欠驱动 AUV 的鲁棒位置跟踪控制

毕凤阳，张嘉钟，魏英杰，曹 伟

（哈尔滨工业大学 航天学院，哈尔滨 150001，bifengyang@126.com）

摘 要：为了实现具有参数不确定性和外界干扰的欠驱动 AUV 的水平面鲁棒位置跟踪，基于李雅普诺夫理论，使用反步法设计了一个非线性控制器，并利用滑模控制方法提高控制系统的鲁棒性；为了检验该控制器的性能，选择有时变参考速度的正弦曲线作为参考轨迹，在控制输入受限的情况下，对具有参数不确定性和外界干扰的欠驱动 AUV 系统进行了数值仿真，结果表明本文设计的控制器能很好地实现欠驱动 AUV 的水平面位置跟踪控制，具有很强的鲁棒性.

关键词：欠驱动自主水下航行器；鲁棒位置跟踪；反步法；李雅普诺夫稳定性理论；不确定性

中图分类号：TP273 **文献标志码：**A **文章编号：**0367-6234(2010)11-1690-06

Robust position tracking control design for underactuated AUVs

BI Feng-yang, ZHANG Jia-zhong, WEI Ying-jie, CAO Wei

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, bifengyang@126.com)

Abstract: To address the problem of robust position tracking of underactuated autonomous underwater vehicles (AUVs) with parameter uncertainties and external disturbances in the horizontal plane, a robust position tracking controller is presented based on the Lyapunov stability theory by using backstepping technique. To compensate the uncertainties, a sliding mode control scheme was proposed. The desired trajectory was chosen as a sinusoidal curve. Simulation results are presented for the underactuated AUV systems with parameter uncertainties and external disturbances to illustrate the effectiveness and robustness of the proposed control schemes.

Key words: underactuated autonomous underwater vehicle; robust position tracking; backstepping; Lyapunov stability theory; uncertainty

自主水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)是水下机器人的一种，其在深海资源勘探开发、海洋水文观测、海洋测量等民用领域正起着重要作用，而且在军事领域有着广泛的应用前景，越来越受到各国的重视[1]. 目前，世界上有近10个国家的40多个部门在研究军用和民用AUV[2]；在AUV的这些实际应用中，精确的位置跟踪控制通常是必需的[3-4]. 但出于成本和减重等的考虑，AUV横向和垂向大多没有推进器，受到不可积的二阶非完整约束，是欠驱动系统[5]，这使得AUV的跟踪控制成为一个极具挑战性的问题. 文献[4]针对欠驱动航行器，基于李雅普诺夫稳定性理论使用backstepping方法提出了一个位置跟踪控制策略，但没有考虑参数不确定性和外界干扰，而且其使用横向速度作为虚拟控制输入，提出的控制策略只能使位置跟踪误差收敛到一个很小的区域内. AUV是强非线性系统，很难获得其精确的水动力系数，易受到海流等外界干扰影响[6-7]，这就需要控制器有较强的鲁棒性.

基于以上考虑，本文针对具有参数不确定性和外界干扰的欠驱动AUV，基于李雅普诺夫稳定性理论使用backstepping方法设计了一个平面位置跟踪控制器；为了提高控制系统的鲁棒性，引入滑模变结构控制策略；为了得到一个更加实用的

收稿日期：2009-11-06.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(10802026).
作者简介：毕凤阳(1979—)，男，博士研究生；
张嘉钟(1945—)，男，教授，博士生导师.

控制器，用一个陡峭的饱和函数代替滑模控制器中的符号函数. 最后将该控制器对具有参数不确定性和外界干扰的欠驱动 AUV 系统进行了数值仿真，结果表明本文设计的控制器能很好地实现欠驱动 AUV 的平面位置跟踪控制，有很强的鲁棒性，动态性能很好.

1　问题描述

AUV 运动一般为空间 6 自由度，不过在弱机动性时可以被解耦为水平面与垂直面的平面运动. 本文仅讨论水平面运动情况. 欠驱动 AUV 的水平面运动学方程可表示为[8]

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

动力学方程可表示为[5,8]

$$m_{11}\dot{u} = m_{22}vr - X_u u - X_{u|u|}u|u| + d_1 + F_u, \tag{2a}$$

$$m_{22}\dot{v} = -m_{11}ur - Y_v v - Y_{v|v|}v|v| + d_2, \tag{2b}$$

$$m_{33}\dot{r} = (m_{11} - m_{22})uv - N_r r - N_{r|r|}r|r| + d_3 + F_r. \tag{2c}$$

其中：$m_{11} = m - X_{\dot{u}}$, $m_{22} = m - Y_{\dot{v}}$, $m_{33} = I_z - N_{\dot{r}}$.

