

引用格式:武 颖,杨胜强,李文辉,等. 基于滑模反演的欠驱动水面无人艇航向控制[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 47—53
Wu Ying, Yang Shengqiang, Li Wenhui, et al. Heading control of an underactuated unmanned surface vehicle based on sliding mode and backstepping[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(1): 47—53

自动化技术、计算机技术

基于滑模反演的欠驱动水面无人艇航向控制

武 颖¹ 杨胜强¹ 李文辉¹ 刘大亮² 王 庆²
(太原理工大学机械工程学院¹,太原 030024;首都航天机械公司²,北京 100076)

摘 要 欠驱动无人艇作为一种水上重要的工作平台,其应用范围非常广泛。针对一种欠驱动水面无人艇的运动控制进行研究,首先分别建立其运动学和考虑了风浪干扰的动力学模型,得出了非线性状态空间模型;然后采用基于指数滑模面的滑模和反演相结合的控制算法设计其航向控制器;最后通过仿真和实物实验验证了设计的动力学方程和控制算法的有效性。
关键词 水面无人艇 欠驱动系统 非线性模型 滑模控制 反演控制 航向控制
中图分类号 TP273; **文献标志码** A

水面无人艇作为无人的水面运载平台,可以在江河湖海中执行时间长、范围广、运营成本低、工作效率高的各种任务;其作为小型船艇的新型研究课题,由于智能化、无人化、运动灵活、环境适应性强等特点,受到了国内外科研机构和专家的青睐和重视^[1]。其应用范围非常广泛,在军事和民用等领域都有无人艇的身影。国外对于无人艇的研究较早,具有代表性的成果有:美国的“斯巴达侦察兵”^[2]、“幽灵卫士”、“海上斗士”、以色列的“保护者”等。中国也在大力发展各种无人艇设备,比如哈尔滨工程大学^[3,4]、大连海事大学^[5]等科研机构在进行无人艇的相关研究。

水面无人艇系统作为一种典型的欠驱动系统(即控制系统的变量个数小于系统运动自由度个数),其由两个控制变量来实现三自由度的运动;针对这种系统,需要对其相关控制进行针对性研究^[6]。对于船艇的航向运动,其运动分析^[7]和控制研究^[8-11]是船艇研究的重要方向。同时航向控制作是无人艇控制必不可少和重要的一部分,其有效性和快速性就显得非常重要。国内外针对水

面无人艇的航向控制采用的控制方法有:PID 控制,该算法原理简单,但其中参数不易确定;神经网络算法控制,该算法对模型要求低,但计算量相对庞大;反步法控制,该算法基于李雅普诺夫稳定性理论;LQR 算法控制,对模型的依赖度较高。因此,针对无人艇的航向控制,对其非线性模型进行分析,并采用反演滑模控制算法,实现无人艇的有效和高效运动。

综上所述,本文将基于滑模反演算法针对欠驱动水面无人艇的航向控制进行研究。内容分为以下3个部分:首先,对欠驱动水面无人艇进行动力学建模,并得出其非线性状态方程;然后,针对该模型进行基于指数滑模面的滑模和反演相融合算法的航向控制方法的研究;最后,进行水面无人艇的仿真和实物实验验证所设计的非线性动力学模型和航向控制方法的有效性。

1 动力学建模

水面无人艇的控制变量为推力和舵面角度,其三自由度运动为沿 X、Y 轴的线运动和绕 Z 轴的旋转运动,因此无人艇系统的控制变量个数小于运动自由度个数,所以整个水面无人艇系统是欠驱动系统。分析了无人艇系统的运动原理,为了实现对欠驱动水面无人艇的有效控制,需要进行水面无人艇的运动学建模。首先建立水面无人艇的笛卡尔直角坐标系,其示意图如图 1 所示。

图 1 中有两个坐标系:地面坐标系和船体坐

2017 年 6 月 5 日收到 国家自然科学基金联合基金(U1510118)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20131402110002)、国家自然科学基金(51175365)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20111402120003)、国家自然科学基金(51345010)和科技部科技型中小企业技术创新基金(12C26211300661)资助
第一作者简介:武 颖(1980—),博士研究生。研究方向:机械设计,机器人控制。E-mail:wuying_tyut@163.com。

