

基于干扰观测器的SWATH船运动非线性预测控制

梁利华¹, 王保华¹, 贾鹤鸣²

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 针对带有海浪干扰和参数不确定的SWATH船运动控制问题, 提出基于干扰观测器的SWATH船运动非线性预测控制. 首先对SWATH船运动进行建模、参数求解和海浪干扰仿真; 然后根据运动模型设计非线性预测控制律, 对SWATH船升沉和纵摇进行控制, 同时利用干扰观测器对海浪干扰进行观测, 并从理论上证明了所设计的控制器可以保证SWATH船运动的稳定性. 仿真结果表明, 所设计的控制器提高了SWATH船运动控制效果, 且能对海浪干扰进行抑制.

关键词: SWATH船运动; 非线性预测控制; 干扰观测器; 海浪干扰

中图分类号: TP273; U661.32

文献标志码: A

Nonlinear predictive control of SWATH ship motions with disturbance observer

LIANG Li-hua¹, WANG Bao-hua¹, JIA He-ming²

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China. Correspondent: WANG Bao-hua, E-mail: wangbaohua404@yeah.net)

Abstract: For the problems of SWATH ship motions with external disturbances and parametric uncertainty, the nonlinear predictive control with the disturbance observer is proposed for SWATH ship motions. The SWATH ship motion model is built, hydrodynamics are got, and wave disturbances are learned firstly. Then the nonlinear predictive control law is designed for SWATH ship heave and pitch motions. And the disturbance observer is used to observe wave disturbance of SWATH ship. It is theoretically proved that the proposed controller can ensure the stability of SWATH ship motions. Simulation results show that the designed controller can get better performance of SWATH ship motions, also wave disturbances can be restrained.

Key words: SWATH ship motion; nonlinear predictive control; disturbance observer; wave disturbance

0 引言

由于SWATH船具有良好的耐波性, 在军事、海关缉私、海监渔政和海洋调查等方面具有广泛的应用前景. 但SWATH船水线面积小, 会使纵摇运动不稳定, 产生“埋首”运动, 需要利用稳定鳍进行控制. 人们在利用船模实验^[1-2]和控制算法^[3]等对SWATH船运动的研究中, 给出了稳定鳍水动力特性对SWATH船升沉和纵摇的影响, 但其海浪干扰利用船模实验模拟得到, 并没有给出海浪干扰的具体形式, 且控制器结构复杂, 不利于工况下控制系统的实现. SWATH船受到运动姿态变化、海浪干扰等因素的影响会产生不确定性, 需要对其进行实时控制.

预测控制利用滚动优化取代全局一次性优化, 使模型失配、时变、干扰等引起的不确定性能及时得到补偿^[4], 并且建立在有限时域上的滚动优化策略会更加有效. Chen等^[5]对光滑仿射非线性系统利用当前输出各阶导数构造未来输出的Taylor级数预测模型, 导出了以预测输出跟踪误差范数最小为指标的控制解, 解决了利用高控制阶数提高输出预测精度的问题. 该方法在具有特定结构飞行器^[6]和机械系统^[7]中取得了较好的控制效果.

本文结合SWATH船运动控制模型, 以“新世纪一号”SWATH船为例, 利用切片法求解SWATH船运动参数和海浪干扰, 提出了基于干扰观测器的SWATH

收稿日期: 2012-11-14; 修回日期: 2013-02-20.

作者简介: 梁利华(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事船舶运动控制等研究; 王保华(1988—), 男, 博士生, 从事船舶运动控制的研究.

船非线性预测控制律. 通过设计 SWATH 船非线性预测控制律, 利用非线性干扰观测器观测升沉和纵摇运动随机海浪干扰, 使模型失配、时变、干扰等引起的不确定性能够及时得到补偿, 实现了对 SWATH 船运动的非线性预测, 并减小了 SWATH 船升沉和纵摇运动, 增强了系统的鲁棒性.

1 SWATH 船运动模型建模

1.1 运动模型

SWATH 船航行时, 船体坐标系选择如图 1 所示. 取船舶前行的方向为 x 轴正方向, 沿 z 轴产生的垂向运动为 SWATH 船的垂荡(升沉)运动, 绕 y 轴的运动为 SWATH 船的纵摇运动.

