

基于NDO的潜艇反演滑模深度控制

李文魁¹, 陆斌杰^{1†}, 江涛²

(1. 海军工程大学 电气工程学院, 武汉 430033; 2. 中国人民解放军 92721 部队, 浙江 舟山 316000)

摘要: 针对潜艇变深运动与定深运动过程中存在模型非线性、强耦合和外界干扰不确定等问题, 设计一种基于非线性干扰观测器(NDO)的反演滑模控制策略. 利用NDO观测系统不确定性和外界干扰, 通过选取设计参数, 使观测误差指数收敛. 针对潜艇垂直面控制系统双通道耦合的特点, 采用艏舵控制深度, 舵舵控制纵倾的策略. 在深度和纵倾通道分别引入NDO后, 采用反演法设计滑模控制器, 基于李亚普诺夫稳定性理论证明闭环系统的全局渐近稳定性, 实现对潜艇深度和纵倾的控制. 仿真实验验证了该控制策略的有效性.

关键词: 潜艇; 深度控制; 非线性干扰观测器; 反演滑模控制; 鲁棒性

中图分类号: TH39, TP24

文献标志码: A

Backstepping sliding mode depth control for submarine based on NDO

LI Wen-kui¹, LU Bin-jie^{1,†}, JIANG Tao²

(1. College of Electrical Engineering, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Unit 92721 of PLA, Zhoushan 316000, China)

Abstract: Aiming at the problems of model nonlinear, strong coupling, as well as external disturbance of submarine in the depth control process, a sliding backstepping control strategy is proposed based on the nonlinear disturbance observer(NDO). The NDO is used to observe the uncertainties and disturbance of the system. The disturbance observer errors is in exponential convergence by electing disturbance observer. Aiming at the characteristics of dual channel coupling of the submarine vertical plane control system, the bow and stem rudder controller is used to control the depth and the pitch respectively. By using the sliding backstepping controller, the closed loop system global asymptotic stability is proved based on the Lyapunov stability theorem. Simulation results show the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: submarine; depth control; nonlinear disturbance observer; sliding backstepping control; robustness

0 引言

在复杂环境下, 潜艇运动模型不仅具有高度非线性和耦合性, 且存在不确定动态和其他未建模动态, 同时存在传感器量测误差、控制误差以及环境干扰. 不同类型的干扰严重影响操控系统的控制精度, 传统单一的控制方法控制效果欠佳. DOBC (Disturbance-observer-based control) 控制策略具有严格的稳定性分析方法和抗扰特性, 可根据潜艇运动特性和干扰特性(海浪、海流等)估计出扰动, 并结合不同的控制方法设计控制器, 从而对潜艇所受的干扰加以抑制和抵消^[1-5].

基于Lyapunov稳定性理论的反演设计方法具有较强的鲁棒性^[6-7]. 文献[8]提出了基于反演的控制方

法用于AUV的深度控制, 并仿真验证了算法的可行性. 文献[9]针对ROV模型的强非线性和耦合性, 将多个状态变量作为整体进行处理, 同时采用二阶指令滤波器解决了传统反演控制中的微分膨胀问题. 为使水下航行器在复杂海洋环境中增强抗干扰能力, 文献[10]设计了有限时间收敛的NDO, 结合动态面控制, 使得NDO在有限时间内快速逼近低频或高频干扰.

滑模控制具有强鲁棒性, 可有效解决潜艇建模误差带来的不确定性. 针对系统不确定性, 文献[11]提出一种基于NDO的自适应滑模控制策略来提高鲁棒性, 但只针对单输入单输出系统设计了控制器. 针对具有复合干扰的复杂连续系统, 文献[4,12]将干扰分

收稿日期: 2017-05-17; 修回日期: 2017-09-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41474061, 41631072).

责任编委: 郭雷.

作者简介: 李文魁(1973—), 男, 副教授, 博士, 从事舰船综合导航与操纵控制等研究; 陆斌杰(1992—), 男, 硕士生, 从事舰船操纵控制的研究.

†通讯作者. E-mail: 757835764@qq.com

为两部分:一是范数有界部分,二是由外生系统产生的干扰,并设计了基于干扰观测器的终端滑模控制器.针对ROV的深度控制问题,文献[13]提出基于非线性干扰观测器的自适应终端滑模控制方法,仿真表明观测器结合控制器,控制效果明显提升.针对水下航行器存在系统未知不确定性和外界时变干扰的问题,文献[14]提出了基于NDO的有限时间反演滑模控制,并通过仿真验证了算法的有效性.

