

文章编号 1004-924X(2013)07-1719-08

水下运载器纵向轨迹自适应跟踪控制

白瑜亮^{1*}, 崔乃刚¹, 吕世良^{2,3}

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京, 100864)

摘要:针对强非线性、大俯仰角运动的水下运载器纵向运动轨迹跟踪问题提出了一类非线性自适应控制方案。首先, 直接采用非线性运动模型, 在控制器设计过程中引入饱和函数, 通过麦克劳林展开公式避免了俯仰角为小角度的假设限制; 其次, 考虑到运载器非线性运动模型很难给出精确的数学描述并且实际运载器系统存在模型误差, 采用在线自适应方法近似逼近其非线性模型; 最后, 利用 Backstepping 方法设计了非线性自适应控制器, 并利用 Lyapunov 理论证明了控制系统的稳定性。半实物仿真结果表明: 在考虑测量噪声和参数不确定性的情况下, 该算法对给出的 3 种轨迹的跟踪误差均小于 0.5 m, 俯仰舵偏均小于 15°, 俯仰力矩均在 105 N·m 量级。结果验证了本文提出的控制系统鲁棒性强, 满足跟踪性能要求。

关键词:水下运载器; 非线性自适应控制; Backstepping 方法; Lyapunov 理论

中图分类号: U674.73; U666.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1719

Adaptive tracking control of longitudinal trajectory for underwater vehicle

BAI Yu-liang¹, CUI Nai-gang¹, LÜ Shi-liang^{2,3}

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

* Corresponding author, E-mail: xiaobai@126.com

Abstract: For the underwater vehicle trajectory tracking with strong nonlinearity and large pitch angle movement, a class of nonlinear adaptive control schemes were proposed in this paper. Firstly, the nonlinear movement model was adopted directly, a saturation function was induced in the process of controller design, and the assumption limit that the pitch angle was a small-angle was broken through the Maclaurin expansion formula. Then, taking into account that the precise nonlinear motion model of the vehicle was difficult to establish and there were many modeling errors in the actual vehicle model, the online adaptive method was used to approximate the nonlinear model. Finally, a nonlinear adaptive controller was designed by using Backstepping method, and its stability was proved by Lyapunov theory.

收稿日期: 2013-02-16; 修订日期: 2013-03-18.

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (No. 20110491028); 中央高校基本科研业务费 (重点支持研究项目) (No. HEUCFZ1126)

apunov's theory. The hardware-in-the-loop simulation results show that the tracking errors of all three types of tracks given in the paper are less than 0.5 m, the pitch rudder partials are less than 15° , and the pitch moments are within $10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$ order of magnitude in consideration of measurement noises and parameter uncertainties, These results prove that the control algorithm in this article has a strong robustness and can meet the requirement of tracking performance.

Key words: underwater vehicle; nonlinear adaptive control; Backstepping method; Lyapunov theory

1 引言

本文所述的水下运载器是一种不依赖操作平台(例如潜艇)自主航行于水下的航行器,属于自主水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)中的一种。与专门用于海洋探测的 AUV 不同,它主要用于包裹导弹完成出水作战任务。

水下运载器是具有高度非线性、快时变性和强耦合的系统。由于很难精确获得水下运载器水动力系数,所以难以保证其数学模型的精确性;同时水下运载器在航行过程中会受到海流和海浪的强烈干扰^[1],因此,水下运载器的控制问题面临严峻挑战。不难看出,水下运载器的控制不仅要摆脱对数学模型精确性的依赖而且应具有自适应性和鲁棒性,而传统的控制方法难以适用于水下运载器的控制。

模型误差包括参数不确定性误差和非结构化不确定性误差^[2]。自适应控制主要研究不确定对象或者事先难以确定的对象,其对模型精确性依赖程度不高,在处理存在参数不确定性的控制问题中是一种有效方法。因此,很多研究者已经开始注重将非线性自适应控制方法应用于水下运载器^[3,4]。文献[5]直接利用自适应控制策略来解决模型不确定性问题。文献[6]给出了包括滑模控制、自适应控制以及输出反馈控制的多种控制方法。文献[7]提出了一种轨迹跟踪控制器,将其姿态控制器作为内环控制器,解决了类比目鱼水下运载器的轨迹控制问题,利用鲁棒 PID 控制方法设计了相应的控制器并进行了稳定性分析。为了实现波浪力干扰作用下对 AUV 的航向控制,夏国清等设计了一种有衡量因子的在线动态 BP 神经网络控制器,与传统 PID 控制器相比,其具有较好的自适应性和鲁棒性^[8]。

