摇鳍的控制策略、低航速与中高航速控制策略切换的研究是目前全航速减摇鳍研究中的一个关键问题.

由于鳍上的升力存在很大的非线性和不确定性, 同时由于装载情况、浪向等因素的影响, 导致船舶横摇非线性方程亦具有很大的不确定性. 为了提高全航速减摇鳍的减摇效果, 本文在给出全航速减摇鳍控制策略的基础上, 采用升力反馈技术封装鳍角到升力的非线性和不确定性, 同时采用基于 T-S 模型的广义预测控制 (GPC) 算法保证全航速下满意的减摇效果.

2 船舶横摇模型

依照 Conolly 理论, 船舶横摇运动的非线性方程描述如下:

收稿日期: 2010-05-14; 修回日期: 2010-07-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879012, 50575048).

作者简介: 宋吉广(1976—), 男, 博士生, 从事船舶控制、船舶特辅装置的研究; 金鸿章(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、船舶控制等研究.

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

其中: I_x 和 ΔI_x 分别为相对于通过船舶重心纵轴的转动惯量和附加转动惯量, $B_1 \frac{d\phi}{dt} + B_2 \left\| \frac{d\phi}{dt} \right\| \frac{d\phi}{dt}$ 为横摇角速度引起的阻尼力矩, $C_1\phi + C_3\phi^3 + C_5\phi^5$ 为船舶恢复力矩, K_ω 为海浪扰动力矩, K_f 为减摇鳍的稳定力矩, ϕ 为船舶的横摇角.

扰动力矩 $K_\omega = Dh\alpha_{01}$, D 为船舶的排水量, h 为稳心高, $\alpha_1 = \alpha_{01} \sin(\omega_e t)$, α_{01} 为对应于波倾角的最大有义波倾角, ω_e 为船舶的遭遇频率; 稳定力矩 $K_f = W_c L u$, 其中 u 为控制量, L 为船体重心到升力中心的距离, W_c 为指令到升力的传递函数. 令闭环系统的偏差 $e = \phi - \phi_r$, $x_1 = e$, $x_2 = d(x_1)/dt$, ϕ_r 为参考输入. 对于减摇控制系统, 目标是使船停止横摇, 因此 $\phi_r = 0$. 由式 (1) 可得横摇运动离散方程如下:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 1 + G & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \left(\frac{-TW_C}{I_x + \Delta I_x} u - \frac{-TDh\alpha_1}{I_x + \Delta I_x} \right), \quad (2)$$

其中 T 为采样周期. 式中

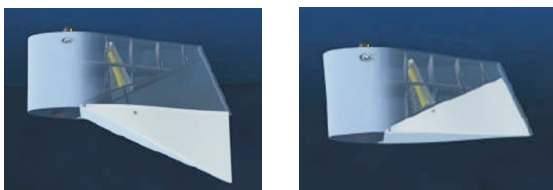
$$G = -T(C_1 + C_3(x_1(k))^2 + C_5(x_1(k))^4)/(I_x + \Delta I_x),$$

$$H = -TB_1/(I_x + \Delta I_x) - TB_2 \|x_2(k)\|/(I_x + \Delta I_x).$$

2.1 零航速和低航速下的升力模型

在零航速或低航速下能够产生足够升力的结构, 主要有基于 Weis-Fogh 机构的双翼零航速减摇鳍和基于仿生鱼尾翼推进方式的单翼零航速减摇鳍^[5]. 由于基于纵向拍动的单翼零航速减摇鳍与传统减摇鳍的结构非常相似, 能够方便地进行零航速、低航速和中高航速工作状态的转换. 所以, 本文中全航速减摇鳍的结构采用单翼纵向拍动型.

因为只安装了一片翼面, 在同样的运动方式下, 基于纵向拍动工作模式的零航速减摇鳍产生的升力比基于 Weis-Fogh 机构零航速减摇鳍产生的升力要小. 为了增大零航速下或低航速下鳍主动拍水时产生的升力值, 全航速减摇鳍采用小展弦比鳍型, 同时主鳍带有一个可收回的附翼, 这个附翼只有在零航速或低航速减摇时才展开, 如图 1 所示. 这样可以增加减



(a) 附翼展开

(b) 附翼收回

图 1 全航速减摇鳍的翼型结构

摇鳍的扫水面积, 从而能够在零航速时产生更大的升力. 在中高航速时附翼收回到主鳍中, 从而减小航行时由于鳍面产生的阻力^[6].