上述文献中对于双通道或多通道耦合的系统的干扰观测及补偿问题探讨较少,本文就此针对潜艇垂直面双输入双输出的耦合系统,在深度和纵倾控制通道分别设计NDO独立观测各自通道的外部等效干扰,提出基于NDO的反演滑模控制器,并考虑舵机动态响应,解决了存在的水动力系数摄动、非线性耦合和外部干扰问题,提高了潜艇的深度控制精度.仿真结果表明,该控制器能够有效提高控制精度、抗干扰能力和稳态精度.

1 潜艇垂直面运动数学模型

坐标系、名词术语、符号规则均采用ITTC和S-NAME术语公报的体系,详见文献[15].固定坐标系(定系) $E-\xi\eta\zeta$ 和运动坐标系(动系) $O-xyz$ 如图1所示.

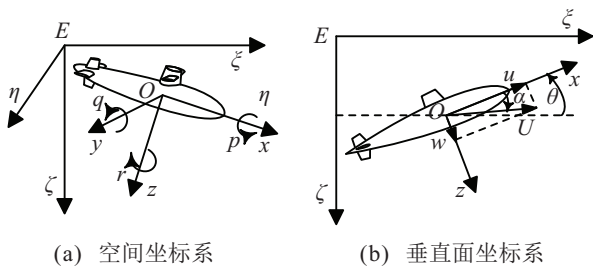


图1 固定坐标系和运动坐标系

考虑干扰项的潜艇垂直面非线性数学模型^[16]为

$$\dot{w} = f_w + b_{wb}\delta_b + b_{ws}\delta_s + d_1, \quad (1)$$

$$\dot{q} = f_q + b_{qb}\delta_b + b_{qs}\delta_s + d_2, \quad (2)$$

$$\dot{\zeta} = -u \sin \theta + w \cos \theta, \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = q. \quad (4)$$

其中: w, q, ζ, θ 分别为升沉速度、纵倾角速度、潜深和纵倾角; u 为纵向速度(假设恒定); δ_b, δ_s 分别为舵舵角和舵舵舵角; d_1, d_2 为由海浪等外部有界干扰带来的误差项; $f_w, f_q, b_{wb}, b_{ws}, b_{qb}, b_{qs}$ 的表达式分别为

$$f_w = \frac{a_4 f_{4w} - a_2 f_{5q}}{a_1 a_4 - a_2 a_3},$$

$$f_q = \frac{-a_3 f_{4w} + a_1 f_{5q}}{a_1 a_4 - a_2 a_3},$$

$$b_{wb} = \frac{a_4 b_{2b} - a_2 b_{3b}}{a_1 a_4 - a_2 a_3},$$

$$b_{ws} = \frac{a_4 b_{2s} - a_2 b_{3s}}{a_1 a_4 - a_2 a_3},$$

$$b_{qb} = \frac{-a_3 b_{2b} + a_1 b_{3b}}{a_1 a_4 - a_2 a_3},$$

$$b_{qs} = \frac{-a_3 b_{2s} + a_1 b_{3s}}{a_1 a_4 - a_2 a_3}.$$

其中各动力学系数分别为

$$f_{4w} = m(uq - vp) + \frac{1}{2}\rho L^4(Z'_{rr}r^2 + Z'_{rp}rp) + \frac{1}{2}\rho L^3(Z'_{vr}vr + Z'_{vp}vp + Z'_quq) + \frac{1}{2}\rho L^3\left(Z_{w|w}\frac{w}{|w|}(v^2 + w^2)^{1/2}|q|\right) + \frac{1}{2}\rho L^2(Z'_{uu}u^2 + Z'_uwuw + Z'_{vv}v^2) + \frac{1}{2}\rho L^2(Z'_{w|w}w(v^2 + w^2)^{1/2}) + (W - B) \cos \theta \sin \phi,$$

$$f_{5q} = (I_z - I_x)rp + \frac{1}{2}\rho L^5(M'_{rr}r^2 + M'_{rp}rp) + \frac{1}{2}\rho L^4(M'_{vr}vr + M'_{vp}vp + M'_quq) + \frac{1}{2}\rho L^4(M'_{|w|q}(v^2 + w^2)^{1/2}q) + \frac{1}{2}\rho L^3(M'_{uu}u^2 + M'_uwuw) - \frac{1}{2}\rho L^3(M'_{|w|}w(v^2 + w^2)^{1/2} + M'_{vv}v^2) - (x_g W - x_b B) \cos \theta \cos \phi - (z_g W - z_b B) \sin \theta,$$

$$b_{2s} = \frac{1}{2}\rho L^3 Z'_{|q|\delta_s} u |q| + \frac{1}{2}\rho L^2 Z'_{\delta_s} u^2,$$

$$b_{3s} = \frac{1}{2}\rho L^4 M'_{|q|\delta_s} u |q| + \frac{1}{2}\rho L^3 M'_{\delta_s} u^2,$$

