

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201306032
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20131012.1815.008.html>

基于切换模糊化的滑模变结构 AUV 姿态控制

郝阳^{1,2}, 赵新华²

(1. 中国人民解放军 91439 部队, 辽宁 大连 116041; 2. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:针对自主水下航行器(AUV)控制的要求,为解决姿态控制问题,提出了一种基于切换模糊化的滑模变结构控制方法.该方法结合了模糊控制与滑模变结构的优点,其中模糊控制以变结构控制的切换函数为输入,变结构控制切换项为输出,在此基础上采用指数趋近律方法设计滑模变结构控制器.分别对该方法与传统滑模变结构控制方法进行对比仿真,结果表明,该控制方法可以有效抑制滑模变结构控制的抖振现象,对模型不确定系统具有较强的鲁棒性和一定的抗干扰能力.

关键词:模糊控制;滑模变结构控制;自主水下航行器;姿态控制;切换模糊化

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2013)06-0532-05

中文引用格式:郝阳,赵新华. 基于切换模糊化的滑模变结构 AUV 姿态控制[J]. 智能系统学报, 2013, 8(6): 532-536.

英文引用格式:HAO Yang, ZHAO Xinhua. Slide-mode variable-structure AUV attitude control on the basis of fuzzy switching[J].

CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(6): 532-536.

Slide-mode variable-structure AUV attitude control on the basis of fuzzy switching

HAO Yang^{1,2}, ZHAO Xinhua²

(1. Unit 91439 of PLA, Dalian 116041, China; 2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: According to the control requirements of the autonomous underwater vehicle (AUV), and in order to solve the attitude control problem, a slide-mode variable-structure control method based on fuzzy switching is proposed. This method combines the merits of fuzzy control and slide-mode variable-structure, in which the fuzzy control takes the switching function of the variable-structure control as the input, and the switching item of the variable-structure control as the output. On the basis of this, the exponential reaching law method is applied to the design of the slide-mode variable-structure controller. By comparison and simulation of the method and the traditional slide-mode variable-structure control method, the results show that the method may effectively suppress the chattering phenomenon of the slide-mode variable-structure control, and has strong robustness and anti-jamming capability for the model uncertainty system.

Keywords: fuzzy control; slide-mode variable-structure control; autonomous underwater vehicle; attitude control; fuzzy switching

AUV (autonomous underwater vehicle) 控制系统设计需要克服的困难主要有:被控对象模型和水动力参数的不确定性以及海浪和海流等随机扰动的影响,这就要求其控制系统具有较强的鲁棒性和抗干扰能力.模糊控制与滑模控制的组合控制策略可以

在削弱滑模变结构控制抖振现象的同时保持其对模型要求低、参数变化及扰动不灵敏等优点,适合用来解决 AUV 控制问题.这方面,研究人员已经开展了卓有成效的工作:施小成等^[1]为 AUV 纵摇运动设计了一种模糊滑模控制器;魏英杰等^[2]分别提出了一种 AUV 模糊变结构控制方法和一种自适应模糊变结构控制方法^[3];沈建森等^[4]为远程 AUV 近水面运动提出了一种纵向模糊滑模控制方法;阚如文^[5]

为无人水下航行器设计了一种改进型模糊滑模控制器和一种自适应模糊滑模控制器.本文采用模糊控制的输出代替符号函数作为滑模变结构控制的切换项来柔化控制信号,反复调整隶属函数以获得更好的控制效果,有效克服了模型参数不确定和海洋随机扰动的影响,通过仿真对比验证了该方法的控制性能、鲁棒性、抗干扰能力和抑制抖振的能力.

