

欠驱动无人艇直线航迹跟踪的反步自适应动态滑模控制^①

廖煜雷^② 常文田 刘 涛

(哈尔滨工程大学水下机器人技术国家重点实验室 哈尔滨 150001)

摘 要 针对喷水推进型欠驱动无人艇的由艇艏摆非线性响应模型和舵机伺服系统组成的直线航迹控制系统,在考虑模型参数不确定性和外界干扰随机性特点的情况下,研究了一种反步自适应动态滑模控制方法。首先利用全局微分同胚坐标变换将原系统转化为具有下三角特征的非线性系统,然后基于反步设计法和动态滑模控制理论,设计了反步自适应动态滑模控制器,并利用 Lyapunov 稳定性理论,证明在该控制器的作用下,直线航迹控制系统是全局渐近稳定的。仿真对比试验表明,该控制器对模型摄动和外界干扰不敏感,具有强鲁棒性和自适应性。

关键词 欠驱动,无人艇(USV),航迹跟踪,动态滑模控制,反步

0 引 言

无人艇(unmanned surface vessel, USV)在海洋探测、海洋环境监测以及维护海洋安全方面具有广泛的应用,目前成为了国内外研究的热点^[1-6]。无人艇的艇型为滑行艇,在不同航速下,艇体各种水动力系数将发生较大变化,且艇体在复杂海洋环境中会受到随机干扰力的影响,因此难以建立其精确数学模型。所以控制方法必须对控制系统的不确定性具有良好的自适应能力和鲁棒性。

一些学者针对船舶的直线航迹控制问题进行了大量研究^[7-9],但直线航迹控制存在一个缺点,那就是只能保证直线航迹的局部渐近稳定性。李铁山、周岗等^[10-12]均利用输入-输出线性化方法对欠驱动船舶的直线航迹控制问题进行了研究。李铁山等^[10]借鉴重定义输出变量思想,将输出变量定义为艏向角和横向位移的线性函数,提出了一种状态反馈控制器。该方法克服了持续激励条件的限制,缺点是只能保证闭环系统的局部渐近收敛。周岗等^[11-12]定义了更为一般的输出变量艏向角和横向位移的非线性函数或艏向角、横向位移和艏摆速度的非线性函数提出的控制器可保证原系统的全局渐近稳定性。李铁山等^[13]把 Nussbaum 增益技术同反步(backstepping)设计技术相结合,利用模糊系统逼

近系统中的未知非线性,提出了一种鲁棒自适应模糊控制器,该控制器保证了闭环系统一致最终有界。上述方法的共同缺点是没有考虑到系统参数摄动和环境干扰力的影响^[10-12],且在研究中忽略了舵机伺服系统的动态特性^[10-13]。卜仁祥等^[14]结合增量反馈技术,对系统输出进行动态非线性滑模分解迭代设计,提出了一种基于分解迭代非线性滑模增量反馈控制器。针对上述研究存在的问题和欠驱动无人艇直线航迹非线性控制系统的特点,本研究将反步技术、动态滑模控制方法和自适应技术相结合,提出了一种反步自适应动态滑模反馈控制器。该控制器的设计保证了直线航迹控制系统的全局渐近稳定性,控制方法的优点在于控制器对建模误差、环境干扰力等非匹配不确定性的影响不敏感,具有良好的自适应能力和鲁棒性,且在设计上考虑了舵机特性。理论分析和仿真对比试验均验证了其控制方法的有效性。

1 数学模型

在自动舵的设计中,船舶航向操纵系统一般采用一阶非线性艏摆响应方程,坐标系定义见文献[15]。同时考虑存在建模误差和环境干扰力等非匹配不确定性的影响,且考虑到舵机伺服系统的响

① 863 计划(2008AA092301)和中央高校基本科研业务费专项资金(HEUCF1321003,13CX02049A)资助项目。

② 男,1985 年生,博士;研究方向:无人水面艇的智能控制与运动仿真,欠驱动控制等;联系人,E-mail: liaoyulei@hrbeu.edu.cn (收稿日期:2012-08-20)

