

作业型水下机器人姿态调节控制研究

周克秋, 李钦奉

(江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘要:为了解决在作业时水下机器人载体上的机械手伸展过程将会引起载体重心发生变化,导致水下机器人发生纵横倾运动,影响作业效率的问题,考虑到水下机器人控制系统较为复杂,因此引入模糊滑模控制,根据要求设计出一款模糊滑模控制器。利用计算机和 MATLAB 技术,将水下机器人姿态运动方程与常规 PID 控制和模糊滑模控制分别结合起来进行仿真分析。仿真结果表明,模糊滑模控制相比于常规 PID 控制,在机械手关节正弦运动过程中,姿态角下降了 20% 以上,横倾姿态角度误差减小了 30% 以上,纵倾姿态角误差也超过了 8% 以上。在悬停作业过程中,纵横倾姿态角度都下降了 30% 以上。通过两种不同控制方式的仿真,验证了模糊滑模控制的控制效果要优于常规 PID 控制,能够取得更好的控制效果,同时利用计算机技术缩短了研究时间、提高了研究效率。

关键词:水下机器人;姿态控制;重心调节;模糊滑模控制;MATLAB 技术

中图分类号:TP242.3

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2020)03-0142-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2020.03.027

Research on Attitude Adjustment Control of Operational Remote Operated Vehicle

ZHOU Ke-qiu, LI Qin-feng

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In order to solve the problem that the barycenter of the vehicle will change during manipulator stretching process on the remote operated vehicle, which will lead to the pitch and roll motion of the vehicle and affect the work efficiency, considering the complexity of the remote operated vehicle control system, according to the requirements, we design a fuzzy sliding mode controller through the introduction of the fuzzy sliding mode control. By computer and MATLAB technology, the remote operated vehicle attitude motion equation is combined with the conventional PID control and fuzzy sliding mode control respectively for simulation analysis. The simulation shows that the fuzzy sliding mode control is more than 20% than the conventional PID control during the sinusoidal motion of the manipulator joint, the roll angle error is reduced by more than 30%, and the pitch attitude angle error is also more than 8%. During the hovering work, the vertical and horizontal attitude angles have dropped by more than 30%. Through the simulation of two different control methods, it is proved that the control effect of the fuzzy sliding mode controller is better than the conventional PID control, which can achieve better control effects. At the same time, the research time is shortened and the efficiency is improved by computer technology.

Key words: remote operated vehicle; attitude control; barycenter adjusting; fuzzy sliding mode control; MATLAB technology

0 引言

新世纪以来,中国加大了对海洋资源的勘探开发,水下机器人(remote operated vehicle, ROV)的研究逐步成为热点。其在水下搜救打捞、海洋油气管道维修、能源勘探等方面发挥着重要作用,因此 ROV 的研究和广泛应用对于国民经济的发展具有重要的现实意义。而拥有稳定、可靠的 ROV 姿态是其进行水下作业的重

要保障^[1]。在水下作业时,ROV 上的机械手伸展过程中会引起系统重心位置发生变化,导致载体发生纵横倾运动,影响作业效率,因此研究机械手运动引起 ROV 姿态的稳定技术具有重要的实际意义和实用价值^[2]。当前国内外对 ROV 的姿态控制主要有两种形式,分别是推进器控制姿态和重浮心相对位置控制姿态^[3-5]。无论采用哪种形式,工程技术人员都会采用

收稿日期:2019-04-02

修回日期:2019-08-05

网络出版时间:2019-11-07

基金项目:国家工业和信息化部高技术科研项目(2014HZ007J)

作者简介:周克秋(1991-),男,硕士研究生,研究方向为海工装备设计制造;李钦奉,教授,研究方向为现代制造技术及装备。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20191107.0918.072.html>

计算机技术进行研究分析,缩短研究时间、降低研究成本。

哈尔滨工程大学的杨超等^[6]提出了一种水下机器人模糊双闭环 PID 方法,通过计算机技术进行仿真分析,确定了所提方法的有效性和可行性。周焕银等^[7]提出将神经网络动态滑模面控制方法应用到 ROV 运动之中,通过 MATLAB 仿真平台和半物理仿真平台,验证了所提方法的鲁棒性和抗干扰性。文中将所研究的对象和方法结合起来,通过 MATLAB 技术进行分析,以验证所提的方法的有效性及其控制效果。

