

开架水下机器人生物启发离散轨迹跟踪控制

孙 兵, 朱大奇[†], 邓志刚

(上海海事大学 水下机器人与智能系统实验室, 上海 201306)

摘要: 针对水下机器人常规反步跟踪控制的速度跳变问题, 提出了基于生物启发模型的反步滑模混合控制方法. 应用生物启发模型的平滑、有界输出特性, 产生渐变的参考跟踪速度, 克服了速度跳变问题, 也满足了推进器推力约束. 同时自适应滑模控制算法产生跟踪控制律, 对于水下干扰及模型不确定影响具有鲁棒性, 能够实现水下机器人稳定、准确的轨迹跟踪控制. 所提方法的稳定性通过Lyapunov理论进行了证明, 并将该方法对FALCON开架水下机器人进行水平面离散轨迹跟踪控制的仿真研究, 实验结果表明了提出控制方法的有效性.

关键词: 反步控制; 滑模控制; 生物启发模型; 轨迹跟踪; 水下机器人

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Bio-inspired discrete trajectory-tracking control for open-frame underwater vehicles

SUN Bing, ZHU Da-qi[†], DENG Zhi-gang

(Laboratory of Underwater Vehicles and Intelligent Systems, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To deal with the speed-jump in the conventional backstepping tracking control for underwater vehicles, we propose a hybrid control combining the backstepping and the sliding-mode control based on the biological inspired model. Because of the smoothness and boundedness of the output from the bio-inspired model, this control produces a gradually varying reference tracking-speed for the underwater vehicles instead of a jumping reference tracking-speed which cannot be followed by the propeller thrust of underwater vehicles. An adaptive sliding-mode control algorithm is applied to generate the tracking control law which ensures the robust performance in the presence of underwater disturbance and model uncertainties to achieve the stable and accurate trajectory-tracking. The stability of the proposed method can be proved by Lyapunov theory. Finally, this control has been applied to simulate the horizontal discrete trajectory tracking-control on FALCON open-frame underwater vehicle. Experiment results validate the effectiveness of the proposed control method.

Key words: backstepping control; sliding-mode control; bio-inspired model; trajectory-tracking; underwater vehicles

1 引言(Introduction)

作为人类探索海洋的助手, 水下机器人在海洋科学调查、水下搜救、海底管道跟踪、海底光缆维护, 以及国防军事领域得到越来越广泛的应用, 轨迹跟踪控制是水下机器人应用研究的核心内容之一. 由于水下环境的复杂性, 水下机器人的强耦合、非线性特性, 使得水下机器人的轨迹跟踪控制研究成为一个十分具有挑战性的研究领域. 目前相关研究成果报道还不多^[1-3], 常用的水下机器人轨迹跟踪控制方法主要有PID控制方法、滑模控制方法、反步控制方法等.

工业现场最常见的PID控制方法常用于早期的水下机器人轨迹跟踪中^[4-5], PID控制在控制领域有

广泛的应用, 其控制效果依赖于PID参数, 但是其参数整定又依赖于被控对象的模型, 由于6自由度水下机器人动力学模型存在非线性、强耦合特性, 在实现跟踪控制前, 需要对动力学模型进行适当简化, 使得这种依赖于模型的PID传统轨迹跟踪控制策略, 在许多情况下无法满足水下机器人轨迹跟踪控制需要. 滑模控制(sliding mode control, SMC)对控制对象模型不确定性和外界干扰具有很强的鲁棒性, 因此, 滑模控制技术在水下机器人控制中得到广泛关注^[6-9]. 它不仅应用于水下机器人的状态控制^[7], 而且在水下机器人轨迹跟踪控制中有较好的表现^[8-9]. 滑模控制虽然优点明显, 但也有一个重要的缺陷, 那就是控制“抖动”的存在.

收稿日期: 2012-09-17; 收修改稿日期: 2012-12-11.

[†]通信作者. Tel.: +86 021-38282856.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075257, 51279098); 上海市科委创新行动计划资助项目(10550502700); 上海市优秀学术带头人计划资助项目(11XD1402500).

水下机器人另一种常见的轨迹跟踪控制方法是反步控制(backstepping control). 反步控制计算简单、系统稳定性可以得到严格证明, 首先广泛应用于地面移动机器人的轨迹跟踪控制领域^[10-13], 近些年, 反步控制被进一步应用到水下机器人轨迹跟踪控制中^[14-17], 但大多数是将反步控制与其他方法集成使用. 如Lionel L等^[14]提出的基于反步控制与Lyapunov函数的水下机器人非线性路径跟踪控制方法, Jon E R等^[15]将反步控制与模型反馈控制结合应用于水下机器人控制之中; 高剑等^[16]将级联系统理论与反步控制结合研究了水下机器人水平面轨迹跟踪策略; Filoktimon R等^[17]将反步控制与水下机器人路径规划进行集成, 提出一个完整的水下机器人水下运动控制模型; Erfu Y等^[18-19]则进一步将反步控制方法应用到多水下机器人的轨迹跟踪与队形阵列控制之中. 从上面的研究报告来看, 反步控制方法虽然在机器人轨迹跟踪控制中应用广泛, 但它也存在重要不足, 即在跟踪误差突变时, 特别是离散轨迹情形, 存在机器人跟踪速度跳变问题, 对此水下机器人需要具备超大数值的加速度和驱动力(力矩), 有时甚至是无穷大, 这在实际机器人控制中是无法实现的.

本文针对反步跟踪控制算法产生速度跳变, 从而引起水下机器人跟踪加速度和驱动力(力矩)饱和问题, 将反步方法与滑模控制进行结合, 同时加入生物启发模型进行改进, 提出了一种基于生物启发模型的反步滑模混合跟踪控制方法. 滑模控制部分加入自适应项来替换传统切换项消除控制抖动, 反步方法部分加入生物启发模型平滑速度跳变, 解决水下机器人推进器的推力超限问题. 通过跟踪典型离散轨迹的对比仿真实验, 说明了所提方法的有效性.

