

风浪流干扰及参数不确定欠驱动船舶航迹跟踪的滑模鲁棒控制

朱齐丹, 于瑞亭, 夏桂华, 刘志林

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对欠驱动船舶的模型参数不确定和外界风浪流干扰问题, 为实现水平面的航迹跟踪控制, 提出了一种基于上下界的滑模控制方法. 首先利用反步法将控制器的设计分解为运动学回路和动力学回路. 其次, 在运动学回路中为实现位置跟踪误差的收敛, 根据期望航迹与当前位置信息, 设计船舶的纵向与侧移参考速度, 并视为镇定位置误差的虚拟控制律; 在动力学回路中, 将虚拟控制律作为新的跟踪目标, 利用滑模方法设计实际控制律实现对参考速度的跟踪控制, 最终实现了欠驱动船舶的跟踪控制. 最后对有干扰下的欠驱动船模分别进行了仿真实验, 仿真结果证明了控制律的有效性.

关键词: 欠驱动船舶; 参数不确定; 外界干扰; 跟踪控制

中图分类号: U664 **文献标识码:** A

Sliding-mode robust tracking control for underactuated surface vessels with parameter uncertainties and external disturbances

ZHU Qi-dan, YU Rui-ting, XIA Gui-hua, LIU Zhi-lin

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: This paper studies the robust tracking control problem of an underactuated surface vessel with parameter uncertainties and external disturbances, and a sliding-mode methodology is proposed. The controller is divided by backstepping method into the kinetic loop and the dynamic loop. In the kinetic loop, the desired position and the current position are used to determine the reference surge and sway velocities which are employed as the virtual control law in stabilizing the position errors. In the dynamic loop, the virtual control law is considered the new tracking target, and the real control law is designed by the sliding-mode method to realize the tracking control of the reference velocities. Eventually, the tracking control for the underactuated surface vessel is achieved. Simulations of the tracking control for the underactuated surface vessel with disturbances or without disturbances are performed. Results validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: underactuated surface vessel; parameter uncertainties; external disturbances; tracking control

1 引言(Introduction)

近年来, 欠驱动系统的运动控制问题一直是倍受关注的研究热点. 目前海上航行的大多数船舶(仅装备螺旋桨主推进器和舵装置用以推进和操纵)是典型的欠驱动系统. 区别于一般非完整系统具有的非完整速度约束, 欠驱动船舶系统属于带有非完整加速度约束的一类非线性系统, 因此, 针对一般非完整系统的研究结论不能直接应用于欠驱动船舶系统上来, 使得欠驱动船舶的航迹跟踪控制器设计较为困难, 尤其在船舶模型参数辨识不准确和存在外界干扰条件下, 要实现欠驱动船舶的航迹跟踪控制更富有挑战性和实际意义.

欠驱动船舶航迹跟踪控制目前存在的主要技术难题有持续激励(persistent excitation, PE)问题, 主要为航向角速度持续激励, 如文献[1-4]. 以PE为假设条件所设计的控制器不能用以实现欠驱动船舶的直

线航迹跟踪控制. 而且文献[1-4]均是基于精确数学模型设计的控制器, 对于模型的参数摄动没有鲁棒性. 此外, 文献[1-4]均是基于跟踪误差动态方程设计控制器, 这一假设条件使得船舶只能跟踪虚拟船舶运动产生的航迹, 并且要求虚拟船舶的水动力阻尼参数与所研究船模必须精确一致才行. 设计这样一条严格限定条件下的航迹本身就是困难的, 而文献[5-6]均采用自适应模糊控制方法考虑了直线跟踪问题, 使得设计的控制器又不适合曲线航迹跟踪的情况. 因此如何设计适用于直线和曲线的跟踪控制器成为了新的控制难题.

在不依赖于精确数学模型条件下, 实现欠驱动船舶的高精度航迹跟踪是极为有意义的. 由于所设计的控制器对于模型参数具有鲁棒性, 提高了工程实现的可行性. 文献[7-8]基于LPA(Lipschitz projection algorithm)算法^[9]提出了对模型不确定参数和外

界干扰均具有鲁棒性的自适应控制律, 不确定参数在控制器执行过程中通过动态的在线估计律予以获取, 但由于参数估计律多, 在线计算量大, 并且算法过于复杂不利于工程实现. 文献[10]为实现船舶的航迹跟踪控制, 设计了神经网络稳定自适应控制器, 然而外界干扰仅限为常值干扰(或慢时变)情况, 即假设干扰对时间的导数为零.