本文以大俯仰角的水下运载器运动为控制对象,利用 Backstepping 方法设计了非线性自适应

控制器,解决了大俯仰角条件下水下运载器纵向轨迹跟踪问题;采用在线自适应方法近似逼近其非线性模型;通过 Lyapunov 理论证明并分析了控制系统的稳定性,最后初步进行了半实物仿真,验证了该控制系统的有效性。

2 水下运载器运动数学模型

水下运载器体坐标系 $o-x_b y_b z_b$ 如图 1 所示。原点位于运载器质心处, $o x_b$ 轴沿运载器纵轴指向前方; $o y_b$ 轴在纵对称面内垂直于 $o x_b$ 轴,向上为正; $o z_b$ 轴与其余两轴构成右手系。

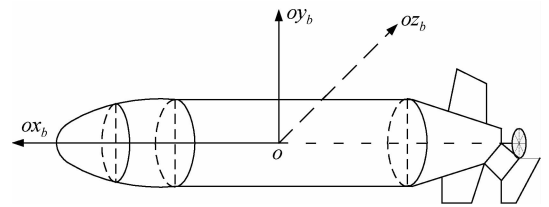


图 1 运载器体坐标系示意图

Fig. 1 Coordinate of image measuring system

设水下运载器的角速度及质心处的速度在水下运载器体坐标系中的 3 个分量分别为 $\omega_x, \omega_y, \omega_z, v_x, v_y, v_z$; 水下运载器的质量为 m , 水下运载器 $o x_b$ 轴、 $o y_b$ 轴和 $o z_b$ 轴的 3 个转动惯量分别为 J_x, J_y 和 J_z ; 水下运载器的偏航角、俯仰角和滚转角分别为 ψ, θ 和 φ :

$$\begin{aligned} v &= [v_1, v_2]^T, v_1 = [v_x, v_y, v_z]^T, v_2 = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \\ \eta &= [\eta_1, \eta_2]^T, \eta_1 = [x, y, z]^T, \eta_2 = [\theta, \psi, \varphi]^T. \end{aligned} \quad (1)$$

很多研究者已经给出了水下运载器的数学模型并对其系统参数辨识技术进行了研究^[9-10]。基于水下运载器大俯仰角运动情况,建立水下运载器 6 自由度动力学模型:

$$\begin{aligned} M_m \cdot \dot{v} &= \Gamma \\ \dot{\eta} &= L(\eta_2) \cdot v, \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $\Gamma = [F_{cx}, F_{cy}, F_{cz}, M_{cx}, M_{cy}, M_{cz}]^T$, (F_{cx}, F_{cy}, F_{cz}) 和 (M_{cx}, M_{cy}, M_{cz}) 分别为作用在水下运载器上的所有合外力和合外力矩在水下运载器体坐标系下的3个分量。

若只研究纵向运动,则水下运载器纵向运动模型可表示为:

$$\begin{cases} \dot{y} = v_x \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega_z \\ (\mathbf{J}_z + \lambda_{66})\dot{\omega}_z = M_p(\dot{v}, v, \eta) + qsLm_z^{\delta_e} \delta_e = d_p \end{cases}, \quad (3)$$

其中: $m_z^{\delta_e}, q, s, L$ 分别为俯仰舵力矩系数、动压、特征面积和特征长度; $M_p(\dot{v}, v, \eta)$ 包括附加质量交叉项、科里奥利力、向心力以及阻尼力等产生的力矩; d_p 为干扰力矩; λ_{66} 为运载器的附加转动惯量。

通常可将 $M_p(\dot{v}, v, \eta)$ 表达成关于 v 的线性关系式,但会带来较大的模型误差,故本文采用在线自适应方法近似逼近其非线性模型。精确描述实际水下运载器的非线性模型 $M_p(\dot{v}, v, \eta)$ 难度很大,如果 $M_p(\dot{v}, v, \eta)$ 满足光滑函数的条件,根据 F. Girosi 和 T. Poggio^[11]关于最佳逼近的研究结果可以得到下面的表达式:

$$M_p(\dot{v}, v, \eta) = \sum_{i=1}^n \theta_i^* \varphi_i^*(\dot{v}, v, \eta), \quad (4)$$