2 运动学与动力学建模(Kinematic and dynamic modelling)

2.1 运动学建模(Kinematic model)

水下机器人运动学方程以向量形式表示:

$$\dot{\eta} = J(\eta)q. \quad (1)$$

在水平面的运动控制中, 涉及到3个自由度, 可控的位姿量(惯性坐标系)与速度量(载体坐标系)分别为 $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ 和 $q = [u \ v \ r]^T$, 如图1所示. 将6自由度的运动学方程 $\dot{\eta} = J(\eta)q$ 对应到水平

面3自由度的运动, 简化后得到如下运动学方程^[20]:

$$\begin{cases} \dot{x} = \cos \psi \cdot u - \sin \psi \cdot v, \\ \dot{y} = \sin \psi \cdot u + \cos \psi \cdot v, \\ \dot{\psi} = r. \end{cases} \quad (2)$$

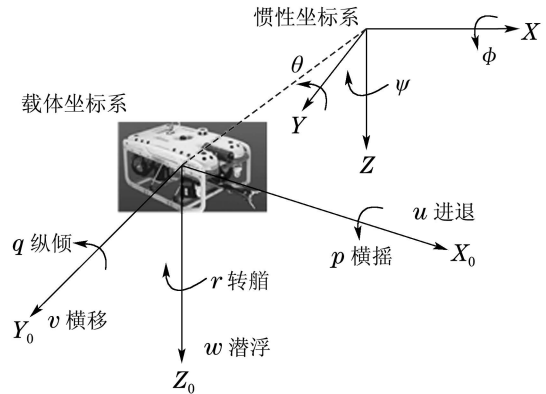


图 1 水下机器人载体坐标系和惯性坐标系

Fig. 1 Body-fixed and inertial frame of underwater vehicles

2.2 动力学建模(Dynamic model)

水下机器人6自由度的动力学方程表述为^[9]

$$M\dot{q} + C(\dot{q})q + D(\dot{q})q + g(\eta) = \tau. \quad (3)$$

6自由度的完整动力学方程通常根据应用需要进行简化解耦处理, 分别在水平面和垂直面进行运动控制, 对水平面运动情况, 本文动力学方程简化如下:

$$\begin{cases} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} + X_u u + X_{uu} u|u| = \tau_x, \\ (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + Y_v v + Y_{vv} v|v| = \tau_y, \\ (I_z - N_r)\dot{r} + N_r r + N_{rr} r|r| = \tau_N, \end{cases} \quad (4)$$

其中: m, I_z 分别是水下机器人的质量与转动惯量, $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, N_r$ 分别是 u, v, r 方向的线性阻力项, X_{uu}, Y_{vv}, N_{rr} 分别是 u, v, r 方向的二次阻力项, τ_x, τ_y, τ_N 是作用于水下机器人 u, v, r 方向的力与力矩.

3 生物启发的反步滑模混合控制(Bio-inspired backstepping-SMC hybrid control)

考虑将运动学与动力学控制相结合, 通过设计一种基于生物启发的水下机器人反步滑模混合控制算法, 在解决了滑模控制抖振性问题的同时解决水下机器人推力饱和限制问题. 所提混合控制系统基本结构框图如图2所示. 混合控制算法包括了两个部分: 1) 通过位置与角度误差构造运动学控制器; 2) 通过速度误差项构造滑模动力学控制器. 两者结合完成了鲁棒跟踪控制.

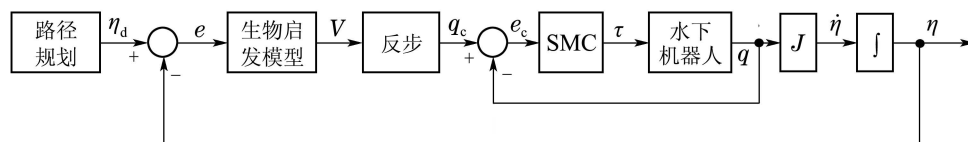


图 2 混合控制系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of hybrid control system

3.1 运动学控制器: 常规反步控制器(Kinematic controller: conventional backstepping controller)

反步控制方法因为其简单实用的控制性能在移动机器人的设计中是一种常用的方法, 本文将其应用到水下机器人水平面轨迹跟踪控制之中, 对应的控制律设计也是基于水平面的。

对于水平面控制来说, 参考轨迹的期望状态定义为 $\eta_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]^T$, $q_d = [u_d \ v_d \ r_d]^T$, 其中: $q_d = [u_d \ v_d \ r_d]^T$ 是载体坐标系下的期望速度, $\eta_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]^T$ 是水下机器人惯性坐标系下的期望状态, (x_d, y_d) 是惯性坐标系下的期望路径, ψ_d 是水下机器人沿X轴逆时针方向转过的角度值。水下机器人实际的状态定义为 $\eta = [x \ y \ \psi]^T$, 轨迹跟踪控制器的目标是通过控制速度和角速度 $q_c = [u_c \ v_c \ r_c]^T$ 使水下机器人跟踪上期望路径, 最终使期望状态与实际状态间的误差 $e = [e_x \ e_y \ e_\psi]^T$ 收敛至零。这里 $e = \eta - \eta_d = [e_x \ e_y \ e_\psi]^T$ 是惯性坐标下的跟踪误差。

不考虑图2中的生物启发模型, 根据李雅普诺夫稳定理论可以构造出水下机器人的反步控制器控制速度为

$$q_c = \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ r_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k(e_x \cos \psi + e_y \sin \psi) + (u_d \cos e_\psi - v_d \sin e_\psi) \\ k(-e_x \sin \psi + e_y \cos \psi) + (u_d \sin e_\psi + v_d \cos e_\psi) \\ r_d + k_\psi e_\psi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 k, k_ψ 是正常数。

3.2 生物启发的反步控制器设计(Bio-inspired backstepping controller design)

在上一节设计的运动学反步控制律设计中, 式(5)的速度控制律, 在离散轨迹的拐点, 跟踪误差会产生突变, 其控制律的输出会发生速度跳变现象。对水下机器人来说, 在速度跳变点需要提供超大的加速度, 对应的作用力或力矩就会很大, 这往往会超出推进器本身所能达到的最大数值, 即存在水下机器人控制推力无法满足轨迹跟踪需要。

为了解决常规反步控制面对的速度跳变和推力限制问题, 此处将生物启发神经动力学模型加入到反步控制器设计中, 生成水下机器人的虚拟速度。由于生物启发神经动力学模型的有界限流(shunting)特性, 当输入信号突然变化时, 生物启发