本文研究了存在外界环境干扰和模型参数辨识不准确情况下欠驱动船舶的航迹跟踪控制问题, 区别于文献[4]和文献[10], 对外界干扰不要求为慢时变的, 而放宽为有界干扰即可.

2 欠驱动船舶的运动模型(Model of the underactuated surface vessel)

考虑如下欠驱动水面船舶运动系统:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} m_{11}\dot{u} - m_{22}vr + d_{11}u = \tau_u + \tau_{wu}, \\ m_{22}\dot{v} + m_{11}ur + d_{22}v = \tau_v + \tau_{wv}, \\ m_{33}\dot{r} + (m_{22} - m_{11})uv + d_{33}r = \tau_r + \tau_{wr}, \end{cases} \quad (2)$$

其中: x, y 和 ψ 分别为大地坐标系中船舶的位置和航向角, u, v, r 分别为船舶在船体坐标系中的纵向速度, 横荡速度及艏摇角速度. $d_{11}, d_{22}, d_{33}, m_{11}, m_{22}, m_{33}$ 分别为船舶系统的水动力阻尼系数和包括附加质量在内的惯性参数. 控制输入 τ_u 和 τ_r 分别为船舶的纵向推力和转向力矩. 由于无侧向推进装置, 在横向上没有可用的控制输入, 因此所研究的船舶航迹跟踪问题为欠驱动控制问题. τ_{wu}, τ_{wv} 和 τ_{wr} 为风浪流产生的外界环境干扰力矩, 满足如下假设条件:

$$\begin{aligned} |\tau_{wu}| &\leq \tau_{wu \max} < \infty, \\ |\tau_{wv}| &\leq \tau_{wv \max} < \infty, \quad |\tau_{wr}| \leq \tau_{wr \max} < \infty. \end{aligned}$$

3 滑模控制器设计(Sliding mode control design)

设计控制器之前, 首先给出如下定理:

定理 1 微分方程

$$\dot{x} = -\frac{ax}{\sqrt{x^2 + c}}, \quad (3)$$

其中: $a > 0, c > 0$, 该微分方程的解是渐近稳定的, 即满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$.

证 定义连续函数

$$V = \frac{1}{2}x^2,$$

V 沿系统(3)的导数为

$$\dot{V} = -\frac{ax^2}{\sqrt{x^2 + c}} \leq 0,$$

是非递增的, 因此 $V(t) \leq V(0)$ 的二阶导数为

$$\begin{aligned} \ddot{V} &= -\frac{2ax\dot{x}\sqrt{x^2 + c} - ax^2 \frac{x\dot{x}}{\sqrt{x^2 + c}}}{x^2 + c} = \\ &= \frac{ax}{\sqrt{x^2 + c}} \left(\frac{2ax}{\sqrt{x^2 + c}} - \frac{ax^2x}{(x^2 + c)\sqrt{x^2 + c}} \right) \leq \\ &= a(2a + a). \end{aligned}$$

接下来的控制器设计中, 利用反步方法将设计过程分为两个步骤: 第1步为运动学回路虚拟控制器设计, 将前向速度 u 和侧移速度 v 视为虚拟控制输入, 分别记作 α_u 和 α_v ; 第2步为动力学回路控制器设计, 目标为设计滑模控制器 τ_u 和 τ_r 使船舶的实际前向速度和侧移速度分别能够跟踪虚拟控制输入 α_u 和 α_v .

3.1 运动学回路控制器设计(Kinematic control design)

定义位置跟踪误差变量

$$x_e = x - x_d, \quad y_e = y - y_d, \quad (4)$$

其中 $(x_d(t), y_d(t))$ 为期望航迹, 且为连续可导函数.