其中: $\varphi_i^*(\dot{v}, v, \eta) (i=1, \dots, n)$ 为 $M_p(\dot{v}, v, \eta)$ 的基函数, $\theta_i^* (i=1, \dots, n)$ 为常量。

根据式(4)可以将 $M_p(\dot{v}, v, \eta)$ 的逼近转换为构造合适的基函数 $\varphi_i^*(\dot{v}, v, \eta)$ 问题。通常选取的基函数不可避免地忽略实际系统的一些特性或者实际系统的限制性条件,这样会产生一定的误差。因此,可以采用下述修正模型来逼近 $M_p(\dot{v}, v, \eta)$:

$$M_p(\dot{v}, v, \eta) = \sum_{i=1}^N \theta_i \varphi_i(\dot{v}, v, \eta) + \epsilon(\dot{v}, v, \eta), \quad (5)$$

其中: $\sum_{i=1}^N \theta_i \varphi_i(\dot{v}, v, \eta)$ 表示 $M_p(\dot{v}, v, \eta)$ 的标称模型, $\epsilon(\dot{v}, v, \eta)$ 表示模型误差。

考虑式(5),改写式(3)得到如下方程组:

$$\begin{cases} \dot{y} = v_x \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega_z \\ (\mathbf{J}_z + \lambda_{66})\dot{\omega}_z = \Phi^T \Theta + qsLm_z^{\delta_e} \delta_e + \epsilon + d_p \end{cases}, \quad (6)$$

其中: $\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]^T, \Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ 。

3 自适应控制器设计及稳定性分析

针对大仰角水下运载器纵向运动轨迹跟踪控制问题,提出了一类非线性自适应方案,利用 Backstepping 方法设计相应的非线性自适应控制律,并通过 Lyapunov 理论证明了该跟踪控制系统的稳定性。

定义新的误差变量 x_1, x_2, x_3 ,具体形式如下:

$$\begin{aligned} x_1 &= y - y_c \\ x_2 &= \theta - \alpha_1(x_1, t), \\ x_3 &= \omega_z - \alpha_2(x_2, t) \end{aligned} \quad (7)$$

其中: y_c 为期望运动轨迹, $\alpha_1(x, t)$ 和 $\alpha_2(x_2, t)$ 为稳定函数。

由误差变量表示的纵向运动模型为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= v_x \sin[x_2 + \alpha_1(x_1, t)] - \dot{y}_c \\ \dot{x}_2 &= x_3 + \alpha_2(x_2, t) - \dot{\alpha}_1(x_1, t) \\ (\mathbf{J}_z + \lambda_{66})\dot{x}_3 &= \Phi^T \Theta + qsLm_z^{\delta_e} \delta_e + \epsilon + d_p - (\mathbf{J}_z + \lambda_{66})\dot{\alpha}_2(x_2, t). \end{aligned} \quad (8)$$

考虑式(8)中第一个方程,针对式中 $\sin(x_2 + \alpha_1)$ 项利用麦克劳林公式展开,略去其中二阶及其以上的高阶项得到:

$$\dot{x}_1 = -\dot{y}_c + v_x \sin \alpha_1 + v_x x_2 \cos \alpha_1. \quad (9)$$

设计如下控制律:

$$\alpha_1 = \arcsin \left[\text{sat} \left(\frac{-\dot{y}_c + k_1 x_1}{v_x} \right) \right], \quad (10)$$

其中: v_x 为轴向速度, $v_x > 0$; k_1 为控制参数且 $k_1 \geq 0$; $\text{sat}(\cdot)$ 为饱和函数。

将式(10)代入式(9)并令 $x_2 = 0$,则有:

$$\dot{x}_1 = -\dot{y}_c + v_x \text{sat}(\xi), \quad (11)$$

其中: $\xi = (-\dot{y}_c + k_1 x_1)/v_x$ 。饱和函数取如下形式:

$$\text{sat}(\xi) = \begin{cases} -\text{sgn}(x_1), & |\xi| \geq 1 \\ -\xi, & |\xi| < 1 \end{cases}. \quad (12)$$

取如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2}x_1^2. \quad (13)$$

则经整理得到:

$$\dot{V}_1 = -\dot{y}_c x_1 + v_x x_1 \text{sat}(\xi). \quad (14)$$

综上, $\forall x_1 \in R$, 有 $\dot{V} \leq 0$. 因此跟踪误差 x_1 渐近收敛至 0, 控制律式(10)使式(9)渐近稳定.