方程(1) 和(2) 中的参数的物理意义请参见文献[5,8]. 从上述方程可看出，横向没有控制输入，是欠驱动系统. 在实际应用中，参数 $m_{11}, m_{22}, m_{33}, X_u, X_{u|u|}, Y_v, Y_{v|v|}, N_r$ 和 $N_{r|r|}$ 都是正值，$F_u, F_r, u, r, \dot{u}$ 和 $\dot{r}$ 都是有界的. 由于方程(2) 中的系统参数的标称值并不足够精确，以 $\boldsymbol{P}$, $\boldsymbol{P}^0$ 和 $\boldsymbol{P}^*$ 分别代表系统参数的实际值，标称值和摄动值，它们关系可表示为

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{P}^0 + \boldsymbol{P}^*. \tag{3}$$

则方程(2)可重写为

$$m_{11}^0\dot{u} = m_{22}^0 vr - X_u^0 u - X_{u|u|}^0 u|u| + d'_1 + F_u, \tag{4a}$$

$$m_{22}^0\dot{v} = -m_{11}^0 ur - Y_v^0 v - Y_{v|v|}^0 v|v| + d'_2, \tag{4b}$$

$$m_{33}^0\dot{r} = (m_{11}^0 - m_{22}^0)uv - N_r^0 r - N_{r|r|}^0 r|r| + d'_3 + F_r. \tag{4c}$$

其中

$$d'_1 = -m_{11}^*\dot{u} + m_{22}^* vr - X_u^* u - X_{u|u|}^* u|u| + d_1, \tag{5a}$$

$$d'_2 = -m_{22}^*\dot{v} - m_{11}^* ur - Y_v^* v - Y_{v|v|}^* v|v| + d_2, \tag{5b}$$

$$d'_3 = (m_{11}^* - m_{22}^*)uv - m_{33}^*\dot{r} - N_r^* r - N_{r|r|}^* r|r| + d_3. \tag{5c}$$

假设参数不确定性 $\boldsymbol{P}^*$ 是有界的，且

$$m_{11}^* > \zeta m_{11}^0, \quad m_{33}^* > \zeta m_{33}^0.$$

其中 $-0.5 < \zeta < 0$. AUV 在近水面主要受波浪干扰，在离水面较远处主要受海流干扰，这两者都较难精确建模[9]. 根据文献[6, 10]，外界干扰一般可取为以下形式

$$\dot{\boldsymbol{b}} = -\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{b} + \boldsymbol{\Gamma\omega}. \tag{6}$$

其中 $\boldsymbol{b} = [b_1 \quad b_2 \quad b_3]^{\mathrm{T}}$ 代表干扰力和力矩向量；$\boldsymbol{\omega} = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^3$ 代表平均值为零的高斯白噪声；$\boldsymbol{T} \in \mathbf{R}^{3\times3}$ 是一个正值对角矩阵；$\boldsymbol{\Gamma} \in \mathbf{R}^{3\times3}$ 是一个表征高斯白噪声幅值的对角矩阵. 为了更好地分析有无外界干扰情况下的仿真结果，同时考虑到外界干扰都是有界的[6]，本文的外界干扰 $\boldsymbol{d} = [d_1 \quad d_2 \quad d_3]^{\mathrm{T}}$ 取为

$$\dot{b}_i = \begin{cases} -\boldsymbol{T}_{ii}^{-1} b_i + \boldsymbol{\Gamma}_{ii}\omega_i, & |b_i| \leqslant b_{i.\max}; \\ -\boldsymbol{T}_{ii}^{-1} b_i - \boldsymbol{\Gamma}_{ii}\mathrm{sgn}(b_i)|\omega_i|, & |b_i| > b_{i.\max}. \end{cases} \tag{7a}$$

$$\boldsymbol{d} = \begin{cases} \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\psi)\boldsymbol{b}, & t \leqslant 700 \text{ s}; \\ 0, & t > 700 \text{ s}. \end{cases} \tag{7b}$$

为了便于论述，定义

$$\boldsymbol{p} = [x(t), y(t)]^{\mathrm{T}}.$$

以 $\boldsymbol{p}_d = [x_d(t), y_d(t)]^{\mathrm{T}}: [0, \infty) \to \mathbf{R}^2$ 代表一条足够光滑的时变的期望轨迹，且该期望轨迹的两阶导数有界. 则本文研究的问题描述如下：针对方程(1) ~ (7) 表示的欠驱动 AUV 系统，设计一个控制器使所有闭环信号有界且跟踪误差 $\|\boldsymbol{p}_d - \boldsymbol{p}\|$ 快速收敛到零附近的一个可以任意减小的邻域.