由式(1)可得

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

为实现船舶位置跟踪误差的收敛, 设计如下虚拟控制律:

$$\begin{bmatrix} \alpha_u \\ \alpha_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d - \frac{kx_e}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2 + C}} \\ \dot{y}_d - \frac{ky_e}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2 + C}} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中: $k > 0, C > 0$. 则

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-kx_e}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2 + C}} \\ \frac{-ky_e}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2 + C}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u - \alpha_u \\ v - \alpha_v \end{bmatrix}. \quad (7)$$

当 $u - \alpha_u = 0, v - \alpha_v = 0$ 时, 系统(7)变为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-kx_e}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2 + C}} \\ \frac{-ky_e}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2 + C}} \end{bmatrix}.$$

构造Lyapunov函数

$$V = \frac{1}{2}x_e^2 + \frac{1}{2}y_e^2,$$

则 V 对时间的导数为

$$\dot{V} = x_e\dot{x}_e + y_e\dot{y}_e = \frac{-k(x_e^2 + y_e^2)}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2 + C}} = \frac{-kV}{\sqrt{V + C}},$$

由定理1可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} V = 0$, 因此

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_e = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} y_e = 0.$$

记 $\varpi = \sqrt{x_e^2 + y_e^2 + C}$, 式(6)对时间导数为

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha}_u \\ \dot{\alpha}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r \sin \psi & r \cos \psi \\ -r \cos \psi & -r \sin \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d + k\varpi^{-1}x_e \\ \dot{y}_d + k\varpi^{-1}y_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{x}_d + k(\varpi^{-1} - \varpi^{-3}x_e^2)\dot{x}_e - k\varpi^{-3}x_e y_e \dot{y}_e \\ \ddot{y}_d + k(\varpi^{-1} - \varpi^{-3}y_e^2)\dot{y}_e - k\varpi^{-3}x_e y_e \dot{x}_e \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r\alpha_v \\ -r\alpha_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{x}_d + k(\varpi^{-1} - \varpi^{-3}x_e^2)\dot{x}_e - k\varpi^{-3}x_e y_e \dot{y}_e \\ \dot{y}_d + k(\varpi^{-1} - \varpi^{-3}y_e^2)\dot{y}_e - k\varpi^{-3}x_e y_e \dot{x}_e \end{bmatrix}.$$

为方便起见, 后文控制器设计中 $\dot{\alpha}_u$ 和 $\dot{\alpha}_v$ 将不再展开.

注 1 之所以应用控制律(6), 而不用变换

$$\begin{bmatrix} \alpha_u \\ \alpha_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d + kx_e \\ \dot{y}_d + ky_e \end{bmatrix}$$

的原因在于防止在 $|x_e|$ 和 $|y_e|$ 较大的情况下, 虚拟控制律 α_u 和 α_v 超出了船舶所能达到的最大速度, 出现无法设计控制输入 τ_u 和 τ_r 使船舶的纵向速度和侧移速度跟踪 α_u 和 α_v 的情况.

3.2 动力学回路控制器设计(Dynamic control design)

3.2.1 纵向推力滑模控制律设计(Sliding mode surge control law design)

定义纵向速度跟踪误差变量:

$$u_e = u - \alpha_u. \tag{8}$$

设计积分型一阶指数稳定滑模面:

$$S_1 = \lambda_1 \int_0^t u_e(\tau) d\tau + u_e, \lambda_1 > 0. \tag{9}$$

对滑模面求导得

$$\dot{S}_1 = \lambda_1 u_e + \dot{u} - \dot{\alpha}_u = \frac{1}{m_{11}}(\lambda_1 m_{11} u_e + \tau_1 + \tau_{wu} + m_{22} vr - d_{11} u - m_{11} \dot{\alpha}_u). \tag{10}$$

令 $\dot{S}_1 = 0$, 可得等效控制律为

$$\tau_{ueq} = -\lambda_1 \hat{m}_{11} u_e - \hat{m}_{22} vr + \hat{d}_{11} u + \hat{m}_{11} \dot{\alpha}_u, \tag{11}$$

其中“ $\hat{\cdot}$ ”表示不确定参数的估计值, 文中假设不确定参数的估计误差存在上界, 即

$$|m_{ii} - \hat{m}_{ii}| \leq M_{ii}, |d_{ii} - \hat{d}_{ii}| \leq D_{ii}, i = 1, 2, 3.$$

选取如下切换控制律:

$$\tau_{uvss}(t) = -K_1 \text{sgn } S_1,$$

其中 K_1 为待设计参数, 为船舶状态的函数.