考虑式(8)中第二个方程, 取稳定函数 α_2 为如下形式:

$$\alpha_2 = \dot{\alpha}_1 - v_x x_1 \sqrt{1 - [\text{sat}(\xi)]^2} - k_2 x_2, \quad (15)$$

其中: k_2 是控制参数且 $k_2 \geq 0$.

设计如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V_2 = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2. \quad (16)$$

对式(16)求导数并整理得到:

$$\dot{V}_2 = -\dot{y}_c x_1 + v_x x_1 \text{sat}(\xi) - k_2 x_2^2 + x_2 x_3. \quad (17)$$

考虑式(8)中第三个方程:

$$(\mathbf{J}_z + \lambda_{66})\dot{x}_3 = -(\mathbf{J}_z + \lambda_{66})\dot{\alpha}_2 + \Phi^T \Theta + qsLm_z^{\delta_e} \delta_e + \varepsilon + d_p. \quad (18)$$

设计下述控制律:

$$\delta_e = [(\mathbf{J}_z + \lambda_{66})\dot{\alpha}_2 - \Phi^T \Theta - C_p \text{sgn}(x_3) - x_2 - k_3 x_3] / (qsLm_z^{\delta_e}), \quad (19)$$

其中: k_3 为控制参数且 $k_3 \geq 0$; Θ 表示式(6)中 Θ 的估计值. 其自适应控制律选为如下形式:

$$\dot{\hat{\Theta}} = x_3 \Phi. \quad (20)$$

选择下述形式的 Lyapunov 函数:

$$V_3 = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}(J_z + \lambda_{66})x_3^2 + \frac{1}{2}\tilde{\Theta}^T \tilde{\Theta} = V_2 + \frac{1}{2}(J_z + \lambda_{66})x_3^2 + \frac{1}{2}\tilde{\Theta}^T \tilde{\Theta}, \quad (21)$$

其中: $\tilde{\Theta} = \Theta - \hat{\Theta}$.

由上述推导过程中的相关条件以及结论可知:

$$\dot{V}_3 \leq 0. \quad (22)$$

综上, 跟踪误差 x_1 、 x_2 和 x_3 均渐近趋近于 0.

4 半实物仿真验证与分析

通过半实物仿真验证本文给出的控制律. 图 2 为考虑传感器的滞后、测量噪声、参数不确定性

和各种干扰的水下运载器非线性仿真模型结构图. 图 3 为半实物仿真系统结构图.