2　鲁棒位置跟踪控制器设计

Backstepping 是一种非常有效的非线性系统控制器设计方法，它通过逐步修正算法，设计镇定控制器实现系统的全局调节或跟踪，在每一步把状态坐标的变化、不确定参数的自适应调节函数和一个已知李雅普诺夫函数的虚拟控制系统的镇定函数等联系起来[11].

2.1　v 的有界性

由于横向没有控制输入，所以很有必要先讨论下 v 的有界性. 定义一个控制李雅普诺夫函数

$$V = 0.5 m_{22} v^2.$$

结合方程(2b)，其导数为

$$\dot{V} = m_{22}v\dot{v} = v(-m_{11}ur - Y_v v - Y_{v|v|}v|v| + d_2) = -m_{11}urv + d_2 v - Y_v v^2 - Y_{v|v|}|v|v^2 \leqslant -Y_v v^2 + \chi|v|. \tag{8}$$

其中 $\chi = \max(|m_{11}ur| + |d_2|)$，方程(8)可重写为

$$\dot{V} \leqslant -0.5Y_v v^2, \forall \mid v \mid \geqslant \frac{2\chi}{Y_v}.$$

根据文献[12]，方程(2b)代表的系统是输入状态稳定的，且

$$\mid v(t) \mid \leqslant \mid v(t_0) \mid e^{-0.5Y_v(t-t_0)} + \frac{2\chi}{Y_v}.$$

2.2 控制器设计

为了便于表达，定义

$$\psi_d = \begin{cases} \arctan\left(\dfrac{\dot{y}_d}{\dot{x}_d}\right), & \dot{x}_d \geqslant 0; \\ \pi + \arctan\left(\dfrac{\dot{y}_d}{\dot{x}_d}\right), & \dot{x}_d < 0. \end{cases}$$

该角度取决于已知的期望位置 x_d 和 y_d 的变化率，完全不受模型不确定性的影响，通过定义 $\psi_e = \psi_d - \psi$ 可以确定 AUV 相对参考轨迹的姿态. 假设期望变量 $x_d, y_d, \psi_d, \dot{x}_d, \dot{y}_d$ 和 $\dot{\psi}_d$ 都是有界的，ψ_e 的初始值满足 $\mid \psi_e(t_0) \mid < \dfrac{\pi}{2}$ 和 $\cos \psi_e(t_0) \geqslant \varepsilon$，其中 ε 是一个待定的正常数.

定义惯性坐标系位置跟踪误差为

$$x_e = x_d - x,$$
$$y_e = y_d - y.$$

则体坐标系下的跟踪误差可表示为

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix}. \tag{9}$$

从方程(9)可得

$$\begin{cases} e_x(t) = 0; \\ e_y(t) = 0. \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x_e(t) = 0; \\ y_e(t) = 0. \end{cases}$$

则只需设计控制律使跟踪误差 e_x 和 e_y 快速收敛到零附近的一个可以任意减小的邻域. 根据方程(1)和(9)，经计算可得 e_x 和 e_y 的导数为

$$\dot{e}_x = -u + v_p \cos \psi_e + r e_y,$$
$$\dot{e}_y = -v + v_p \sin \psi_e - r e_x.$$

其中 $v_p = \sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2}$. 接下来将分 4 步给出本文的控制器.

步骤 1 镇定跟踪误差 e_x 和 e_y. 首先定义一个控制李雅普诺夫函数

$$V_1 = 0.5(e_x^2 + e_y^2).$$

其导数为

$$\dot{V}_1 = e_x \dot{e}_x + e_y \dot{e}_y = (-u + v_p \cos \psi_e) e_x + (-v + v_p \sin \psi_e) e_y. \tag{10}$$

选择

$$\alpha = v_p \sin \psi_e. \tag{11}$$

为了使 $\dot{V}_1$ 为负值，以 u 和 α 为虚拟控制输入，选择其期望值为

$$u_d = v_p \cos \psi_e + k_1 e_x,$$
$$\alpha_d = v - k_2 e_y.$$

其中 k_1 和 k_2 都是正常数. 为了确保存在 ψ_e，使得 $v_p \sin \psi_e = v$ 成立，假设 v_p 满足 $v_p \geqslant \dfrac{2 \mid d_2 \mid_{\max}}{Y_v}$. 将 u_d 和 α_d 代入方程(10)可得