应特性,则无人艇直线航迹控制的数学模型可描述为

$$\begin{cases} \dot{y} = U \sin \psi \\ \dot{\psi} = r \\ \dot{r} = -\frac{1}{T}r - \frac{\alpha}{T}r^3 + \frac{K}{T}\delta + F \\ \dot{\delta} = -\frac{1}{T_E}\delta + \frac{K_E}{T_E}\delta_E \\ \xi_1 = y \\ \xi_2 = \psi \end{cases} \quad (1)$$

其中 y 为船舶的横漂位移, ψ 为艏向角(顺时针为正), ξ_1, ξ_2 为系统输出。 U 为航速, r 为艏摇角速度; T 为时间常数, K 为回转性指数, α 为模型非线性项系数。 δ 为实际舵角(左舵为正), δ_E 为控制舵角。 F 为建模误差 Δ 和未知环境干扰力 ω 不确定性影响的总和,即 $F = \Delta(\psi, \dot{\psi}) + \omega$, 假设不确定性有界 $|F| \leq \bar{F}$, 且 F 为慢变过程,即 $\dot{F} = 0$ 。 T_E 为舵机时间常数, K_E 为舵机控制增益。

该无人艇配备单泵喷水推进器,可通过改变喷嘴转角来进行艏向控制,没有装配独立的横向推进器,即该无人艇具有欠驱动性。2010年5月,某型无人艇在山东蓬莱海域进行了直航、回转和Z型机动等操纵性试验,图1所示为试验中的无人艇。



图1 试验中的无人艇

现在需要针对直线航迹控制系统(式(1)),设计一种自适应反馈控制律 δ_E , 以保证系统(式(1))是全局渐进稳定的。

2 控制器设计

2.1 模型变换

为了便于后续控制器的设计,首先对系统(式(1))的状态做如下的全局微分同胚坐标变换^[16]:

$$\begin{cases} x_1 = \psi + \arcsin\left(\frac{ky}{\sqrt{1+(ky)^2}}\right) \\ x_2 = r \\ x_3 = \dot{r} \end{cases} \quad (2)$$

并令 $u = \delta_E$, $a_1 = -1/T$, $a_2 = -\alpha/T$, $a_3 = K/T$, $a_4 = -1/T_E$, $b = K_E/T_E$ 。式中 k 为正常数。

将式(2)代入式(1),得到一个新的非线性系统

$$\begin{cases} \dot{y} = U \sin\left(x_1 - \arcsin\left(\frac{ky}{\sqrt{1+(ky)^2}}\right)\right) \\ \dot{x}_1 = U f_1 + x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = f_2 + b_1 u + F_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f_1 = \frac{k \sin \psi}{1 + (ky)^2}$, $F_1 = -a_4 F$, $b_1 = a_3 b$, $f_2 = (3a_2 x_2^2 x_3 - a_1 a_4 x_2 - a_2 a_4 x_2^3) + (a_1 + a_4) x_3$ 。

如果控制律能保证 x_1 全局收敛到零,则可保证原系统(式(1))中 y, ψ 皆全局收敛到零^[17],因此可将欠驱动系统(式(1))(单输入-双输出系统)的控制问题,简化为以下全驱动系统(单输入-单输出系统)的控制问题:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = U f_1 + x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = f_2 + b_1 u + F_1 \end{cases} \quad (4)$$

显然,直线航迹跟踪控制问题转变为设计控制律 u 以保证系统(式(4))全局稳定。

系统(式(4))具有下三角结构特性,下面利用反步(backstepping)设计方法并基于动态滑模控制理论进行控制器设计。滑模变结构控制理论在移动机器人、电机等非线性机械系统中得到了广泛应用^[18-20],然而该方法却存在着“抖振”的缺点。而作为一种消除“抖振”的有效方法,动态滑模控制被广泛使用在移动机器人、并联机器人、机械臂等非线性系统中^[21-23]。