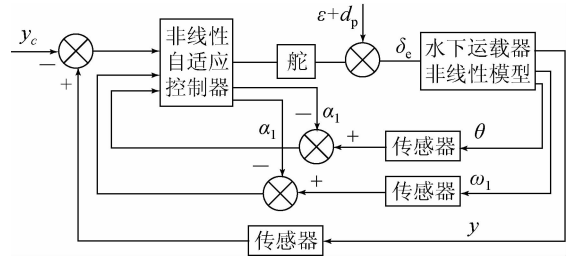


图 2 非线性控制系统结构图

Fig. 2 Configuration of nonlinear control system

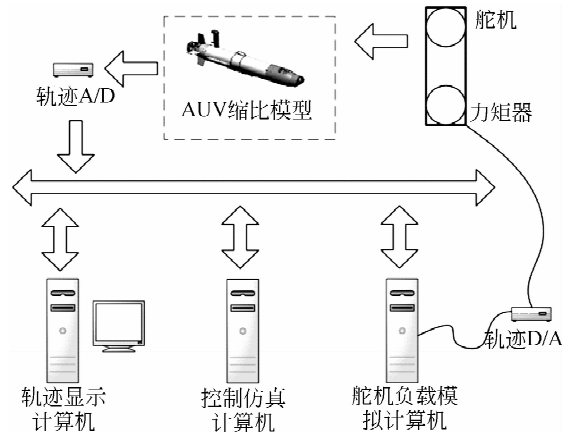


图 3 半实物系统结构图

Fig. 3 Configuration of hardware-in-the-loop system

仿真时将水下运载器实物(缩比模型和位置传感器)加入仿真回路, 组成半实物仿真系统. 仿真过程中, 控制仿真计算机给出水下运载器跟踪纵向期望轨迹所需的舵偏指令; 舵机负载模拟计算机根据控制仿真计算机发出的舵偏指令计算出舵轴所受负载力矩, 经 D/A 转换后通过力矩器向舵机施加力矩, 舵机偏转控制水下运载器缩比模型进行运动; 轨迹显示计算机用于显示水下运载器纵向运动状态.

非线性仿真模型为:

$$\begin{cases} \dot{y} = v_x \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega_z \\ 3.5\dot{\omega}_z = \Phi^T \Theta + 6.5v_x^2 \delta_e + \varepsilon + d_p \end{cases}. \quad (23)$$

非线性自适应控制律为:

$$\delta_e = [3.5\dot{\alpha}_2 - \Phi^T \hat{\Theta} - 5\text{sgn}(x_3) - x_2 - k_3 x_3] / (6.5v_0^2). \quad (24)$$

仿真中控制参数取值为: $k_1 = -2, k_2 = 8, k_3 = 120$,水动力参数偏差为 30%。

此算例中系统控制周期为 10 ms。为了能够更直接地体现本文控制算法的优势,在仿真中与基于线性化后的数学模型设计的控制器进行了比较。为了对比这两类模型对应的控制器性能,采用如下 3 种不同的期望轨迹。

- (1)期望轨迹 1: $y_c = \sin t$;
- (2)期望轨迹 2: $y_c = -40 + 20\sin 0.1t$;
- (3)期望轨迹 3: $y_c = -40 + 20\sin 0.3t$ 。

半实物仿真结果如图 4~14 所示。其中图 4~6 为采用非线性模型跟踪期望轨迹的仿真结果。

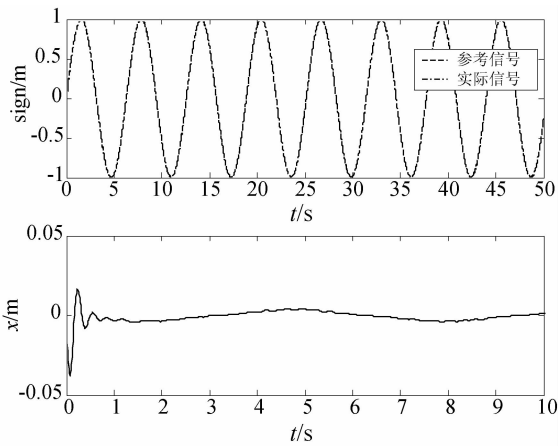


图 4 非线性模型跟踪期望轨迹 1 的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of nonlinear model's expected tracking trajectory 1

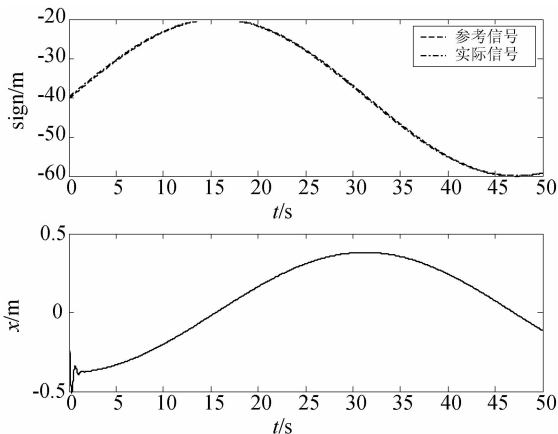


图 5 非线性模型跟踪期望轨迹 2 的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of nonlinear model's expected tracking trajectory 2

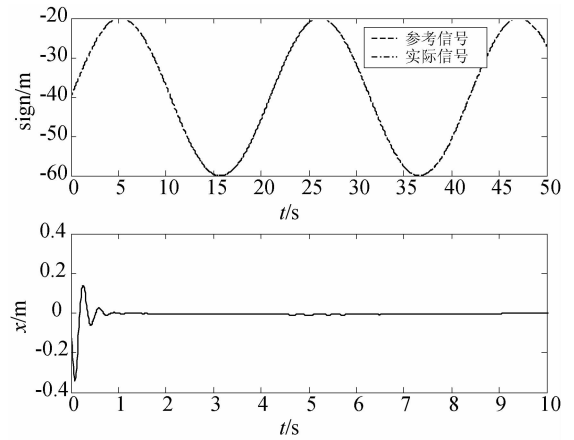


图 6 非线性模型跟踪期望轨迹 3 的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of nonlinear model's expected tracking trajectory 3