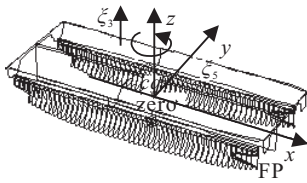


图 1 SWATH 船船体坐标系

SWATH 船垂荡和纵摇运动在不规则海浪中的运动模型^[2]表示为

$$\begin{aligned} (M + A_{33}(t))\ddot{\xi}_3 + B_{33}(t)\dot{\xi}_3 + C_{33}(t)\xi_3 + A_{35}(t)\ddot{\xi}_5 + \\ B_{35}(t)\dot{\xi}_5 + C_{35}(t)\xi_5 = F_3 + F_{\text{fin}}(\xi), \\ (I_5 + A_{55}(t))\ddot{\xi}_5 + B_{55}(t)\dot{\xi}_5 + C_{55}(t)\xi_5 + A_{53}(t)\ddot{\xi}_3 + \\ B_{53}(t)\dot{\xi}_3 + C_{53}(t)\xi_3 = F_5 + M_{\text{fin}}(\xi). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: 下标 3 和 5 分别为垂荡和纵摇运动模式; M 和 I_5 分别为船的质量及其对通过船重心的横轴的惯性矩; A_{ik} , B_{ik} 和 C_{ik} ($i, k = 3, 5$) 分别为广义的附加质量、阻尼系数和恢复力系数; F_3 和 F_5 为海浪干扰作用于船的升沉力和纵摇力矩; $F_{\text{fin}}(\xi)$ 和 $M_{\text{fin}}(\xi)$ 为稳定鳍产生的控制力和力矩.

在舰船航行时, 通常将水翼升力和升力产生的力矩表示为

$$L = \frac{1}{2}\rho U^2 S C_L \alpha(\xi), \quad M = \frac{1}{2}\rho U^2 S C_L \alpha(\xi) L_P. \quad (2)$$

其中: ρ 为水的密度, U 为船速, S 为鳍面积, C_L 为升力系数, $\alpha(\xi)$ 为打鳍角度, L_P 为稳定鳍重心到船的重心的纵向距离.

1.2 运动参数求解

通过大量的数值计算和模型实验, 表明了二维半理论对多体船运动预报具有较好的适用性^[8]. 假定 SWATH 船在规则波中沿固定方向以恒速前进, SWATH 船切片形式如图 1 所示, 在二维切片法求解船舶运动参数的基础上, 考虑航速对系数的影响, 各运动参数^[9]如下所示:

$$A_{33} = \int_L a_{33} dx, \quad A_{35} = - \int_L a_{33} x dx - \frac{U}{\omega_e^2} B_{33},$$

$$A_{53} = - \int_L a_{33} x dx + \frac{U}{\omega_e^2} B_{33},$$

$$A_{55} = \int_L a_{33} x^2 dx + \frac{U}{\omega_e^2} A_{33},$$

$$B_{33} = \int_L b_{33} dx, \quad B_{35} = - \int_L b_{33} x dx + U A_{33},$$

$$B_{53} = - \int_L b_{33} x dx - U A_{33},$$

$$B_{55} = \int_L b_{33} x^2 dx + \frac{U}{\omega_e^2} B_{33},$$

$$C_{33} = \rho g \int_L b dx, \quad C_{35} = -\rho g \int_L b x dx,$$

$$C_{55} = \rho g \int_L b x^2 dx, \quad C_{53} = -\rho g \int_L b x dx. \quad (3)$$

其中: L 为船长, b 为船宽, ω_e 为遭遇频率. 图 2 为利用切片法求得的不同频率点下 SWATH 船附加质量系数 A_{33} , A_{55} 和阻尼系数 B_{33} , B_{55} 的示意图.

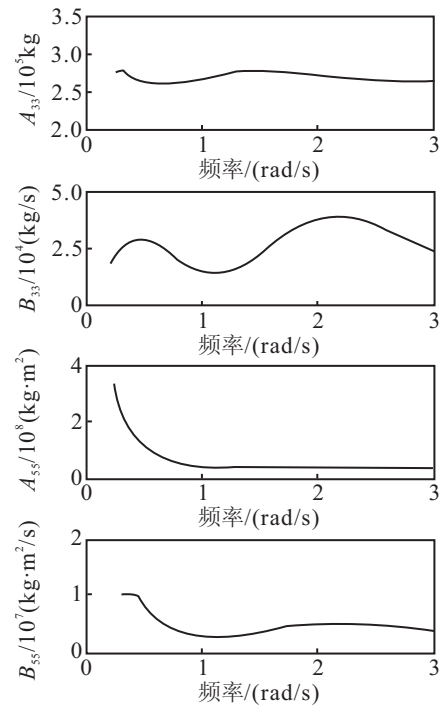


图 2 SWATH 船部分运动参数

1.3 海浪干扰仿真

选用 ITTC 单参数谱作为海浪仿真谱函数, 即

$$S(\omega) = \frac{8.11 \times 10^{-3} g^2}{\omega^5} \exp\left(-\frac{3.11}{h_{1/3}^2 \omega^4}\right). \quad (4)$$

其中: $h_{1/3}$ 为海浪有义波高, ω 为海浪主导频率.