针对带有不确定性和外加干扰的欠驱动船舶系统, 设计纵向推力滑模控制律为

$$\tau_u = \tau_{ueq}(t) + \tau_{uvss}(t) = -\lambda_1 \hat{m}_{11} u_e - \hat{m}_{22} vr + \hat{d}_{11} u + \hat{m}_{11} \dot{\alpha}_u - K_1 \text{sgn } S_1.$$

选取如下Lyapunov函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} m_{11} S_1^2,$$

则 V_1 对时间 t 的导数为

$$\dot{V}_1 = S_1(\lambda_1 u_e(m_{11} - \hat{m}_{11}) + (m_{22} - \hat{m}_{22})vr + (\hat{d}_{11} - d_{11})u + (\hat{m}_{11} - m_{11})\dot{\alpha}_u + \tau_{wu}) - K_1 |S_1|.$$

若设计参数 K_1 为

$$K_1 = \lambda_1 M_{11} |u_e| + M_{22} |vr| + D_{11} |u| + M_{11} |\dot{\alpha}_u| + \eta_1 + \tau_{wu \max},$$

其中 $\eta_1 > 0$, 则

$$\dot{V}_1 \leq -\eta_1 |S_1|.$$

3.2.2 转向力矩滑模控制律设计(Sliding mode lateral motion control law)

为使 $\dot{S}_2(t)$ 中出现控制输入 τ_r , 设计如下滑模面:

$$S_2(t) = \dot{v}_e(t) + \lambda_2 v_e(t). \tag{12}$$

对滑模面(12)求导得

$$\dot{S}_2(t) = \ddot{v} - \ddot{\alpha}_v + \lambda_2(\dot{v} - \dot{\alpha}_v),$$

其中:

$$\ddot{\alpha}_v = -\dot{r}\alpha_u - r\dot{\alpha}_u + \dot{f},$$

$$f = (\ddot{y}_d + k(\varpi^{-1} - \varpi^{-3}y_e^2)\dot{y}_e - k\varpi^{-3}x_e y_e \dot{x}_e) \cos \psi - (\ddot{x}_d + k((\varpi^{-1} - \varpi^{-3}x_e^2)\dot{x}_e - k\varpi^{-3}x_e y_e \dot{y}_e)) \sin \psi,$$

$$\dot{r} = (\tau_r + \tau_{wr} - d_{33}r - (m_{22} - m_{11})uv)/m_{33},$$

$$\ddot{v} =$$

$$(-d_{22}m_{33}\dot{v} + m_{33}\tau_{wv} - m_{11}m_{33}\dot{u}r - m_{11}u\tau_r - m_{11}u\tau_{wr})/m_{22}m_{33} + (m_{11}d_{33}ur + m_{11}(m_{22} - m_{11})u^2v)/m_{22}m_{33},$$

得

$$\dot{S}_2(t) = ((m_{22}\alpha_u - m_{11}u)\tau_r + m_{33}\tau_{wv} + (m_{22}\alpha_u - m_{11}u)\tau_{wr} + h)/m_{22}m_{33},$$

$$h = m_{22}\alpha_u((m_{11} - m_{22})uv - d_{33}r) + m_{22}m_{33}(r\dot{\alpha}_u + \dot{f} + \lambda_2(\dot{v} - \dot{\alpha}_v)) - d_{22}m_{33}\dot{v} - m_{11}m_{33}\dot{u}r + m_{11}d_{33}ur +$$

$$m_{11}(m_{22} - m_{11})u^2v.$$

令 $\dot{S}_2 = 0$, 可得等效控制律为

$$\tau_{\text{req}}(t) = \frac{\hat{h}}{\hat{b}},$$

其中 $b = m_{22}\alpha_u - m_{11}u$.

因此可设计转向力矩的滑模控制律为

$$\tau_r(t) = \frac{\hat{h} - K_2 \text{sgn } S_2}{\hat{b}}.$$

注 2 当 $\hat{b} = 0$, 控制律 $\tau_r(t)$ 将产生奇异值. 然而在前向速度不为零的假设条件下, 这种情况只有在船舶的实际速度超过期望速度20%的才会发生, 这是因为对于常规的大多数水面船舶, 惯性参数 m_{22} 比 m_{11} 大20%^[11]. 因此假设在航迹跟踪控制过程中 $\hat{b} > 0$.