鉴于零航速减摇鳍系统采用主动急拍产生升力的特殊工作模式, 零低航速下鳍的受力情况属于非定常流问题, 不能采用固定翼理论进行分析. 本文采用伯拉休斯定理来分析鳍在理想流体环境中转动时产生的升力, 当鳍轴位于距离导缘 $1/5$ 弦长时, 在低航速下鳍上产生的升力近似如下^[5]:

$$F = F_1 + F_2 \cos \alpha. \quad (3)$$

式中

$$F_1 = 7.2(d + x_0)^2(c - x_0)e\rho\omega\|\omega\| \sin \alpha +$$

$$11.58(d + x_0)^2(c - x_0)e\rho\omega\|\omega\| \cos \alpha +$$

$$[7.2(d + x_0)^2e\rho + Ape]\omega v_0 + 0.16\pi e\rho v_0,$$

$$F_2 = (12d^2c + c^3)e\rho\omega\|\omega\|/3 - 4dce\rho v_0 \omega \cos \alpha.$$

其中: d 为鳍面弦长的 $1/4$, c 为弦长中点到鳍轴的距离, A 为鳍面弦向截面积, ω 为鳍面转动的角速度, v_0 为鳍相对于水流的速度, e 为鳍型展长, ρ 为流体密度, $x_0 = dt'/1.3$, t' 为鳍型厚度比.

式 (3) 中 $v_0 = 0$ 时, 便是零航速减摇鳍的升力模型. 由式 (3) 可知, 升力到鳍角和角速度的映射并不唯一, 同时由于升力与角度和角速度的非线性关系, 如果在低航速下使用传统的鳍角控制方式将导致控制规律过于复杂.

2.2 中高航速下的升力模型

减摇鳍在中高航速下, 鳍上产生的升力如下:

$$F = \rho v_0^2 A_f C_L(\alpha_e)/2. \quad (4)$$

其中: ρ 为流体密度, v_0 为鳍相对于水流的速度, A_f 为鳍的投影面积, C_L 为升力系数, α_e 为鳍和流速之间的有效攻角.

式 (4) 中升力系数 C_L 受众多因素影响, 当鳍在转动时, 由于鳍的“前缘动壁”效应, 随着攻角的增加使鳍吸力面上流速加大, 从而使升力系数增大并推迟失速; 相反, 当鳍的攻角从大减小时, 鳍吸力面流速降低, 从而导致升力降低. 这样当鳍绕轴来回摆动时, 一个来回摆动周期的升力系数曲线不会重合^[7]. 文献 [8] 的水动力实验也说明了这一问题, 因此由式 (4) 确定的升力存在很大的非线性.

2.3 升力反馈控制

船舶在海上航行时伴随着六个自由度的运动, 这些运动会对鳍上的水动力特性产生不确定性影响, 导致鳍上产生的升力相当复杂, 使普通的鳍角控制减摇鳍往往达不到设计效果. 如果采用鳍上产生的升力作为伺服系统的反馈信号, 而不是采用鳍角进行反

馈,则可以克服由鳍角估算鳍的升力所带来的误差,有效封装鳍与舳龙骨、鳍与船体、前后鳍等干扰因素的影响,同时体现航速、角度、角速度等对升力的影响,减小鳍上的水动力误差,从而使减摇鳍系统能够更准确地获得动态减摇力矩,提高减摇效果.有效封装式(3)和(4)中的非线性和不确定性,可使式(2)中的 W_c 成为一个比例系数,使全航速减摇鳍的控制策略变得相对简单.另外升力反馈减摇鳍还有利于减摇鳍转鳍伺服系统的功率设计,提高减摇鳍的综合控制性能.更为重要的是,在零航速下可以有效降低控制难度,使全航速减摇鳍的工程应用变得更容易.