1 作业型水下机器人姿态建模

为了方便描述 ROV 的运动特性,确定其在水下的姿态、速度、方位,有必要建立 ROV 的坐标系。根据国际水池会议推荐的和造船与轮机工程学会术语公报推荐的体系,建立两个空间直角坐标系^[8]。一个是惯性坐标系 $E - \xi\eta\zeta$,另一个是载体坐标系 $O - xyz$ 。具体如图 1 所示。

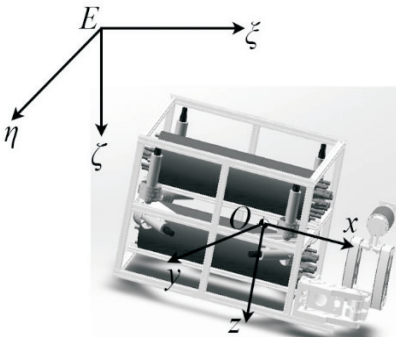


图 1 水下机器人坐标系

在惯性坐标系中,水下机器人的位置和方向可以描述为 $[x\ y\ z\ \varphi\ \theta\ \psi]$ 。其中 x 、 y 、 z 分别为 ROV 在惯性坐标系中的位置; φ 、 θ 、 ψ 分别为 ROV 对惯性坐标系的横倾角、纵倾角、航向角。

在载体坐标系,ROV 的线速度、角速度可以描述为速度矢量 $\mathbf{V} = [u\ v\ w\ p\ q\ r]$ 。其中 u 、 v 、 w 是 ROV 线速度矢量在载体坐标系中的 3 个分量,分别为横向移动速度、纵向移动速度和垂向移动速度; p 、 q 、 r 是 ROV 角速度矢量在载体坐标系中的 3 个分量,分别为横倾角速度、纵倾角速度和偏航角速度。

由于 ROV 在操作过程中会改变系统的重心,为了保证其能够快速、顺利地完成任务,有必要对 ROV 载体姿态进行平衡控制。由于作业过程中 ROV 在载体坐标系内会发生较为明显的纵倾运动,影响水下作业效率。为了解决该问题,需要调节控制 ROV 的纵倾和横倾姿态,所以建立机器人载体的纵倾和横倾姿态运动方程。根据文献^[9],经过修改和简化,得到

ROV 载体的纵倾姿态运动方程与横倾姿态运动方程。

纵倾姿态运动方程为:

$$\begin{cases} \tau_M = (I_y - M_{\dot{q}}) \ddot{q} + M_{q|q} |q| q - \\ (x_c P - x_c B) \cos \theta \cos \varphi - \\ (z_c P - z_c B) \sin \theta + f_M \\ \dot{\theta} = q \end{cases} \quad (1)$$

横倾姿态运动方程为:

$$\begin{cases} \tau_K = (I_x - K_{\dot{p}}) \ddot{p} + K_{p|p} |p| p + \\ (y_c P - y_c B) \cos \theta \cos \varphi - \\ (z_c P - z_c B) \cos \theta \sin \varphi + f_K \\ \dot{\varphi} = p \end{cases} \quad (2)$$

2 模糊滑模控制器的设计

由于滑动模态具有灵活的设计性,且不受被控对象的参数变化和外界干扰,因此滑模变结构控制系统的鲁棒性比一般常规的控制系统要强,且设计方法相对简单。但是由于滑模变结构控制会产生抖振问题,因此需要与其他的控制方式相结合来削弱其抖振的影响^[10]。模糊控制是根据经验,以降低抖振来设计模糊逻辑规则,或采用模糊逻辑实现滑模控制参数自调整,可有效降低滑模控制抖振。模糊滑模控制策略包含了上述算法优异功能,对于系统的控制能力更强。

2.1 滑模控制器设计

滑模变结构控制系统设计可分成两步^[11-12]:

(1)设计切换函数 $s(x)$ 。切换函数的设计不仅需要保证滑模运动的渐进稳定,而且其应具有良好的动品质;

(2)系统滑模运动的到达条件由滑模控制律来满足,因此所设计的控制律应能在切换函数上形成滑动模区。

考虑非线性系统^[10,13]:

$$\dot{\theta} = f(\theta, t) + g(\theta, t)u(t) + d(t) \quad (3)$$

其中, f 和 g 为未知非线性函数, $g > 0$, $u(t)$ 为系统的控制输入信号, $\theta(t)$ 为系统的输出信号, $d(t)$ 为外界干扰信号,