$$b_{2b} = \frac{1}{2}\rho L^2 Z'_{\delta_b} u^2, \quad b_{3b} = \frac{1}{2}\rho L^3 M'_{\delta_b} u^2,$$

$$a_1 = m - \frac{1}{2}\rho L^3 Z'_{\dot{w}}, \quad a_2 = -\frac{1}{2}\rho L^4 Z'_{\dot{q}},$$

$$a_3 = -\frac{1}{2}\rho L^4 M'_{\dot{w}}, \quad a_4 = I_y - \frac{1}{2}\rho L^5 M'_{\dot{q}},$$

$$a_5 = m - \frac{1}{2}\rho L^3 Y'_{\dot{v}}, \quad a_6 = -\frac{1}{2}\rho L^4 Y'_{\dot{p}},$$

$$a_7 = -\frac{1}{2}\rho L^4 Y'_{\dot{r}}, \quad a_8 = -\frac{1}{2}\rho L^4 K'_{\dot{v}},$$

$$a_9 = I_x - \frac{1}{2}\rho L^5 K'_{\dot{p}}, \quad a_{10} = -\frac{1}{2}\rho L^5 K'_{\dot{r}},$$

$$a_{11} = -\frac{1}{2}\rho L^4 N'_{\dot{v}}, \quad a_{12} = -\frac{1}{2}\rho L^5 N'_{\dot{p}},$$

$$a_{13} = I_z - \frac{1}{2}\rho L^5 N'_{\dot{r}}.$$

2 潜艇垂直面控制方案

潜艇垂直面自动控制结构如图2所示,由深度控制回路和纵倾控制回路构成,各回路由控制器、NDO、舵/舵舵伺服系统和潜艇等环节组成.NDO观测作用于潜艇的干扰,经增益调节环节得到克服干扰所需的

控制量,与控制器产生的控制量共同作为船舵/舵的输入信号. 船舵主要控制深度,视舵舵力为干扰;舵舵主要控制纵倾,视船舵力为干扰,简化处理产生的误差由控制器加以补偿.

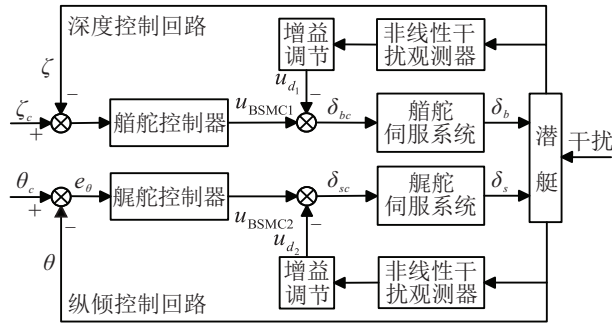


图2 垂直面自动控制结构

图2中: ζ, θ 为实际的潜深、纵倾; ζ_c, θ_c 为指令深度、纵倾; u_{BSMC1}, u_{BSMC2} 分别为船舵和舵舵反演滑模控制器输出; u_{d1}, u_{d2} 分别为船舵和舵舵的NDO补偿控制律输出值; δ_{bc}, δ_{sc} 分别为船舵和舵舵的指令舵角; δ_b, δ_s 分别为船舵和舵舵的实际舵角.

假设1 对于任意时间 $t > t_0$,有输入指令及其二阶导数存在且有界.

舵机模型表达式为

$$T_d \dot{\delta} + \delta = \delta_c. \quad (5)$$

其中: $|\delta| \leq \delta_{max}, |\dot{\delta}| \leq \dot{\delta}_{max}, T_d$ 为舵机时间常数.

3 非线性干扰观测器设计

定义状态变量 $x_1 = \zeta, x_2 = \dot{\zeta}, x_3 = \theta, x_4 = \dot{\theta}$,式(1)~(4)可转换为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f_\zeta + b_{\zeta s} \delta_s + b_{\zeta b} \delta_b + d'_1, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = f_\theta + b_{\theta b} \delta_b + b_{\theta s} \delta_s + d'_2. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $f_\zeta = f_w \cos \theta - q u \cos \theta - q w \sin \theta, f_\theta = f_q, b_{\zeta s} = b_{ws} \cos \theta, b_{\zeta b} = b_{wb} \cos \theta, b_{\theta s} = b_{qs} \cos \theta, b_{\theta b} = b_{qb} \cos \theta, d'_1 = d_1 \cos \theta, d'_2 = d_2 \cos \theta$.

船舵和舵舵间的相互耦合干扰不作为观测器的观测对象,由此产生的观测误差由控制器的鲁棒性加以抵消.下面以深度控制回路为例介绍所采用的NDO.下标1和2分别表示深度和纵倾控制回路变量.