为确定控制参数, 同文献[12-13], 假设不确定函数存在如下边界条件:

$$|h - \hat{h}| \leq H.$$

定义如下Lyapunov函数:

$$V_2 = \frac{1}{2}m_{22}m_{33}S_2^2,$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= m_{22}m_{33}S_2\dot{S}_2 = \\ & m_{22}m_{33}S_2\left(\frac{b\tau_r + b\tau_{wr} + m_{33}\tau_{wv} - h}{m_{22}m_{33}}\right) = \\ & S_2(b\hat{b}^{-1}(\hat{h} - K_2\text{sgn } S_2) - h + b\tau_{wr} + m_{33}\tau_{wv}) = \\ & S_2\left(\begin{matrix} (b\hat{b}^{-1} - 1)\hat{h} + \hat{h} - h + b\tau_{wr} + m_{33}\tau_{wv} \\ -b\hat{b}^{-1}K_2\text{sgn } S_2 \end{matrix}\right), \end{aligned}$$

因为 $|m_{ii} - \hat{m}_{ii}| \leq M_{ii}, i = 1, 2, 3$, 且 $m_{ii}, \hat{m}_{ii} > 0$, 因此亦有 $|m_{ii}| \leq M_{ii}$. 因此可设计控制参数 K_2 参数如下条件:

$$K_2 = \beta(H + \eta_2 + \hat{b}\tau_{wr\max} + M_{33}\tau_{wv\max}) + (\beta - 1)|\hat{h}|,$$

使得

$$\dot{V}_2 = m_{22}m_{33}S_2\dot{S}_2 \leq -\eta_2|S_2|,$$

其中 β 为 $b\hat{b}^{-1}$ 的上界, 即 $b\hat{b}^{-1} \leq \beta$.

4 航向稳定性分析(Yaw stability analysis)

下面将证明艏摇运动 r 具有有界输入有界输出稳定特性, 选择如下Lyapunov函数:

$$V_3 = \frac{1}{2}m_{33}r^2,$$

V_3 对时间 t 的导数为

$$\dot{V}_3 = r(\tau_r + \tau_{wr} - (m_{22} - m_{11})uv - d_{33}r).$$

如果

$$|d_{33}r| > |\tau_r + \tau_{wr} - (m_{22} - m_{11})uv|,$$

则 $\dot{V}_3 < 0$. V_3 是一个递减函数, 因此 r 是条件 $|d_{33}r| > |\tau_r + \tau_{wr} - (m_{22} - m_{11})uv|$ 下的递减函数. 因为 τ_r, τ_{wr}, u, v 是有界的, 因此 r 也是有界的.

5 仿真结果(Simulation results)

为验证滑模跟踪控制器的控制性能, 对一船模进行仿真实验. 参照文献[12]介绍的船模, 船模参数为

$$m_{11} = 1.956 \pm 0.19, m_{22} = 2.405 \pm 0.117,$$

$$m_{33} = 0.043 \pm 0.0068, d_{11} = 2.436 \pm 0.023,$$

$$d_{22} = 12.992 \pm 0.297, d_{33} = 0.0564 \pm 0.00085.$$

本文所提出的控制律即适合对曲线航迹进行跟踪, 也适合对直线段进行跟踪. 为便于比较分析, 同文献[2]将船舶的期望航迹设定为圆. 在仿真应用中, 期望信号表达为

$$x_d(t) = \cos(0.2t), y_d(t) = \sin(0.2t),$$

即期望航迹为半径1米的圆. 外界风浪流产生的的干扰力矩设为

$$\begin{aligned} \tau_{wu} = \tau_{wv} = & \\ & 0.08(\sin(0.2t) + \cos(0.2t + \frac{\pi}{4}) + \sin(0.2t + \frac{\pi}{6})), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{wr} = & \\ & 0.1(\sin(0.2t) + \cos(0.2t + \frac{\pi}{4}) + \sin(0.2t + \frac{\pi}{6})). \end{aligned}$$