模型的输出依然限制在有限区间且线性平滑。基于这样的优点, 在反步控制器中加入生物启发模型, 控制器的性能可以得到明显的改善, 可以较好解决水下机器人轨迹跟踪控制的速度跳变问题, 这在地面移动机器人轨迹跟踪控制中已得到较好应用。

3.2.1 生物启发模型(Bio-inspired model)

生物启发模型首先由Grossberg^[21]提出, 来源于Hodgkin和Huxley^[22]针对生物薄膜使用电路原理提出的膜模型。它可以被认为是一个单体的实时自适应行为。薄膜上的膜电压可以用下列的膜模型状态式来描述:

$$C_m \frac{dV_m}{dt} = -(E_p + V_m)g_p + (E_{Na} - V_m)g_{Na} - (E_k + V_m)g_k, \quad (6)$$

其中: C_m 表示为膜电容, E_k, E_{Na} 和 E_p 表示为薄膜中钾离子、钠离子和无源漏电流的能斯特电势, g_k, g_{Na} 和 g_p 分别是钾离子、钠离子和无源通道的电导, 它表示了一个随输入信号时变的被动通道。

将式(6)做如下简化: $C_m = 1, V = E_p + V_m, A = g_p, B = E_{Na} + E_p, D = E_k - E_p, S^+ = g_{Na}$ 和 $S^- = g_k$, 获得如下的生物启发模型:

$$\dot{V} = -AV + (B - V)S^+(t) - (D + V)S^-(t), \quad (7)$$

其中 V 表示神经元的神经活性(膜电位)。参数 A, B 和 D 分别表示被动衰减率、神经激励的上下限。变量 S^+ 和 S^- 分别表示激励输入与抑制输入。单个神经元的分流动态可以用这个式来表达。神经元的膜电压被限制在 $[-D, B]$ 之间并有一个自动的增益控制。所以本文可以推导出以下的生物启发模型:

$$\dot{V}_i = -AV_i + (B - V_i)f(e_i) - (D + V_i)g(e_i), \quad (8)$$

其中: $f(e_i) = \max(e_i, 0), g(e_i) = \max(-e_i, 0)$ 。对于一个适当选择的输入信号来说, 可以获得各种不同的期望结构特性, 如竞争、遗忘与上下限都能从这个模型中获得。生物启发模型是一种连续的微分方程。系统输出 V 对于任何激励与抑制信号能够保证在 $[-D, B]$ 范围内, 输出信号连续而平滑。在后面章节的水下机器人的跟踪控制中显示了生物启发模型的稳定性保证与计算高效等诸多优势。

3.2.2 生物启发的反步控制器(Bio-inspired backstepping controller)

基于生物启发模型, 考虑将误差输入到生物启发模型中, 将生物启发模型的输出替代原来的输入误差, 由反步速度控制律式(5)得到新的反步控

制律:

$$q_c = \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ r_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k(V_x \cos \psi + V_y \sin \psi) + (u_d \cos e_\psi - v_d \sin e_\psi) \\ k(-V_x \sin \psi + V_y \cos \psi) + (u_d \sin e_\psi + v_d \cos e_\psi) \\ r_d + k_\psi V_\psi \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中: k, k_ψ 参数的设置与式(5)相同, $V_i (i = x, y, \psi)$ 是惯性坐标系下的跟踪误差作用于生物启发模型后的输出. 基于生物启发模型的特性, 即使输入信号有突然的跳变, 输出依然被限制在一个指定的范围内, 平滑而没有尖锐的跳变现象. 因此所提出的控制器性能将会有显著的改善, 后面的仿真实验也验证了所提算法的正确性.

本节的运动学模型, 假设水下机器人能产生所需的速度大小即 $q = q_c$, 则系统稳定, 可以跟踪上期望轨迹, 证明如下.

证 对运动学控制系统构造Lyapunov函数

$$\Gamma_O = \frac{1}{2}[(e_x^2 + e_y^2 + e_\psi^2) + \frac{k}{B}(V_x^2 + V_y^2) + \frac{k_\psi}{B}V_\psi^2]. \quad (10)$$

令

$$\Gamma_{O1} = \frac{1}{2}[(e_x^2 + e_y^2) + \frac{k}{B}(V_x^2 + V_y^2)],$$

$$\Gamma_{O2} = \frac{1}{2}(e_\psi^2 + \frac{k_\psi}{B}V_\psi^2),$$

对上述两式分别求导得

$$\dot{\Gamma}_{O1} = e_x \dot{e}_x + e_y \dot{e}_y + \frac{k}{B}(V_x \dot{V}_x + V_y \dot{V}_y),$$

将式(2)(9)代入上式前两项, 整理得到

$$e_x \dot{e}_x + e_y \dot{e}_y = e_x(\dot{x}_d - \dot{x}) + e_y(\dot{y}_d - \dot{y}) = -ke_x V_x - ke_y V_y.$$

令 $B = D$, 则可以整理得到

$$\begin{aligned} \frac{k}{B}(V_x \dot{V}_x + V_y \dot{V}_y) &= \\ \frac{k}{B}[-A - f(e_x) - g(e_x)]V_x^2 &+ k[f(e_y) - g(e_y)]V_x + \\ \frac{k}{B}[-A - f(e_y) - g(e_y)]V_y^2 &+ k[f(e_y) - g(e_y)]V_y, \\ \dot{\Gamma}_{O1} &= \frac{k}{B}(V_x \dot{V}_x + V_y \dot{V}_y) - ke_x V_x - ke_y V_y = \\ \frac{k}{B}[-A - f(e_x) - g(e_x)]V_x^2 &+ \\ k[f(e_x) - g(e_x) - e_x]V_x &+ \\ \frac{k}{B}[-A - f(e_y) - g(e_y)]V_y^2 &+ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &k[f(e_y) - g(e_y) - e_y]V_y, \\ \dot{\Gamma}_{O2} &= e_\psi \dot{e}_\psi + \frac{k_\psi}{B}V_\psi \dot{V}_\psi = \\ e_\psi(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) + \frac{k_\psi}{B}V_\psi \dot{V}_\psi &= \\ e_\psi(r_d - r_c) + \frac{k_\psi}{B}V_\psi \dot{V}_\psi &= \\ -k_\psi e_\psi V_\psi + \frac{k_\psi}{B}[-A - f(e_\psi) - g(e_\psi)]V_\psi^2 &+ \\ k_\psi[f(e_\psi) - g(e_\psi)]V_\psi. \end{aligned}$$