定义跟踪误差:

$$e(t) = \theta(t) - \theta_d(t) \quad (4)$$

其中, $\theta_d(t)$ 为期望位置。

定义积分滑模面为:

$$s(t) = \dot{e}(t) + k_1 e(t) + k_2 \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

其中, k_1 和 k_2 为非零正常数。

如果滑模控制处于理想状态,那么 $s(t) = \dot{s}(t) = 0$,即:

$$\ddot{e}(t) + k_1 \dot{e}(t) + k_2 e(t) = 0 \quad (6)$$

通过确定 k_1 和 k_2 , 跟踪误差 $e(t)$ 及其导数趋近于零。

假设 f 、 g 、 $d(t)$ 已知, 那么可以求出理想控制器为:

$$u^*(t) = g(\theta, t)^{-1} [-f(\theta, t) - d(t) + \ddot{\theta}_d(t) - k_1 \dot{e}(t) - k_2 e(t)] \quad (7)$$

由于滑模控制的不连续性开关特性会引起系统的抖振现象, 为此引入模糊控制理论, 以此来减弱抖振现象, 提高滑模控制器的鲁棒性。

2.2 模糊滑模控制器设计

由式(3)可知, f 、 g 、 $d(t)$ 均是未知函数, 因此 $u^*(t)$ 无法用线性函数表示, 为此采用模糊系统来趋近 $u^*(t)$ 。取变量 α_i , 对其进行模糊化处理, 设定模糊控制器的新输出函数, 即系统的控制输入函数:

$$u_{fc}(s, \alpha) = \alpha^T \xi \quad (8)$$

其中, $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m]^T$, $\xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m]^T$ 。

定义 ξ 为:

$$\xi = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i} \quad (9)$$

其中, ω_i 为第 i 条规则权值。

由以上分析, 可知一定存在一个最优模糊控制系统 $u_{fc}^*(s, \alpha^*)$, 即:

$$u^*(t) = u_{fc}^*(s, \alpha^*) + \varepsilon = \alpha^{*T} \xi + \varepsilon \quad (10)$$

其中, ε 为实际近似误差, 且满足 $|\varepsilon| < E$ 。

使用一个模糊控制系统 $\hat{u}_{fc}(s, \hat{\alpha})$ 来近似 $u^*(t)$:

$$\hat{u}_{fc}(s, \hat{\alpha}) = \hat{\alpha}^T \xi \quad (11)$$

其中, $\hat{\alpha}$ 为 α^* 的自适应估计值。

控制函数采用以下形式:

$$u(t) = \hat{u}_{fc} + u_{vs}(s) \quad (12)$$

由式(10)定义:

$$\tilde{u}_{fc} = \hat{u}_{fc} - u^* = \hat{u}_{fc} - u_{fc}^* - \varepsilon \quad (13)$$

定义 $\tilde{\alpha} = \hat{\alpha} - \alpha^*$, 则上式可变换成:

$$\tilde{u}_{fc} = \tilde{\alpha}^T \xi - \varepsilon \quad (14)$$

因此可得:

$$\dot{s}(t) = \ddot{e}(t) + k_1 \dot{e}(t) + k_2 e(t) \quad (15)$$

进一步可得:

$$u^*(t) = g(\theta, t)^{-1} [-f(\theta, t) - d(t) + \ddot{\theta}_d(t) + \dot{e}(t) - \dot{s}(t)] = g(\theta, t)^{-1} [-f(\theta, t) - d(t) + \ddot{\theta}_d(t) -$$

$$\dot{s}(t)] = g(\theta, t)^{-1} [g(\theta, t)u(t) - \dot{s}(t)] \quad (16)$$

由式(12)和式(16)可得:

$$\dot{s}(t) = g(\theta, t)[u(t) - u^*(t)] = g(\theta, t)[u_{fc} + u_{vs} - u^*(t)] \quad (17)$$

Lyapunov(李雅普诺夫)基本理论^[13]: 假如一个系统内部所包含的能量是连续消散的, 那么这个系统最终一定稳定于平衡状态。为了促进状态变量 $s(t)$ 和 $\tilde{\alpha}$ 趋近于零, 定义李雅普诺夫函数为:

$$V[s(t), \tilde{\alpha}] = \frac{1}{2}s^2 + \frac{g(\theta, t)}{2\beta} \tilde{\alpha}^T \tilde{\alpha} \quad (18)$$