SWATH 船在波浪中航行时, 根据 SWATH 船型线图, 对水线下部分进行切片计算可以得到船舶受到的海浪干扰力和力矩. 求解 SWATH 船在不同频率点下的升沉力和纵摇力矩分别为

$$\begin{aligned} F_3 &= \zeta \int_L e^{ikx} e^{-kds} \{\rho g b - \omega(\omega_e a_{33} - ib_{33})\} dx, \\ F_5 &= -\zeta \int_L e^{ikx} e^{-kds} \{x[\rho g b - \omega(\omega_e a_{33} - ib_{33})] - \\ &\quad U\omega(\omega_e a_{33} - ib_{33})/i\omega_e\} dx. \end{aligned} \quad (5)$$

其中: ζ 为海浪波高, k 为波数, d 为船舶吃水.

由式 (5) 求得不同频率下的升沉力和纵摇力矩, 得到升沉力和纵摇力矩谱 $H_{\zeta F}(\omega_e, \beta)$ 和 $H_{\zeta M}(\omega_e, \beta)$. 根据

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{Force}}(\omega_e, \beta) &= |H_{\zeta F}(\omega_e, \beta)|^2 \Phi_{\zeta}(\omega_e, \beta), \\ \Phi_{\text{Moment}}(\omega_e, \beta) &= |H_{\zeta M}(\omega_e, \beta)|^2 \Phi_{\zeta}(\omega_e, \beta) \end{aligned} \quad (6)$$

对得到的 SWATH 船在遭遇海浪谱 $\Phi_{\zeta}(\omega_e, \beta)$ 下的海浪干扰进行逆傅里叶变换, 可以对海浪干扰能量谱进行校验^[3].

2 非线性预测控制器设计

2.1 运动模型简化

在 SWATH 船运动模型中, 各参数受海浪干扰、船舶运动姿态变化等不确定的影响而发生变化, 为了研究方便, 认为其为与 SWATH 船运动状态相关的函数, 可以将式 (1) 改写为状态空间形式

$$A(\xi)\ddot{\xi} + B(\xi)\dot{\xi} + C(\xi)\xi = F + F_{\text{fin}}. \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} A(\xi) &= \begin{bmatrix} M + A_{33}(\xi) & A_{35}(\xi) \\ A_{53}(\xi) & I_5 + A_{55}(\xi) \end{bmatrix}, \\ B(\xi) &= \begin{bmatrix} B_{33}(\xi) & B_{35}(\xi) \\ B_{53}(\xi) & B_{55}(\xi) \end{bmatrix}, \quad C(\xi) = \begin{bmatrix} C_{33}(\xi) & C_{35}(\xi) \\ C_{53}(\xi) & C_{55}(\xi) \end{bmatrix}, \\ F &= [F_3 \quad F_5]^T, \quad \xi = [\xi_3 \quad \xi_5]^T, \quad F_{\text{fin}} = [F_{\text{fin}}(\xi) \quad M_{\text{fin}}(\xi)]^T. \end{aligned}$$

2.2 预测控制律设计

首先针对 SWATH 船升沉和纵摇运动的控制问题, 设计 SWATH 船运动非线性预测控制律.

假设期望的 SWATH 船运动控制轨迹为 $\xi_r(t)$, 定义 $t + t_s$ 时刻的 $\xi(t + t_s)$ 预测值和控制值为 $\hat{\xi}(t + t_s)$ 和 $\hat{\xi}_r(t + t_s)$, 预测误差为

$$e(t + t_s) = \hat{\xi}(t + t_s) - \hat{\xi}_r(t + t_s). \quad (8)$$

非线性预测控制滚动优化性能指标选取为

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \int_0^T [e^T(t + t_s)e(t + t_s) + \\ &\quad \lambda \dot{e}^T(t + t_s)\dot{e}(t + t_s)] dt_s. \end{aligned} \quad (9)$$

其中: 加权因子 $\lambda \geq 0$, 且为常数; T 为预测时域.

