第 26 卷 第 2 期
Vol. 26 No. 2

控 制 与 决 策
Control and Decision

2011 年 2 月
Feb. 2011

文章编号:1001-0920 (2011) 02-0289-04

基于迭代滑模增量反馈的欠驱动 AUV 地形跟踪控制

边信黔, 程相勤, 贾鹤鸣, 严浙平, 张利军

(哈尔滨工程大学 自动化学院，哈尔滨 150001)

摘　要: 为实现欠驱动自治水下机器人 (AUV) 在未知海流干扰作用下的地形跟踪控制, 提出一种基于非线性迭代滑模增量反馈的航迹跟踪控制器. 基于虚拟向导的方法, 建立 AUV 垂直面航迹跟踪误差方程. 采用迭代方法, 设计滑模增量反馈控制器, 无需对 AUV 模型参数不确定部分和海流干扰进行估计, 这样避免了 AUV 俯仰舵的抖振现象, 并且减小了输出反馈控制的稳态误差与超调问题. 仿真实验表明, 所设计的控制器对 AUV 系统的模型参数摄动及海流干扰变化不敏感, 所设计的参数易于调节.

关键词: 欠驱动自治水下机器人；地形跟踪；迭代滑模；增量反馈

中图分类号: TP24　　　　**文献标识码:** A

A bottom-following controller for underactuated AUV based on iterative sliding and increment feedback

BIAN Xin-qian, *CHENG Xiang-qin*, *JIA He-ming*, *YAN Zhe-ping*, *ZHANG Li-jun*

(College of Automation，Harbin Engineering University，Harbin 150001，China．Correspondent：CHENG Xiang-qin, E-mail：chengxiangqin1983@163.com)

Abstract: In order to realize the bottom-following control for underactuated autonomous underwater vehicle(AUV) under the ocean current, an increment feedback control method based on nonlinear iterative sliding mode control is presented for path following. The path following error equation in vertical plane is established based on virtual guide method. Then an increment feedback control law is designed based on iterative sliding modes without the uncertainty of AUV model and ocean current disturbances’ estimating. The problem of chattering by the hydroplane is circumvented, and the static error and overshoot by output feedback control are decreased. The results of simulation experiments show that the controller is robust against the systemic variations and disturbances, and the parameters are easy to be adjusted.

Key words: underactuate autonomous underwater vehicle；bottom-following；iterative sliding mode；increment feedback

1 引　言

自治水下机器人 (AUV) 在执行海底搜索、管道跟踪和光缆维护等任务时, 需要与海底定高进行航行, 称为海底地形跟踪[1]. 实现地形跟踪主要分为两个步骤: 航迹规划和航迹跟踪. 航迹规划是指 AUV 依据多波束声纳测得其与海底的高度距离, 拟合得满足任务要求和 AUV 性能约束的定高航迹曲线. 航迹跟踪是指设计航迹跟踪控制器来驱动 AUV 精确跟踪规划曲线.

目前, 国外已对 AUV 水平面航迹跟踪问题进行了研究[2-3]. 文献 [4-5] 将航迹规划曲线的运动特性与 AUV 动力学方程相结合, 基于 Lyapunov 稳定性理论和反步法设计航迹跟踪控制器, 实现了 AUV 水平面航迹规划和跟踪控制. 针对欠驱动 AUV 在定常海流干扰和不确定参数扰动的工况下, 文献 [6] 基于 Lyapunov 函数和积分反步法设计非线性自适应航迹跟踪控制器, 仿真结果表明该控制器可实现 AUV 在海流干扰和不确定参数扰动下的航迹跟踪控制.

上述文献多集中于欠驱动 AUV 水平面航迹跟踪控制问题, 未考虑 AUV 垂直面的潜浮运动, 且基于精确模型和反步法思想设计的航迹跟踪控制器, 无法解决欠驱动 AUV 模型参数的不确定性和未知外界环境的干扰问题, 难于保证系统的控制品质. 本文采用基于增量反馈的迭代滑模控制算法, 同时考虑了 AUV 系统的运动学方程和动力学方程. 首先针对系统的运动学方程, 依据虚拟控制向导的方法[7], 建

收稿日期: 2009-11-30；**修回日期:** 2010-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60704004).