NDO形式为

$$\begin{cases} \dot{d}'_1 = z_1 + p_1, \\ \dot{z}_1 = -L_1 z_1 + L_1(-p_1 - f_\zeta - b_{\zeta s} \delta_s - b_{\zeta b} \delta_b). \end{cases} \quad (7)$$

其中: \hat{d}'_1 为深度控制回路干扰量的观测值, z_1 和 p_1 为

中间变量, L_1 为观测器增益.

定义NDO观测误差为

$$\tilde{d}'_1 = d'_1 - \hat{d}'_1. \quad (8)$$

由于无法获取微分先验知识,当干扰项相对于观测器的动态特性缓慢变化时,假设

$$\dot{d}'_1 = 0. \quad (9)$$

观测器误差的动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{d}}'_1 &= \dot{d}'_1 - \dot{\hat{d}}'_1 = -\dot{z}_1 - \dot{p}_1 = \\ &L_1 z_1 - L_1(-p_1 - f_\zeta - b_{\zeta s} \delta_s - b_{\zeta b} \delta_b) - \dot{p}_1 = \\ &L_1 \tilde{d}'_1 + L_1 \dot{\zeta} - L_1 \dot{d}'_1 - \dot{p}_1. \end{aligned} \quad (10)$$

令 $\dot{p}_1 = L_1 \dot{\zeta}$,有

$$\dot{\tilde{d}}'_1 = -L_1 \tilde{d}'_1. \quad (11)$$

由式(11)可知,取 $L_1 > 0$,求解得

$$\tilde{d}'_1 = e^{-L_1 t} \tilde{d}'_1(0). \quad (12)$$

所以观测误差呈指数收敛,通过选取较大的 L_1 使 $|\tilde{d}'_1|_{t \rightarrow \infty} \rightarrow 0$,即观测误差无限小;但 L_1 值过大时,会使控制产生抖动,所以选取时需综合考虑.

构建NDO的Lyapunov函数

$$V_{obs1} = \frac{1}{2} (\tilde{d}'_1)^2, \quad (13)$$

求导得

$$\dot{V}_{obs1} = \tilde{d}'_1 \dot{\tilde{d}}'_1 = -L_1 (\tilde{d}'_1)^2 \leq 0, \quad (14)$$

故NDO渐近稳定.

由式(6)可知

$$\dot{\zeta} = f_\zeta + b_{\zeta s} \delta_s + b_{\zeta b} \left(\delta_b + \frac{d'_1}{b_{\zeta b}} \right). \quad (15)$$

其中: $d'_1/b_{\zeta b}$ 表示干扰施加在潜艇上的等效作用力,为克服干扰,令

$$u_{d'_1} = -\frac{d'_1}{b_{\zeta b}}. \quad (16)$$

式(16)即为克服干扰所需的控制量.结合系统表达式(6),得

$$\dot{x}_2 = f_\zeta + b_{\zeta s} \delta_s + b_{\zeta b} \delta_b + \tilde{d}'_1. \quad (17)$$

由式(17)可知,系统总干扰由 d'_1 减少到 \tilde{d}'_1 ,减小了外干扰对系统的影响.

同理,纵倾控制回路NDO设计为

$$\begin{cases} \dot{d}'_2 = z_2 + p_2, \\ \dot{z}_2 = -L_2 z_2 + L_2(-p_2 - f_\theta - b_{\theta s} \delta_s - b_{\theta b} \delta_b), \\ p_2 = L_2 \theta, \\ u_{d'_2} = -\frac{d'_2}{b_{\theta s}}. \end{cases} \quad (18)$$

4 反演滑模控制器设计及稳定性分析

引入NDO后,系统状态方程(6)改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f_\zeta + b_{\zeta s}\delta_s + b_{\zeta b}\delta_b + \tilde{d}'_1, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = f_\theta + b_{\theta b}\delta_b + b_{\theta s}\delta_s + \tilde{d}'_2. \end{cases} \quad (19)$$

以深度控制回路为例设计反演滑模控制器,定义深度控制系统误差为

$$e_{\zeta 1} = \zeta - \zeta_c, \quad (20)$$

$$e_{\zeta 2} = x_2 - \alpha_{\zeta 1}, \quad (21)$$

其中 $\alpha_{\zeta 1}$ 为待设计的虚拟控制量.设计深度控制系统第1个误差子系统的虚拟控制量

$$\alpha_{\zeta 1} = -k_\zeta e_{\zeta 1} + \dot{\zeta}_c, \quad k_\zeta > 0, \quad (22)$$

第1个误差子系统动态方程为

$$\dot{e}_{\zeta 1} = \dot{\zeta} - \dot{\zeta}_c = x_2 - \dot{\zeta}_c = -k_\zeta e_{\zeta 1} + e_{\zeta 2}; \quad (23)$$