1 AUV 数学模型及其线性化

为了便于控制系统的分析与设计,通常将 AUV 六自由度运动分解为垂直面运动和水平面运动,本文只研究 AUV 在垂直面内的姿态控制.由于 AUV 姿态控制可以看作受到扰动作用后在平衡位置附近做小幅度运动,因此基于小扰动法对其垂直面模型做线性化处理^[6],得到^[2]:

$$\begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & -Z_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ -M_{\dot{w}} & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{uw}u & (Z_{uq} + m)u & 0 & 0 \\ M_{uw}u & M_{uq}u & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{u\delta}u^2 \\ M_{u\delta}u^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta.$$

式中: m 为 AUV 质量; I 为转动惯量; Z 和 M 为水动力系数^[6]; z 、 θ 分别为深度和纵摇角; u 、 w 和 q 分别为纵荡速度、升沉速度和纵摇角速度; δ 为水平舵角.取轴向速度为 2 m/s,基于某典型 AUV 水动力系数建立系统标称状态方程为^[2]

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.040 & 0.865 & -0.020 & 0 \\ 6.000 & -0.681 & 0.708 & 0 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0 \\ 1.000 & 0 & -2.000 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.072 \\ -0.722 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta. \tag{1}$$

考虑到模型的不确定性,设所有相关水动力系数有 30% 的相对不确定度^[2], p 为水动力系数标称值, p_1 和 p_2 分别为水动力系数下限值和上限值:

$$\begin{cases} p_1 = 0.7p, \\ p_2 = 1.3p. \end{cases}$$

实际水动力系数将在 p_1 和 p_2 之间变化,进而可以得到系统状态方程的下限形式和上限形式.

基于水动力系数 p_1 的系统状态方程为^[2]

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.950 & 1.150 & -0.021 & 0 \\ 9.280 & -0.615 & 0.858 & 0 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0 \\ 1.000 & 0 & -2.000 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.063 \\ -0.615 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta. \tag{2}$$

基于水动力系数 p_2 的系统状态方程为^[2]

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.190 & 0.730 & -0.020 & 0 \\ 6.680 & -0.718 & 0.603 & 0 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0 \\ 1.000 & 0 & -2.000 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.078 \\ -0.796 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta. \tag{3}$$

2 控制方法

基于切换模糊化的滑模变结构 AUV 姿态控制方法的原理框图如图 1 所示.

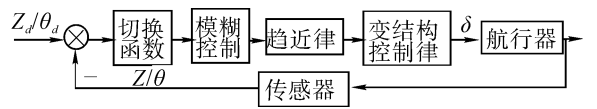


图 1 控制方法原理框图

Fig.1 Block diagram of the control method

图 1 中, Z_d 、 θ_d 为期望深度和纵摇角,即平衡状态, Z 、 θ 为实际深度和纵摇角; δ 为水平舵角.

2.1 滑模变结构控制

针对如下线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B(u + f(t)), \\ s = Cx. \end{cases} \tag{4}$$

式中: A 和 B 取自式 (1), 容易验证 (A, B) 完全能控, 因此系统可以任意配置极点^[7], 本文采用

Ackermann 公式设计切换函数 $s=Cx$ 中的 C 值:

$$C=[0 \ \dots \ 0 \ 1][B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B]^{-1}P(A).$$

式中: $P(A)$ 为期望特征多项式复变量 s 换成 A 所得的矩阵多项式^[8-9],得

$$C=[0.7970 \ \ -1.4645 \ \ -1.7290 \ \ 0.4113].$$

滑模变结构控制器的设计通常采用趋近律形式,如指数趋近律:

$$slaw=\dot{s}=-\varepsilon sgn(s)-ks. \tag{5}$$

式中: $\varepsilon=0.3, k=0.5$.

本文使用模糊控制器的输出代替其中的切换项,得到基于切换模糊化的趋近律:

$$slaw=\dot{s}=-\varepsilon Fuzzy(s)-ks. \tag{6}$$

式中: $\varepsilon=3, k=5, Fuzzy(s)$ 为模糊控制的输出.

将式(5)和(6)代入状态方程(4)可分别得到滑模变结构控制律和基于切换模糊化的滑模变结构控制律,它们的表示形式为^[9]

$$u=(CB)^{-1}(-CAx+slaw).$$

式中: $f(t)$ 为扰动项,表示正态分布的随机小扰动.