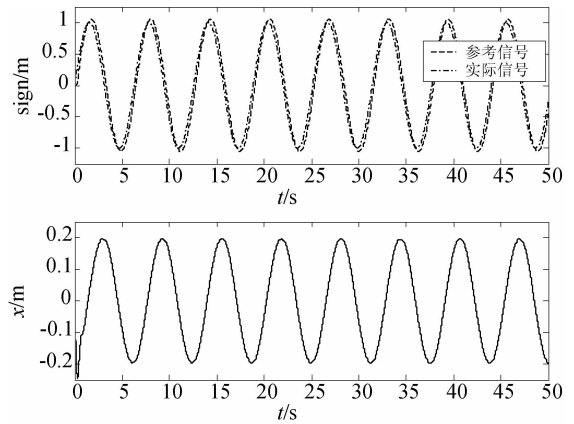


图 7 线性模型跟踪期望轨迹 1 的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of linear model's expected tracking trajectory 1

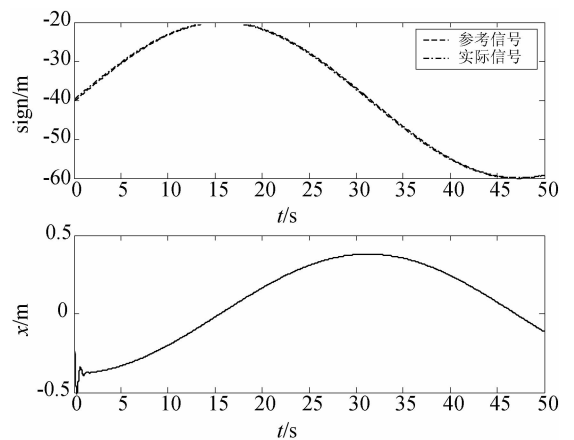


图 8 线性模型跟踪期望轨迹 2 的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of linear model's expected tracking trajectory 2

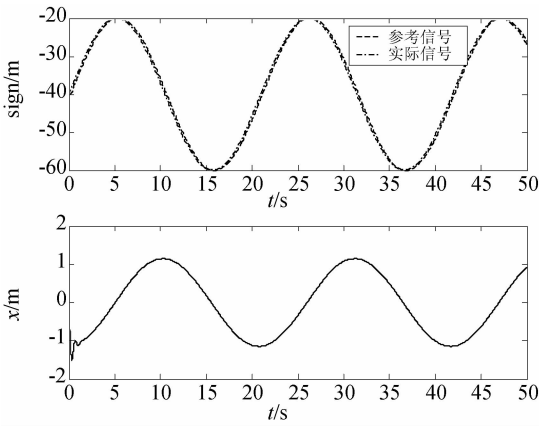


图 9 线性模型跟踪期望轨迹 3 的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of linear model's expected tracking trajectory 3