其中, β 为非零常数。

对上式求导, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}[s(t), \tilde{\alpha}] &= s(t)\dot{s}(t) + \frac{g(\theta, t)}{\beta} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} = \\ s(t)g(\theta, t)[u_{fc} + u_{vs} - u^*(t)] &+ \frac{g(\theta, t)}{\beta} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} = \\ s(t)g(\theta, t)[\tilde{u}_{fc} + u_{vs}] &+ \frac{g(\theta, t)}{\beta} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} = \\ s(t)g(\theta, t)[\tilde{\alpha}^T \xi - \varepsilon + u_{vs}] &+ \frac{g(\theta, t)}{\beta} \tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} = \\ g(\theta, t)\tilde{\alpha}^T[s(t)\xi + \frac{\dot{\tilde{\alpha}}}{\beta}] &+ s(t)g(\theta, t)(u_{vs} - \varepsilon) \end{aligned} \quad (19)$$

为了使 $\dot{V}[s(t), \tilde{\alpha}] < 0$, 采用如下切换函数:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\alpha}} = \dot{\hat{\alpha}} = -\beta s(t)\xi \\ u_{vs} = -E(t)\text{sgn}[s(t)] \end{cases} \quad (20)$$

其中, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

则式(19)可变为:

$$\begin{aligned} \dot{V}[s(t), \tilde{\alpha}] &= -E(t)|s(t)|g(\theta, t) - \varepsilon s(t)g(\theta, t) \leq \\ &-E(t)|s(t)|g(\theta, t) + |\varepsilon||s(t)|g(\theta, t) = \\ &-[E(t) - |\varepsilon|]|s(t)|g(\theta, t) \leq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

根据以上分析, 模糊控制器是首先对滑模面轨迹函数 $s(t)$ 进行了模糊化处理, 削弱抖振现象的影响, 然后在模糊控制变量输入时采用满足李雅普诺夫理论定律, 确定了系统运动的边界范围, 实现了模糊控制。

3 仿真分析

前一节设计了模糊滑模控制器(Fuzzy sliding mode control, FSMC), 本节将其与常规PID控制器进行仿真对比, 验证所设计的模糊滑模控制器在ROV载体姿态控制中的控制效果^[14-15]。首先以机械手关节

正弦运动为对象进行仿真,然后再模拟 ROV 悬停作业,即 ROV 自身位置固定不动,其上的机械手做伸展运动,进行仿真分析。

3.1 机械手关节正弦运动仿真分析

由图 2 分析可知,在常规 PID 控制下 ROV 纵倾姿态角均方差为 3.77° ,而 FSMC 控制下纵倾姿态角均方差为 2.98° ,其值下降了 20.95%。它们的最大绝对值和平均绝对值分别是 7.05° 、 5.27° 和 3.30° 、 2.63° ,分别下降了 25.25% 和 20.30%。同时从图 2 可以看出,FSMC 控制下纵倾姿态角比常规 PID 控制明显收窄。由图 3 分析可知,FSMC 相比常规 PID 控制,纵倾姿态角度误差的均方差、平均绝对误差、最大绝对误差分别下降了 29.69%、12.5%、8.44%。以上数据表明,文中设计的 FSMC 在机械手运动过程中对纵倾姿态的控制效果优于常规 PID 控制。