作者简介: 边信黔(1941−), 男, 教授, 博士生导师, 从事潜器与水下机器人控制、船舶动力定位技术等研究；程相勤(1983−), 男, 博士生, 从事潜器与水下机器人控制技术的研究.

立 AUV 在弗雷涅-塞雷坐标系下的运动学方程; 然后基于系统的动力学方程和执行机构模型, 设计了一个非线性迭代滑模控制器, 与文献 [8] 相比能有效地补偿欠驱动 AUV 模型参数摄动和外界环境干扰的影响, 这样提高了欠驱动 AUV 地形跟踪的稳定性和鲁棒性.

2 AUV地形跟踪系统方程

2.1 问题描述

图 1 为 AUV 定高航迹跟踪示意图. $\{U\}$, $\{F\}$ 和 $\{B\}$ 分别代表固定坐标系、弗雷涅-塞雷坐标系和 AUV 随体坐标系; u, w, v_t 分别为 AUV 纵向速度、垂向速度和合成速度, v_t 满足 $v_t = \sqrt{(u^2+v^2)}$; θ_B 为 AUV 纵倾角; θ_F 为坐标系 $\{U\}$ 到坐标系 $\{F\}$ 的旋转角度; θ_W 为速度 v_t 与坐标系 $\{U\}$ X 轴的夹角; α 为 AUV 潜浮运动中的冲角; path_0 为多波束声纳探测生成的海底地形曲线; path_1 为满足欠驱动 AUV 任务要求和性能约束距离海底一定高度 h 的航迹规划曲线. 假设 P 点为 AUV 航迹规划曲线上具有一定速度的任意一点; AUV 质心 Q 点在坐标系 $\{U\}$ 和 $\{F\}$ 下分别表示为 $(\xi,\ \eta,\ \zeta)$ 和 $(x_F, 0, z_F)$; $\boldsymbol{p}$, $\boldsymbol{q}$ 分别为 P 点和 Q 点在坐标系 $\{U\}$ 下的向量; $\boldsymbol{d}$ 为 P 点到 Q 点的向量.

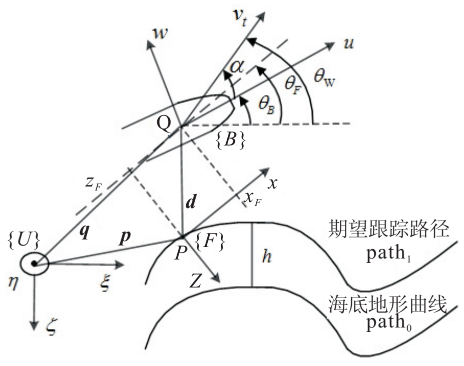

图 1 定高航迹跟踪示意图

AUV 的控制目标为: 设计基于非线性迭代滑模增量反馈控制器, 使得

$$\lim_{t\to\infty} x_F = 0,\ \lim_{t\to\infty} z_F = 0,\ \lim_{t\to\infty}(\theta_W - \theta_F) = 0. \quad (1)$$

进而实现 AUV 以高度 h 精确跟踪航迹规划路径 path_1.