2.2 反步自适应滑模控制器设计

首先,考虑系统(式(4))的子系统 $\dot{x}_1 = U f_1 + x_2$, 将 x_2 看作该子系统的控制输入进行反步设计。

定义 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2} x_1^2 \quad (5)$$

将 V_1 对时间求导,可得

$$\dot{V}_1 = x_1 \dot{x}_1 = x_1 (U f_1 + x_2) \quad (6)$$

选取虚拟控制输入 x_2 为

$$x_2 = \alpha_1 = -U f_1 - k_1 x_1 \quad (7)$$

其中 k_1 为正常数。

将式(7)代入式(6),可得

$$\dot{V}_1 = x_1 \dot{x}_1 = -k_1 x_1^2 \leq 0 \quad (8)$$

显然,控制律(式(7))可保证子系统 $\dot{x}_1 = Uf_1 + x_2$ 的全局渐进稳定性。然而 x_2 不是实际的控制输入,定义误差变量

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (9)$$

把式(9)代入式(6),重新整理可得

$$\dot{V}_1 = x_1 \dot{x}_1 = -k_1 x_1^2 + x_1 z_2 \quad (10)$$

系统(式(4))的前两个方程可重写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_1 x_1 + z_2 \\ \dot{z}_2 = U\dot{f}_1 + k_1 Uf_1 + k_1 x_2 + x_3 \end{cases} \quad (11)$$

定义 Lyapunov 函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (12)$$

将 V_2 对时间求导,可得

$$\dot{V}_2 = -k_1 x_1^2 + x_1 z_2 + z_2 (U\dot{f}_1 + k_1 Uf_1 + k_1 x_2 + x_3) \quad (13)$$

如选择控制输入 x_3 为

$$x_3 = \alpha_2 = - (U\dot{f}_1 + k_1 Uf_1 + k_1 x_2 + x_1 + k_2 z_2) \quad (14)$$

其中 k_2 为正常数,将式(14)代入式(13),可得

$$\dot{V}_2 = -k_1 x_1^2 - k_2 z_2^2 \leq 0 \quad (15)$$

控制律(式(14))可保证系统(式(11))是全局渐进稳定的。然而 x_3 也不是实际的控制输入,定义误差变量为

$$z_3 = x_3 - \alpha_2 \quad (16)$$

把式(16)代入式(13),重新整理可得

$$\dot{f}_2 = -k_1 x_1^2 - k_2 z_2^2 + z_2 z_3 \quad (17)$$

系统(式(4))可重新整理为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_1 x_1 + z_2 \\ \dot{z}_2 = U\dot{f}_1 + k_1 Uf_1 + k_1 x_2 + x_3 \\ \dot{z}_3 = f_2 + U\ddot{f}_1 + k_1 U\dot{f}_1 + k_1 \dot{x}_2 + \dot{x}_1 + k_2 \dot{z}_2 \\ \quad + b_1 u + F_1 = f_3 + b_1 u + F_1 \end{cases} \quad (18)$$

其中: $f_3 = f_2 + U\ddot{f}_1 + k_1 U\dot{f}_1 + k_1 \dot{x}_2 + \dot{x}_1 + k_2 \dot{z}_2$ 。

定义 Lyapunov 函数为

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2 + \frac{1}{2} (F_1 - \hat{F}_1)^2 \quad (19)$$

其中: $\hat{F}_1$ 为未知不确定项 F_1 的估计值。

切换函数设计为

$$S = c_1 z_3 + f_3 + b_1 u + \hat{F}_1 + z_2 \quad (20)$$

其中 c_1 为正常数。

由系统(式(18))的第 3 式和式(20)可知

$$\dot{z}_3 = S - z_2 - c_1 z_3 + (F_1 - \hat{F}_1) \quad (21)$$

将 V_3 对时间求导,并将式(21)代入,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + z_3 \dot{z}_3 - \dot{\hat{F}}_1 (F_1 - \hat{F}_1) \\ &= -k_1 x_1^2 - k_2 z_2^2 - c_1 z_3^2 + z_3 S \\ &\quad + (z_3 - \dot{\hat{F}}_1) (F_1 - \hat{F}_1) \end{aligned} \quad (22)$$