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_x^2 - k_2 e_y^2. \tag{12}$$

步骤 2 镇定 $\tilde{u}$. 考虑到 u_d 和 α_d 并不是实际控制输入，定义

$$\tilde{u} = u - u_d, \quad \tilde{\alpha} = \alpha - \alpha_d. \tag{13}$$

方程(12)变为

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_x^2 - k_2 e_y^2 - \tilde{u} e_x + \tilde{\alpha} e_y.$$

定义一个新的控制李雅普诺夫函数 V_2 为

$$V_2 = V_1 + 0.5\tilde{u}^2.$$

其导数为

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_x^2 - k_2 e_y^2 + \tilde{u}(\dot{u} - \dot{u}_d - e_x) + \tilde{\alpha} e_y. \tag{14}$$

选择控制输入 F_u 为

$$F_u = m_{11}^0(\dot{u}_d + e_x - k_3 \tilde{u}) - m_{22}^0 v r + X_u^0 u + X_{u|u|}^0 u \mid u \mid - \eta_1 \mathrm{sgn}(\tilde{u}). \tag{15}$$

其中 k_3 和 η_1 为待定的正常数，方程(14)变为

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_x^2 - k_2 e_y^2 - k_3 \tilde{u}^2 + (m_{11}^0)^{-1}(d'_1 - \eta_1 \mathrm{sgn}(\tilde{u}))\tilde{u} + \tilde{\alpha} e_y.$$

从方程(4a)，(5a)和(15)计算可得

$$m_{11} d'_1 = m_{11}^* \eta_1 \mathrm{sgn}(\tilde{u}) + m_{11}^0 (m_{22}^* v r - X_u^* u - X_{u|u|}^* u \mid u \mid + d_1 - m_{11}^* (\dot{u}_d + e_x - k_3 \tilde{u})).$$

为了便于表述，定义

$$f_u(u, v, r, d_1, \dot{u}_d, e_x, \tilde{u}) = m_{22}^* v r - X_u^* u - X_{u|u|}^* u \mid u \mid + d_1 - m_{11}^* (\dot{u}_d + e_x - k_3 \tilde{u}).$$

选择

$$\eta_1 \geqslant \frac{\max(\mid f_u(u, v, r, d_1, \dot{u}_d, e_x, \tilde{u}) \mid)}{1 + 2\zeta}.$$

则

$$m_{11} \mid d'_1 \mid \leqslant \mid m_{11}^* \mid \eta_1 + m_{11}^0 \mid f_u(u, v, r, d_1, \dot{u}_d, e_x, \tilde{u}) \mid \leqslant m_{11} \eta_1 \Rightarrow \mid d'_1 \mid \leqslant \eta_1.$$

步骤 3 镇定 $\tilde{\alpha}$. 定义一个新的控制李雅普诺夫函数 V_3 为

$$V_3 = V_2 + 0.5\tilde{\alpha}^2.$$

其导数为

$$\dot{V}_3 = -k_1 e_x^2 - k_2 e_y^2 - k_3 \tilde{u}^2 + \tilde{\alpha} e_y + \dot{\tilde{\alpha}} \tilde{\alpha} + (m_{11}^0)^{-1}(d'_1 - \eta_1 \mathrm{sgn}(\tilde{u}))\tilde{u}. \tag{16}$$

经计算方程(11)和(13)可得

$$\dot{\tilde{\alpha}} = \dot{\alpha} - \dot{\alpha}_d = \dot{v}_p \sin \psi_e + v_p \cos \psi_e (\dot{\psi}_d - r) - \dot{\alpha}_d.$$

为了使 $\dot{V}_3$ 为负值，以 r 为虚拟控制输入，选择

其期望值 r_d 为

$$r_d = \dot{\psi}_d + \frac{e_y + k_4\tilde{\alpha} - \dot{\alpha}_d + \dot{v}_p \sin\psi_e}{v_p\cos\psi_e}.$$

其中 k_4 是一个正常数，方程(16) 变为

$$\dot{V}_3 = -k_1e_x^2 - k_2e_y^2 - k_3\tilde{u}^2 - k_4\tilde{\alpha}^2 + (m_{11}^0)^{-1}(d'_1 - \eta_1\mathrm{sgn}(\tilde{u}))\tilde{u}. \tag{17}$$