根据 $f(e_i)$ 与 $g(e_i)$ 的定义 ($i = x, y, \psi$): 如果 $e_i \geq 0$, 则 $f(e_i) = e_i, g(e_i) = 0, A + f(e_i) + g(e_i) = A + e_i > 0, f(e_i) - g(e_i) - e_i = e_i - e_i = 0$. 如果 $e_i < 0$, 则 $f(e_i) = 0, g(e_i) = -e_i, A + f(e_i) + g(e_i) = A - e_i > 0, f(e_i) - g(e_i) - e_i = e_i - e_i = 0$. 因为 $A + f(e_i) + g(e_i)$ 始终为正且 $f(e_i) - g(e_i) - e_i = 0$, 很容易能推断出 $\dot{\Gamma}_{O1} \leq 0, \dot{\Gamma}_{O2} \leq 0$, 进而 $\dot{\Gamma}_O \leq 0$, 系统稳定. 证毕.

3.3 动力学控制器: 滑模动力学控制器(Dynamic controller: sliding mode controller)

对于一个实际跟踪控制过程而言, 需要考虑动力学模型进而计算出力与力矩使得 $q \rightarrow q_c$, 由于建模不确定与外界干扰等因素的存在, 难以保证在初始阶段即达到稳定的速度跟踪, 这里考虑设计一个鲁棒的滑模动力学控制器进行速度控制, 通过速度误差生成控制信号 τ 作用于水下机器人上产生实际的进退、横移、转艏运动

$$q = [u \ v \ r]^T$$

(仿真实验中作用在简化的动力学模型(4)上), 达到稳定的速度跟踪 $q = q_c$, 最终达到轨迹跟踪的目的.

这里设定 q_c 是期望的速度值, 定义虚拟速度跟踪误差:

$$e_c = q_c - q. \quad (11)$$

标准滑模控制的设计分为两个步骤: 1) 设计滑模面; 2) 设计控制律. 这里选择设计滑模面^[10]:

$$s = \dot{e}_c + 2\Lambda e_c + \Lambda^2 \int e_c. \quad (12)$$

求导式(12), 则

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{e}_c + 2\Lambda \dot{e}_c + \Lambda^2 e_c = \\ \ddot{e}_c + 2\Lambda(\dot{q}_c - \dot{q}) + \Lambda^2 e_c. \end{aligned} \quad (13)$$

当系统运行于滑模面的时候, 式(13)等于零, 即

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{e}_c + 2\Lambda \dot{e}_c + \Lambda^2 e_c = \\ \ddot{e}_c + 2\Lambda(\dot{q}_c - \dot{q}) + \Lambda^2 e_c &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

将式(3)代入式(14)得

$$\ddot{e}_c + 2\Lambda(\dot{q}_c - M^{-1}(\tau - Cq - Dq - g)) + \Lambda^2 e_c = 0. \quad (15)$$

考虑到水下机器人的系统动力学是不完全已知的,将水下机器人的动力学方程等效为估计动力学项 $\hat{\tau}$ 与未知动力学项 $\tilde{\tau}$,即

$$\tau = \hat{\tau} + \tilde{\tau}, \quad (16)$$

其中: $\hat{\tau} = \hat{M}\dot{q} + \hat{C}q + \hat{D}q + \hat{g}$, \hat{M} , \hat{C} , \hat{D} , \hat{g} 是 M , C , D , g 的估计项, $\tilde{\tau} = \tilde{M}\dot{q} + \tilde{C}q + \tilde{D}q + \tilde{g} + w$, \tilde{M} , \tilde{C} , \tilde{D} , \tilde{g} 是 M , C , D , g 的未知项, w 是未知的扰动量. 因此等价控制律可以推导为

$$\tau_{eq} = \hat{M}(\dot{q}_c + \frac{\ddot{e}_c}{2\Lambda} + \frac{\Lambda}{2}e_c) + \hat{C}q + \hat{D}q + \hat{g}. \quad (17)$$

考虑到计算式(17)中 \ddot{e}_c 比较复杂,这里加入一个误差加速度的反馈控制方法:

$$\ddot{e}_c = -k_c \dot{e}_c. \quad (18)$$

传统的滑模控制可以设计为

$$\tau = \tau_{eq} + k \text{sgn } s. \quad (19)$$

为了消除由不连续切换项带来的抖振问题,自适应控制项加入到控制律中去取代切换项:

$$\tau_{ad} = \tilde{\tau}_{est} + (K + \frac{\hat{C}}{2\Lambda})s, \quad (20)$$

其中 $\tilde{\tau}_{est}$ 是用来估计未知量 $\tilde{\tau}$ 的自适应变化项. 未知的不确定量 $\tilde{\tau}_{est}$ 满足以下更新率:

$$\dot{\tilde{\tau}}_{est} = \Gamma s. \quad (21)$$

完整的控制律可以表述为

$$\tau = \tau_{eq} + \tau_{ad} = \tau_{eq} + \tilde{\tau}_{est} + (K + \frac{\hat{C}}{2\Lambda})s. \quad (22)$$

3.4 稳定性分析(Stability analysis)

考虑到本文所提的混合控制方法包含两个部分: 运动学控制器与动力学控制器, 第3.2节已经给出运动学控制器稳定性的证明, 这里给出动力学控制器的稳定性分析进而推导整个系统的稳定性.