令辅助控制项为 $v = b_1 \dot{u}$, 将式(20)对时间求导,可得

$$\dot{S} = c_1 \dot{z}_3 + \dot{f}_3 + v + \dot{\hat{F}}_1 + \dot{z}_2 \quad (23)$$

将式(18)的第 3 式代入式(23),可得

$$\dot{S} = c_1 (f_3 + b_1 u + F_1) + \dot{f}_3 + v + \dot{\hat{F}}_1 + \dot{z}_2 \quad (24)$$

定义 Lyapunov 预选函数为

$$V_4 = V_3 + \frac{1}{2} S^2 \quad (25)$$

将 V_4 对时间求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 &= -k_1 x_1^2 - k_2 z_2^2 - c_1 z_3^2 + z_3 S + (z_3 - \dot{\hat{F}}_1) (F_1 - \hat{F}_1) \\ &\quad + S \cdot [c_1 (f_3 + b_1 u + F_1) + \dot{f}_3 + v + \dot{\hat{F}}_1 + \dot{z}_2] \end{aligned} \quad (26)$$

设计动态滑模控制律 v 为

$$\begin{aligned} v &= -[c_1 (f_3 + b_1 u + \hat{F}_1) + \dot{f}_3 + z_3 + \dot{\hat{F}}_1 + \dot{z}_2] \\ &\quad - [w_s S + k_s \operatorname{sgn}(S)] \end{aligned} \quad (27)$$

其中: w_s, k_s 均为正常数。将式(27)代入式(26),整理可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 &= -k_1 x_1^2 - k_2 z_2^2 - c_1 z_3^2 - w_s S^2 - k_s |S| \\ &\quad + (z_3 + c_1 S - \dot{\hat{F}}_1) (F_1 - \hat{F}_1) \end{aligned} \quad (28)$$

如设计 F_1 的自适应律为

$$\dot{\hat{F}}_1 = z_3 + c_1 S \quad (29)$$

将式(29)代入式(28)则有

$$\dot{V}_4 = -k_1 x_1^2 - k_2 z_2^2 - c_1 z_3^2 - w_s S^2 - k_s |S| \leq 0 \quad (30)$$

只要选取 k_1, k_2, c_1, w_s, k_s 为正常数,则必有 $\dot{V}_4 \leq 0$ 成立。利用 Lyapunov 稳定性理论^[24],可证明在动态滑模控制律(式(27))和自适应律(式(29))的

作用下,系统(式(18))是全局渐进稳定的。从而保证系统(式(4))具有 Lyapunov 意义下的全局渐近稳定性。

该无人艇是滑行艇,其航态复杂多变,因此其艏向操纵模型参数难以精确获得,且具有较大不确定性。同时艇还受到未知复杂环境干扰力的影响。显然,不确定性 F 的上界 $\bar{F}$ 难以确定。从设计中可知,文中采用的自适应动态滑模控制方法不需要知道 $\bar{F}$,从而避免了估计 F 上界带来的“抖振”等问题。

2.3 反步控制器设计

为了与反步自适应动态滑模控制器的控制效果进行对比,下面利用反步法设计无人艇直线航迹跟踪控制器。本节设计中假设不确定性项 $F = 0$,即 $F_1 = 0$ 。

定义 Lyapunov 预选函数为

$$V_5 = V_2 + \frac{1}{2}z_3^2 \quad (31)$$

将 V_5 对时间求导,将式(18)的第3式代入,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_5 &= \dot{V}_2 + z_3\dot{z}_3 \\ &= -k_1x_1^2 - k_2z_2^2 + z_2z_3 + z_3(f_3 + b_1u) \end{aligned} \quad (32)$$