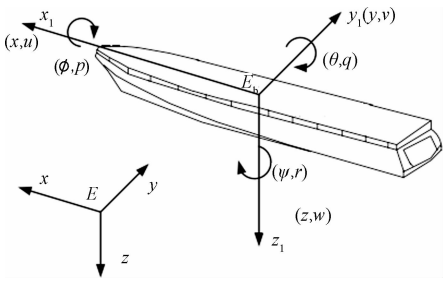


图1 无人艇坐标系示意图

Fig. 1 Coordinate system of an unmanned surface vehicle

标系。设地面坐标系的原点 E 为地面的原点, 根据右手坐标系法则, x 轴指向正东, y 轴指向正南, 则 z 轴沿重力方向竖直向下指向地心; 船体坐标系的原点 E_b 为水面无人艇的重心位置, 根据右手坐标系法则, x_1 轴沿无人艇主轴线对称轴指向水面无人艇的前方, y_1 轴指向水面无人艇的右方, z_1 轴与其他两条轴线垂直, 指向水面无人艇的垂直下方。

为了方便对水面无人艇数学模型进行研究, 需要提出几点基本假设: ①水面无人艇为刚体, 质量恒定; ②地面坐标系为惯性坐标系; ③忽略地曲面曲率, 无人艇所处水面为平面; ④空气密度、重力加速度和水的密度均恒定; ⑤无人艇船体的主轴线为对称轴; ⑥流体具有不可压缩性; ⑦忽略水面无人艇的绕 x 、 y 轴与沿 z 轴的变化量。

根据上面的假设, 忽略了水面无人艇的横摇、纵摇和垂荡, 对欠驱动水面无人艇的运动进行符号定义, 如表 1 所示。

表 1 水面无人艇运动各符号定义
Table 1 Definition of USV's symbols

名称	定义	力矩/力	角速度/速度	欧拉角/位置
艏摇	绕 z 轴	M_z	r	ψ
纵荡	沿 x 轴	F_x	u	x
横荡	沿 y 轴	F_y	v	y

地面坐标系和船体坐标系的转换矩阵 $R(E, B)$ 表示为

$$R(E, B) = \begin{bmatrix} C_\psi & -S_\psi & 0 \\ S_\psi & C_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中 $S_\psi = \sin \psi$, $C_\psi = \cos \psi$ 。

对于船体坐标系的力和力矩的表示为

$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{V}_c) \Big|_B + \boldsymbol{\omega} \times (m\mathbf{V}_c) \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \frac{d}{dt}\mathbf{H} \Big|_B + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H} \quad (3)$$

式(2)和式(3)就是水面无人艇的运动矢量

方程。

将式(2)和式(3)用标量形式进行表达, 其标量方程包括三个力和力矩微分方程, 表达式如下:

$$\begin{cases} F_x = m(\dot{u} - rv) \\ F_y = m(\dot{v} + ru) \end{cases} \quad (4)$$

$$M_z = I_z \dot{r} \quad (5)$$

式(5)中 I_z 为相对于船体坐标系的转动惯量。

水面无人艇绕质心转动的微分方程为

$$\dot{r} = \frac{M_z}{I_z} \quad (6)$$

水面无人艇质心平动的微分方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -r \\ r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(6)和式(7)两个运动方程组为水面无人艇运动分析和仿真提供了理论基础。

通过转换矩阵[式(1)]可得出水面无人艇的欧拉角速度 $\dot{\psi}$ 与船体角速度分量 r 之间的关系为

$$\dot{\psi} = r \quad (8)$$

同理可得出水面无人艇分别在地面坐标系和船体坐标系中的速度分量之间的关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \mathbf{Q}(\mathbf{A}) \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)中 $\mathbf{Q}(\mathbf{A}) = \begin{bmatrix} C_\psi & -S_\psi \\ S_\psi & C_\psi \end{bmatrix}$ 。

水面无人艇在运动过程中, 通过螺旋桨的推力和舵面摆动角度两个控制量的改变实现其在水面上的三自由度的运动, 如图 2 所示。

欠驱动水面无人艇所受的力主要为螺旋桨的推力、舵面改变方向的舵力、惯性水动力、黏性水动力、受到的风和浪的干扰力(同时还包含重力和浮力, 因为动态浮力计算非常复杂, 而且所占比例非常小, 这里对两者进行简化处理, 认为重力等于浮力, 不再进行分析)。