在全航速下,鳍角反馈也是必不可少的,这不仅是因为控制中需要鳍角和角速度的限制,而且仅仅依靠升力反馈无法精确控制鳍的拍动(零航速和低航速)与转动(中高航速)的切换,容易造成鳍的失速.因此本文采用升力和鳍角的综合反馈,进行全航速减摇鳍的闭环控制.

2.4 全航速减摇鳍控制原则

为了在全航速下使用减摇鳍,对全航速减摇鳍控制策略的研究是至关重要的.在零航速和低航速下采用低航速减摇鳍的控制策略,在中高航速下采用中高航速减摇鳍的控制策略,这其中最重要的部分即是低航速和中航速下控制策略的切换.

为此,设计如下的控制原则:

1) 在全航速范围内,满足减摇效果.能够在全航速下有效工作,满足不同航速区间给定的减摇效果(或剩余横摇角),并且使系统的消耗功率在一个允许的范围.

2) 升力和鳍角饱和率不大于设定值.在高海况下,无论是否达到减摇效果,升力和鳍角的饱和率均限制在一定范围内,以保护机械和液压系统.

3) 低航速和中航速下实现平稳切换,并且要避免频繁切换.因此,需要根据船舶的具体情况,综合考虑减摇效果、功率限制、鳍角限制、鳍角速度限制等进行设计.由于这些约束的存在,针对式(2)设计一个最优的控制器并不是一件容易的事,而MPC是解决这类问题的一个有效途径.

3 全航速减摇鳍模型预测控制

采用升力和鳍角综合反馈控制,虽然可以封装鳍角到升力的不确定性,使式(2)中 W_c 成为一个比例系数,但当船舶运行时,仍存有诸多不确定因素.因此,船舶的横摇模型具有一定的非线性和不确定特性.在船舶运行过程中,海情、船舶装载情况和浪向的变化都会引起船舶横摇运动方程参数的变化,使式(2)中的参数具有很大的不确定性,对控制器的设计提出了

很大的挑战.

模型预测控制是一类基于过程动态模型进行预测和优化的控制算法^[9-10],可以解决上述问题.然而,由于式(2)中的非线性,以及预测控制所要求的对未来输出的预测性,导致性能指标函数非常复杂,难以求取控制量解析解.一些智能优化算法,如遗传算法、人工免疫算法很难满足实时控制的要求.

Takagi和sugeno提出的T-S模糊模型可以以任意精度逼近定义在紧集上的非线性函数^[11-13],因而T-S模型可以很好地运用到船舶横摇方程的参数辨识中.本文采用基于T-S模型的局部递推最小二乘法来动态辨识对象的模型,然后根据得到的线性化模型,采用广义预测控制算法计算控制量,避免了非线性预测控制算法中的非线性滚动优化问题.

3.1 船舶横摇运动的T-S模型及参数辨识

式(2)中的船舶横摇非线性离散时间模型可由 n 条模糊规则来表示,其中第 i 条模糊规则的形式为: R^i : if x_1 is A_1^i and \dots and x_m is A_m^i , then $y^i = p_0^i + p_1^i x_1 + \dots + p_m^i x_m$ ($i = 1, 2, \dots, n$). 则由诸规则的输出 y^i 的加权平均即可求得系统总的输出

$$y = \sum_{i=0}^n \beta_i y^i, \quad \beta_i = \mu_i \sum_{j=0}^n \mu_j,$$

其中各参数的含义可参考文献[11,13].对于式(2)的船舶横摇运动方程而言,其结构一般不会发生变化,也就是说模型的规则数、前件变量的选择等一般不会发生变化,因此只需对前件参数进行离线辨识.由于三角形和梯形隶属函数在特定的拐点处不可微,为避免这种情况,本文采用高斯型隶属函数

$$A^i(x_j) = \exp(-(x_j - v_j^i)^2 / (2(\delta_j^i)^2)),$$

其中 v_j^i 和 δ_j^i 分别代表函数的中心和中心宽度(方差).利用模糊减法聚类来确定模糊系统的规则数以及高斯型隶属度函数的中心,具体算法可参考文献[14].