为使 $\dot{V}_5 \leq 0$, 设计反馈控制律为

$$u = -b_1^{-1}[f_3 + z_2 + k_3z_3] \quad (33)$$

其中: k_3 为正常数。将控制律(式(33))代入式(32)则有

$$\dot{V}_5 = -k_1x_1^2 - k_2z_2^2 - k_3z_3^2 \leq 0 \quad (34)$$

显然,在控制律(式(33))的作用下,系统(式(18))的状态变量 x_1, z_2, z_3 将渐近收敛到零点,即系统(式(4))是全局渐近稳定的。

下面对闭环控制系统进行稳定性分析。

2.4 系统稳定性分析

由上述反步法设计过程和 Lyapunov 稳定性理论^[24]可知,通过逐步迭代设计 Lyapunov 函数使系统指数渐近稳定,最终实现了对原系统的全局渐近稳定。同时,根据滑模控制理论,可证明渐近稳定的系统能在有限时间内到达滑模表面(满足可达条件),从而保证了整个系统的稳定性。下面给出文中的两个重要结论。

定理 1:考虑存在不确定性影响下的控制系统(式(4)),在反馈控制律(式(27))和自适应律(式(29))的作用下,系统(式(3))全局渐近稳定。即实现了对欠驱动无人艇直线航迹控制系统(式(1))的全局渐近稳定。

证明:由 2.2 节的设计过程得证。

定理 2:在反馈控制律(式(33))的作用下,系统(式(4))全局渐近稳定,即保证了欠驱动无人艇直线航迹控制系统(式(1))的全局渐近稳定性。

证明:由 2.2 节和 2.3 节的设计过程得证。

3 仿真结果和分析

依据海试操纵性试验结果,无人艇在航速 $U = 3\text{m/s}$ 时的操纵性参数为 $K = -2.364$, $T = 5.489$, $\alpha = 0.94$ 。系统初始状态取为 $y_0 = 200\text{m}$, $\psi_0 = -75^\circ$, $r_0 = 0$ 。考虑喷水推进器喷嘴转角(舵角)的机械饱和限制条件 $-30^\circ \leq \delta \leq +30^\circ$, 并设定与角加速度同量级的不确定性项输入:建模误差 $\Delta = 2\sin(10\pi t) (\circ \cdot s^{-2})$, 外界干扰力 $\omega = \pm 2 (\circ \cdot s^{-2})$ 的正态白噪声。

仿真试验中,反步自适应动态滑模控制器称为控制律 1,反步控制器称为控制律 2。控制律 1 的参数选为: $k = 0.1$, $c_1 = 0.8$, $k_1 = k_2 = 1$, $w_s = k_s = 0.1$; 控制律 2 的参数选为: $k = 0.1$, $k_1 = 1$, $k_3 = 1.8$ 。航速 $U = 3\text{m/s}$ 下的仿真结果如图 2 - 图 7 所示。

从图 2 - 图 7 可以看出,在不确定性的影响下,两种控制律均使航迹快速地收敛到期望值,航迹偏差几乎是匀速衰减,横向位移和航向输出光滑,没有振荡和超调,避免了频繁操舵影响船速。同控制律 2 相比,控制律 1 的控制舵角输出较平缓、振荡小,