2.2 AUV 运动学方程和动力学方程

AUV 在潜浮运动过程中, 总是存在一定的冲角 α, 如图 1 所示, $\alpha = \theta_W - \theta_B$. AUV 的运动学方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{\xi} = v_t\cos(\theta_W), \\ \dot{\zeta} = v_t\sin(\theta_W), \\ \dot{\theta}_W = q + \dot{\alpha}. \end{cases} \quad (2)$$

AUV 的地形跟踪由垂直面的航迹跟踪控制实现, 因此可忽略 AUV 水平面航向控制、横移和横摇运动的影响, 则

$$\begin{cases} m_{11}\dot{u} = m_{wq}wq + d_u + X_{\mathrm{prop}} + \omega_1, \\ m_{22}\dot{w} = m_{uq}uq + d_w + \omega_2, \\ m_{33}\dot{q} = d_q + M_{\mathrm{prop}} + \omega_3. \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} m_{11} = m - X'_{\dot{u}},\ m_{22} = m - Z'_{\dot{w}},\ m_{33} = I_y - M'_{\dot{q}}, \\ m_{wq} = -m + X'_{wq},\ m_{uq} = m + Z'_{uq}, \\ d_u = X'_{qq}q^2 + X'_{uu}u^2 + X'_{ww}w^2, \\ d_w = Z'_{q|q|}q|q| + Z'_{w|q|}w|q| + Z'_{w|w|}w|w| + Z'_{ww}w^2, \\ d_q = M'_{q|q|}q|q| + M'_{uq}uq + M'_{ww}w^2 + M'_{uw}uw + \\ \qquad M'_{u|w|}u|w| + M'_{w|q|}w|q| + M'_{w|w|}w|w|. \end{cases}$$

这里: m, $m_{(\cdot)}$ 为 AUV 质量和附加质量; I_y 为转动惯量; $X'_{(\cdot)}$, $M'_{(\cdot)}$, $Z'_{(\cdot)}$ 为水动力系数; X_{prop} 和 M_{prop} 分别为推进器推力和俯仰舵作用力矩; $\omega_{(\cdot)}$ 为外界海流干扰.

2.3 执行机构模型

欠驱动 AUV 采用艉部两个螺旋桨推进器实现其前向航速控制, 其转速方程为

$$\dot{N} = K_M(N_r - N)/T_M. \quad (4)$$

其中: K_M 为控制增益; N 为推进器转速, 右旋为正; N_r 为转速指令; T_M 为推进器时间常数.

舵机模型为

$$\dot{\delta} = K_E(\delta_r - \delta)/T_E. \quad (5)$$

其中: K_E 为舵机控制增益, δ 为舵角, δ_r 为舵角控制指令, T_E 为舵机时间常数.

2.4 地形跟踪误差方程

为了得出弗雷涅-塞雷坐标系 $\{F\}$ 下的 AUV 运动学方程, 需计算 Q 点在坐标系 $\{F\}$ 下的速度向量.

设 R 为坐标系 $\{U\}$ 到坐标系 $\{F\}$ 的转换矩阵, 即

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta_F & 0 & -\sin\theta_F \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_F & 0 & \cos\theta_F \end{bmatrix}. \quad (6)$$

令 $q_F = \dot{\theta}_F$, $\boldsymbol{q}_F = [0\ \ q_F\ \ 0]$ 为 P 点在坐标系 $\{F\}$ 下的位移, 依据曲线几何特性可得

$$\begin{cases} q_F = \dot{\theta}_F = c_c(\mu)\dot{\mu}, \\ \dot{c}_c(\mu) = g_c(\mu)\dot{\mu}, \end{cases} \quad (7)$$

其中 $c_c(\mu)$ 和 $g_c(\mu)$ 分别表示曲线曲率及其导数.

P 点在坐标系 $\{F\}$ 下的速度为

$$(\mathrm{d}\boldsymbol{q}/\mathrm{d}t)_F = [\dot{\mu}\ \ 0\ \ 0]^{\mathrm{T}}. \quad (8)$$

依据向量合成公式, Q 点在坐标系 $\{F\}$ 下的速度向量为

$$R\Big(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{q}}{\mathrm{d}t}\Big)_U = \Big(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}\Big)_F + \Big(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{d}}{\mathrm{d}t}\Big)_F + \boldsymbol{q}_F \times \boldsymbol{d}. \quad (9)$$

其中: $\boldsymbol{d}$ 为 P 点到 Q 点的向量, $\times$ 为向量叉积.