第2个误差子系统动态方程为

$$\begin{aligned} e_{\zeta 2} &= \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_{\zeta 1} = \\ & f_\zeta + b_{\zeta s}\delta_s + b_{\zeta b}u_{\text{BSMC1}} + \tilde{d}'_1 - \dot{\alpha}_{\zeta 1}. \end{aligned} \quad (24)$$

定义切换函数 $\sigma_\zeta = c_\zeta e_{\zeta 1} + e_{\zeta 2}, c_\zeta > 0$.设计反演滑模控制律为

$$\begin{aligned} u_{\text{BSMC1}} &= \frac{c_\zeta(k_\zeta e_{\zeta 1} - e_{\zeta 2}) - f_\zeta - b_{\zeta s}\delta_s +}{b_{\zeta b}} + \\ & \frac{\dot{\alpha}_{\zeta 1}(x_1) - h_\zeta \sigma_\zeta - \hat{\delta}_\zeta \text{sgn}(\sigma_\zeta)}{b_{\zeta b}}. \end{aligned} \quad (25)$$

其中: $h_\zeta > 0$ 为设计参数, $\hat{\delta}_\zeta$ 为 δ_ζ 的估计值.定义 $\tilde{\delta}_\zeta = \delta_\zeta - \hat{\delta}_\zeta$,参数自适应律为

$$\dot{\hat{\delta}}_\zeta = \gamma_\zeta |\sigma_\zeta|, \quad (26)$$

其中 $\gamma_\zeta > 0$ 为设计参数.将符号函数替换为连续光滑的双曲正切函数,可有效降低抖振

$$\tanh(\mu\sigma) = \frac{e^{\mu\sigma} - e^{-\mu\sigma}}{e^{\mu\sigma} + e^{-\mu\sigma}}, \quad (27)$$

其中 $\mu > 0$ 为待定调节系数,其值大小决定了双曲正切函数拐点的变化快慢.

同理可得纵倾反演滑模控制律 u_{BSMC2} .综合以上分析,潜艇总的指令舵角控制律为

$$\begin{cases} \delta_{bc} = u_{\text{BSMC1}} - u_{d1}, \\ \delta_{sc} = u_{\text{BSMC2}} - u_{d2}. \end{cases} \quad (28)$$

对于由NDO和反演滑模控制器组成的闭环系统,选取Lyapunov函数为

$$V = \frac{1}{2}e_\zeta^2 + \frac{1}{2}\sigma_\zeta^2 + \frac{1}{2\gamma_\zeta}\hat{\delta}_\zeta^2 + \frac{1}{2}(\tilde{d}'_1)^2, \quad (29)$$

对 V 求导,得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_{\zeta 1}\dot{e}_{\zeta 1} + \sigma_\zeta\dot{\sigma}_\zeta - \frac{\tilde{\delta}_\zeta\dot{\hat{\delta}}_\zeta}{\gamma_\zeta} + \tilde{d}'_1\dot{d}'_1 = \\ & -k_\zeta e_{\zeta 1}^2 + e_{\zeta 1}e_{\zeta 2} + \sigma_\zeta(c_\zeta\dot{e}_{\zeta 1} + \dot{e}_{\zeta 2}) - \frac{\tilde{\delta}_\zeta\dot{\hat{\delta}}_\zeta}{\gamma_\zeta} - L_1(\tilde{d}'_1)^2 = \\ & -k_\zeta e_{\zeta 1}^2 + e_{\zeta 1}(\sigma_\zeta - c_{\zeta 1}e_{\zeta 1}) + \sigma_\zeta(c_\zeta\dot{e}_{\zeta 1} + \dot{e}_{\zeta 2}) - \\ & \frac{\tilde{\delta}_\zeta\dot{\hat{\delta}}_\zeta}{\gamma_\zeta} - L_1(\tilde{d}'_1)^2. \end{aligned} \quad (30)$$

由式(25)和(30)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -(k_\zeta + c_\zeta)e_{\zeta 1}^2 - L_1(\tilde{d}'_1)^2 + \\ & \sigma_\zeta[\tilde{d}'_1 - \hat{\delta}_\zeta \text{sgn}(\sigma_\zeta) - h_\zeta \sigma_\zeta] - \frac{\tilde{\delta}_\zeta\dot{\hat{\delta}}_\zeta}{\gamma_\zeta} \leq \\ & -(k_\zeta + c_\zeta)e_{\zeta 1}^2 - L_1(\tilde{d}'_1)^2 - h_\zeta \sigma_\zeta^2 + \\ & \delta_\zeta|\sigma_\zeta| - \hat{\delta}_\zeta|\sigma_\zeta| - \frac{\tilde{\delta}_\zeta\dot{\hat{\delta}}_\zeta}{\gamma_\zeta} = \\ & -(k_\zeta + c_\zeta)e_{\zeta 1}^2 - L_1(\tilde{d}'_1)^2 - \\ & h_\zeta \sigma_\zeta^2 + \tilde{\delta}_\zeta|\sigma_\zeta| - \frac{\tilde{\delta}_\zeta\dot{\hat{\delta}}_\zeta}{\gamma_\zeta}. \end{aligned} \quad (31)$$