针对动力学控制系统构造如下的Lyapunov函数:

$$\Gamma_I = \frac{1}{4\Lambda} s^T M s + \frac{1}{2} \theta^T \Gamma^{-1} \theta. \quad (23)$$

定义

$$q_r = q_c + \frac{\dot{e} + \Lambda^2 \int e}{2\Lambda}, \quad \dot{q}_r = \dot{q}_c + \frac{\ddot{e} + \Lambda^2 e}{2\Lambda},$$

$$\theta = \tilde{\tau}_r - \tilde{\tau}_{est},$$

$$\tilde{\tau}_r = \tilde{M}\dot{q}_r + \tilde{C}q_r + \tilde{D}q + \tilde{g},$$

$$\dot{\Gamma}_I = \frac{1}{4\Lambda} (s^T M s + \dot{s}^T M s + s^T M \dot{s}) + \dot{\theta}^T \Gamma^{-1} \theta =$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4\Lambda} [s^T (M - 2C)s + s^T (2M\dot{s} + 2Cs)] + \dot{\theta}^T \Gamma^{-1} \theta = \\ & \frac{1}{2\Lambda} s^T (M\dot{s} + Cs) + \dot{\theta}^T \Gamma^{-1} \theta = \\ & s^T (M\dot{q}_r + Cq_r + Dq + g - \tau) + \dot{\theta}^T \Gamma^{-1} \theta. \end{aligned}$$

已知 $\dot{M} - 2C$ 是反对称矩阵, $s^T (\dot{M} - 2C)s = 0$. 将式(22)代入上式, 则

$$\begin{aligned} \dot{\Gamma}_I &= s^T [\tilde{M}\dot{q}_r + \tilde{C}q_r + \tilde{D}q + \tilde{g} - \\ & \tilde{\tau}_{est} - Ks] + \dot{\theta}^T \Gamma^{-1} \theta = \\ & s^T (\theta - Ks) + \dot{\theta}^T \Gamma^{-1} \theta = \\ & s^T (\theta - Ks) + (\dot{\tilde{\tau}}_r - \dot{\tilde{\tau}}_{est})^T \Gamma^{-1} \theta = \\ & -s^T Ks + \dot{\tilde{\tau}}_r^T \Gamma^{-1} \theta. \end{aligned}$$

这里给出两个假设:

- 1) 不确定动力学项 $\tilde{\tau}_r$ 有界;
- 2) 满足如下的不等式: $s^T Ks \geq |\dot{\tilde{\tau}}_r^T \Gamma^{-1} \theta|$.

通常, 水下机器人运行速度较慢, 所以水下机器人的未知动力学部分也是比较小且有界的. 自适应项的加入能够弥补未知误差项 θ 并收敛至零. 在最差的情况下, 通过增大 K 和 Γ , 能够保证 $\dot{\Gamma}_I \leq 0$, 滑模面 s 能够保证足够小, 因此 e_c 也能收敛至零域值附近即当 $t \rightarrow \infty$ 时 $e_c \rightarrow 0$.

对于本文所提的跟踪控制系统而言, 整个闭环控制系统可以描述为图3. 从图3可以看到, 前面所提的完美速度跟踪 $q = q_c$ 实际中并不满足, 运动学控制器与动力学控制器之间存在着速度误差项 e_c . 由速度误差 e_c 进行动力学控制的速度跟踪最终使得 $q \rightarrow q_c$ 即 $e_c \rightarrow 0$. 由 $V_i (i = x, y, \psi)$ 有界知 q_c 有界, 又由于 q 有界, 则 e_c 有界, e_c 可以看作是运动学系统的干扰项^[23], 即式(2)可以表述为

$$\dot{\eta} = J(q_c - e_c). \quad (24)$$

对于整个控制系统, 速度误差直接影响状态误差, 由前面已知, e_c 能够收敛到零域并保证足够小即 $e_c \rightarrow 0$, 此时动力学干扰可以忽略, 而简化为对于运动学系统的分析, 而对于运动学系统来说, 系统稳定性已经得到了证明. 最终, 可以推导出整个控制系统稳定.

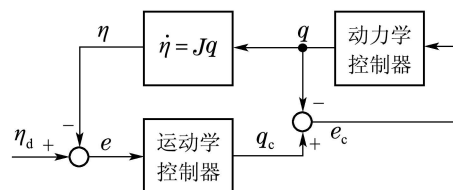


图3 闭环控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of closed loop control system

4 仿真实验(Simulation experiments)

为了验证给出算法的有效性, 将所给控制算法用于上海海事大学水下机器人与智能系统实验室FALCON开架水下机器人的轨迹跟踪控制中. FALCON机器人一共包含5个推进器, 水平面4个推进器和垂直面的1个推进器, 能够进行4个自由度运动: 进退(surge)、横移(sway)、回转(yaw)和潜浮(heave). FALCON的结构图如图4所示, 水平面推进器配置图如图5所示, 4个推进器对称排列且性能完全相同, a, b 分别为机器人的宽度和长度, $a = 0.6 \text{ m}, b = 1 \text{ m}, \alpha$ 为推进器与载体坐标系 X_0 轴之间的夹角, $\alpha = 36^\circ$.



图4 FALCON结构图

Fig. 4 Structure chart of FALCON

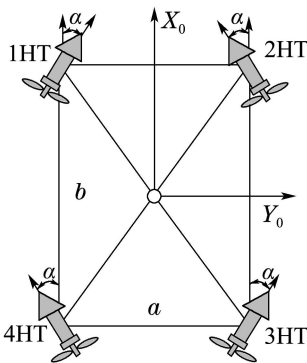


图5 FALCON水平面推进器布置图

Fig. 5 Horizontal thruster arrangement of FALCON

4.1 FALCON推进器推力归一化(FALCON thruster normalization)

根据图5的推进器布置, 依据动力与动力矩原理, 可以很容易推算出FALCON机器人在水平面各个自由度上产生的合力与合力矩^[24]:

$$\begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos \alpha & \cos \alpha & \cos \alpha \\ \sin \alpha & -\sin \alpha & \sin \alpha & -\sin \alpha \\ A & -A & -A & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

其中: $[\tau_X \ \tau_Y \ \tau_N]^T$ 是作用于无人潜器重心的各个自由度上的合力与合力矩, $[T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4]^T$ 是水