由向量 $\boldsymbol{q}, \boldsymbol{q}_F$ 和 $\boldsymbol{d}$ 的定义可得

$$\begin{cases} (\mathrm{d}\boldsymbol{q}/\mathrm{d}t)_U = [\dot{\xi}\ \ 0\ \ \dot{\zeta}]^{\mathrm{T}}, \\ (\mathrm{d}\boldsymbol{d}/\mathrm{d}t)_F = [\dot{x}_F\ \ 0\ \ \dot{z}_F]^{\mathrm{T}}, \\ \boldsymbol{q}_F \times \boldsymbol{d} = [c_c(\mu)\dot{\mu}x_F\ \ 0\ \ -c_c(\mu)\dot{\mu}z_F]^{\mathrm{T}}. \end{cases} \tag{10}$$

将上式中的各项分别代入式(9), 化简可得

$$\begin{cases} \dot{x}_F = \dot{\xi}\cos\theta_F - \dot{\zeta}\sin\theta_F - \dot{\mu}(1 + c_c(\mu)z_F), \\ \dot{z}_F = \dot{\xi}\sin\theta_F + \dot{\zeta}\cos\theta_F + c_c(\mu)\dot{\mu}x_F. \end{cases} \tag{11}$$

令 $\dot{\theta}_W = q + \dot{\alpha}$, $\theta = \theta_W - \theta_F$, 由式(2)和(11)可得AUV在坐标系$\{F\}$下的运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_F = -\dot{\mu}(1 + c_c(\mu)z_F) + v_t\cos\theta, \\ \dot{z}_F = c_c(\mu)\dot{\mu}x_F + v_t\sin\theta, \\ \dot{\theta} = q + \dot{\alpha} - c_c(\mu)\dot{\mu}. \end{cases} \tag{12}$$

上式为AUV在坐标系$\{U\}$下的误差运动学方程. 因此, AUV的地形跟踪控制问题即为设计推进器推力X_{prop}和舵角力矩M_{prop}, 使得

$$\lim_{t\to\infty} x_F = 0,\ \ \lim_{t\to\infty} z_F = 0,\ \ \lim_{t\to\infty} \theta = 0, \tag{13}$$

进而实现欠驱动AUV的地形跟踪控制.

3 AUV地形跟踪控制器设计

3.1 控制器设计

针对误差方程(12), 利用推进器来控制AUV纵向位移偏差x_F和航速u. 基于非线性滑模增量反馈的地形跟踪控制器可设计为

$$\begin{cases} s_1^1(x_F) = k_1^1\tanh(k_2^1 x_F) + \dot{x}_F, \\ s_2^1(s_1^1) = k_3^1\tanh(k_4^1 s_1^1) + \dot{s}_1^1, \\ \dot{N} = -k_5^1 s_2^1 - k_6^1\mathrm{sgn}(s_2^1). \end{cases} \tag{14}$$

其中: $k_i^1(i = 1,2,\cdots,6) \in \boldsymbol{R}^+$ 为设计参数, 令 $K^1 = [k_1^1,\ k_2^1,\ k_3^1,\ k_4^1,\ k_5^1,\ k_6^1]$. 由推进器工作特性(4)可得螺旋桨转速的输入指令为

$$N_r = N - T_M(k_5^1 s_2^1 + k_6^1\mathrm{sgn}(s_2^1)). \tag{15}$$

对于垂向路径偏差z_F和纵倾偏差θ,采用如下的迭代设计和增量反馈, 并利用AUV俯仰舵进行控制

$$\begin{cases} s_1^2(z_F) = k_1^2\tanh(k_2^2 z_F) + \dot{z}_F, \\ s_2^2(s_1^2,\theta) = \theta + k_3^2\int\tanh(s_1^2)\mathrm{d}t, \\ s_3^2(s_2^2) = k_4^2\tanh(s_2^2) + \dot{s}_2^2, \\ s_4^2(s_3^2) = k_5^2\tanh(s_3^2) + \dot{s}_3^2, \\ \dot{\delta} = -k_6^2 s_4^2 - k_7^2\mathrm{sgn}(s_4^2). \end{cases} \tag{16}$$