对后件参数采用如下的带遗忘因子的最小二乘法进行在线学习,采用在线修正控制参数方法,增强所辨识模型的自适应性.

$$\hat{\theta}_j(k+1) = \hat{\theta}_j(k) + \frac{P_j(k)\phi_{j,k+1}}{\phi_{j,k+1}^T P_j(k)\phi_{j,k+1} + \lambda} \times [y(k+1) - \phi_{j,k+1}^T \hat{\theta}_j(k)],$$

$$P_j(k+1) = \left(I - \frac{P_j(k)\phi_{j,k+1}\phi_{j,k+1}^T}{\phi_{j,k+1}^T P_j(k)\phi_{j,k+1} + \lambda} \right) P_j(k) / \lambda.$$

其中: $0 < \lambda \leq 1$,各参数的含义和具体实现可参考文献[12,14].采用局部递推最小二乘算法,把各个规则的后件参数分开进行辨识,减少了计算量;同时对各规则参数的辨识递推进行,可在线修改规则的参数,因而能够及时反映系统的动态变化,适合于在线应用.

3.2 基于 GPC 的减摇鳍全航速控制策略

根据 2.4 节中全航速减摇鳍的控制原则, 采用带约束的输出误差和控制增量加权的二次型性能指标

$$J = (\phi_r - \phi)^T Q (\phi_r - \phi) / 2 + \Delta U^T R \Delta U, \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \phi_{\min} \leq \phi \leq \phi_{\max}, U_{\min} \leq U \leq U_{\max},$$

$$\Delta U_{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max}.$$

其中: $\phi_r = 0$ 为系统输入; ϕ 为模型输出; ΔU 为控制增量; Q 和 R 为正定权重矩阵, 分别为系统输出误差和控制增量的权值; 目标函数的约束 ϕ_{\max} 和 ϕ_{\min} , ΔU_{\max} 和 ΔU_{\min} , U_{\max} 和 U_{\min} 分别为横摇角输出、控制量增量(升力变化率和角速度)和控制量(升力和角度)的最大最小约束。

基于船舶横摇的 T-S 模型, 式(2)可转化为如下的线性时变系统(LTV)^[11]:

$$Y = Gx(k) + F_1 \Delta U + F_2 u(k-1). \quad (6)$$

式(6)中的优化指标变为

$$\min_{\Delta U} J = \min(\Delta U^T H \Delta U / 2 + T \Delta U), \quad (7)$$

s.t.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ -F_1 \\ I \\ -I \\ I \\ -I \end{bmatrix} \Delta U = \begin{bmatrix} Y_{\max} - Gx(k) - F_2 u(k-1) \\ -Y_{\min} + Gx(k) + F_2 u(k-1) \\ \Delta U_{\max} \\ -\Delta U_{\max} \\ \Delta U_{\max} - u(k-1) \\ -\Delta U_{\max} + u(k-1) \end{bmatrix}.$$

式中

$$H = 2(F_1^T Q F_1 + R),$$

$$T = 2(Gx(k) + F_2 u(k-1) - Y_r)^T Q F_1.$$

综合以上分析, 基于 GPC 的全航速减摇鳍控制策略结构如图 2 所示。

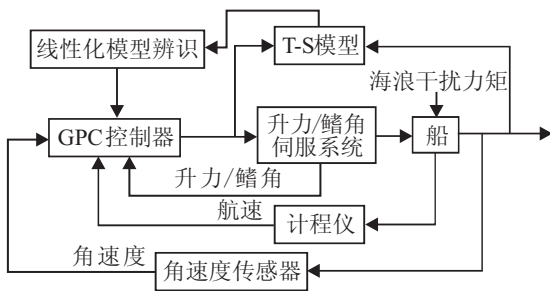


图 2 基于 GPC 的全航速减摇鳍控制框图

4 数值仿真

4.1 设计要求

以某多功能船为例, 其排水量 $D = 1500 \text{ t}$, 船长 $L = 98 \text{ m}$, 船宽 $B = 10.2 \text{ m}$, 吃水 $H = 3.1 \text{ m}$, 稳心高 $h = 1.15 \text{ m}$, 谐振周期 $T_\phi = 7.8 \text{ s}$, 巡航速度为 18 kn , 最大持续航速为 28 kn . 要求: 全航速范围内在有义

波高 $H_{1/3} = 4.0 \text{ m}$ 的海况下, 为定点作业和低航速任务的需要, $0 \sim 6 \text{ kn}$ 下减摇效果不低于 65% ; 同时, 18 kn 以上减摇效果不低于 85% 。