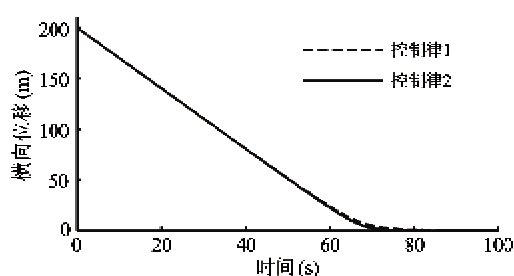


图2 横向位移 y 响应曲线

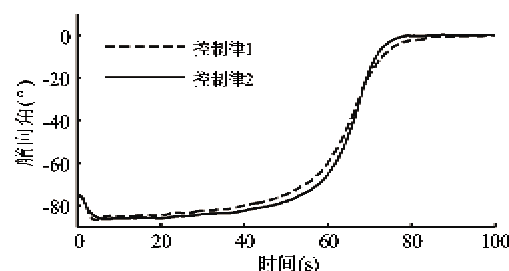


图3 艏向角 ψ 响应曲线

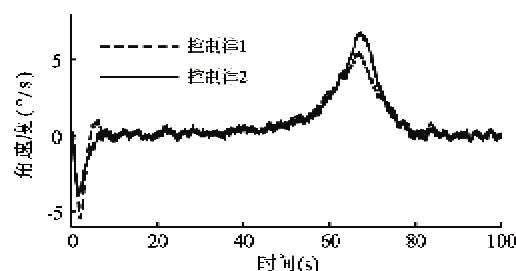


图 4 角速度 r 响应曲线

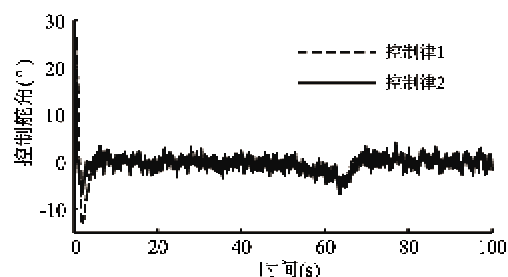


图 5 控制舵角 δ_c 响应曲线

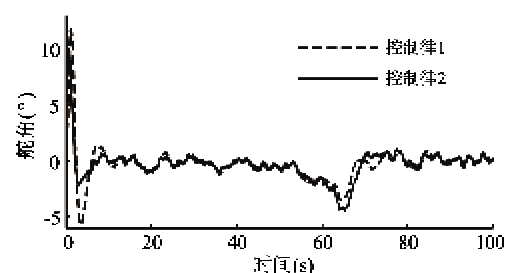


图 6 实际舵角 δ 响应曲线

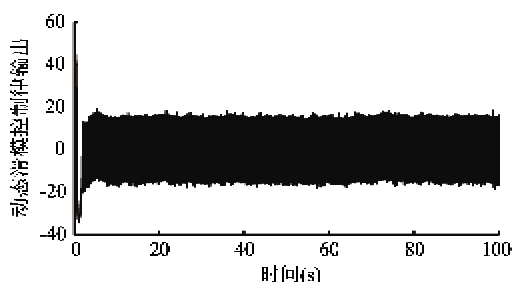


图 7 动态滑模控制律 v 响应曲线

且没有满舵的情况,实际的舵角输出更光滑,这说明反步自适应动态滑模控制器具有更好的自适应性能和抑制干扰的能力。

从图 5 可以看出,控制舵角输出没有出现“抖振”现象,即本文的控制方法有效地削弱了滑模控制的“抖振”问题。

因无人艇操纵性模型参数具有时变性,且难以精确获得,为了验证控制系统的自适应性和鲁棒性能,下面给出航速发生改变时的仿真结果。艇在航速 $U = 8\text{m/s}$ 时,实测的操纵性参数为: $K = -2.92$, $T = 6.73$, $\alpha = 1.45$ 。在 $U = 8\text{m/s}$ 下进行仿真试

验,但控制器中采用 $U = 3\text{m/s}$ 下的名义操纵性参数即 $K_m = -2.364$, $T_m = 5.489$, $\alpha_m = 0.94$, 其它条件同上,仿真结果如图 8 - 图 12 所示。