为体现控制律对参数摄动及外界干扰不同的响应, 分别对有无干扰条件下所提控制律对期望航迹的跟踪能力进行了仿真. 有参数摄动无外界干扰下的仿真结果如图1-3所示; 参数摄动兼外界干扰条件下的仿真结果如图4-6所示. 其中无外界干扰条件下的仿真结果体现了控制器对参数摄动的鲁棒性能; 参数摄动兼外界干扰条件下的仿真结果体现了控制器对模型参数摄动和外界环境干扰的鲁棒性能. 两种不同情况下的跟踪控制采用同一控制器, 即所有控制参数设置相同. 控制器参数设为

$$k = 2, C = 0.1, \lambda_1 = 1, \lambda_2 = 1,$$

M_{ii} 和 D_{ii} 分别取估计参数的5%, $\eta_1 + \tau_{wu\max} = 0.2, \eta_2 = 0.1, \tau_{wr\max} = 0.1, \tau_{wv\max} = 0.1, H = 0.2, \alpha = 0.2$.

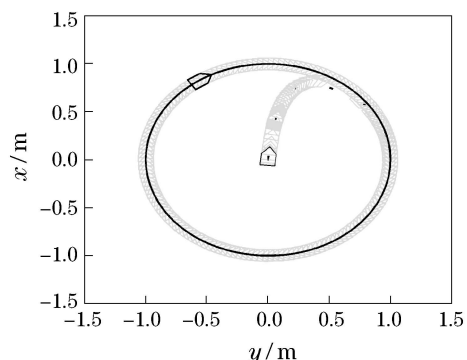


图1 无干扰条件下的航迹跟踪控制

Fig. 1 Tracking control of the vessel without disturbances

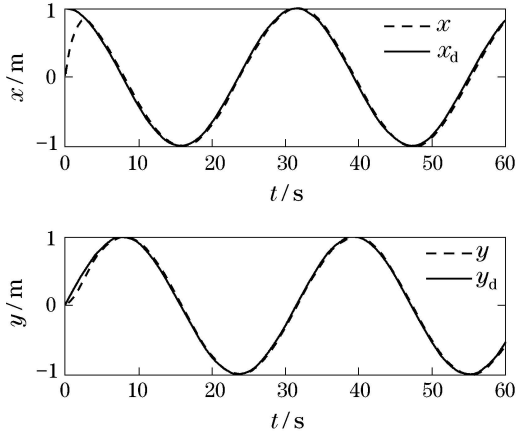


图 2 无干扰条件下的位置误差收敛曲线
Fig. 2 Convergence of position errors without disturbances

其中: 图1和图2显示了在参数摄动条件下, 船舶的实际位置快速运动至并保持期望航迹上; 图4和图5分别显示了参数摄动及外界干扰条件下的船舶的跟踪航迹及收敛曲线, 说明所提出的控制律可有效解决欠驱动船舶的航迹跟踪控制问题, 并且对于建模的参数不确定性和外界干扰具有一定的鲁棒性; 两种不同仿真情况下的控制输入响应分别如图3和图6所示。