结合自适应律(26)和式(31)得

$$\dot{V} \leq -(k_\zeta + c_\zeta)e_{\zeta 1}^2 - L_1(\tilde{d}'_1)^2 - h_\zeta \sigma_\zeta^2. \quad (32)$$

由于参数 $k_\zeta > 0, c_\zeta > 0, L_1 > 0, h_\zeta > 0$,可得 $\dot{V} \leq 0$,满足全局渐近稳定性条件,保证了滑动模态的存在性、可达性、稳定性.

5 仿真结果及分析

为验证基于NDO的反演滑模控制器的有效性,采用完整的潜艇六自由度空间运动模型进行仿真^[16],水动力参数参考文献[16].选取潜艇垂直面无纵倾定常直线潜浮运动与定深运动进行仿真.

NDO观测器设计参数为 $L_1 = 0.5, L_2 = 8$.控制器设计参数为 $\hat{\delta}_{\zeta 0} = 0.02, \hat{\delta}_{\theta 0} = 0.2, \gamma_\zeta = 0.1, \gamma_\theta = 0.01, k_\zeta = 0.01, k_\theta = 0.01, c_\zeta = 0.05, c_\theta = 0.08, h_\zeta = 0.2, h_\theta = 0.08, \mu_\zeta = 0.001, \mu_\theta = 0.0001, |\delta_b| \leq 25^\circ, |\delta_s| \leq 30^\circ, |\dot{\delta}_b| \leq 3^\circ/\text{s}, |\dot{\delta}_s| \leq 3^\circ/\text{s}, T_d = 3\text{s}$.

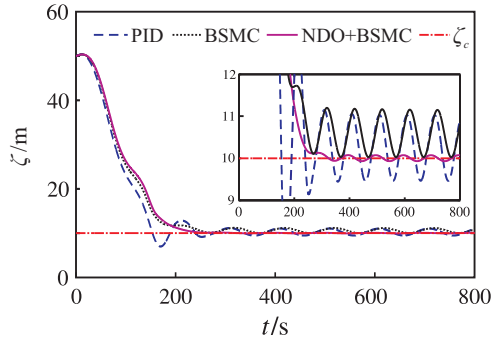
当外干扰为直接作用于潜艇的力 Z_d 或力矩 M_d 时,式(1)和(2)中的 d_1 和 d_2 可表示为

$$\begin{aligned} d_1 &= d_{wZ}Z_d + d_{wM}M_d, \quad d_2 = d_{qZ}Z_d + d_{qM}M_d; \\ d_{wZ} &= \frac{a_4}{a_1a_4 - a_2a_3}, \quad d_{wM} = -\frac{a_2}{a_1a_4 - a_2a_3}, \\ d_{qZ} &= -\frac{a_3}{a_1a_4 - a_2a_3}, \quad d_{qM} = \frac{a_1}{a_1a_4 - a_2a_3}. \end{aligned}$$

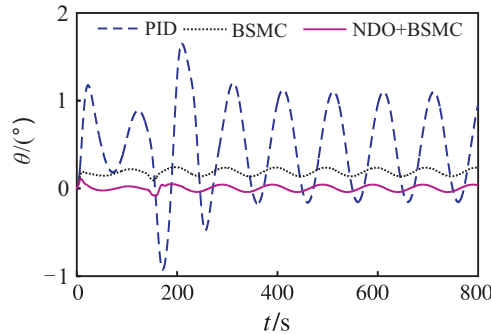
由于海浪等对潜艇的作用力量级约为 $10^4 \sim 10^8$ ^[17],取外干扰产生的力/力矩,采用慢时变信号、常值信号和随机信号的叠加,形式为

$$\begin{bmatrix} Z_d \\ M_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10\,000\text{rand} + 100\,000 + 200\,000 \cos(0.02\pi t) \\ 100\,000\text{rand} + 2\,000\,000 + 5\,000\,000 \sin(0.02\pi t) \end{bmatrix}$$

初始潜深 $\zeta_0 = 50\text{ m}$, 指令深度 $\zeta_c = 10\text{ m}$, 指令纵倾 $\theta_c = 0^\circ$, 指令航速 $u_c = 10\text{ kn}$, 仿真时间 800 s . 深度、纵倾运动响应仿真结果如图3所示, 其中图3中BSMC表示反演滑模控制器, NDO+BSMC表示基于NDO的反演滑模控制器. 深度和纵倾控制回路的复合干扰