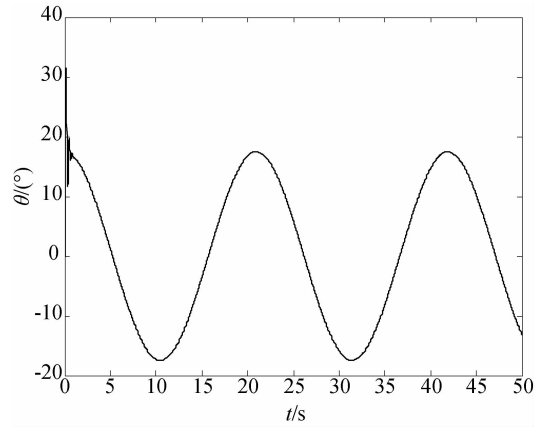


图 12 跟踪期望轨迹 3 的俯仰角仿真结果

Fig. 12 Simulation results of pitch angle's expected tracking trajectory 3

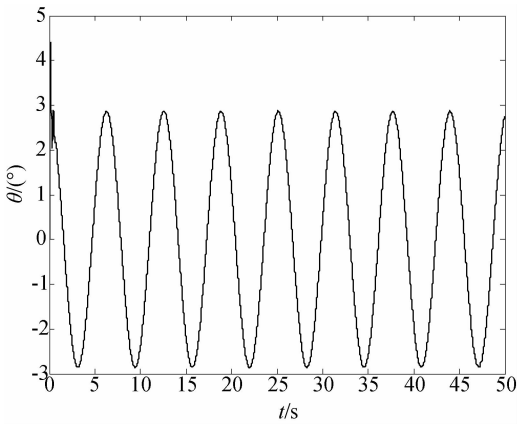


图 10 跟踪期望轨迹 1 的俯仰角仿真结果

Fig. 10 Simulation results of pitch angle's expected tracking trajectory 1

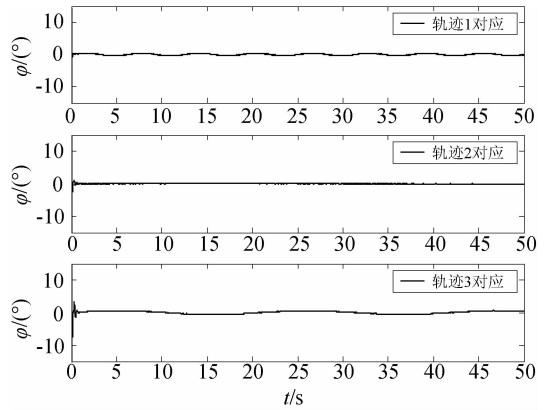


图 13 非线性模型半实物仿真俯仰舵偏结果

Fig. 13 Hardware-in-the-loop simulation results of nonlinear model's pitch rudder partial

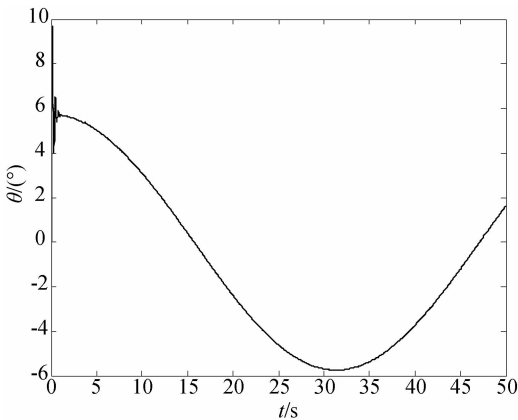


图 11 跟踪期望轨迹 2 的俯仰角仿真结果

Fig. 11 Simulation results of pitch angle's expected tracking trajectory 2

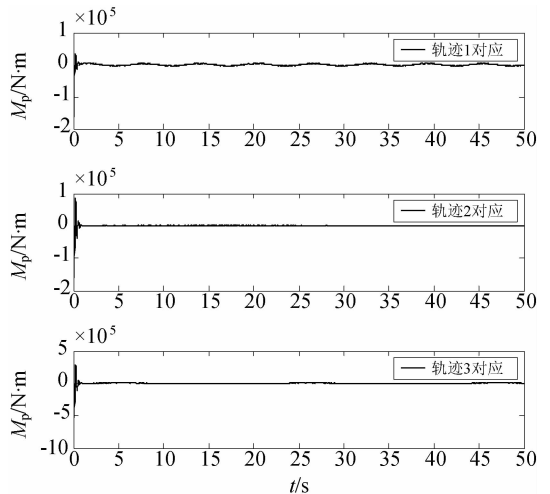


图 14 非线性模型半实物仿真俯仰力矩结果

Fig. 14 Hardware-in-the-loop simulation results of nonlinear model's pitch force moment