根据文献 [5], 对于控制阶和相对阶均为 2 的 2 自由度模型, 当 Taylor 级数展开为 4 时, 系统是稳定的. 应用 Taylor 公式, 将 $t + t_s$ 时刻的 SWATH 船运动状态近似展开为

$$\begin{aligned} \hat{\xi}(t + t_s) &\approx \sum_{i=0}^4 \frac{t_s^i}{i!} \xi^{(i)}(t) = H_1(t_s)Y, \\ \hat{\xi}_r(t + t_s) &\approx \\ 0_{2 \times 2} \times \xi(t) &+ \sum_{i=1}^4 \frac{t_s^{i-1}}{(i-1)!} \xi^{(i)}(t) = H_2(t_s)Y. \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$H_1(t_s) = [I_2 \quad t_s I_2 \quad t_s^2 I_2 / 2 \quad t_s^3 I_2 / 6 \quad t_s^4 I_2 / 24],$$

$$H_2(t_s) = [0_{2 \times 2} \quad I_2 \quad t_s I_2 \quad t_s^2 I_2 / 2 \quad t_s^3 I_2 / 6],$$

$$Y = [\xi(t)^T \quad \dot{\xi}(t)^T \quad \ddot{\xi}(t)^T \quad \xi^{(3)}(t)^T \quad \xi^{(4)}(t)^T]^T,$$

$0_{2 \times 2}$ 和 I_2 分别为 2 阶零阵和单位阵.

同理, 将期望控制轨迹 $\hat{\xi}_r(t + t_s)$ 及其一阶导数近似展开为

$$\hat{\xi}_r(t + t_s) \approx H_1(t_s)Y_r, \quad \dot{\hat{\xi}}_r(t + t_s) \approx H_2(t_s)Y_r, \quad (11)$$

其中

$$Y_r = [\xi_r(t)^T \quad \dot{\xi}_r(t)^T \quad \ddot{\xi}_r(t)^T \quad \xi_r^{(3)}(t)^T \quad \xi_r^{(4)}(t)^T]^T.$$

根据式 (7), 对 $\xi(t)$ 求各阶导数, 得到

$$\begin{aligned} \ddot{\xi}(t) &= Q_1(\xi, \dot{\xi}) + [A(\xi)]^{-1}(F + F_{\text{fin}}), \\ \xi^{(3)}(t) &= Q_2(\xi, \dot{\xi}) + P_1 + [A(\xi)]^{-1}(\dot{F} + \dot{F}_{\text{fin}}), \\ \xi^{(4)}(t) &= Q_3(\xi, \dot{\xi}) + P_2 + [A(\xi)]^{-1}(\ddot{F} + \ddot{F}_{\text{fin}}). \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} Q_1(\xi, \dot{\xi}) &= -[A(\xi)]^{-1}[B(\xi)\dot{\xi} + C(\xi)\xi], \\ Q_2(\xi, \dot{\xi}) &= \xi \frac{\partial Q_1(\xi, \dot{\xi})}{\partial \xi}, \quad Q_3(\xi, \dot{\xi}) = \dot{\xi} \frac{\partial Q_2(\xi, \dot{\xi})}{\partial \xi}, \\ P_1 &= \xi \frac{\partial Q_1(\xi, \dot{\xi})}{\partial \xi} + \dot{\xi}(F + F_{\text{fin}}) \times \frac{\partial [A(\xi)]^{-1}}{\partial \xi}, \\ P_2 &= \xi \frac{\partial Q_2(\xi, \dot{\xi})}{\partial \xi} + \dot{P}_1 + \dot{\xi}(\dot{F} + \dot{F}_{\text{fin}}) \times \frac{\partial [A(\xi)]^{-1}}{\partial \xi}. \end{aligned}$$

根据式 (9)~(11), 选取的预测控制律性能指标可以近似表示为

$$J = \frac{1}{2}(Y - Y_r)^T R(Y - Y_r), \quad (13)$$

其中 $R = \int_0^T [H_1^T H_1 + \lambda H_2^T H_2] dt_s$ 为 10 阶常值对称正定矩阵. 定义

$$\hat{Y} = [\xi^T - \xi_r^T \quad \dot{\xi}^T - \dot{\xi}_r^T]^T, \quad \hat{\xi}_r = [\ddot{\xi}_r(t) \quad \xi_r(t) \quad \xi_r^{(4)}]^T.$$

代入式 (12), 得到

$$Y - Y_r = \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ Q - \hat{\xi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{Q}(\hat{F}, \hat{F}_{\text{fin}}) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

其中

$$\hat{F} = [F^T \quad \dot{F}^T \quad \ddot{F}^T], \quad \hat{F}_{\text{fin}} = [F_{\text{fin}}^T \quad \dot{F}_{\text{fin}}^T \quad \ddot{F}_{\text{fin}}^T],$$

$$Q = [Q_1^T(\xi, \dot{\xi}) \quad Q_2^T(\xi, \dot{\xi}) \quad Q_3^T(\xi, \dot{\xi})]^T,$$

$$\hat{Q}(\hat{F}, \hat{F}_{\text{fin}}) = \begin{bmatrix} [A(\xi)]^{-1}(F + F_{\text{fin}}) \\ p_1 + [A(\xi)]^{-1}(\dot{F} + \dot{F}_{\text{fin}}) \\ p_2 + [A(\xi)]^{-1}(\ddot{F} + \ddot{F}_{\text{fin}}) \end{bmatrix}.$$