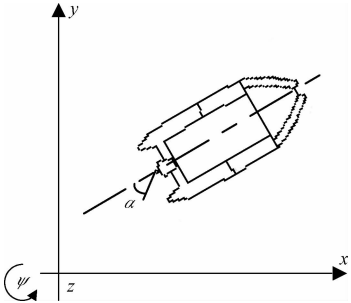


图2 无人艇水面运动示意图

Fig. 2 Motion diagram of an unmanned surface vehicle

那么螺旋桨的推力可以表示为

$$T = (1 - t_p) \rho n D_p^3 k_T (1 - \omega_p) V \quad (10)$$

式(10)中 t_p 为螺旋桨的推力衰减系数, ρ 为水的密度, n 为螺旋桨的转速, D_p 为螺旋桨的直径, k_T 为推力系数, ω_p 为伴流系数, V 为航行速度。

舵面改变方向的舵力可以表示为

$$\begin{cases} F_\alpha = \frac{1}{2} C_\alpha \rho v_R^2 S_R \\ M_\alpha = F_\alpha L_R \cos \alpha \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中 F_α 为舵面所受到的舵力, M_α 为舵面所受到的力矩, C_α 为舵力系数, v_R 为流入舵面的有效速度, S_R 为舵面的面积, α 为舵面的摆动角度, L_R 为舵面的有效长度。

惯性水动力是无人艇在流体中运动时由惯性产生的水动力,其表达式为

$$\begin{cases} F_{xi} = -m_{11} \ddot{u} + m_{26} \dot{r}^2 + m_{22} vr \\ F_{yi} = -m_{22} \ddot{v} - m_{26} \dot{r} - m_{11} ur \\ M_{zi} = -m_{12} \ddot{v} - m_{66} \dot{r} + (m_{11} + m_{22}) uv - m_{26} ur \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中 F_{xi} 为沿 x 轴惯性水动力, F_{yi} 为沿 y 轴惯性水动力, F_{zi} 为绕 z 轴惯性水动力矩, m_{ij} 为附加质量, $i, j = 1, 2$ 。

黏性水动力是无人艇在运动过程中由于流体黏性的作用而产生的水动力,其表达式为

$$\begin{cases} F_{xf} = F_{xuv} v^2 + F_{xvr} vr + F_{xrr} r^2 \\ F_{yf} = F_{yuv} v + F_{yvr} r + F_{yvv} v^2 + F_{yrr} r^2 \\ M_{zf} = M_{zv} v + M_{zr} r + M_{zvv} v^2 + M_{zrr} r^2 + M_{xvr} vr \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中 F_{xf} 为沿 x 轴黏性水动力, F_{yf} 为沿 y 轴黏性水动力, M_{zf} 为绕 z 轴黏性水动力矩, F_{xuv} 、 F_{xvr} 、 F_{xrr} 、 F_{yuv} 、 F_{yvr} 、 F_{yvv} 、 F_{yrr} 、 M_{zv} 、 M_{zr} 、 M_{zvv} 、 M_{zrr} 、 M_{xvr} 分别为沿各个方向速度的水动力和力矩的分量。

同时,考虑水面无人艇在水面上受到的风和浪的干扰,根据经验公式,风的干扰所受的力和力矩分别为

$$\begin{cases} F_{xw} = \frac{C_w \cos \alpha_w \sqrt{A_f^2 + A_s^2}}{A_f} \\ F_{yw} = \frac{C_w \sin \alpha_w \sqrt{A_f^2 + A_s^2}}{A_s} \\ M_{zw} = \frac{B_w C_w \sin \alpha_w \sqrt{A_f^2 + A_s^2}}{A_s} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中 F_{xw} 为沿 x 轴风扰力, F_{yw} 为沿 y 轴风扰力, M_{zw} 为绕 z 轴风扰力矩, A_f 为船体与风正面接触面积, A_s 为船体与风侧面接触面积, $B_w = 0.5 - \frac{x_w}{L_s}$, C_w 为风压系数, α_w 为风压作用角, x_w 为风压作用点, L_s 为无人艇船体的长度。