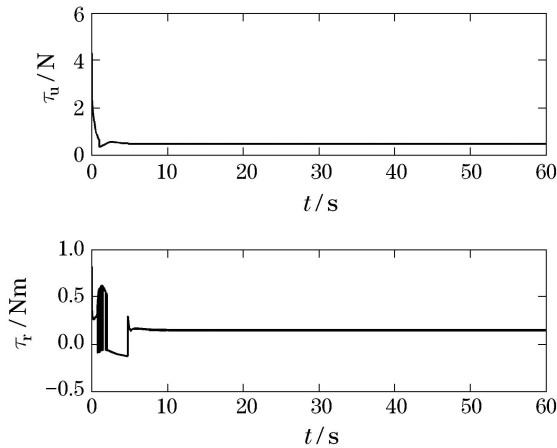


图 3 无干扰条件下的跟踪控制输入
Fig. 3 Control input without disturbances

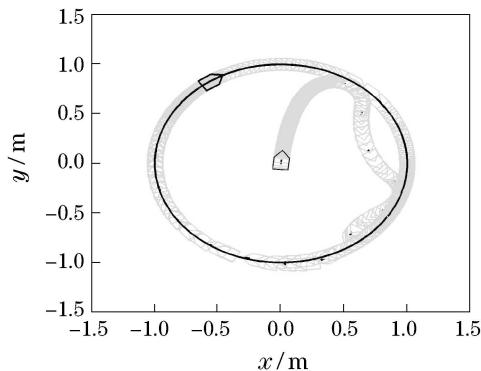


图 4 干扰条件下的航迹跟踪控制
Fig. 4 Tracking control of the vessel under disturbances

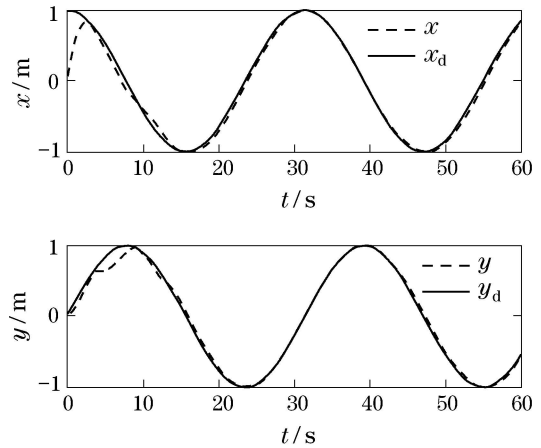


图 5 干扰条件下的位置误差收敛曲线
Fig. 5 Convergence of position errors under disturbances

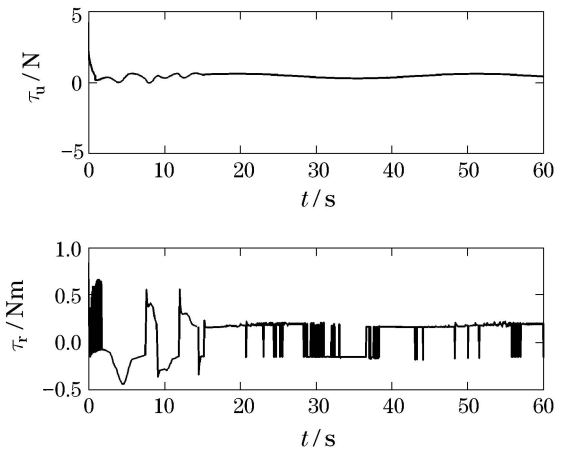


图 6 干扰条件下的跟踪控制输入
Fig. 6 Control input under disturbances

6 结论(Conclusion)

针对模型参数不确定及外界环境干扰下欠驱动水面船舶的航迹跟踪控制问题, 设计了滑模控制器. 利用反步方法将控制器的设计分解为运动学回路和动力学回路两个环节进行设计. 在运动学回路中, 为实现船舶位置跟踪误差的收敛, 设计了船舶的参考纵向速度和侧移速度. 在动力学回路中利用滑模控制方法设计实际控制输入实际对参考速度的跟踪控制, 从而实现了欠驱动水面船舶的航迹跟踪控制问题. 仿真结果表明, 控制器对于模型参数摄动和外界干扰均具有较好的鲁棒性能.

参考文献(References):

- [1] LEFEBER E, PETTERSEN K Y, NIJMEIJER H. Tracking control of an underactuated ship [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11(1): 52 – 61.
- [2] JIANG Z P. Global tracking control of underactuated ships by Lyapunov's direct method [J]. *Automatica*, 2002, 38(2): 301 – 309.
- [3] DONG W J, GUO Y. Nonlinear tracking control of underactuated surface vessel [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. New York: IEEE, 2005: 4351 – 4356.