(a) 潜深



(b) 纵倾

图3 复合干扰下深度、纵倾跟踪曲线

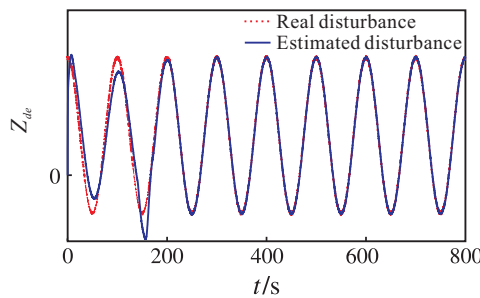


图4 深度控制回路NDO干扰观测值

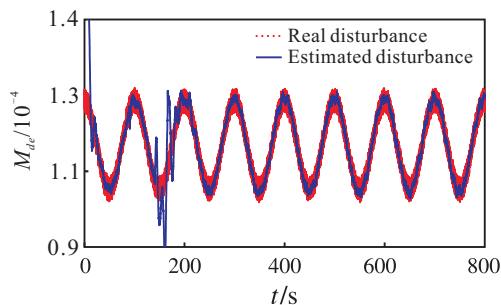
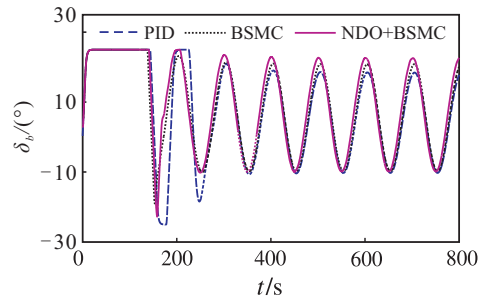
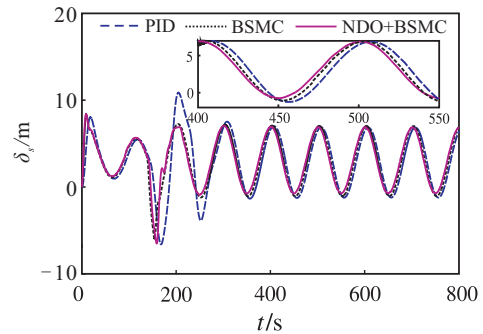


图5 纵倾控制回路NDO干扰观测值

观测值和观测误差分别如图4和图5所示, 其中 Z_{de} , M_{de} 分别表示深度回路NDO和纵倾回路NDO等效干扰力/力矩观测值. 舵舵和艏舵实际打舵舵角如图6所示.



(a) 舵舵



(b) 艏舵

图6 复合干扰下舵舵和艏舵实际舵角

通过对PID、BSMC、NDO+BSMC三种控制器控制效果的对比, 可得如下结论:

1) 由图3可以看出, 复合干扰下PID控制无法实现深度的精确控制, 产生约 1.2 m 的超调, 定深运动时深度在 10 m 处产生幅值约 1.5 m 的振荡; 纵倾在 0° 附近产生幅值约 1.2° 的振荡. 单一的反演滑模控制器控制效果优于PID控制, 但深度仍然未能实现无静差控制. 定深运动时, 在深度为 10.3 m 附近产生约 0.9 m 振荡; 纵倾在 0.2° 处产生幅值为 0.1° 的振荡. 加入观测器后的反演滑模控制能对深度、纵倾实现更高精度的跟踪控制, 深度稳态误差小于 0.1 m , 纵倾稳态误差小于 0.1° . 这说明对于双通道的耦合处理策略合理有效, 基于NDO的反演滑模控制能实现高精度的深度控制.

2) 由图4和图5可以看出, 两个NDO均能对外部干扰准确观测, 观测误差很小. 仅在仿真初始阶段 ($0 \sim 50\text{ s}$) 和到达指令深度阶段 ($150 \sim 200\text{ s}$) 出现较大的观测误差; 进入定深运动后, 观测误差逐渐减小. 由纵倾NDO干扰观测值可看出, 对随机高频小扰动的观测误差较大, 即本文设计的NDO可对较低频率的干扰进行准确补偿控制. 仿真结果表明, 由于NDO对舵、艏舵间的相互耦合干扰未加以观测而产生的观测误差很小, 可通过滑模控制加以补偿.