步骤 4　镇定 $\tilde{r}$. 考虑到 r_d 也不是实际控制输入，定义

$$\tilde{r} = r - r_d.$$

则方程(17)变为

$$\dot{V}_3 = -k_1e_x^2 - k_2e_y^2 - k_3\tilde{u}^2 - k_4\tilde{\alpha}^2 + (m_{11}^0)^{-1}(d'_1 - \eta_1\mathrm{sgn}(\tilde{u}))\tilde{u} - v_p\tilde{\alpha}\tilde{r}\cos\psi_e.$$

定义一个新的控制李雅普诺夫函数 V_4 为

$$V_4 = V_3 + 0.4\tilde{r}^2. \tag{18}$$

其导数为

$$\dot{V}_4 = -k_1e_x^2 - k_2e_y^2 - k_3\tilde{u}^2 - k_4\tilde{\alpha}^2 + (m_{11}^0)^{-1}(d'_1 - \eta_1\mathrm{sgn}(\tilde{u}))\tilde{u} + \tilde{r}(\dot{r} - \dot{r}_d - v_p\tilde{\alpha}\cos\psi_e). \tag{19}$$

选择控制输入 F_r 为

$$F_r = m_{33}^0(v_p\tilde{\alpha}\cos\psi_e - k_5\tilde{r} + \dot{r}_d) - (m_{11}^0 - m_{22}^0)uv + N_r^0 r + N_{r|r|}^0 r|r| - \eta_3\mathrm{sgn}(\tilde{r}). \tag{20}$$

其中 k_5 和 η_3 为待定的正常数，方程(19) 变为

$$\dot{V}_4 = -k_1e_x^2 - k_2e_y^2 - k_3\tilde{u}^2 - k_4\tilde{\alpha}^2 - k_5\tilde{r}^2 + (m_{11}^0)^{-1}(d'_1 - \eta_1\mathrm{sgn}(\tilde{u}))\tilde{u} + (m_{33}^0)^{-1}(d'_3 - \eta_3\mathrm{sgn}(\tilde{r}))\tilde{r}.$$

从方程(4c)，(5c)和(20)计算可得

$$m_{33}d'_3 = m_{33}^*\eta_3\mathrm{sgn}(\tilde{r}) + m_{33}^0((m_{11}^* - m_{22}^*)uv - N_r^* r - N_{r|r|}^* r|r| + d_3 - m_{33}^*(v_p\tilde{\alpha}\cos\psi_e - k_5\tilde{r} + \dot{r}_d)).$$

为了便于表述，定义

$$f_r(u,v,r,d_3,\dot{r}_d,e_\psi,\tilde{\alpha},\tilde{r}) = (m_{11}^* - m_{22}^*)uv - N_r^* r - N_{r|r|}^* r|r| + d_3 - m_{33}^*(v_p\tilde{\alpha}\cos\psi_e - k_5\tilde{r} + \dot{r}_d).$$

选择

$$\eta_3 \geqslant \frac{\max(f_r(u,v,r,d_3,\dot{r}_d,e_\psi,\tilde{\alpha},\tilde{r}))}{1+2\zeta}.$$

则

$$m_{33}|d'_3| \leqslant |m_{33}^*|\eta_3 + m_{33}^0|f_r(u,v,r,d_3,\dot{r}_d,e_\psi,\tilde{\alpha},\tilde{r})| \leqslant m_{33}\eta_3.$$

即 $|d'_3| \leqslant \eta_3$，则 V_4 的导数满足

$$\dot{V}_4 = -k_1e_x^2 - k_2e_y^2 - k_3\tilde{u}^2 - k_4\tilde{\alpha}^2 - k_5\tilde{r}^2 + (m_{11}^0)^{-1}(d'_1 - \eta_1\mathrm{sgn}(\tilde{u}))\tilde{u} + (m_{33}^0)^{-1}(d'_3 - \eta_3\mathrm{sgn}(\tilde{r}))\tilde{r} \leqslant -k_1e_x^2 - k_2e_y^2 - k_3\tilde{u}^2 - k_4\tilde{\alpha}^2 - k_5\tilde{r}^2. \tag{21}$$

根据文献[12]，最终的闭环系统是指数稳定的，位置跟踪误差将指数趋近到零.

2.3　关于控制输入 F_r 的讨论

需要特别注意的是，当 $\cos\psi_e$ 等于零的时候，r_d 将变成无穷大，控制输入 F_r 也变成无穷大而没有意义，所以有必要讨论下在使用本文提出的控制器且满足 ψ_e 的初始条件假设情况下，ψ_e 的变化范围.