浪的干扰所受的力和力矩分别为

$$\begin{cases} F_{xs} = 2\rho g a J_{\chi} e^{-kd} B d K_{\chi} \\ F_{ys} = -2\rho g a J_{\chi} e^{-kd} B d K_{\chi} \\ M_{zs} = 2\rho g a \sin \chi J_{\chi} e^{-kd} d Q_{\chi} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中:

$$\begin{cases} J_{\chi} = \frac{\sin \frac{kB \sin \chi}{2}}{\frac{kB \sin \chi}{2}} \\ K_{\chi} = \sin k \frac{L}{2} \cos \chi \sin(\omega_e t) \\ J_{\chi} = \frac{\sin \frac{kB \cos \chi}{2}}{\frac{kB \cos \chi}{2}} \\ K_{\chi} = \sin k \frac{L}{2} \sin \chi \sin(\omega_e t) \\ Q_{\chi} = \frac{2 \sin \frac{kL \cos \chi}{2}}{k^2 \cos^2 \chi} - \frac{L \cos \chi \frac{kL \cos \chi}{2}}{k \cos \chi} \end{cases} \quad (16)$$

式中 F_{xs} 为沿 x 轴浪扰力, F_{ys} 为沿 y 轴浪扰力, M_{zs} 为绕 z 轴浪扰力矩, a 为波幅, k 为波数, L 是水面无人艇垂线之间间距, B 为无人艇的宽度, d 为无人艇的吃水深度, χ 为波浪与船体接触的作用角, ω_e 为波浪的波动频率。

综上所述,水面无人艇沿 x 、 y 轴所受的合力和绕 z 轴的合力矩为

$$\begin{cases} F_x = F_{xT} + F_{x\alpha} + F_{xi} + F_{xf} + F_{xw} + F_{xs} \\ F_y = F_{yT} + F_{y\alpha} + F_{yi} + F_{yf} + F_{yw} + F_{ys} \\ M_z = M_{z\alpha} + M_{zi} + M_{zf} + M_{zw} + M_{zs} \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中 F_{xT} 为沿 x 轴螺旋桨推力, F_{yT} 为沿 y 轴螺旋桨推力, $F_{x\alpha}$ 为沿 x 轴舵力, $F_{y\alpha}$ 为沿 y 轴舵力, $M_{z\alpha}$ 为绕 z 轴舵力矩。

将式(17)代入式(6)~式(9),可得水面无人艇的非线性状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + g(x)u \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中欠驱动水面无人艇系统的状态矢量为 $\mathbf{x} = [x \ y \ \psi \ u \ v \ r]$, 控制输入矢量为 $\mathbf{u} = [n \ \alpha]$ 。基于此非线性模型,下面研究欠驱动水面无人艇在航向运动中的控制方法。

2 运动控制方法研究

欠驱动水面无人艇的航向控制是由推力和舵面角度两个控制量来实现的,而且仅有其中的任一控制量都无法实现无人艇的航向控制,因此这两个控制量存在一定的输入控制耦合作用。

针对非线性系统的滑模(sliding mode)控制是一种变结构控制,随着系统状态的变化而不断地改变其系统结构,以此来实现对系统的控制^[12]。由于在滑模控制后期过程中,由于系统状态来回穿越超平面,所以系统结构之间不停地转换,其控制量会发生不断地抖动,这也是变结构滑模控制实际应用中存在的问题。滑模变结构控制系统的优点在于系统结构设计简单,而且不随系统的不确定性和扰动发生变化,具有鲁棒性和自适应性。

反演(backstepping)控制通过将非线性系统进行分解,得出在系统阶数以内的子系统,对子系统分别进行李雅普诺夫(Lyapunov)函数设计和中间虚拟控制量设定,然后反推到整个系统,完成整个系统控制器的设计^[13]。该控制方法主要用于非线性系统的控制,通过构建李雅普诺夫函数推导出稳定的控制器。反演控制系统的优点在于其对系统的确定性要求不高,而且对非线性系统具有优越性^[14]。所以将变结构滑模控制与反演控制进行结合,可以实现对欠驱动水面无人艇的非线性系统的有效控制,这里针对该系统的控制器进行分析和设计。

首先,定义航向角(即艏摇欧拉角)误差为

$$e(t) = \psi(t) - \psi_d(t) \quad (19)$$

式(19)中, $\psi_d(t)$ 为航向角的期望值。

则对式(19)求导,可得航向角速度误差为

$$\dot{e}(t) = \dot{\psi}(t) - \dot{\psi}_d(t) \quad (20)$$

式(20)中, $\dot{\psi}_d(t)$ 为航向角速度的期望值。

根据式(19)和式(20),设:

$$\begin{cases} z_1(t) = e(t) \\ \dot{z}_1(t) = \dot{e}(t) \end{cases} \quad (21)$$