2.2 模糊控制

该模糊控制为单输入单输出,其输入与输出的论域分别为

$$A=\{A_i \mid NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB\},$$
$$B=\{B_i \mid NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB\}.$$

式中:NB 为负大,NM 为负中,NS 为负小,ZE 为零,PS 为正小,PM 为正中,PB 为正大.输入、输出量的取值为 $[-3,3]$.其模糊规则为

$$\text{If } A=A_i \text{ then } B=B_i.$$

其控制效果主要依赖于隶属函数和清晰化方法的选取,经过反复试验,确定其输入与输出的隶属函数如图 2、3 所示.采用(最大隶属度)平均值法实现输出量的清晰化^[10].

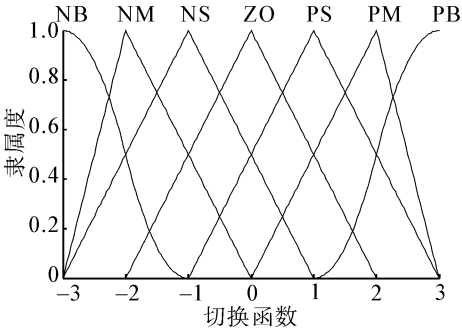


图 2 输入变量隶属函数

Fig.2 Membership function of input variable

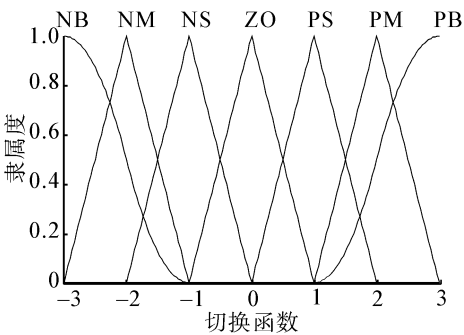


图 3 输出变量隶属函数

Fig.3 Membership function of out put variable

3 仿真结果

仿真条件统一设定为 AUV 因受到小扰动 $f(t)$ 作用而在平衡状态($w_d=0 \text{ m/s}, q_d=0 \text{ rad/s}, \theta_d=0 \text{ rad}, z_d=0$)附近进行小幅度运动,设其初始状态为: $w_o=0.01 \text{ m/s}, q_o=0.02 \text{ rad/s}, \theta_o=0.05 \text{ rad}, z_o=0.5 \text{ m}$.

3.1 标称系统仿真

通过不同控制器对式(1)所示 AUV 标称系统模型进行仿真对比,论证本文提出方法具有较好的控制效果和较强的削弱抖振及抗干扰能力.滑模变结构控制和切换模糊化的滑模变结构控制的深度响应曲线如图 4 所示,可以看到二者都能以较快的响应速度到达平衡位置 z_d ,基本没有稳态误差,且都具有一定的抗干扰能力.

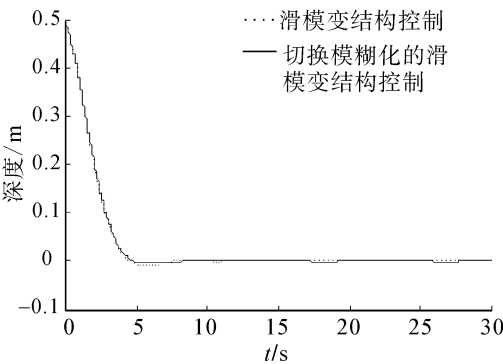


图 4 2 种控制方法的深度响应

Fig.4 Depth response curve of 2 control methods

滑模变结构控制和切换模糊化的滑模变结构控制的纵摇响应曲线如图 5 和图 6 所示,可以看到二者响应速度基本相同,但切换模糊化的滑模变结构控制纵摇响应输出更加平滑,控制效果更好.滑模变结构控制和切换模糊化的滑模变结构控制的舵角响应曲线如图 7 和图 8 所示,可以看到切换模糊化的滑模变结构控制器能够有效降低抖振.