平面布置的4个推进器的推力,

$$A = (b/2) \sin \alpha + (a/2) \cos \alpha,$$

并且

$$\tau_{Xm} = 4T_m \cos \alpha \Rightarrow \cos \alpha = \frac{\tau_{Xm}}{4T_m}, \quad (26)$$

$$\tau_{Ym} = 4T_m \sin \alpha \Rightarrow \sin \alpha = \frac{\tau_{Ym}}{4T_m}, \quad (27)$$

$$\tau_{Nm} = 4T_m A \Rightarrow A = \frac{\tau_{Nm}}{4T_m}, \quad (28)$$

其中: $\tau_{Xm}, \tau_{Ym}, \tau_{Nm}$ 表示各个自由度上的最大合力与合力矩: 最大的进退推力 τ_{Xm} , 最大的横移推力 τ_{Ym} , 最大的回转力矩 τ_{Nm} , T_m 代表单个推进器的最大推力. 所以式(25)可以如下表示:

$$\begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\tau_{Xm}}{4T_m} & \frac{\tau_{Xm}}{4T_m} & \frac{\tau_{Xm}}{4T_m} & \frac{\tau_{Xm}}{4T_m} \\ \frac{\tau_{Ym}}{4T_m} & -\frac{\tau_{Ym}}{4T_m} & \frac{\tau_{Ym}}{4T_m} & -\frac{\tau_{Ym}}{4T_m} \\ \frac{\tau_{Nm}}{4T_m} & -\frac{\tau_{Nm}}{4T_m} & -\frac{\tau_{Nm}}{4T_m} & \frac{\tau_{Nm}}{4T_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\tau_X}{\tau_{Xm}} \\ \frac{\tau_Y}{\tau_{Ym}} \\ \frac{\tau_N}{\tau_{Nm}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} & -\frac{1}{4} & \frac{1}{4} & -\frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} & -\frac{1}{4} & -\frac{1}{4} & \frac{1}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{T_1}{T_m} \\ \frac{T_2}{T_m} \\ \frac{T_3}{T_m} \\ \frac{T_4}{T_m} \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\tau}_X \\ \bar{\tau}_Y \\ \bar{\tau}_N \end{bmatrix} = \bar{B} \begin{bmatrix} \bar{T}_1 \\ \bar{T}_2 \\ \bar{T}_3 \\ \bar{T}_4 \end{bmatrix}, \quad (31)$$

其中:

$$[\bar{\tau}_X \ \bar{\tau}_Y \ \bar{\tau}_N]^T = \left[\frac{\tau_X}{\tau_{Xm}} \ \frac{\tau_Y}{\tau_{Ym}} \ \frac{\tau_N}{\tau_{Nm}} \right]^T,$$

$$[\bar{T}_1 \ \bar{T}_2 \ \bar{T}_3 \ \bar{T}_4]^T = \left[\frac{T_1}{T_m} \ \frac{T_2}{T_m} \ \frac{T_3}{T_m} \ \frac{T_4}{T_m} \right]^T,$$

$$-1 \leq \bar{\tau}_i \leq 1, \quad i = X, Y, N,$$

$$-1 \leq \bar{T}_i \leq 1, \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

4.2 折线离散轨迹跟踪(Discrete line trajectory tracking)

针对离散轨迹(轨迹连续但不可微)下状态跳变引起的速度跳变问题, 为了验证所提方法在水下机器人轨迹跟踪中的有效性, 此处给出了典型的离散轨迹下的仿真结果(折线跟踪). 将所提无生物启发的反步滑模方法(以下简称反步方法)与基于生物启发的反步滑模方法(以下简称生物启发方法)进行跟踪控制性能对比, 进而验证所提算法的

有效性. FALCON的水动力参数见文献[25], 为了反映水下机器人动力学模型中的不确定性, 20%的模型不确定性加入到控制器的动力学模型中. 即在仿真中假设文献[25]的水动力参数为实际值, 而考虑参数不确定性认为得到的估计值是实际值的80%. 另外, 为了反映控制器对于干扰的容忍能力, 在惯性坐标系轴下加入常值干扰50 N.

水平面的水下机器人状态设为 $\eta = [x(k) \ y(k) \ \psi(k)]^T$. 假设水下机器人的期望状态为

$$x_d(t) = 5 + 0.5t,$$

$$y_d(t) = \begin{cases} 0.5t, & 0 \leq t \leq 10, \\ 5, & 10 < t < 20, \\ 0.5t - 5, & t \geq 20, \end{cases}$$

$$\psi_d(t) = \begin{cases} 45^\circ, & 0 \leq t \leq 10, \\ 0, & 10 < t < 20, \\ 45^\circ, & t \geq 20. \end{cases}$$

实际初始状态

$$\eta(0) = [x(0) \ y(0) \ \psi(0)]^T = [0 \ 0 \ 0]^T.$$

混合控制器的参数设置如表1所示. 这里需要说明的是, 对于生物启发模型中的 B, D 参数的选择. 通常情况下, 参数 $B = D$, 这两个参数的大小直接影响了控制精度的高低, 过大无法起到约束平滑作用, 误差较大时推力也会过大引起饱和, 过小会使得控制精度较低, 响应时间和跟踪误差方面性能会降低, 这里通过经验总结选取较为合适的中间参数值.

表 1 控制器参数设置

Table 1 Controller parameter settings

k_c	Γ	K	Λ	k	k_ψ	A	B	D
1	1	300	1	1	1	0.5	0.5	0.5

系统轨迹跟踪仿真结果图如图6所示. 图7给出了两种方法下的虚拟速度响应(包括线速度和角速度). 推进器归一化推力图如图8(a)所示(细节放大图如图8(b)所示). 最大推进器推力如表2所示, 表2中列出了在初始时刻、两个状态跳变点时刻($t = 10$ 和 20)水平面4个推进器的3处最大推力值.

针对图6这样的典型离散轨迹, 反步方法与生物启发方法在跟踪性能上, 两者跟踪效果基本相似. 但是对于离散轨迹跟踪来说, 常规反步跟踪算法在轨迹位姿突变时会导致虚拟速度的跳变进而出现推力饱和的现象, 而生物启发模型由于其平

滑、有界输出特性能够很好的平滑速度跳变现象以及引起的推力饱和问题, 所以两种方法在虚拟速度响应与推进器归一化推力上性能差异较大, 这可以从初始时刻与状态跳变时刻两个方面进行分析.