其中: $k_i^2(i = 1,2,\cdots,7) \in \boldsymbol{R}^+$ 为设计参数, 令 $K^2 = [k_1^2,\ k_2^2,\ k_3^2,\ k_4^2,\ k_5^2,\ k_6^2,\ k_7^2]$. 考虑舵机工作特性(5), 可得舵机输入指令为

$$\delta_r = \delta - T_E(k_6^2 s_4^2 + k_7^2\mathrm{sgn}(s_4^2)). \tag{17}$$

3.2 稳定性证明

定理 1 基于Lyapunov稳定性理论, 考虑AUV系统运动学方程(12)和基于非线性滑模增量反馈的地形跟踪控制器(14)~(17), AUV的纵向航迹跟踪误差x_F, 垂向航迹跟踪误差z_F和纵倾角跟踪误差θ是渐近稳定的.

证明 首先证明纵向航迹跟踪误差稳定性.

由式(14), 利用非线性滑模s_1^1和s_2^1的迭代设计思想, 对偏差x_F的控制即转化为对零阶系统s_2^1的镇定控制问题.

选取Lyapunov函数 $V_1 = \frac{1}{2}(s_2^1)^2$, 对其求导可得

$$\dot{V}_1 = s_2^1\dot{s}_2^1 = s_2^1\frac{\partial s_2^1}{\partial N}\dot{N}. \tag{18}$$

将s_2^1展开有

$$s_2^1 = k_3^1\tanh(k_4^1 s_1^1) + k_1^1 k_2^1\dot{x}_F/\cosh^2(k_2^1 x_F) + \ddot{x}_F. \tag{19}$$

忽略与转速N无关的变量, 上式两边对N求导可得

$$\frac{\partial s_2^1}{\partial N} = \frac{\partial \ddot{x}_F}{\partial N} = \frac{\partial}{\partial N}(\dot{v}_t\cos\theta). \tag{20}$$

由于AUV无法以倒车方式进行地形跟踪, 从而保证 $\dot{v}_t > 0$, 且 $\theta \in [-\pi/2,\ \pi/2]$, 则 $\dfrac{\partial s_2^1}{\partial N} \geqslant 0$.

由式(14)和(18)可得

$$s_2^1\dot{N} = -k_5^1(s_2^1)^2 - k_6^1|s_2^1| \leqslant 0, \tag{21}$$

进而求得$\dot{V}_1 = s_2^1\dot{s}_2^1 \leqslant 0$.

由式(15)可以看出, 由于双曲正切、余切函数严格有界(后者为下确界), 且系统可控[9], 一定存在 $k_i^1(i = 1,2,\cdots,6) \in \boldsymbol{R}^+$ 以及转速N_r, 满足$s_2^1 = 0$. 依据增量反馈定理[10]可知, 假设系统外界干扰为理想光滑情况, 增量反馈控制律(15)可令s_2^1稳定. 根据s_1^1和s_2^1的定义, 当$V_1 \geqslant 0$时$\dot{V}_1$为半负定的, 且由Barbalat引理[11]可知, 当$t \to \infty$时, $s_2^1 \to 0$, 则纵向航迹跟踪误差x_F的渐近稳定性得证.

下面证明垂向航迹跟踪误差和纵倾角跟踪误差的稳定性.