4.2 鳍型和控制策略设计

根据要求, 该船安装一对不可收放式减摇鳍, 设计航速为 18 kn , 主鳍面积为 3.2 m^2 , 附翼面积为 1.0 m^2 . 由式(4)可推算出, 如果在 18 kn 时使用传统减摇鳍的控制策略可以达到 85% 减摇效果, 则采用传统减摇鳍的控制策略, 在 6 kn 没有伸出附翼时约有 9% 的减摇效果, 伸出附翼也仅能达到 12% 左右的减摇效果, 不能满足低航速减摇要求, 在 $0 \sim 6 \text{ kn}$ 时必须使用零航速或低航速控制策略. 因此设计图 3 所示的低航速和中航速切换策略, 航速由低升高时, 小于 6 kn 采用零航速控制方式(依靠拍动产生升力), 其他航速采用传统减摇鳍的控制方式(依靠鳍角和来流速度产生升力), 大于 16 kn 时收回附翼, 以减小减摇鳍对高速航行船舶航速的影响. 航速由高降低时, 大于 7 kn 时使用传统减摇鳍的控制方式, 其他航速采用零航速减摇鳍的控制方式. 小于 17 kn 时需要伸出附翼. 这样即可以保证减摇效果, 也避免了当船舶在 $6 \sim 7 \text{ kn}$ 内航行时控制方式的频繁切换和 $16 \sim 17 \text{ kn}$ 内航行时附翼的频繁收放。

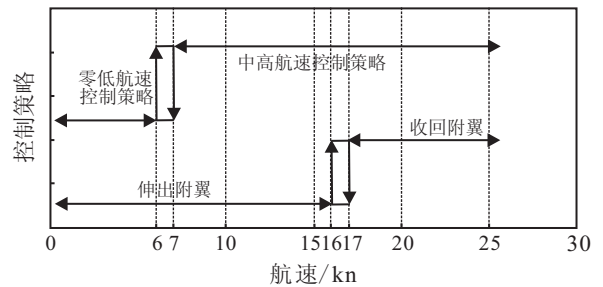


图 3 多功能船低中航速切换策略

4.3 仿真分析

船舶在设计海况 $H_{1/3} = 4.0 \text{ m}$, 垂浪情况下航行. 图 4 和图 5 分别为使用全航速减摇鳍时在 0 kn 和 18 kn 航速下的横摇角和鳍角. 因为没有失速角的影响, 在 0 kn 下鳍角限位被设定在 55° , 而在 18 kn 下鳍角限位被设定在 26° . 表 1 中列出了不同航速下的减摇效果, 从中可以看出全航速减摇鳍可以很好地满足设计要求。

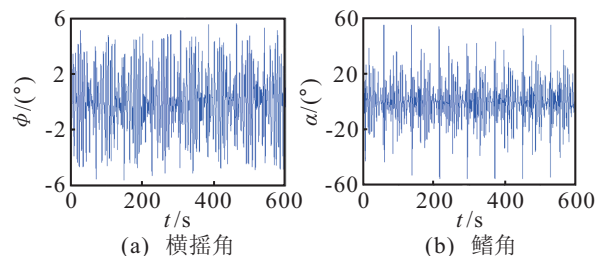


图 4 0 kn 时的横摇角和鳍角

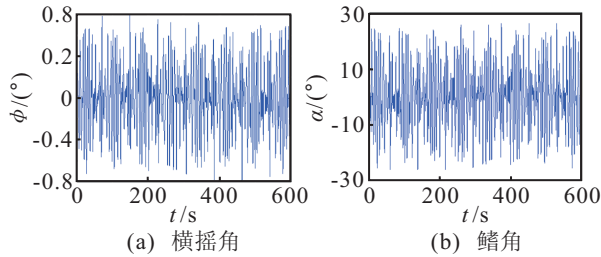


图5 18 kn时的横摇角和鳍角

表1 不同航速下横摇角幅度平均值

航速/kn	P1/(°)	P2/(°)	减摇效果/%
0	6.2313	1.8545	70.24
5	5.8184	1.6741	71.23
15.5	5.6278	0.5001	91.11
16.5	5.6093	1.1513	79.48
18	5.5848	0.2611	95.32