定义虚拟控制量(又叫稳定化函数)为

$$\alpha_1 = -b_1 z_1(t) + \dot{\psi}_d(t) \quad (22)$$

式(22)中 $b_1 > 0$ 。

设:

$$z_2(t) = x_2(t) - \alpha \quad (23)$$

定义李雅普诺夫函数 V_1 为

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (24)$$

则对 V_1 求导可得:

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1(x_2 - \dot{\psi}_d) \quad (25)$$

将式(22)和式(23)代入式(25)可得:

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 z_2 - b_1 z_1 z_1 \quad (26)$$

那么当 $z_2 = 0$ 时,则 $\dot{V}_1 \leq 0$,该子系统处于渐进稳定状态。

定义李雅普诺夫函数 V_2 为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (27)$$

则对 V_2 求导可得:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = z_1 z_2 - b_1 z_1^2 + z_2 [f(x) + g(x)u + b_1 \dot{z}_1 - \ddot{\psi}_d] \quad (28)$$

将式(24)代入式(28)可得:

$$u = \frac{-f(x) - b_2 z_2 - z_1 - b_1 \dot{z}_1 + \ddot{\psi}_d}{g(x)} \quad (29)$$

式(29)中 $b_2 > 0$ 。

则有:

$$\dot{V}_2 = -b_1 z_1^2 - b_2 z_2^2 \leq 0 \quad (30)$$

因此由李雅普诺夫稳定性可得,式(29)设计的控制律保证了欠驱动水面无人艇非线性系统的全局意义下的渐进稳定性。

由于欠驱动水面无人艇系统的复杂性,所以在构造其非线性系统时存在不确定量,在这里设其非线性系统为

$$\dot{x} = f(x) + \Delta f + [g(x) + \Delta g]u \quad (31)$$

式(31)中 Δf 和 Δg 为系统中的不确定函数。

则滑模面选取为

$$s = s(x) \quad (32)$$

对式(32)求导可得:

$$\dot{s} = \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x} [f + \Delta f + (g + \Delta g)u] \quad (33)$$

则系统在滑动模态的等效控制为

$$u_{eq} = - \left(\frac{\partial s}{\partial x} g \right)^{-1} \left[\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x} (f + \Delta f + \Delta g u_{eq}) \right] \quad (34)$$

将式(33)代入式(34)的滑模方程为

$$\begin{aligned} \dot{x} = & \left[I - g \left(\frac{\partial s}{\partial x} g \right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} \right] [f + \Delta f + (g + \Delta g)u] - \\ & g \left(\frac{\partial s}{\partial x} g \right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial t} \end{aligned} \quad (35)$$

从中可以得出,当:

$$\Delta f + \Delta g u_{eq} = g \left(\frac{\partial s}{\partial x} g \right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} (\Delta f + \Delta g u_{eq}) \quad (36)$$

则滑动模态方程与系统的干扰及不确定性无关,即滑模对于系统不确定性和扰动具有不变性。

非线性系统式(18)的滑模面这里选用非线性滑模面,非线性滑模面相对于传统的线性滑模面其收敛速度有了很大的提高,而指数滑模面在非线性滑模面中收敛速度快而且趋近效果好,所以选欠驱动水面无人艇的指数滑模面为

$$s(t) = x_2 + \lambda x_1^{\frac{p}{q}} \quad (37)$$

式(37)中 λ 、 p 、 q 为待定参数。

则对式(37)求导可得:

$$\dot{s}(t) = \dot{x}_2 + \frac{\lambda p}{q} x_1^{\frac{p}{q}-1} \dot{x}_1 \quad (38)$$

定义李雅普诺夫函数 V_s 为

$$V_s = V_{1s} + \frac{1}{2}s^2$$

(39)

则对 V_s 求导可得:

$$\dot{V}_s = -a_1x_1^2 + x_1x_2 + (x_2 + \lambda x_1^{\frac{p}{q}}) \times \left(\dot{x}_2 + \frac{\lambda p}{q} x_1^{\frac{p}{q}-1} \dot{x}_1 \right)$$

(40)