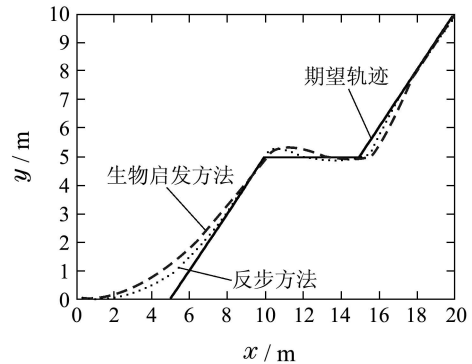


图 6 系统跟踪轨迹图

Fig. 6 System trajectories

如图7所示, 在初始时刻, 由于期望状态与实际状态间存在较大误差, 因为反步控制与误差直接相关, 初始的大误差(也可以认为是由零状态到初始状态的跳变)会导致极大的虚拟速度, 如虚拟进退速度 u_c 在初始时刻超过了5 m/s, 要生成如此大的速度势必需要推进器产生极大的推力输出, 即如图8和表2所示推进器1和4的期望推力为1.7153, 远远超出了推进器所能达到的最大推力, 所以即使仿真结果的跟踪性能良好, 显然在实际中这是不可能的; 对应的加入了生物启发模型后, 平滑了误差带来的速度跳变, 使得虚拟速度控制在1.5 m/s以内, 推进器1和4的最大推力为0.5556和0.5486, 满足了推力饱和限制, 这也解释了为何反步方法在跟踪效果上反而略好于生物启发方法. 在 $t = 10$ s时刻, 转艏角 ψ 由 45° 突变到 0° , 由此引起了虚拟转艏角速度 r_c 的跳变, 对应的图7中反步方法的虚拟角速度由0直接跳变到0.7 m/s左右, 这就要求推进器产生较大的力矩来达到期望的角速度, 使得推进器产生了推力饱和, 如推进器1在 $t = 10$ s时刻推力为-1.9270; 而对应的由于平滑特性, 加入生物启发方法的虚拟角速度小于0.3 rad/s, 较好的抑制了状态跳变引起的速度跳变问题, 进而也削减了所需的力矩大小, 使得推进器1的推力为-0.6453, 这也很明显的证明了生物启发方法的有效性. 同时必须客观的注意到, 加入生物启发方法后由于对于控制信号进行了平滑, 推力值约束到了饱和范围内, 在响应时间和跟踪误差方面性能受到了一定影响, 最终得到的结果是控制性能与推力约束间优化的平衡结果.

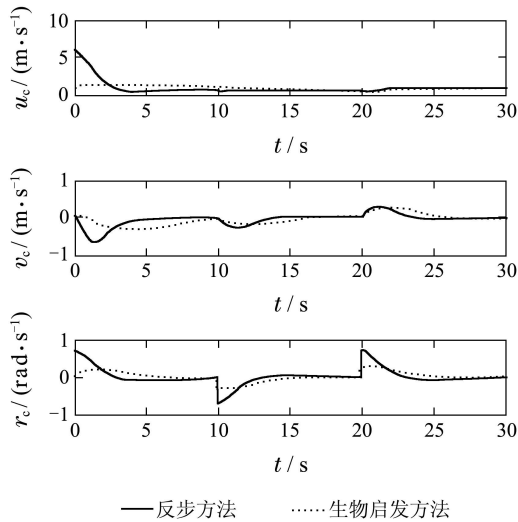


图 7 虚拟速度

Fig. 7 Virtual velocities

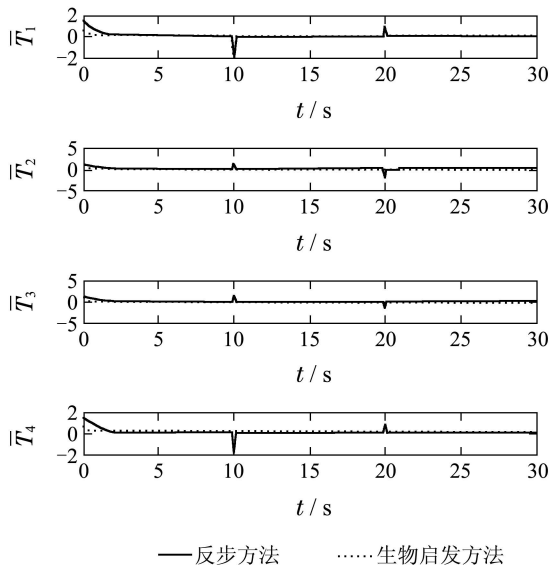


图 8(a) 推进器归一化推力图

Fig. 8(a) Thruster normalized forces

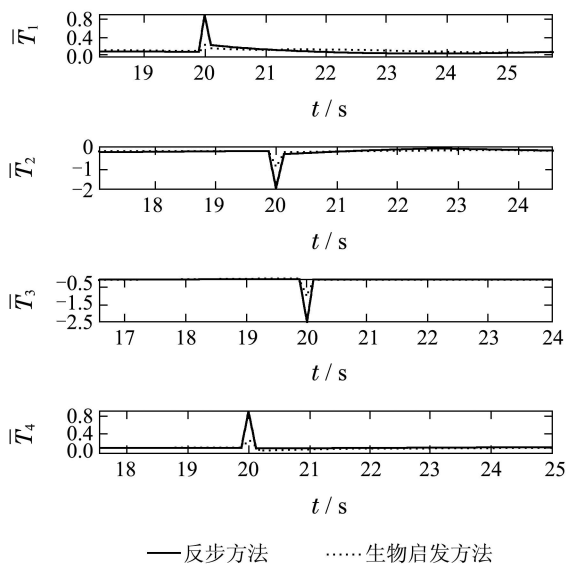


图 8(b) 推力放大图

Fig. 8(b) Enlarged view of thruster forces

表 2 最大推进器推力

Table 2 Maximum thruster forces

推力	反步方法	生物启发方法
\bar{T}_1	1.7153/ - 1.9270/0.8885	0.5556/ - 0.6453/0.2448
\bar{T}_2	1.3030/1.2074/ - 2.2248	0.4026/0.7022/0.9757
\bar{T}_3	1.3030/1.1847/ - 2.2254	0.4096/0.6859/0.9761
\bar{T}_4	1.7153/ - 1.9043/0.8891	0.5486/ - 0.6291/0.2451

5 结论(Conclusions)

本文在建立简化运动学与动力学模型的基础上提出了一种基于生物启发模型的反步滑模混合控制方法,并将该方法应用于FALCON开架水下机器人进行轨迹跟踪控制的仿真研究.该方法应用生物启发模型平滑反步方法的速度跳变并满足推力约束限制,同时在滑模控制中利用自适应项替换传统切换控制项来实现鲁棒无抖控制,两者结合实现稳定的轨迹跟踪控制.通过实验结果表明所提方法是稳定可行的,能够对于水下机器人进行有效控制,改进效果较为明显.