将 R 矩阵改写为 $R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}$, 选取 R_{11} 为 4×4 矩阵, R_{12} 为 4×6 矩阵, R_{22} 为 6×6 矩阵. 要达到性能指标最小, 需令 $\partial J / \partial \hat{F}_{\text{fin}} = 0$, 由式 (14), 对式 (13) 求偏导得

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{F}_{\text{fin}}} = \frac{\partial (Y - Y_r)}{\partial \hat{F}_{\text{fin}}} R(Y - Y_r) =$$

$$\left[\frac{\partial \hat{Q}(\hat{F}, \hat{F}_{\text{fin}})}{\partial \hat{F}_{\text{fin}}} \right]^T \left([R_{12}^T \ R_{22}] \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ Q - \hat{\xi}_r \end{bmatrix} + R_{22} \hat{Q}(\hat{F}, \hat{F}_{\text{fin}}) \right), \quad (15)$$

其中 $\partial \hat{Q}(\hat{F}, \hat{F}_{\text{fin}})/\partial \hat{F}_{\text{fin}}$ 和 R_{22} 可逆^[6]. 可以得到

$$\hat{Q}(\hat{F}, \hat{F}_{\text{fin}}) = -R_{22}^{-1} R_{12}^T \hat{Y} - (Q - \hat{\xi}_r). \quad (16)$$

定义误差函数为

$$e(t) = \xi_r(t) - \xi(t), \quad (17)$$

则由式 (15)~(17) 可以得到使 SWATH 船性能指标最小的预测律为

$$F_{\text{fin}} = A(\xi) \left[\ddot{\xi}_r + K_2 \dot{e} + K_1 e \right] + B(\xi) \dot{\xi} + C(\xi) \xi - F. \quad (18)$$

其中: K_1 为 $R_{22}^{-1} R_{12}^T$ 前两行前两列构成的方阵, K_2 为 $R_{22}^{-1} R_{12}^T$ 前两行后两列构成的方阵. 通过 Matlab 求解, 可以得到预测时域 T 和加权因子 λ 与 K_1, K_2 的关系.

由船舶减摇问题的实际物理意义可知, $\xi_r(t) = 0$, 则 SWATH 船非线性预测控制律为

$$F_{\text{fin}} = A(\xi) [-K_2 \dot{\xi} - K_1 \xi] + B(\xi) \dot{\xi} + C(\xi) \xi - F. \quad (19)$$

2.3 干扰观测器实现

舰船在航行时, 受外部干扰等因素的影响存在不同程度的模型不确定性, 即在具体实施过程中不能使用控制律 (19), 为此利用观测器可以很好地解决模型不确定性问题^[10-11].

干扰观测器 (DO)^[12-13] 能够利用系统输入、输出状态实现对系统干扰的观测, 非线性干扰观测器 (NDO) 技术用于消除系统的未知干扰和未建模动态等不确定因素的影响, 已在许多实际系统中取得了较好的效果^[14-16], 同时可以很好地研究 SWATH 船在随机海浪中受到的海浪干扰.

为了更好地观测海浪干扰, 选取 $\xi = [\dot{\xi} \ \xi]^T$ 作为输出观测量, 将式 (1) 改写为如下状态空间形式:

$$A_1(\xi) \dot{\xi} + B_1(\xi) \xi = F_1 + F_{\text{fin}1}. \quad (20)$$

其中

$$F_1 = [F_3 \ 0 \ F_5 \ 0]^T, \quad \xi = [\dot{\xi}_3 \ \xi_3 \ \dot{\xi}_5 \ \xi_5]^T,$$

$$F_{\text{fin}1} = [F_{\text{fin}}(\xi) \ 0 \ M_{\text{fin}}(\xi) \ 0]^T,$$

$$A_1(\xi) = \begin{bmatrix} M + A_{33}(\xi) & 0 & A_{35}(\xi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{53}(\xi) & 0 & I_5 + A_{55}(\xi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_1(\xi) = \begin{bmatrix} B_{33}(\xi) & C_{33}(\xi) & B_{35}(\xi) & C_{35}(\xi) \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ B_{53}(\xi) & C_{53}(\xi) & B_{55}(\xi) & C_{55}(\xi) \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

考虑受到海浪干扰和运动姿态的变化等影响, SWATH 船运动参数会产生摄动, 设计的非线性干扰观测器^[12]为

$$\hat{F}_1 = Z + P(\xi),$$

$$\dot{Z} = -L(\xi)Z + L(\xi)[B_1(\xi)\xi - F_{\text{fin}1} - P(\xi)]. \quad (21)$$

其中: $P(\xi)$ 为观测器函数; $L(\xi)$ 为非线性观测器的增益, 满足 $L(\xi)A_1(\xi)\dot{\xi} = \partial P(\xi)/\partial \xi$.