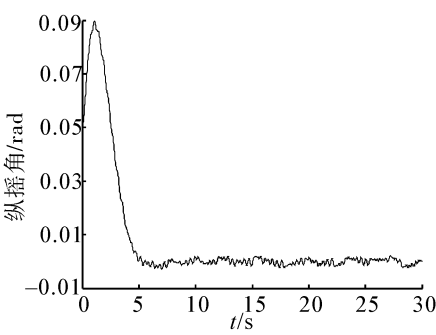


图 5 滑模变结构控制的纵摇响应

Fig.5 Pitching response curve of sliding mode control

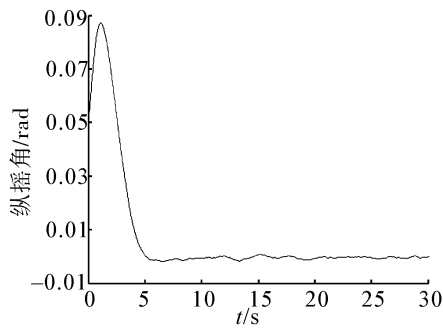


图 6 切换模糊化的滑模变结构控制的纵摇响应

Fig.6 Pitching response curve of sliding mode control based on fuzzy switching

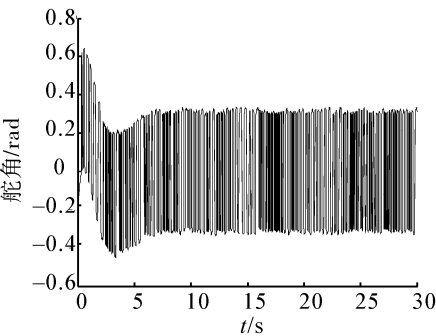


图 7 滑模变结构控制的舵角响应

Fig.7 Pitching response curve of sliding mode control

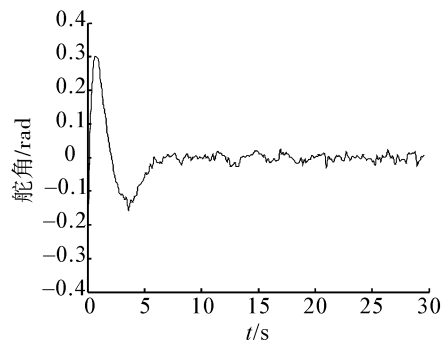


图 8 切换模糊化的滑模控制器的舵角响应

Fig.8 Rudder response curve of sliding mode control

3.2 模型不确定系统仿真

通过对式(2)、(3)所示 AUV 下限系统和上限系统进行仿真,论证本文提出方法针对时变和参数不确定系统具有较强的鲁棒性.

标称系统、上限系统和下限系统的深度响应曲线和纵摇响应曲线如图 9 和图 10 所示,可以看到尽管模型参数有较大变化,但控制效果基本没有变化.标称系统、上限系统和下限系统的舵角响应曲线如图 11 所示,可以看到舵角幅值随模型参数变化放大或缩小,但都在舵机所能承受的范围之内.