选取Lyapunov函数 $V_2 = \dfrac{1}{2}(s_4^2)^2$, 对其求导可得

$$\dot{V}_2 = s_4^2\dot{s}_4^2 = s_4^2\frac{\partial s_4^2}{\partial \delta}\dot{\delta}. \tag{22}$$

将s_4^2展开可得

$$\begin{aligned} &s_4^2 = \\ &k_3^2(k_1^2 k_2^2\dot{z}_F/(\cosh(k_2^2 z_F))^2 + \ddot{z}_F)/(\cosh(s_1^2))^2 + \\ &k_4^2(q + k_3^2\tanh(s_1^2))/(\cosh(s_2^2))^2 + \\ &k_5^2\tanh(s_3^2) + \dot{q} + \ddot{\alpha} - c_c(\mu)\dot{\mu}^2 - c_c(\mu)\ddot{\mu}. \end{aligned} \tag{23}$$

将式(23)两边对δ求导可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial s_4^2}{\partial \delta} =& k_3^2\frac{\partial}{\partial \delta}((c_c(\mu)\dot{\mu}x_F + v_t\sin\theta)/ \\ &(\cosh(s_1^2))^2) + \frac{\partial M_{\mathrm{prop}}}{\partial \delta}. \end{aligned} \tag{24}$$

由三角函数和双曲三角函数的有界性可知, 存在k_3^2满足$\partial s_4^2/\partial\delta > 0$.

由式(16)和(22)可得

$$s_4^2\dot{\delta} = -k_6^2(s_4^2)^2 - k_7^2|s_4^2| \leqslant 0. \tag{25}$$

从而解得 $\dot{V}_2 = s_4^2\dot{s}_4^2 \leqslant 0$.

依据 $\dot{\delta} = -k_6^2 s_4^2 - k_7^2\mathrm{sgn}(s_4^2)$, 而且双曲正切、余切函数严格有界(后者为下确界), 一定存在 $k_i^2(i = 1, 2, \cdots, 7) \in \boldsymbol{R}^+$ 及舵角 δ_r, 满足 $s_4^2 = 0$. 依据增量反馈定理[10], 在系统外界干扰足够光滑的情况下, 增量反馈控制律(17)可令 s_4^2 稳定. 根据 s_1^2, s_2^2, s_3^2 和 s_4^2 的定义, 当 $V_2 \geqslant 0$ 时 $\dot{V}_2$ 为半负定的, 由 Barbalat 引理[11]可知, 当 $t \to \infty$ 时, $s_4^2 \to 0$, 则垂向航迹跟踪误差 z_F 和纵倾角跟踪误差 θ 的渐近稳定性得证. □

4 仿真结果与分析

为了验证控制器的控制性能和工程实用性, 本节基于 AUV 虚拟仿真平台, 针对不同海流干扰下的地形跟踪控制进行了仿真实验和对比分析.

设定声纳探测地形所拟合的航迹跟踪曲线为

$$\zeta = 30\cos(\xi\pi/200). \tag{26}$$

考虑外界海流干扰对欠驱动 AUV 的影响, 设海流流速为

$$u_{\mathrm{cur}} = \begin{cases} 1.00\mathrm{m/s},\ 5 < z \leqslant 25; \\ 0.75\mathrm{m/s},\ 25 < z \leqslant 45; \\ 0.50\mathrm{m/s},\ 45 < z \leqslant 65; \end{cases} \tag{27}$$

流向为 0° (与 X 轴负半轴夹角). 设 AUV 的初始位置为 $(x,\ y,\ z) = (0,\ 0,\ 5)$ m, 初始姿态角为 $(\varphi,\ \theta,\ \phi) = (0°, 0°, 0°)$, 初始航速为 $u = 0$ m/s, 期望速度为 $u_d = 2$ m/s. 选取控制增益为

$$\begin{cases} K^1 = [1.2,\ 0.06,\ 0.06,\ 0.03,\ 0.03,\ 135], \\ K^2 = [0.8,\ 0.4,\ 0.4,\ 0.7,\ 0.7,\ 98.5,\ 0.05]. \end{cases} \tag{28}$$

为了评价本文所设计控制器的性能, 将 PID 控制器对 AUV 航迹跟踪的仿真数据加以比对, 如图 2 和图 3 所示. 图 2 中, 实线代表期望航迹, 虚线代表迭代滑模航迹跟踪, 点线代表 PID 航迹跟踪.