定义干扰观测器的误差函数为

$$e_F = F_1 - \hat{F}_1. \quad (22)$$

由实际情况, \dot{F} 可以认为等于 0, 从而得到基于式 (20) 的观测器动态误差为

$$\dot{e}_F = \dot{F}_1 - \dot{\hat{F}}_1 = -\dot{Z} - \dot{P}(\xi) =$$

$$L(\xi)[Z + P(\xi)] - L(\xi)[A_1(\xi)\dot{\xi} + B_1(\xi)\xi - F_{\text{fin}1}] - L(\xi)[F_1 - \hat{F}_1] = -L(\xi)e_F. \quad (23)$$

根据式 (23), 选择合适的 $L(\xi)$ 可以使设计的非线性观测器误差按指数形式收敛. 当 $P(\xi) = c\xi$ 时, $L(\xi) = cA_1(\xi)^{-1}$, c 为 4×4 正定矩阵, 系统一致最终有界.

2.4 稳定性分析

定理 1 针对 SWATH 船升沉和纵摇运动模型 (1), 设计基于干扰观测器 (21) 的非线性预测控制器 (19), 使得闭环系统误差信号最终有界.

证明 由船舶减摇镇定问题的实际物理意义, SWATH 船运动系统的误差为 ξ . 选取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} \xi^T R \xi + \frac{1}{2} e_F^2, \quad (24)$$

因为 $R = \int_0^T [H_1^T H_1 + \lambda H_2^T H_2] dt_s$ 是 10 阶常值对称正定矩阵, 满足 $V \geq 0$. 根据预测控制的原理, 由式 (13) 和 (19), 忽略系统高阶项, $\xi^T R \xi / 2$ 可以表示为滚动优化指标 J .

对式 (24) 求导, 有

$$\dot{V} = \partial J / \partial \hat{F}_{\text{fin}} + e_F \dot{e}_F. \quad (25)$$

由式 (23) 得到

$$e_F \dot{e}_F = -L(\xi) e_F^2 \leq 0. \quad (26)$$

并由式 (15) 和 (16) 可以看到, 要达到性能指标最小, 需满足

$$\partial J / \partial \hat{F}_{\text{fin}} = 0. \quad (27)$$

由式 (25)~(27) 可知

$$\dot{V} \leq 0, \quad (28)$$

系统一致稳定.

从另一方面分析, 由式 (23) 可知, 当选取合适的干扰观测器矩阵 c 时, 设计的非线性干扰观测器误差按指数形式收敛. 将由干扰观测器观测到的海浪干扰代入式 (19), 可以保证海浪干扰有界. 由于 $A(\xi)$ 可逆,

根据非线性预测控制器推导过程, 将式(19)代入(7)得到

$$\ddot{\xi} + K_2\dot{\xi} + K_1\xi = 0, \quad (29)$$

其中 K_1, K_2 为正定矩阵. 闭环系统方程全局渐近稳定. \square

将SWATH船运动方程式(1)和稳定鳍产生的力和力矩方程式(2)改写成状态空间形式

$$\dot{\xi} = W\xi + N\alpha(\xi). \quad (30)$$

根据线性二次型最优控制器设计方法, 选取合适的 4×4 半正定对称矩阵 Q 、 4×4 正定对称矩阵 R 参数, 得到SWATH船打鳍角度和可观测输出之间的最佳增益矩阵分别为

$$\alpha_{op} = -K[\xi_3 \ \xi_4 \ \xi_5 \ \xi_6]^T, \quad K = R^{-1}N^TP, \quad (31)$$

其中 P 为满足如下Riccati方程的惟一正定解:

$$W^TP + PW + Q - PNR^{-1}N^TP = 0. \quad (32)$$

线性二次型最优控制器中, 打鳍角度与输出速度、位移之间的关系矩阵为

$$K = \begin{bmatrix} 0.139 & 0.0224 & 3.38 & 0.548 \\ 0.195 & 0.0350 & 3.46 & 0.656 \end{bmatrix}.$$