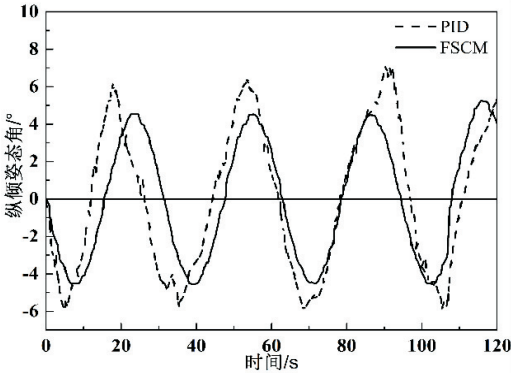


图 2 纵倾运动角度曲线

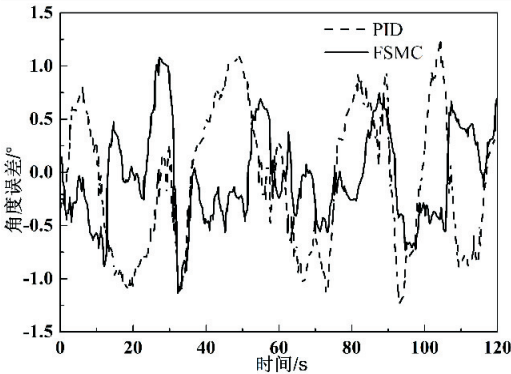


图 3 角度误差

由图 4 分析可知,在常规 PID 控制下 ROV 横倾姿态角均方差为 2.87° ,而 FSMC 控制下纵倾姿态角均方差为 2.21° ,其值下降了 23.00%。它们的平均绝对值分别是 2.55° 和 1.96° ,下降了 23.14%;它们的最大绝对值分别是 4.87° 和 3.67° ,下降了 24.64%,同时由图 4 可以看出 FSMC 控制下横倾姿态角比常规 PID 控制收窄。由图 5 分析可知,FSMC 相比常规 PID 控制,纵倾姿态角度误差的均方差、平均绝对误差、最大绝对误差分别下降了 39.68%、38.60%、42.50%。以上数据表明,文中设计的 FSMC 在机械手运动过程中对横

倾姿态的控制效果优于常规 PID 控制。

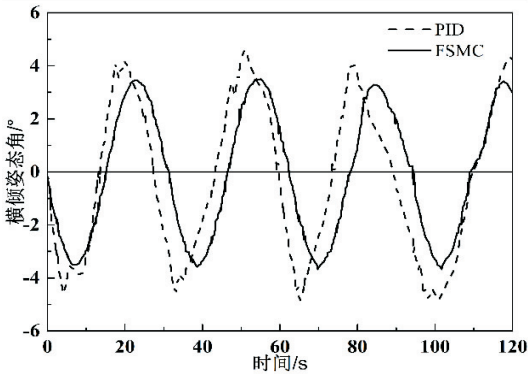


图 4 横倾姿态角度曲线

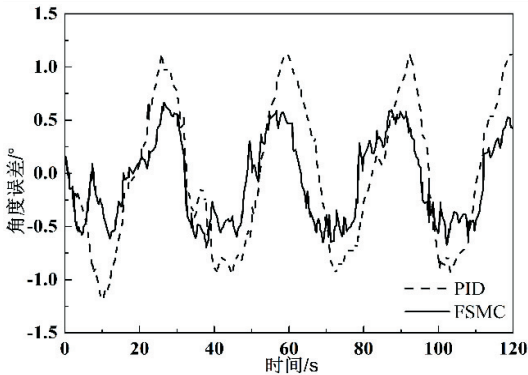


图 5 角度误差

3.2 ROV 悬停作业仿真分析

由图 6 的仿真结果可知,随着时间的变化,纵倾姿态角由正变负,基本规律是先增大后减小,最后趋近于 0 度附近。在常规 PID 控制条件下,ROV 载体发生纵倾姿态角在 6 s 时最大,最大值为 0.52° ,在约 45 s 时达到最大负角,该值为 -3.80° ,之后姿态角开始慢慢恢复到 0° ,于 115 s 到达 0° 附近。在 FSMC 条件下,ROV 载体发生纵倾姿态角在 7 s 时最大,最大值为 0.14° ,在 34 s 时达到最大负角,该值为 -2.42° ,于 90 s 到达 0° 附近,之后开始震荡。FSMC 与常规 PID 相比,最大绝对值减小了 36.32%。

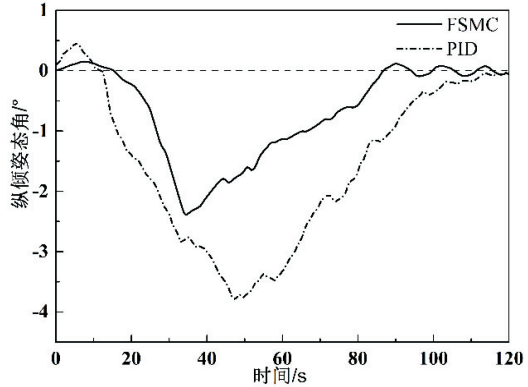


图 6 倾姿态角度曲线

由图 7 的仿真结果可知,横倾姿态角是先增大后减小,最后趋近于 0 度附近。在 PID 控制条件下,ROV

载体发生横倾姿态角在 39 s 时达到最大,最大值为 -3.19° ,之后姿态角开始慢慢恢复到 0° ,于 92 s 到达 0° 附近。在 FSMC 条件下,ROV 载体发生横倾姿态角在 34 s 时达到最大,最大值为 -1.88° ,于 82 s 到达 0° 附近,之后开始震荡。FSMC 与常规 PID 相比,最大绝对值减小了 41.07%。