假设初始时刻为 t_0，考虑到 $x_d, y_d, \psi_d, \dot{x}_d, \dot{y}_d$ 和 $\dot{\psi}_d$ 都是有界的，ψ_e 的初始值满足 $|\psi_e(t_0)| < \frac{\pi}{2}$. 和 $\cos\psi_e(t_0) \geqslant \varepsilon$，所以 $V_4(t_0)$ 是有界的. 根据文献[12]取 $\gamma = \min\{k_1,\ k_2,\ k_3,\ k_4,\ k_5\}$，由方程(21) 可得

$$V_4(t) \leqslant V_4(t_0)e^{-2\gamma(t-t_0)}.$$

结合方程(18)可得

$$|\tilde{r}| = |r - r_d| \leqslant (2V_4(t_0)\mathrm{e}^{-2\gamma(t-t_0)})^{1/2}.$$

则 $|r_d(t)|$ 和 $|\cos\psi_e(t)|$ 满足

$$|r_d(t)| = |\dot{\psi}_d + (e_y + k_4\tilde{\alpha} - \dot{\alpha}_d + \dot{v}_p\sin\psi_e)/(v_p\cos\psi_e)| \leqslant (2V_4(t_0)\mathrm{e}^{-2\gamma(t-t_0)})^{1/2} + \max(|r|),\ \forall t \geqslant t_0.$$

$$|\cos\psi_e(t)| \geqslant |(e_y + k_4\tilde{\alpha} - \dot{\alpha}_d + \dot{v}_p\sin\psi_e)/\{v_p[(2V_4(t_0)\mathrm{e}^{-2\gamma(t-t_0)})^{1/2} + \max(|r|) + |\dot{\psi}_d|]\}|,\ \forall t \geqslant t_0.$$

因此 $|r_d(t)|$ 和方程(20) 中的控制输入 F_r 都是有界的.

2.4　一个实用控制器

在理论上，方程(15)和(20)的控制律能取得很好的控制性能，但该控制律的控制信号是不连续的，将产生抖振现象. 在实际应用中，AUV 系统是极其不希望出现抖振现象的. 为了削弱抖振，根据文献[12]，可用一个抖振的饱和函数来代替符号函数，则控制律可重写为

$$F_u = m_{11}^0(\dot{u}_d + e_x - k_3\tilde{u}) - m_{22}^0 vr + X_u^0 u + X_{u|u|}^0 u|u| - \eta_1 sat(\tilde{u},\sigma_1),$$

$$F_r = m_{33}^0(v_p\tilde{\alpha}\cos\psi_e - k_5\tilde{r} + \dot{r}_d) - (m_{11}^0 - m_{22}^0)uv + N_r^0 r + N_{r|r|}^0 r|r| - \eta_3 sat(\tilde{r},\sigma_2).$$

其中

$$sat(\tilde{u},\sigma_1) = \begin{cases} \dfrac{\tilde{u}}{\sigma_1}, & |\tilde{u}| \leqslant \sigma_1; \\ \mathrm{sgn}(\tilde{u}), & |\tilde{u}| > \sigma_1. \end{cases}$$

$$sat(\tilde{r},\sigma_2) = \begin{cases} \dfrac{\tilde{r}}{\sigma_2}, & |\tilde{r}| \leqslant \sigma_2; \\ \mathrm{sgn}(\tilde{r}), & |\tilde{r}| > \sigma_2. \end{cases}$$

其中 σ_1 和 σ_2 都是很小的正常数. 根据文献[12]，通过增大控制增益，或者减小 σ_1 和 σ_2，该控制律

能使跟踪误差收敛到零附近的一个可以任意减小的邻域,能够解决本文的位置跟踪问题.

3 数值仿真

根据文献[10,13],外界干扰系数为

$$\boldsymbol{T} = \mathrm{diag}(100 \quad 100 \quad 100),$$

$$\boldsymbol{\Gamma} = \mathrm{diag}(10 \quad 5 \quad 10),$$

$$\boldsymbol{b}_{\max} = [10 \quad 5 \quad 10]^{\mathrm{T}}.$$

AUV 系统的标称参数参见文献[8],假设最大的参数不确定

$$\max(|\boldsymbol{p}^*|) = 0.1|\boldsymbol{p}^0|.$$

为了论证本文提出的控制器的鲁棒性,数值仿真包括以下 3 个仿真模型:1)标称参数且无外界干扰的标称模型;2)$\boldsymbol{p}^* = -0.1\boldsymbol{p}^0$ 且有外界干扰的不确定模型 1;3)$\boldsymbol{p}^* = 0.1\boldsymbol{p}^0$ 且有外界干扰的不确定模型 2. 期望轨迹为

$$\begin{cases} x_d = 0.3t \text{ m}; \\ y_d = 30\sin(0.01t) \text{ m}. \end{cases}$$