注1 P1, P2分别为未减摇时横摇角幅度的平均值和减摇时横摇角幅度的平均值。

在表1中, 由于考虑了航速对横摇阻尼的影响, 在相同的海况下, 未减摇时, 随着航速升高横摇角有所下降。航速由15.5 kn上升到16.5 kn时, 减摇效果有所降低, 这是由于附翼的收回造成鳍面积的减小而形成的, 而航速上升到18 kn以后, 可依靠来流速度弥补附翼收回造成的鳍面积减小引起的升力下降。

5 结论

本文提出一种基于升力鳍角综合控制的全航速减摇鳍控制策略, 重点对其中的低航速、中航速切换策略进行研究。依靠升力反馈封装鳍角到升力的不确定性, 以及鳍角反馈控制鳍的运动方式(拍动或转动), 基于T-S模型将船舶横摇非线性系统转化为线性时变系统, 并将控制中的约束非线性优化问题转化为二次规划问题。某多功能船的仿真结果表明, 该方法可以使减摇鳍在船舶全航速范围内达到70%以上的减摇效果。

参考文献(References)

[1] 梁燕华, 金鸿章, 李东松. 基于修正因子模糊PID控制在升力鳍系统中的应用[J]. 控制与决策, 2008, 23(10): 1139-1144.
(Liang Y H, Jin H Z, Li D S. Application of fuzzy PID controller based on adjustment factors in lift fin stabilizers[J]. Control and Decision, 2008, 23(10): 1139-1144.)

[2] Ooms J. The use of roll stabilizer fins at zero speed[R]. Amsterdam: Quantum Controls BV, 2002

[3] 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.

[4] 张晓飞. 船舶零航速减摇鳍建模及控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2008.
(Zhang X F. Research on modelling and control of fin stabilizer at zero speed[D]. Harbin: College of Automation, Harbin Engineering University, 2008.)

[5] 王龙金. 零/低航速减摇鳍升力模型及系统控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2010.
(Wang L J. Research on lift model and control strategy of fin stabilizer at zero and low speed[D]. Harbin: College of Automation, Harbin Engineering University, 2010.)

[6] van Wieringen H M. Design considerations on an anchor stabilizing system[R]. Amsterdam: Maritime Research Institute Netherlands Manager Seakeeping Department, 2002

[7] Tristan Perez, Graham C. Goodwin. Constrained predictive control of ship fin stabilizers to prevent dynamic stall[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(4): 482-494.

[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.
(Ma J A, Tang Z M. Dynamic hydrodynamic force report of fin stabilizer model pool experiment[R]. Harbin: Harbin Engineering University Ship Model and Pool Lab, 2003.)

[9] 席裕庚, 李德伟. 预测控制定性综合理论的基本思路和研究现状[J]. 自动化学报, 2008, 34(10): 1225-1234.
(Xi Y G, Li D W. Fundamental philosophy and status of qualitative synthesis of model predictive control[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(10): 1225-1234.)

[10] Kot hare M V, Balakrishnan V, Morari M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities[J]. Automatica, 1996, 32(10): 1361-1379.

[11] 邢宗义, 胡维礼, 贾利民. 基于T-S模型的模糊预测控制研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(5): 495-504.
(Xing Z Y, Hu W L, Jia L M. Fuzzy predictive control based on T-S model[J]. Control and Decision, 2005, 20(10): 495-504.)

[12] 刘忠信, 孙青林, 陈增强, 等. 基于T-S模型的钻杆对中自适应预测控制[J]. 控制与决策, 2002, 17(3): 372-384.
(Liu Z X, Sun Q L, Chen Z Q, et al. T-S model based adaptive predictive control in drill stems windage adjusting[J]. Control and Decision, 2002, 17(3): 372-384.)

[13] 苏佰丽, 陈增强, 袁著祉. 多变量非线性系统的有约束模糊预测解耦控制[J]. 系统工程学报, 2007, 22(5): 546-550.
(Su B L, Chen Z Q, Yuan Z Z. Constrained fuzzy predictive control for multivariable nonlinear systems[J]. J of Systems Engineering, 2007, 22(5): 546-550.)