3) 由图6可以看出, PID控制下在到达指令深度时, 船舵、艏舵均产生较大的压舵舵角, 船舵打满舵, 艏舵最大达 12° ; BSMC和基于NDO的BSMC控制下在到达指令深度时, 船舵压舵舵角最大为 19° 和 20° , 艏舵压舵舵角最大为 6.2° 和 6.5° . 在定深运动时, 3种控制打舵频率几乎一致, PID控制下, 船舵舵角范围为 $-11^\circ \sim 19^\circ$, 艏舵打舵范围为 $-1.3^\circ \sim 6.9^\circ$; BSMC控制下, 船舵范围为 $-9.5^\circ \sim 20.9^\circ$, 艏舵范围为 $-1.5^\circ \sim 7^\circ$; 基于NDO的BSMC控制下, 船舵范围为 $-9.8^\circ \sim 22.5^\circ$, 艏舵范围为 $-0.7^\circ \sim 6.8^\circ$. 在加入NDO观测器后, 舵角打舵平滑无抖振, 且在有效范围内. 这说明在高精度控制的基础上, 潜艇并未因进行干扰补偿控制而打出过大的舵角, 从而产生过多的能耗.

6 结论

本文针对潜艇垂直面双通道耦合的深度控制问题, 提出了一种基于各通道独立设计控制器的策略, 设计了基于NDO的反演滑模控制器. 利用Lyapunov稳定性理论, 证明了系统的全局渐近稳定性及观测误差收敛特征. 通过对潜艇进行无纵倾定常直线潜浮运动与定深运动仿真, 验证了NDO观测器能够准确观测双通道耦合系统的干扰, 并分别加以补偿控制, 实现深度和纵倾的高精度控制.

参考文献(References)

- [1] Nakao M, Ohnishi K, Miyachi K. A robust decentralized joint control based on interference estimation[C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Raleigh, 1987: 326-331.
- [2] Guo L, Chen W. Disturbance attenuation and rejection for systems with nonlinearity via DOBC approach[J]. Int J of Robust & Nonlinear Control, 2005, 15(3): 109-125.
- [3] Guo L, Feng C B, Chen W H. A survey of disturbance-observer-based control for dynamic nonlinear system[J]. Dynamics of Continuous Discrete and Impulsive Systems-series B: Applications & Algorithms, 2006, 13E: 79-84.
- [4] Guo L, Cao S. Anti-disturbance control for systems with multiple disturbances[M]. Boca Raton: Crc Press, 2017: 20-212.
- [5] Chen W H, Yang J, Guo L, et al. Disturbance-observer-based control and related methods-an overview[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1083-1095.
- [6] Ebrahim A, Murphy G. Adaptive backstepping control of an induction motor under time-varying load torque and rotor resistance uncertainty[J]. Int J of Automation and Control, 2008, 2(4): 401-417.
- [7] 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.)
- [8] Li J H, Lee P M. Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(17/18): 2165-2181.
- [9] 魏延辉, 贾献强, 高延滨, 等. 基于NDO的ROV滤波反步轨迹跟踪控制[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 112-119.
(Wei Y H, Jia X Q, Gao Y B, et al. Command filtered backstepping path tracking control for ROV based on NDO[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 112-119.)
- [10] 陈巍, 魏延辉, 曾建辉, 等. 基于干扰观测器的欠驱动AUV自适应反演控制[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48(1): 69-76.
(Chen W, Wei Y H, Zeng J H, et al. Adaptive backstepping control of underactuated AUV based on disturbance observer[J]. J of Central South University: Science and Technology, 2017, 48(1): 69-76.)
- [11] Chen M, Chen W H. Sliding mode control for a class of uncertain nonlinear system based on disturbance observer[J]. Int J of Adaptive Control & Signal Processing, 2010, 24(1): 51-64.
- [12] Wei X, Guo L. Composite disturbance-observer-based control and terminal sliding mode control for non-linear systems with disturbances[J]. Int J of Control, 2009, 82(6): 1082-1098.
- [13] 魏延辉, 周卫祥, 陈巍, 等. 基于NDO的ROV变深自适应终端滑模控制器设计[J]. 控制与决策, 2016, 31(2): 373-377.
(Wei Y H, Zhou W X, Chen W, et al. Design of adaptive terminal sliding mode controller based on nonlinear disturbance observer for ROV depth changing[J]. Control and Decision, 2016, 31(2): 373-377.)
- [14] Liu S Y, Liu Y C, Wang N. Nonlinear disturbance observer-based backstepping finite-time sliding mode tracking control of underwater vehicles with system uncertainties and external disturbances[J]. Nonlinear Dynamic, 2017, 88(1): 465-476.
- [15] The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid[R]. Technical and Research Bulletin, 1950: 1-5.
- [16] Babaoglu O K. Design an automatic control system for a submarine[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1988.
- [17] 冯学知, 蒋强强, 缪泉明, 等. 潜体波浪中近水面不同潜深和航向时运动和波浪力计算[J]. 船舶力学, 2002, 6(2): 1-14.
(Feng X Z, Jiang Q Q, Miao Q M, et al. Motion and wave forces calculation of a deep-submerged body indifferent depth and course near water surface[J]. J of Ship Mechanics, 2002, 6(2): 1-14.)

(责任编辑: 孙艺红)