在 AUV 实际应用中,其控制输入都是受限的,为了更好地检验本文设计的控制器的性能,本文假设轴向推力是非负的,控制输入的幅值都受限,具体为

$$0 \leqslant F_u \leqslant 100 \text{ N},$$

$$|F_r| \leqslant 100 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

在接下来对所有仿真模型的所有数值仿真中,采用相同的控制器参数和初始条件,具体如下:控制器参数 $k_1 = 10, k_2 = 3, k_3 = k_4 = 0.5, k_5 = 0.1, \sigma_1 = \sigma_2 = 1, \eta_1 = 20, \eta_3 = 20$;初始值 $x_e = 1$ m, $y_e = -1$ m, $\psi_0 = 0, u_0 = 0.01$ m/s, $v_0 = 0, r_0 = 0$.

总的仿真时间为 1 400 s,为了更好地观察相应变量的动态响应和稳态响应,x_e, y_e, ψ_e, F_u 和 F_r 仿真结果分成 1 400 s,前 50 s 和最后 1 350 s 三部分显示,具体仿真结果见图 1 ~3. 图 1 显示的是正弦期望轨迹和 3 个实际轨迹,从图中可以看到,对 3 个模型的仿真都有较好的宏观的跟踪性能;图 2 描述的是惯性坐标系下的跟踪误差 x_e 和 y_e,可看出对于 3 个不同的仿真模型,跟踪误差都快速收敛到零附近的一个很小的邻域内;图 3 描述了控制力 F_u 和控制力矩 F_r,从图中可看出,为了克服外界干扰的影响,控制力矩 F_r 变化较为剧烈,在无外界干扰时,F_u 和 F_r 的响应曲线十分光滑.