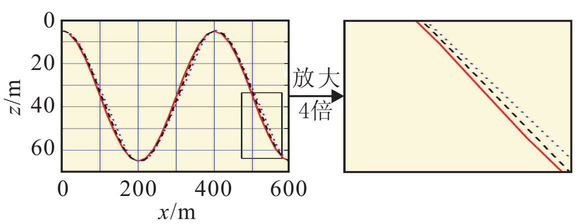

图 2 纵平面航迹跟踪曲线

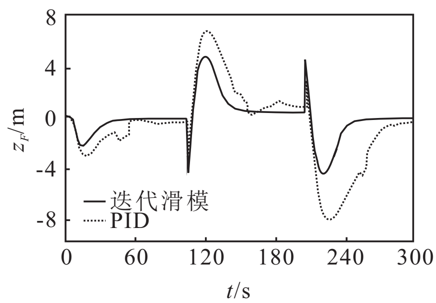

图 3 高度跟踪误差曲线

由图 2 和图 3 可知, 两种控制器均可实现 AUV 在不同海流干扰下的航迹精确跟踪, 与传统 PID 控制器相比, 基于增量反馈的迭代滑模控制器的航迹跟踪偏差有明显改善.

图 4 为航速误差曲线. 由图 4 可知, 基于增量反馈的迭代滑模控制器能较好地抑制海流的干扰, 使 AUV 航速趋于稳定. 图 5 为俯仰舵响应曲线. 由图 5 可知, 基于迭代滑模设计的控制器的稳定性和鲁棒性明显优于 PID 控制器, 并且较好地解决了欠驱动 AUV 俯仰舵的抖振问题, 使得舵角趋于稳定.

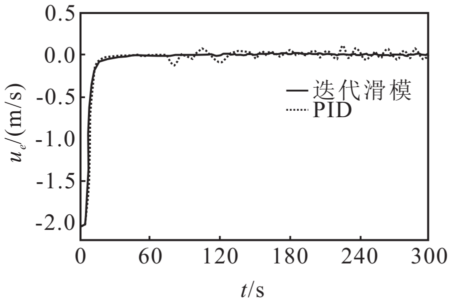

图 4 航速误差曲线

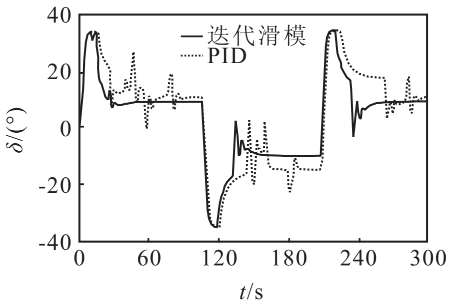

图 5 俯仰舵舵角响应曲线

5 结 论

本文通过对欠驱动 AUV 航迹曲线跟踪的研究, 基于虚拟向导的思想, 建立了 AUV 航迹跟踪误差方程, 实现了航迹曲线特性与 AUV 运动方程的结合, 为实现光滑曲线的跟踪奠定了理论基础. 同时, 考虑 AUV 执行机构模型和动力学方程, 设计了基于增量反馈的迭代滑模控制器, 此控制器不仅能较好地抑制海流的干扰, 而且能避免 AUV 俯仰舵控制的抖振现象以及减小航速和纵倾角反馈控制的稳态误差与超调问题. 基于迭代滑模增量反馈的航迹跟踪控制器实现了欠驱动 AUV 在变海流干扰作用下的定高地形跟踪控制.

参考文献(References)

[1] 桂志辉, 严卫生, 高剑. 虚拟现实在AUV地形跟踪控制研究中的应用[J]. 鱼雷技术, 2008, 16(4): 24-26.
(Gui Z H, Yan W S, Gao J. Application of virtual reality to bottom tracking of autonomous underwater vehicle[J]. Torpedo Technology, 2008, 16(4): 24-26.)

(下转第296页)