根据滑模控制设计条件,设指数滑模控制律为

$$u = \frac{-f(x) - \frac{\lambda p}{q} x_1^{\frac{p}{q}-1} \dot{x}_1 - x_1}{g(x)}$$

(41)

将式(41)代入式(40)中可得:

$$\dot{V}_s = -a_1x_1^2 - \lambda x_1^{\frac{p}{q}+1} \leq 0$$

(42)

由李雅普诺夫稳定性可得,式(41)设计的控制律保证了欠驱动水面无人艇非线性系统控制稳定性。

因此将滑模和反演相结合的航向控制,可以有效地保证欠驱动水面无人艇系统控制的稳定性,通过两者的结合,提高了非线性系统控制的鲁棒性、自适应性和优越性,以此来实现对欠驱动水面无人艇航向的优化控制。

3 仿真与实验

通过以上对欠驱动水面无人艇非线性系统的动力学分析和航向控制方法设计,完成了该系统的理论分析。下面通过仿真实验和实物实验验证系统理论和控制方法的有效性。

3.1 仿真实验

为了验证欠驱动水面无人艇的动力学模型的有效性,首先对欠驱动水面无人艇的非线性动力学模型进行仿真实验,通过 MATLAB 仿真软件进行系统模型的仿真实验。下面给出研发的 WL-II 号欠驱动水面无人艇的重要参数如表 2 所示。

表 2 水面无人艇重要参数
Table 2 Key parameters of USV

名称	数值
艇长/cm	150
艇高/cm	55
艇宽/cm	60
质量/kg	45
螺旋桨最大功率/W	300
螺旋桨数量/个	2
螺旋桨直径/cm	11.5
舵面面积/cm ²	120
重心高度/cm	15
吃水深度/cm	9

在仿真实验中,设定欠驱动水面无人艇螺旋桨的转速为 800 r/min,舵面的偏转角度为 0,针对

两种情况的动力学模型进行仿真:①只考虑螺旋桨的推力、舵面改变方向的舵力、惯性水动力、黏性水动力;②将无人艇在水面上受到的风和浪的干扰也考虑到模型中去,得出仿真结果如图 3 和图 4 所示。

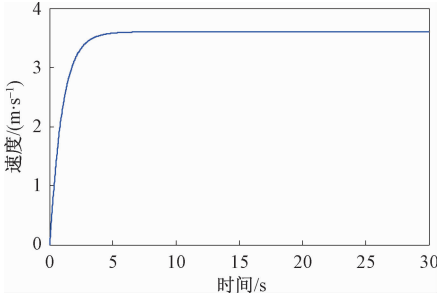


图 3 动力学模型①仿真示意图

Fig. 3 Dynamic model ① simulation diagram

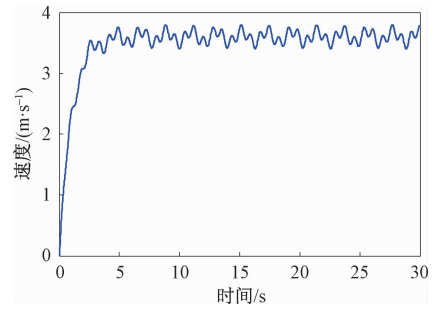


图 4 动力学模型②仿真示意图

Fig. 4 Dynamic model ② simulation diagram

通过图 3 可以得出,在一定的螺旋桨转速下水面无人艇在 5 s 内处于加速运动,在 5 s 左右速度趋于稳定,稳定在 3.6 m/s。这是由于随着水面无人艇速度的增加,其所受的黏性水动力阻力变大,速度加速放缓,最后达到平衡状态,速度保持稳定。

通过图 4 可以得出,考虑无人艇在水面上受到的风和浪的干扰,其速度相对于图 3 所示运动趋势一致,但在运动过程中出现了波动,这是由于风和浪的干扰造成的,其速度趋于稳定的状态下也会存在一定的波动。

在动力学模型②仿真实验的基础上,设定舵面偏转的角度为 30°,得出仿真结果如图 5 所示。

通过图 5 可以得出,水面无人艇做转弯半径为 23 m 的类圆周运动,通过舵面偏转实现无人艇转弯运动需要一定的转弯半径,而且从图 5 可以看出,在转弯运动模型中由于考虑了风浪干扰,其运动曲线中有波动性。