参考文献(References):

- [1] SANTHAKUMAR M, ASOKAN T. Investigations on the hybrid tracking control of an underactuated autonomous underwater robot [J]. *Advanced Robotics*, 2010, 24(11): 1529 - 1556.
- [2] 俞建成, 李强, 张艾群. 水下机器人的神经网络自适应控制 [J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(1): 9 - 13.
(YU Jiancheng, LI Qiang, ZHANG Aiqun. Neural network adaptive control for underwater vehicles [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 9 - 13.)
- [3] 张利军, 贾鹤鸣, 边信黔. 基于 L_2 干扰抑制的水下机器人三维航迹跟踪控制 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(5): 645 - 651.
(ZHANG Lijun, JIA Heming, BIAN Xinqian. Three-dimensional path tracking control for an autonomous underwater vehicle based on L_2 disturbance attenuation method [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(5): 645 - 651.)
- [4] ANTONELLI G, CACCAVALE F, CHIAVERINI S. A novel adaptive control law for underwater vehicles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems and Technology*, 2003, 11(2): 221 - 232.
- [5] 边宇枢, 高志慧, 袁超. 6自由度水下机器人动力学分析与运动控制 [J]. *机械工程学报*, 2007, 43(7): 87 - 92.
(BIAN Yushu, GAO Zhihui, YUN Chao. Dynamic Analysis and motion control of 6-DOF underwater robot [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(7): 87 - 92.)
- [6] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展 [J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(3): 407 - 418.
(LIU Jinkun, SUN Fuchun. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 407 - 418.)
- [7] WALLACE M B, MAX S D, EDWIN K. Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56(8): 670 - 677.
- [8] BAGHHERI A, MOGHADDAM J J. Simulation and tracking control based on neural-network strategy and sliding-mode control for underwater remotely operated vehicle [J]. *Neurocomputing*, 2009, 72(8): 1934 - 1950.

- [9] SERDAR S, BRADLEY J B, RON P P. A chattering-free sliding-mode controller for underwater vehicles with fault-tolerant infinity-norm thrust allocation [J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(16): 1647 – 1659.
- [10] FIERRO R, LEWIS F L. Control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics [J]. *Journal of Robotic Systems*, 1997, 14(3): 149 – 163.
- [11] 朱大奇, 杨蕊蕊. 生物启发神经动力学模型的AUV反步跟踪控制 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(10): 1309 – 1316. (ZHU Daqi, YANG Ruirui. Backstepping tracking control of autonomous underwater vehicles with bio-inspired neurodynamics model [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(10): 1309 – 1316.)
- [12] YANG S X, ZHU A, YUAN G F, et al. A bioinspired neurodynamics based approach to tracking control of mobile robots [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(8): 3211 – 3220.
- [13] LUO C, YANG S X. A bioinspired neural network for real-time concurrent map building and complete coverage robot navigation in unknown environment [J]. *IEEE Transaction on Neural Network*, 2008, 19(7): 1279 – 1298.
- [14] LIONEL L, BRUNO J. Robust nonlinear path-following control of an AUV [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2008, 33(2): 89 – 102.
- [15] JON E R, ASGEIR J S, KRISTIN Y P. 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.
- [16] 高剑, 徐德民, 严卫生. 欠驱动自主水下航行器轨迹跟踪控制 [J]. *西北工业大学学报*, 2010, 28(3): 404 – 408. (GAO JIAN, XU Demin, YAN Weisheng. Applying cascaded systems theory to ensuring globally uniformly asymptotical stability of trajectory tracking controller of underactuated autonomous underwater vehicle(AUV) [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2010, 28(3): 404 – 408.)
- [17] FILOKTIMON R, EVANGELOS P. Planar trajectory planning and tracking control design for underactuated AUVs [J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(1): 1650 – 1667.
- [18] ERFU Y, GU D B. Nonlinear formation-keeping and mooring control of multiple autonomous underwater vehicles [J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2007, 12(2): 164 – 178.
- [19] 王银涛, 严卫生, 闫伟. 基于视线导航的自主水下航行器编队轨迹控制 [J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(6): 1421 – 1424. (WANG Yintao, YAN Weisheng, YAN Wei. Formation tracking control of autonomous underwater vehicles based on line-of-sight guidance [J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(6): 1421 – 1424.)
- [20] 马岭, 崔维成. 基于模糊混合控制的自治水下机器人路径跟踪控制 [J]. *控制理论与应用*, 2006, 23(3): 341 – 346. (MA Ling, CUI Weicheng. Path following control of autonomous underwater vehicle based upon fuzzy hybrid control [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 341 – 346.)
- [21] GROSSBERG S. Nonlinear neural networks: Principles, mechanisms, and architectures [J]. *Neural Networks*, 1988, 1(1): 17 – 61.
- [22] HODGKIN A L, HUXLEY A F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve [J]. *The Journal of Physiology*, 1952, 117(4): 500 – 544.
- [23] FIERRO R, LEWIS F L. Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1998, 9(4): 589 – 600.
- [24] OMERDIE E, ROBERTS G. Thruster fault diagnosis and accommodation for open-frame underwater vehicles [J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 12(12): 1575 – 1598.
- [25] JONATHAN Z. *Enhanced navigation and tether management of inspection class remotely operated vehicles* [D]. Victoria: University of Victoria, 2006.

作者简介:

孙兵 (1987–), 男, 博士研究生, 研究方向为水下机器人跟踪控制, E-mail: hmsunbing@163.com;

朱大奇 (1964–), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理与水下机器人, E-mail: zdq367@yahoo.com.cn;

邓志刚 (1971–), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为水下机器人模型辨识, E-mail: dzg1026@126.com.