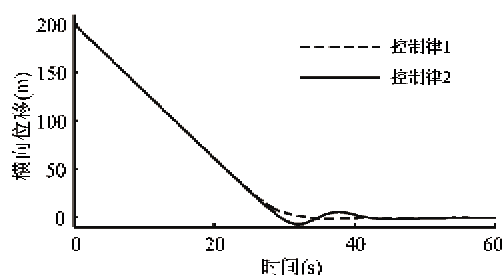


图 8 横向位移 y 响应曲线

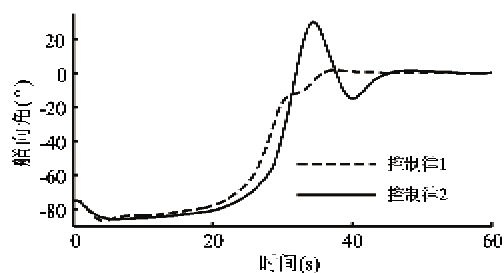


图 9 艏向角 ψ 响应曲线

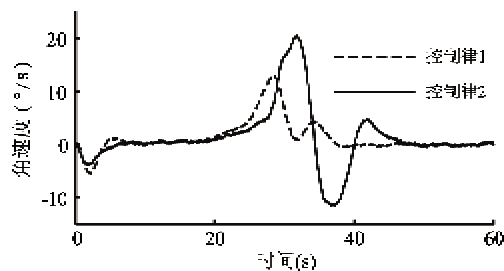


图 10 角速度 r 响应曲线

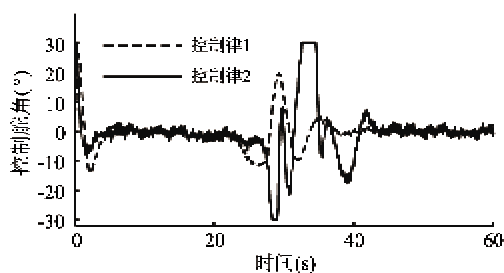


图 11 控制舵角 δ_c 响应曲线

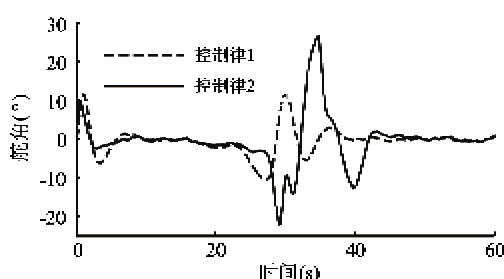


图 12 实际舵角 δ 响应曲线

从图 8 - 图 12 可以看出,虽然实际操纵性参数发生了较大变化,但两种控制律均能驱使无人艇跟踪上期望航线。然而同控制律 2 相比,控制律 1 的横向位移和艏向角输出没有出现超调和振荡;且控制律 1 的控制舵角输出较光顺,振荡较小,没有出现满舵现象,可见控制律 1 依然保持了良好的控制性能。由于航速增加,提高了喷水推进型无人艇的转向能力,因此显著缩短了航迹的稳定时间(缩短为 43s)。仿真对比结果说明,反步自适应动态滑模控制器对系统参数变化和外界干扰力的影响不敏感,具有良好的自适应能力和鲁棒性能。

4 结 论

本文研究了欠驱动无人艇直线航迹非线性系统的控制问题,并考虑到建模误差、未知外界干扰力等非匹配不确定性和舵机伺服系统的影响,利用全局微分同胚坐标变换法,将原系统转变为一个具有下三角结构特性的非线性系统。基于反步设计法和一阶动态滑模控制方法,并结合自适应技术,设计了一种反步自适应动态滑模控制器。理论分析证明,在该控制器作用下,无人艇直线航迹控制系统具有全局渐近稳定性。仿真对比试验结果表明,本文给出的控制器具有很好的控制性能、自适应能力和强鲁棒性。理论分析和仿真试验均验证了该控制方法的有效性。本文设计方法可推广到水下机器人、海洋平台、潜水器等海洋运载系统的直线航迹控制中。限于试验条件,本文方法未进行外场试验验证,同时对外界干扰等不确定性进行了简化处理。考虑复杂海洋环境的运动控制问题,将是未来的研究方向之一。