通过图 3 ~ 图 5 对欠驱动水面无人艇的非线性系统动力学模型仿真可以得出其运动趋势与预想结果相符,说明该模型的合理性。

基于上面的动力学模型和第 2 节水面无人艇的

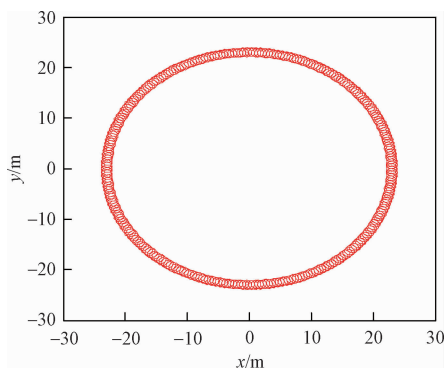


图5 有舵面偏转角度的动力学模型仿真示意图

Fig. 5 Dynamic model considering the rudder's deflection angle simulation diagram

滑模和反演控制相结合的航向控制进行仿真实验,实现无人艇的航向姿态为 30° ,得出仿真结果如图6所示。

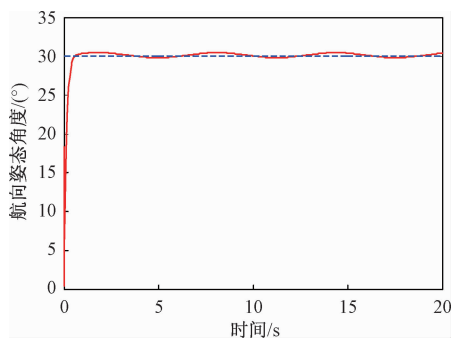


图6 航向控制仿真示意图

Fig. 6 Heading control simulation diagram

通过图6可以得出,水面无人艇的滑模和反演控制相结合的航向控制在2 s左右达到期望值,并能够在后面的时间里趋于稳定,说明该控制算法可以有效快速地实现无人艇的航向控制。

3.2 实物实验

通过对欠驱动水面无人艇的结构进行分析和设计,并进行了三维建模和仿真,并充分考虑了结构的密封性和防水性,最后确定采用加强型玻璃钢材料完成了WL-II号欠驱动水面无人艇的研制。

针对研发的WL-II号欠驱动水面无人艇进行实物实验验证所设计的控制算法的有效性,设期望角度为 30° ,经过设计的航向控制器后,得出实验结果如图7所示。

通过图7可以得出,欠驱动水面无人艇在3 s左右到达 30° ,在随后的时间航向姿态角度在 $\pm 3.5^\circ$ 内进行波动,这说明受无人艇实际环境的影响,其姿态角度有一定的波动性。从整体来看,滑模和反演相结合的航向控制可以实现对无人艇航向的有效控制。

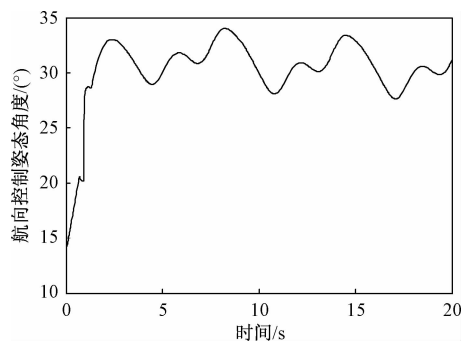


图7 无人艇WL-II号航向控制实验示意图

Fig. 7 Heading control experiment diagram of USV WL-II

4 结论

针对欠驱动水面无人艇的航向运动提出了一种优化的反演滑模控制方法。针对欠驱动水面无人艇建立了运动学和非线性动力学模型,该模型考虑了无人艇的惯性、黏性水动力和水面上风和浪对船体的干扰。基于无人艇的非线性状态控制模型,为了提高控制的鲁棒性和自适应性,设计了一种优化的反演滑模控制方法,使得水面无人艇的闭环控制系统具有全局渐进稳定性。最后数学仿真和实物实验都证明提出的控制方法在非线性的欠驱动水面无人艇系统航向控制的有效性。