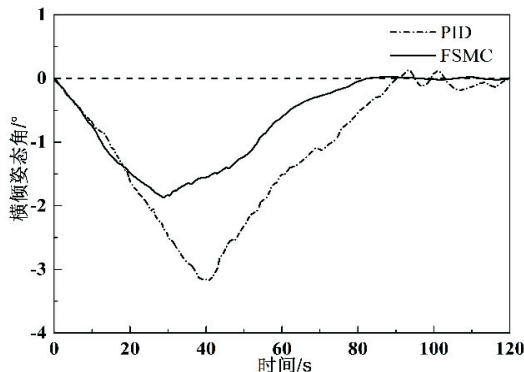


图 7 横倾姿态角度曲线

4 结束语

针对水下机械手伸展过程中引起 ROV 动力学模型中变量与参数的不确定性,以及水下环境的干扰等对 ROV 载体姿态产生不利影响,提出基于模糊滑模控制的姿态控制方法。通过模糊化逼近模型中不确定性和干扰,用李雅普诺夫稳定性理论确定了系统运动的边界范围,实现了模糊控制。

利用计算机强大的运算能力和 MATLAB 强大的计算能力,将 ROV 姿态运动方程与常规 PID 控制和 FSMC 分别结合起来进行仿真分析。在机械手关节正弦运动仿真中,模糊滑模控制下载体姿态角度曲线相比于常规 PID 控制都下降 20% 以上,且角度误差也有了较为明显的下降。在悬停作业仿真中,模糊滑模控制下载体姿态角度曲线下降的更为明显。通过两种不同方式的仿真,结果表明模糊滑模控制器的控制效果要优于常规 PID 控制,能够取得良好的控制效果。同时利用计算机技术缩短了研究时间,提高了研究效率。

参考文献:

[1] 黎柱坤,王 慧,林冰胜,等.用于水产养殖的水下机器人设计与制作[J].电子世界,2017(15):36-39.

[2] CONTI R,MELI E,RIDOLFI A,et al. An innovative decentralized strategy for I-AUVs cooperative manipulation tasks [J]. Robotics and Autonomous Systems,2015,72:261-276.

[3] SIMETTI E,CASALINO G,TORELLI S,et al. Floating underwater manipulation: developed control methodology and experimental validation within the TRIDENT project [J]. Journal of Field Robotics,2014,31(3):364-385.

[4] LI Q,XIE S,LUO J,et al. Pitch reduction system design and control for an underwater vehicle[C]//2014 IEEE international conference on mechatronics and automation. Tianjin: IEEE,2014:168-173.

[5] SAKAGAMI N,SHIBATA M,KAWAMURA S,et al. An attitude control system for underwater vehicle-manipulator systems[C]//2010 IEEE international conference on robotics and automation. Anchorage, AK: IEEE, 2010: 1761-1767.

[6] 杨 超,张铭钧,秦洪德,等.水下机器人-机械手姿态调节系统研究[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(2):377-383.

[7] 周焕银,刘开周,封锡盛.基于神经网络补偿的滑模控制在 AUV 运动中的应用[J].计算机应用研究,2011,28(9):3384-3386.

[8] 彭 勃.水下机器人-机械手系统姿态平衡控制技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.

[9] 周卫祥.深海作业型 ROV 建模方法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.

[10] 刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2012.

[11] 陈路伟,汤华涛.滑模控制在水下航行器横滚姿态控制中的应用研究[J].舰船电子工程,2013,33(9):55-57.

[12] ZHANG M,CHU Z. Adaptive sliding mode control based on local recurrent neural networks for underwater robot[J]. Ocean Engineering,2012,45:56-62.

[13] BESSA W M,DUTRA M S,KREUZER E. Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller[J]. Robotics and Autonomous Systems,2008,56(8):670-677.

[14] 薛定宇,陈阳泉.基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M].第 2 版.北京:清华大学出版社,2011.

[15] 李 昕. MATLAB 数学建模[M].北京:清华大学出版社,2017.