参考文献

- [1] Aguiar A P, Hespanha J P. Trajectory-tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles with parametric modeling uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(8): 1362-1379.
- [2] Caccia M, Bibuli M, Bono R, et al. Basic navigation, guidance and control of an unmanned surface vehicle. *Autonomous Robots*, 2008, 25: 349-365
- [3] Caccia M, Bibuli M, Bono R. Unmanned marine vehicles at CNR-ISSIA. In: *Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, 2008. 3070-3075
- [4] Bibuli M, Bruzzone G, Caccia M. Path-following algorithms and experiments for an unmanned surface vehicle. *Journal of Field Robotics*, 2009, 26(8): 669-688
- [5] Liao Y L, Wan L, Zhuang J Y. Full state-feedback stabilization of an underactuated unmanned surface vehicle. In: *Proceeding of the 2nd IEEE International Conference on Advanced Computer Control*, Shenyang, China, 2010. 70-74
- [6] 廖煜雷, 万磊, 庄佳园. 喷水推进型无人水面艇的嵌入式运动控制系统研究. *高技术通讯*, 2012, 22(4): 416-422.
- [7] Fossen T I. Recent Developments in Ship Control Systems Design. In: *World Superyacht Review*. London: Sterling Publications Limited, 2000. 20-31
- [8] Holzhuter T. LQG approach for the high-precision track control of ships. *IEE Proceedings Control Theory Applications*, 1997, 144(2): 121-127
- [9] Holzhuter T, Schultze R. Operating experience with a high precision track controller for commercial ships. *Control Engineering Practice*, 1996, 4(3): 343-350
- [10] 李铁山, 杨盐生, 郑云峰. 不完全驱动船舶航迹控制输入输出线性化设计. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(7): 945-948
- [11] 周岗, 姚琼荃, 陈永冰等. 基于输入输出线性化的船舶全局直线航迹控制. *控制理论与应用*, 2007, 24(1): 117-121
- [12] 周岗, 姚琼荃, 陈永冰等. 不完全驱动船舶直线航迹控制稳定性研究. *自动化学报*, 2007, 33(4): 378-382
- [13] 李铁山, 杨盐生, 洪碧光等. 船舶航迹控制鲁棒自适应模糊设计. *控制理论与应用*, 2007, 24(3): 445-448
- [14] 卜仁祥, 刘正江, 李铁山. 船舶航迹迭代非线性滑模增量反馈控制算法. *交通运输工程学报*, 2006, 6(4): 75-79
- [15] 范尚雍. 船舶操纵性. 北京: 国防工业出版社, 2002. 30-39
- [16] Sussmann H J. A general theorem on local controllability. *SIAM Journal of Control and Optimization*, 1987, 25(11): 158-194
- [17] 李铁山, 杨盐生, 洪碧光. 船舶直线航迹控制的鲁棒自适应非线性设计. *大连海事大学学报*, 2004, 30(4): 1-5
- [18] 叶涛, 侯增广, 谭民等. 移动机器人的滑模轨迹跟踪控制. *高技术通讯*, 2004, 14(1): 71-74
- [19] 刘大亮, 孙汉旭, 贾庆轩. 基于曲率控制的球形移动机器人路径跟踪. *高技术通讯*, 2008, 18(11): 1161-1167
- [20] 皇甫宜耿, S. Laghrouche, 刘卫国等. 一种高阶滑模控制的永磁同步电机磁通和电阻辨识. *西北工业大学学报*, 2010, 28(5): 684-688

- [21] 刘延斌, 韩秀英, 许晖. 3-RRRT 并联机器人解耦的反演自适应动态滑模控制. 系统仿真学报, 2008, 20(14): 3633-3636
- [22] 徐玉华, 张崇巍, 鲍伟等. 基于动态滑模控制的移动机器人路径跟踪. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(1): 28-31
- [23] 吴玉香, 胡跃明. 二阶动态滑模控制在移动机械臂输出跟踪中的应用. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 411-415
- [24] Khalil H K. Nonlinear Systems (3rd ed.). Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2002

Backstepping adaptive dynamical sliding mode control of the straight-line trajectory tracking of underactuated unmanned surface vessels

Liao Yulei, Chang Wentian, Liu Tao

(National Key Laboratory of Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle,
Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract

A method for backstepping adaptive dynamical sliding mode control was studied for underactuated water jet-propulsion unmanned surface vessels' straight-line trajectory system consisting of the nonlinear ship response model and the rudder actuator dynamics under the circumstances of taking account of the modeling parameters' uncertainty and external disturbances. Firstly, the original system was transformed into a nonlinear system based on a global diffeomorphism change of coordinate. And then, a backstepping adaptive dynamical sliding mode controller was proposed based on the backstepping design method and the theory of dynamical sliding mode control. Finally, it was proved by means of the Lyapunov stability theory that under the proposed controller the straight-line trajectory control system was globally, asymptotically stable. The simulation comparison results verified that the proposed controller was robust and adaptive to the model perturbation and external disturbances.

Key words: underactuated, unmanned surface vessel (USV), trajectory tracking, dynamical sliding mode control, backstepping