参考文献

- 柳晨光, 初秀民, 吴青, 等. USV发展现状及展望. 中国造船, 2014; 55(4): 194—204
Liu Chenguang, Chu Xiumin, Wu Qing, et al. A review and prospect of USV research. Shipbuilding of China, 2014; 55(4): 194—204
- Larson J, Bruch M, Halterman R, et al. Advances in autonomous obstacle avoidance for unmanned surface vehicles. Proceedings of AUVSI Unmanned Systems North America. Washington, D. C.: IEEE, 2007: 1—15
- 吴恭兴. 无人艇操纵性与智能控制技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011
Wu Gongxing. Study of maneuverability and intelligent control for unmanned surface vehicle. Harbin: Harbin Engineering University, 2011
- 廖煜雷. 无人艇的非线性运动控制方法研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012
Liao Yulei. Nonlinear motion control methods of unmanned surface vehicle. Harbin: Harbin Engineering University, 2012
- 孙巧梅. 无人艇建模及逻辑网络自适应控制方法的研究. 大连: 大连海事大学, 2013
Sun Qiaomei. Study on unmanned surface vehicle modeling and logic networks adaptive control method. Dalian: Dalian Maritime University, 2013
- 郭晨, 汪洋, 孙富春, 等. 欠驱动水面船舶运动控制研究综述. 控制与决策, 2009; 24(3): 321—329

- Guo Chen, Wang Yang, Sun Fuchun, *et al.* Survey for motion control of underactuated surface vessels. *Control and Decision*, 2009; 24 (3): 321—329
- 7 张泽国, 尹建川, 胡江强, 等. 基于灰色 PSO-ANFIS 模型的船舶横摇运动预报分析. *科学技术与工程*, 2016; 16(33): 124—129
- Zhang Zeguo, Yin Jianchuan, Hu Jiangqiang, *et al.* Ship rolling motion prediction and analysis based on grey PSO-ANFIS model. *Science Technology and Engineering*, 2016; 16(33): 124—129
- 8 Naeem W, Irwin G W, Yang A. COLREGs-based collision avoidance strategies for unmanned surface vehicles. *Mechatronics*, 2012; 22 (6): 669—678
- 9 Aguiar A P, Hespanha J P. Trajectory-tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles with parametric modelling uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007; 52 (8): 1362—1379
- 10 Repoulas F, Papadopoulos E. Planar trajectory planning and tracking control design for underactuated AUVs. *Ocean Engineering*, 2007; 34(2): 1650—1667
- 11 Bessa W M, Dutra M S, Kreuzer E. An adaptive fuzzy sliding mode controller for remotely operated underwater vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010; 58(1): 16—26
- 12 刘大亮, 孙汉旭, 贾庆轩. 一种球形机器人的非线性滑模运动控制. *机器人*, 2008; 30(6): 498—502
- Liu Daliang, Sun Hanxu, Jia Qingxuan. Nonlinear sliding-mode motion control of a spherical robot. *Robot*, 2008; 30 (6): 498—502
- 13 曾薄文, 朱齐丹, 于瑞亭. 欠驱动水面船舶的曲线航迹跟踪控制. *哈尔滨工程大学学报*, 2011; 32(10): 1317—1322
- Zeng Bowen, Zhu Qidan, Yu Ruiting. Curve tracking control of an underactuated surface vessel. *Journal of Harbin Engineering University*, 2011; 32(10): 1317—1322
- 14 徐传忠. 非线性机器人的智能反演滑模控制研究. 泉州: 华侨大学, 2012
- Xu Chuansong. Research on intelligent backstepping sliding mode control of nonlinear robots. Quanzhou: Huaqiao University, 2012

Heading Control of an Underactuated Unmanned Surface Vehicle Based on Sliding Mode and Backstepping

WU Ying¹, YANG Sheng-qiang¹, LI Wen-hui¹, LIU Da-liang², WANG Qing²

(College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology¹, Taiyuan 030024, China;

Capital Space Flight Machinery Company², Beijing 100076, China)

[**Abstract**] An underactuated unmanned surface vehicle, as an important platform working in the sea or lake, has a wide range of applications. Motion control of an underactuated unmanned surface vehicle is researched. Firstly, the kinematics and dynamics model considering the wind and sea wave disturbance is built, and the nonlinear state equation is derived. Then the combination control algorithm of the sliding mode control based on exponential sliding surface and backstepping control is designed for heading controller. Finally in the simulations and experiments, the validity of the dynamics equation and the control algorithm designed is verified.

[**Key words**] unmanned surface vehicle underactuated system nonlinear model sliding mode control backstepping control heading control