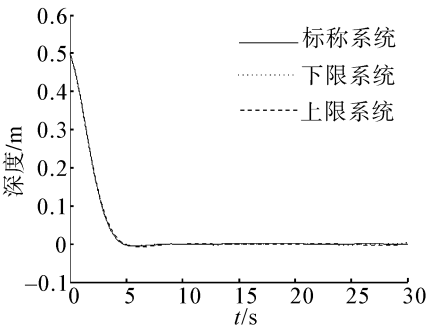


图 9 3 个系统模型的深度响应

Fig.9 Depth response curve of 3 models

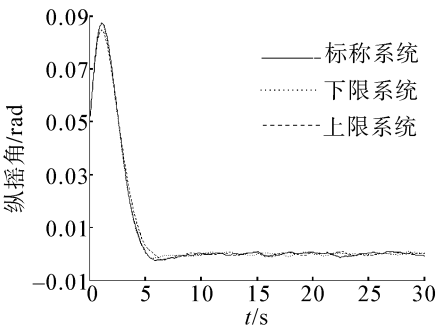


图 10 3 个系统模型的纵摇响应

Fig.10 Pitching response curve of 3 models

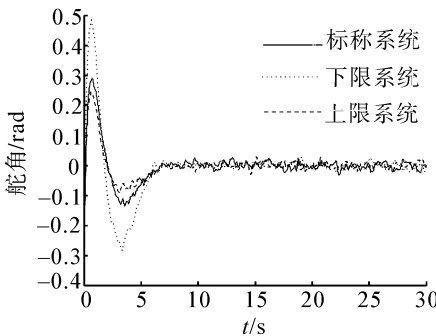


图 11 3 个系统模型的舵角响应

Fig.11 Rudder response curve of 3 models

4 结束语

本文不同于以往研究工作中直接由模糊控制器输出变结构控制律或其变化率的方法,使用模糊控制输出连续非线性控制信号,改变滑模变结构控制在本质上不连续的开关特性来解决抖振问题;在有效降低抖振的同时具有较好的控制效果、较强的鲁棒性和抗干扰能力,能够很好地适应 AUV 控制系统设计的需要。未来可以在其参数确定中引入自适应调节方法,以进一步提高控制系统性能,并最终使用该方法设计控制器应用于实际 AUV 控制系统。

参考文献:

- [1] SHI Xiaocheng, ZHOU Jiajia, BIAN Xinqian, et al. Fuzzy sliding-mode controller for the motion of autonomous underwater vehicle[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Takamatsu, Japan, 2008: 466-470.
- [2] 魏英杰,毕凤阳,张家钟,等.时滞时变 AUV 的模糊变结构控制[J].系统工程与电子技术, 2009, 31(8): 1949-1953.
- WEI Yingjie, BI Fengyang, ZHANG Jiazhong, et al. Fuzzy sliding mode controller for time delay and time varying autonomous underwater vehicles[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(8): 1949-1953.
- [3] 毕凤阳,张家钟,魏英杰,等.模型不确定时滞欠驱动 AUV 的模糊变结构控制[J].哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(3): 358-363.
- BI Fengyang, ZHANG Jiazhong, WEI Yingjie, et al. A fuzzy sliding mode controller for underactuated autonomous underwater vehicles with uncertain time delay[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(3): 358-363.
- [4] 沈建森,周徐昌,高璇.远程 AUV 近水面运动纵向模糊滑模控制[J].鱼雷技术, 2011, 19(5): 360-364.

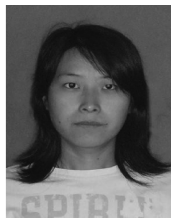
SHEN Jiansen, ZHOU Xuchang, GAO Xuan. Fuzzy sliding mode control for near-surface AUV in longitudinal plane[J]. Torpedo Technology, 2011, 19(5): 360-364.

- [5] 阙如文.无人水下航行器姿态控制策略研究[D].长春: 吉林大学, 2012: 33-46.
- KAN Ruwen. Research on attitude control strategies of unmanned underwater vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2012: 33-46.
- [6] 金鸿章,姚绪梁.船舶控制原理[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2001: 1-13.
- [7] 郑大钟.线性系统理论[M].2 版.北京:清华大学出版社, 2002: 135-209.
- [8] 彭亚为,杜彬,陈娟.基于 Ackermann 公式的滑模控制设计方法[J].北京化工大学学报: 自然科学版, 2011, 38(4): 128-133.
- PENG Yawei, DU Bin, CHEN Juan. Method of sliding mode control design base on Ackermann formula[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2011, 38(4): 128-133.
- [9] 刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社, 2005: 22-40.
- [10] 石辛民,郝整清.模糊控制及其 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社, 2008: 11-51.

作者简介:



郝阳,男,1980 年生,工程师,主要研究方向为先进控制理论及应用。



赵新华,女,1980 年生,讲师,硕士研究生导师,主要研究方向为超空泡航行体、AUV 的动力学及智能控制,发表学术论文 10 余篇,均被 EI 检索。