3 仿真研究

本文根据SWATH船型线, 考虑SWATH船航速影响, 通过切片法对SWATH船运动参数进行求解, 得到某SWATH船在特定频率下的一组仿真参数为

$$A = \begin{bmatrix} 6.92 \times 10^5 & -2.03 \times 10^5 \\ -8.62 \times 10^4 & 6.16 \times 10^7 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 2.64 \times 10^4 & 2.47 \times 10^6 \\ -2.58 \times 10^6 & 2.49 \times 10^6 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 5.68 \times 10^5 & -2.03 \times 10^5 \\ -2.03 \times 10^5 & 4.37 \times 10^5 \end{bmatrix}.$$

仿真条件为: 迎浪, 航速 18kn, 有义波高 3.3m. 仿真过程对稳定鳍引入饱和和非线性滞后环节, 对鳍角和打鳍速度进行限位. 鳍角 $\alpha \leq 25 \text{ deg}$, 打鳍速度 $\dot{\alpha} \leq 30 \text{ deg/s}$, 滞后时间 $T_s = 0.2 \text{ s}$.

假设受海浪干扰等因素的影响, 考虑SWATH船运动参数的不确定性, 取 $A(\xi), B(\xi), C(\xi)$ 的变化量最大为 20%. 根据设计的预测控制律, 选取加权系数 $\lambda = 2$, 预测时域 $T = 2 \text{ s}$, 得到 $K_1 = 2.0173I_2, K_2 = 4.0000I_2$. 设计的干扰观测器系数矩阵为

$$c = \begin{bmatrix} 2 \times 10^6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \times 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

图3为干扰观测器观测的SWATH船海浪干扰曲线, 实线为观测扰动, 虚线为观测误差, 点划线为扰动.

可以看到, 观测器能很好地观测SWATH船受到的海浪干扰, 且对其能量谱进行校验^[3], 符合海浪形式.

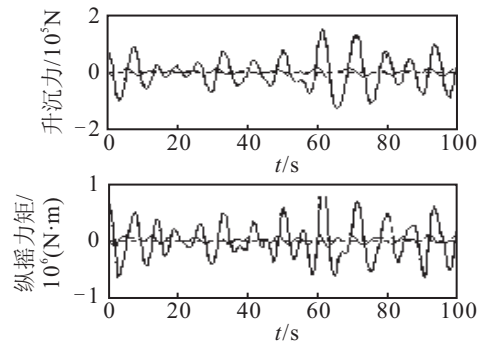


图3 干扰观测器观测海浪干扰曲线

图4为带有裸船、最优控制器和基于干扰观测器的SWATH船非线性预测控制, 实线为非线性预测, 虚线为最优控制, 点划线为裸船. 可以看到, 最优控制器和非线性预测控制器均能有效减小SWATH船升沉和纵摇运动, 但基于干扰观测器的SWATH船非线性预测控制比最优控制器取得了更好的控制效果, 纵摇控制效果从 71.3% 提升到 90% 以上, 升沉位移控制效果变好.

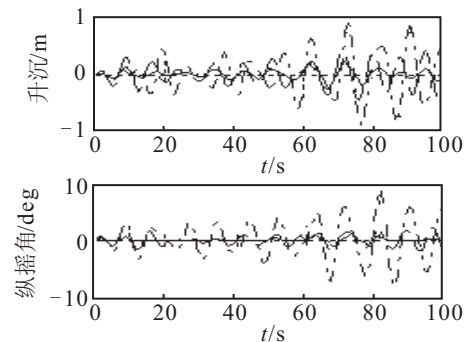


图4 SWATH船升沉纵摇运动曲线

图5为基于干扰观测器的非线性预测控制器和最优控制器的稳定鳍打鳍角度曲线, 实线为非线性预测, 点划线为最优控制. 对于选用的SWATH船稳定鳍模型, 总体上非线性预测控制比设计的最优控制器打鳍角度大, 前鳍打鳍角度出现饱和现象, 其原因是要提高控制效果, 需要的能量也增加, 这对高海况下的舰船运动控制作用尤为明显.

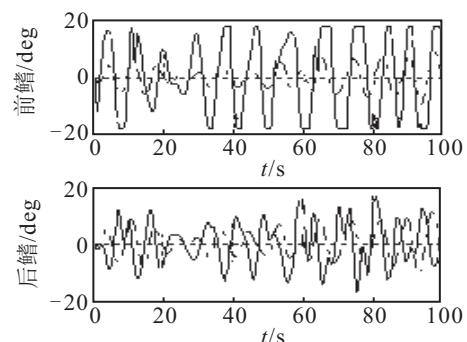


图5 稳定鳍打鳍角度曲线

4 结 论

本文提出了基于干扰观测器的 SWATH 船非线性预测控制设计,能有效实现对 SWATH 船运动的预测控制,使模型失配、时变、干扰等引起的不确定性能够得到及时的补偿.仿真结果表明,所设计的基于非线性干扰观测器的 SWATH 船运动非线性预测控制器提高了 SWATH 船运动控制效果,对升沉和纵摇运动进行预测控制,能很好地观测研究 SWATH 船受到的海浪升沉力和纵摇力矩干扰,增强系统的鲁棒性.该方法对于研究舰船运动控制和舰船受到的海浪干扰都具有重要意义.