- [4] GHOMMAM J, MNIF F, DERBEL N. Global stabilization and tracking control of underactuated surface vessels [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2010, 4(1): 71 – 88.
- [5] 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 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 445 – 448.
(LI Tieshan, YANG Yansheng, HONG Biguang, et al. Robust adaptive fuzzy design for ships tracking-keeping control [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 445 – 448.)
- [6] 潘永平, 黄道平, 孙宗海. 欠驱动船舶航迹Backstepping自适应模糊控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(7): 907 – 914.
(PAN Yongping, HUANG Daoping, SUN Zonghai. Backstepping adaptive fuzzy control for track-keeping of underactuated surface vessels [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(7): 907 – 914.)
- [7] DO K D, PAN J. Global robust adaptive path following of underactuated ships [J]. *Automatica*, 2006, 42(10): 1713 – 1722.
- [8] DO K D, PAN J. Global tracking control of underactuated ships with nonzero off-diagonal terms in their system matrices [J]. *Automatica*, 2005, 41(1): 87 – 95.
- [9] POMET J B, PRALY L. Adaptive nonlinear regulation: estimation from the Lyapunov equation [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, 37(6): 729 – 740.
- [10] 刘杨, 郭晨, 沈智鹏, 等. 欠驱动船舶路径跟踪的神经网络稳定自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(2): 169 – 174.
(LIU Yang, GUO Chen, SHEN Zhipeng, et al. Stable adaptive neural network control of path following for underactuated ships [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(2): 169 – 174.)
- [11] FOSSEN T I. *Marine Control Systems* [M]. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2002.
- [12] ASHRAFIUON H, MUSKE K. Sliding mode tracking control of surface vessels [C] // *Proceedings of the American Control Conference*, New York: IEEE, 2008: 556 – 561.
- [13] ASHRAFIUON H, MUSKE K, MCNINCH L, et al. Sliding mode tracking control of surface vessels [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(11): 4004 – 4012.

作者简介:

- 朱齐丹 (1965–), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为船舶控制、机器人控制、全景视觉等, E-mail: zhuqidan@hrbeu.edu.cn;
- 于瑞亭 (1984–), 男, 博士研究生, 研究方向为智能控制理论及应用, E-mail: ruitingyu@yahoo.com.cn;
- 夏桂华 (1962–), 男, 研究员, 研究方向为船舶控制、机器人控制、全景视觉等, E-mail: xiaguihua@hrbeu.edu.cn;
- 刘志林 (1977–), 男, 讲师, 研究方向为机器感知与智能控制技术、水面航行器预测控制, E-mail: liuzhilin@hrbeu.edu.cn.

(上接第958页)

- [6] 韩京清. 自抗扰控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
(HAN Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [7] 雷春林, 吴捷, 陈渊睿, 等. 自抗扰控制在永磁直线电机控制中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(3): 423 – 428.
(LEI Chunlin, WU Jie, CHEN Yuanrui, et al. Auto-disturbance-rejection controller used in permanent-magnet linear motor control system [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(3): 423 – 428.)
- [8] 林炯康, 郑家伟, 柳明, 等. 基于线性模型跟随的风力发电功率解耦控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 312 – 315.
(LIN Jongkang, ZHENG Jiawei, LIU Ming, et al. Power-decoupling control for wind energy conversion system based on linear model following control [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 312 – 315.)
- [9] 邱晓波, 窦丽华, 单东升, 等. 光电跟踪系统自抗扰伺服控制器的设计 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 220 – 226.
(QIU Xiaobo, DOU Lihua, DAN Dongsheng, et al. Design of active disturbance rejection controller for electro-optical tracking servo system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 220 – 226.)
- [10] CSANK J, GAO Z Q. Uncertainty reduction through active disturbance rejection [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. [S.l.]: [s.n.], 2008: 3689 – 3694.
- [11] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. [S.l.]: [s.n.], 2003: 4989 – 4996.
- [12] ROBERT MIKLOSOVIC, AARON RADKE, GAO Z Q. Discrete implementation and generalization of the extended state observer [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. [S.l.]: [s.n.], 2006: 2209 – 2214.

作者简介:

- 李锦英 (1984–), 男, 博士研究生, 主要研究工作为电机驱动和伺服控制, E-mail: jyliok@gmail.com;
- 付承毓 (1952–), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究工作为自动控制、精密测量与跟踪, E-mail: cyfu@ioe.ac.cn;
- 唐涛 (1980–), 男, 博士研究生, 主要研究工作为精密伺服系统控制、信号处理, E-mail: prettang@gmail.com;
- 李志俊 (1984–), 男, 硕士研究生, 主要研究工作为高精度跟瞄技术, E-mail: zhijunhome@sina.com;
- 于伟 (1975–), 男, 讲师, 博士研究生, 现从事光束控制技术研究, E-mail: yuwei2005@yeah.net.