图7~9为采用线性模型跟踪期望轨迹的仿真结果。图10~12为跟踪3种期望轨迹时俯仰角变化曲线。从图中可以看出本文设计的非线性自适应控制器能够很好地跟踪3种期望轨迹,跟踪误差均很小。而对于采用线性模型设计的控制器,虽然能够跟踪信号,但是跟踪误差明显增大,而且出现振荡。通过图4和图7,图5和图8的对比可以看出采用线性模型的控制器的跟踪误差不是很大。通过图10和图11可知这主要是由于俯仰角变化范围不大, $\sin \theta \approx \theta$ 近似成立,使得线性模型与非线性模型差别不是很大。图6与图9对比可以看出,线性模型控制器的跟踪误差明显增大,这是由于跟踪期望轨迹3时,俯仰角变化范围很大, $\sin \theta \approx \theta$ 关系不再成立,导致线性模型与非线性模型误差变大。对比跟踪3种期望轨迹的俯仰力矩可知,最大力矩分别为: 1.62×10^5 , 1.61×10^5 和 5.37×10^5 N·m。

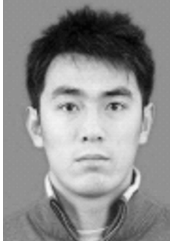
5 结 论

基于自适应控制理论,利用Backstepping方法设计了纵向轨迹跟踪控制器。在设计控制器过程中,引入饱和函数替代了传统的符号函数,防止系统谐振,保证了控制系统平稳过渡;通过麦克劳林展开取代了俯仰角为小角度的限制条件,避免了线性化过程中忽略掉有价值的非线性因素。由于实际的水下运载器非线性模型很难精确描述,直接采用在线自适应方法近似逼近其非线性模型,省略了线性化过程中的不必要假设。给出了自适应控制的设计方案和设计方法,初步结合地面半实物仿真验证了该方法的有效性。实验结果表明:针对文中给出的3种期望轨迹,该算法的跟踪误差均小于0.5 m,俯仰舵偏不大于 15° ,俯仰力矩均在 10^5 N·m量级,符合控制要求;证明了该方法满足轨迹跟踪要求,具有一定的鲁棒性。

参考文献:

- [1] CARLOS S, RITA C, NUNO P. A bottom-following preview controller for autonomous underwater [J]. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 2009, 17(2):257-266.
- [2] SHI X CH. Fuzzy sliding-mode controller for the motion of autonomous underwater vehicle [C]. *IC-MA*, 2008, 466-470.
- [3] GIANLUCA A. On the use of adaptive/integral actions for six-degrees-of-freedom control of autonomous underwater vehicles [J]. *Ocean Engineering*, 2007, 32(2):300-312.
- [4] POORYA H, MAHYAR N, SEYYED A S V. Adaptive position and attitude tracking of an AUV in the presence of ocean current disturbances [C]. *CCA*, 2007:741-746.
- [5] NARASIMHAN M, SINGH S N. Adaptive input-output feedback linearizing yaw plane control of BAUV using dorsal fins [J]. *Oceanic Engineering*, 2006, 33:1413-1430.
- [6] ANTONELLI G, ROBOTS U. *Motion and Force Control of Vehicle-manipulator Systems*[M]. Berlin:Springer-Verlag, 2003.
- [7] SANTHAKUMAR M, ASOKAN T. Attitude control of flatfish shaped autonomous underwater vehicle [C]. *ICIIS*, 2008: 1-6.
- [8] 夏国清,汤莉.基于动态神经网络的AUV航向自适应控制[J]. *船舶工程*, 2009, 31(2):46-49.
XIA G Q, TANG L. AUV heading adaptive control based on the dynamic neural network [J]. *Ship Engineering*, 2009, 31(2):46-49. (in Chinese)
- [8] FOSSEN T I. *Guidance and control of ocean vehicles*[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- [10] GOHEEN K R, JEFFERYS E R. Multivariable self-tuning autopilots for autonomous and remotely operated underwater vehicles [J]. *Ocean Engineering*, 1990, 15(3):144-151.
- [11] GIROSI F, POGGIO T. Networks and the best approximation property [J]. *Biological Cybernetics*, 1990, 63(3):169-176.

作者简介:



白瑜亮(1985—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2008、2010年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事水下运载器动力学建模、制导与控制方面的研究。E-mail: xiaobailv@126.com



崔乃刚(1965—),男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,1986年于国防科技大学获得学士学位,1989年、1996年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事导弹飞行力学与控制、组合导航及自主导航技术、惯导系统对准技术、导弹攻防对抗仿真、滤波理论及应用等。E-mail: cui_naigang@163.com



吕世良(1974—),男,山东郓城人,硕士,助理研究员,1999年、2006年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事自动控制和空间遥感成像处理方面的研究。E-mail: lvshiliang100@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)