参考文献(References)

- [1] 朱炳泉, 睦爱国, 魏纳新, 等. 小水线面双体船纵向运动控制系统的试验研究[J]. 中国造船, 2005, 46(4): 1-10.
(Zhu B Q, Sui A G, Wei N X, et al. Experimental study on longitudinal motion control system of SWATH[J]. Shipbuilding of China, 2005, 46(4): 1-10.)
- [2] Fang M C, Chiou S C. A hydrodynamic model for simulating SWATH ship motions with fuzzy control[J]. Int Shipbuilding Progress, 2001, 48(4): 277-303.
- [3] Liang Li-hua, Wang Bao-hua, Ji Ming. Adaptive fuzzy control for SWATH ship seakeeping characteristic[C]. Int Conf on Mechatronics and Automation. Chengdu, 2012: 440-445.
- [4] 贾鹤鸣, 程相勤, 张利军, 等. 基于非线性迭代滑模的欠驱动 UUV 三维航迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2011, 26(10): 1452-1458.
(Jia H M, Cheng X Q, Zhang L J, et al. Three-dimensional path tracking control for an underactuated AUV based on discrete-time sliding mode prediction[J]. Control and Decision, 2011, 26(10): 1452-1458.)
- [5] Chen W H, Balance D J, Gawthrop P J. Optimal control of nonlinear systems: A predictive control approach[J]. Automatica, 2003, 39(4): 633-641.
- [6] 孙光, 霍伟. 卫星姿态直接自适应模糊预测控制[J]. 自动化学报, 2010, 36(8): 1151-1159.
(Sun G, Huo W. Direct-adaptive fuzzy predictive control of satellite attitude[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(8): 1151-1159.)
- [7] 陈志旺, 薛佳伟. 基于不确定逼近的机械手自适应鲁棒预测控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(5): 635-641.
(Chen Z W, Xue J W. Adaptive robust predictive control for robotic manipulator based on uncertain parameter approximation[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(5): 635-641.)
- [8] 马山, 段文洋, 马卫星. 基于二维半理论的船舶水动力预报方法研究[J]. 船舶力学, 2011, 15(1): 1-10.
(Ma S, Duan W Y, Ma W X. Prediction of hydrodynamic pressure on ships based on 2.5D theory[J]. J of Ship Mechanics, 2011, 15(1): 1-10.)
- [9] Perez Arribas F, Clemente Fernandez J A. Strip theories applied to the vertical motions of high speed crafts[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(8/9): 1214-1229.
- [10] 张利军, 贾鹤鸣, 金鸿章, 等. 基于神经网络的船舶航向自适应输出反馈控制设计[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2009, 33(增1): 52-57.
(Zhang L J, Jia H M, Jin H Z, et al. NN-based adaptive output feedback control of ship course[J]. J of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2009, 33(S1): 52-57.)
- [11] 贾鹤鸣, 张利军, 程相勤, 等. 基于离散滑模预测的欠驱动 AUV 三维航迹跟踪控制[J]. 自动化学报, 2012, 38(2): 308-314.
(Jia H M, Zhang L J, Cheng X Q, et al. Three-dimensional path following control for an underactuated UUV based on nonlinear iterative sliding mode[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(2): 308-314.)
- [12] Chen W H. Disturbance observer based control for nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Mechatronics, 2004, 9(4): 706-710.
- [13] Chen W H. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 932-938.
- [14] Liu C J, Chen W H, Andrews J. Tracking control of small-scale helicopters using explicit nonlinear MPC augmented with disturbance observers[J]. Control Engineering Practice, 2012, 20(3): 258-268.
- [15] 张元涛, 石为人, 邱明伯. 基于非线性干扰观测器的减摇鳍滑模反演控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(8): 1255-1260.
(Zhang Y T, Shi W R, Qiu M B. Sliding backstepping control for fin stabilizer with nonlinear disturbance observer[J]. Control and Decision, 2010, 25(8): 1255-1260.)
- [16] 贾鹤鸣, 张利军, 齐雪, 等. 基于神经网络的水下机器人三维航迹跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(7): 877-883.
(Jia H M, Zhang L J, Qi X, et al. Three-dimensional path tracking control for autonomous underwater vehicle based on neural network[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(7): 877-883.)

(责任编辑: 郑晓蕾)