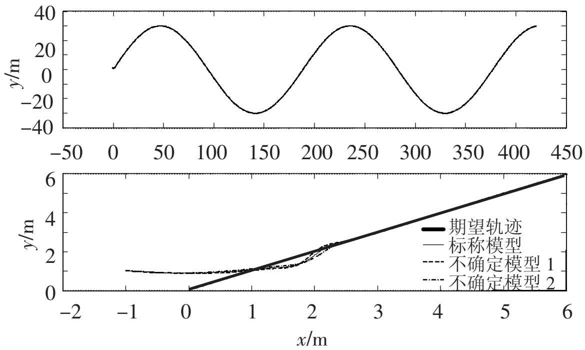

图 1 正弦期望轨迹和实际轨迹

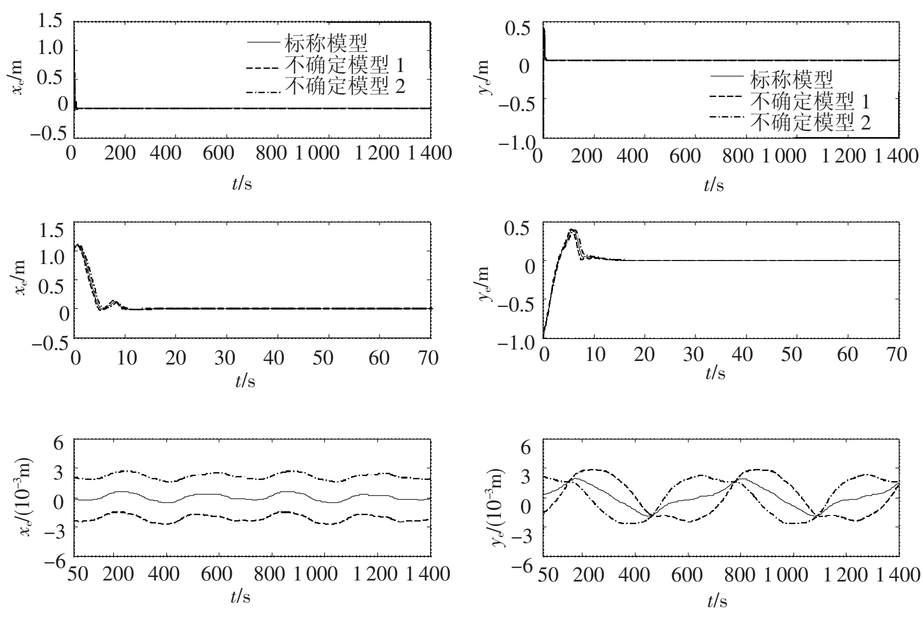

图 2 位置跟踪误差 x_e 和 y_e

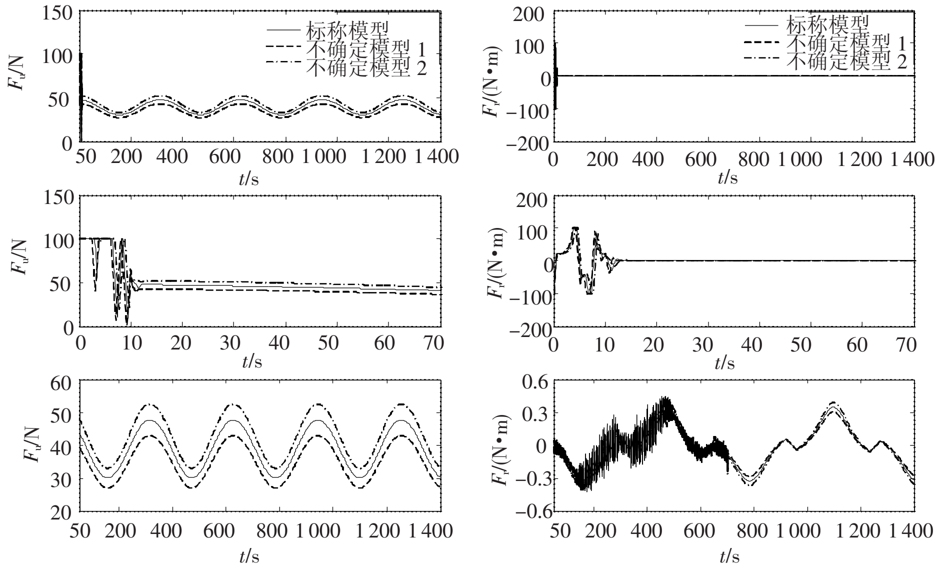

图 3　控制力 F_u 和控制力矩 F_r

4　结　论

本文基于李雅普诺夫稳定性理论,使用反步法,结合滑模变结构控制方法,针对具有较大不确定性和强非线性动力学的欠驱动 AUV 设计了一个鲁棒平面位置跟踪控制器;对具有参数不确定性和外界环境干扰的欠驱动 AUV 系统进行了数值仿真,结果表明该控制器能很好地实现欠驱动 AUV 的水平面位置跟踪控制,具有很强的鲁棒性.

参考文献:

[1] BOVIO E, CECCHI D, BARALLI F. Autonomous underwater vehicles for scientific and naval operations [J]. Annual Reviews in Control, 2006, 30(2): 117 - 130.

[2] 李涛,李晔. 一种有效的水下机器人并行定位标图方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008, 40(5): 818 - 822.

[3] STUTTER L, LIU H H, TILLMANC, *et al.* Navigation technologies for autonomous underwater vehicles [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, 2008, 38(4): 581 - 589.

[4] AGUIAR A P, HESPANHA J P. Position tracking of underactuated vehicles [C]//Proc of the Amer Control Conference. Denver, CO: [s. n.], 2003: 1988 - 1993.

[5] AGUIAR A P, PASCOAL A M. Dynamic positioning and way - point tracking of underactuated AUVs in the presence of ocean currents [J]. International Journal of Control, 2007, 80(7): 1092 - 1108.

[6] FOSSEN T I. Guidance and Control of Ocean vehicles [M]. New York: Wikey, 1994.

[7] NAIK M S, SINGH S N. State-dependent Riccati equation-based robust dive plane control of AUV with control constraints [J]. Ocean Engineering, 2007, 34(11 - 12): 1711 - 1723.

[8] REPOULIAS F, PAPADOPOULOS E. Planar trajectory planning and tracking control design for underactuated AUVs [J]. Ocean Engineering, 2007, 34(11 - 12): 1650 - 1667.

[9] REFSNES J E, SIREBSEB A J, PETTERSEN K Y. Model-based output feedback control of slender-body underactuated AUVs: Theory and experiments [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(5): 930 - 946.

[10] LORIA A, FOSSEN T I, PLANTELEY E. A separation principle for dynamic positioning of ships Theoretical and experimental results [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(2): 332 - 343.

[11] 胡跃明. 非线性控制系统理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

[12] KHALIL H K. Nonlinear Systems [M]. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.

[13] DO K D, PAN J, JIANG Z P. Robust and adaptive path following for underactuated autonomous underwater vehicles [J]. Ocean Engineering, 2004, 31(16): 1967 - 1997.

（编辑　张　宏）