模型不确定时滞欠驱动 AUV 的模糊变结构控制

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：为了实现具有时变水动力系数、未建模动态和时滞等不确定性的欠驱动自主水下航行器的鲁棒控制，以变结构控制的切换函数及其变化率为模糊控制器的输入，以变结构控制律的变化率为模糊控制器的输出设计了一个模糊变结构控制器；为了得到更好的性能，引入了压缩扩张隶属度函数，设计一定的模糊规则自适应地调整模糊控制器中的比例因子和量化因子；将该控制器和模糊变结构控制器，准滑模控制器进行了仿真对比，证明本文设计的控制器有更好的性能；最后基于该控制器对具有水动力系数不确定性，未建模动态和控制输入时滞的 AUV 运动模型进行了数值仿真，结果表明该控制器有很强的鲁棒性，而且控制成本很小，只在某些情况有极弱的抖振.

关键词：欠驱动自主水下航行器；自适应模糊变结构控制；鲁棒性；不确定性；时滞

中图分类号：TP273 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2010)03－0358－06

A fuzzy sliding mode controller for underactuated autonomous underwater vehicles with uncertain time delay

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 realized the robust control of underactuated autonomous underwater vehicle with uncertainties of time-delay, un-modeled dynamics and time-varying hydrodynamic parameters, a fuzzy sliding mode controller is proposed, with switching function of variable structure control and its derivative as fuzzy control inputs, and derivative of the variable structure control law as fuzzy control output. The design method of the controller offers a systematical means of constructing a set of shrinking-span and dilating-span membership functions for the controller. A technique to adaptively tune scaling factors of fuzzy controller is presented for better performance of eliminating chattering. The contrast simulation results indicate that the proposed adaptive fuzzy sliding mode controller has better performance. And then the controller is applied to the dive plane control of AUV with parameter uncertainties, un-modeled dynamics and control input time delay. The results demonstrate the effectiveness and robustness of the controller with low control effort.

Key words: underactuated AUV; adaptive fuzzy sliding mode control; robustness; uncertainty; time-delay

自主水下航行器(AUV－Autonomous Underwater Vehicle)因为其在海洋开发，海底探测和军事等领域的广泛应用背景而受到各国的重视[1]. 随着 AUV 应用范围的增加，对其自主性的要求也随之增加，而增加 AUV 自主性的关键之一就是提高其控制系统的性能. AUV 有高度的非线性动力学和时变的水动力学性能，易受到海流的干扰[2]，而且 AUV 的具体工作环境随着其工作距离的变化有着很大的变化，这些不确定性要求控制器要有很强的鲁棒性，这使得一般的控制器很难胜任 AUV 的控制任务. 出于节约成本和减轻 AUV 重量的考虑，AUV 大多是欠驱动系统[3]，这使 AUV 的控制成为一个极具挑战性的课题[4].

由于变结构控制在滑模面上对满足匹配条件

收稿日期：2009－05－01.
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.

的任意摄动及外干扰有着较鲁棒性更好的不变性[5]，国内外很多学者[6-7]以传统的滑模变结构控制方法，基于边界层方法的准滑模控制方法及其它演变的变结构控制方法，对自主水下航行器的控制进行了研究，然而滑模变结构控制在本质上的不连续开关特性由于系统存在时间滞后开关等原因将引起系统的抖振现象[8]，这是变结构控制能够实际应用的主要障碍；但目前国内 AUV 的研究基本都没有考虑引起实际系统抖振的时滞等因素，国外相关文献虽然考虑了时滞现象，但却没有考虑水动力系数的时变性或未建模动态.

基于上述考虑，本文以变结构控制的切换函数及其变化率为模糊控制器的输入，变结构控制律的变化率为模糊控制器的输出设计了一个模糊滑模变结构控制器（FSMC - fuzzy sliding mode controller），为提高控制结果的稳定性和精确性，模糊控制输入采用了压缩宽度隶属度函数；为提高控制器响应的快速性，模糊输出采用了扩张宽度隶属度函数. 为得到更好的控制性能，设计一定的模糊规则自适应地调整模糊控制器中的比例因子. 将该控制器与模糊变结构控制器、准滑模控制器进行仿真对比，并应用于控制输入存在时滞，水动力参数有较大的不确定性和未建模动态的自主水下航行器的运动控制，仿真结果表明该控制器的具有很强的鲁棒性和更好的削弱抖振性能.

1　欠驱动 AUV 垂直面运动模型

欠驱动是指系统的控制输入少于其自由度数，为了便于控制系统的分析和综合，通常将航行器的运动分解为水平面和垂直面运动，本文只研究 AUV 的垂直面运动. 假设其轴向速度为恒值，所有横向参数为零，且 AUV 除了尾舵没有别的推进器，此时系统只有一个控制输入 δ_s，而有两个运动自由度，其运动学和动力学方程可表示如下[9]：

$$\begin{cases} m[\dot{w} - uq - x_G\dot{q} - z_Gq^2] = Z_q\dot{q} + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{uq}uq + \\ \quad Z_{uw}uw + Z_{w|w|}w\,|\,w\,|\,+ Z_{q|q|}q\,|\,q\,|\,+ (W - \\ \quad B_0)\cos\theta + u^2Z_{u\delta_s}\delta_s, \\ I_{yy}\dot{q} + m[x_G(uq - \dot{w}) + z_Gwq] = M_q\dot{q} + M_{\dot{w}}\dot{w} + \\ \quad M_{uq}uq + M_{uw}uw + M_{w|w|}w\,|\,w\,|\,+ M_{q|q|}q\,|\,q\,|\,- \\ \quad (x_GW - x_BB_0)\cos\theta - (z_GW - z_BB_0)\sin\theta + M_{u\delta_s}u^2\delta_s, \\ \dot{z} = w\cos\theta - u\sin\theta, \\ \dot{\theta} = q. \end{cases} \tag{1}$$

式中的参数的物理意义参见文献[2].

由于非线性方程组不方便控制系统的分析和综合，所以本文基于小扰动方法将其线性化，假设其基准运动为轴向直航运动，没有艏向运动和横滚运动，其二阶系数为相对小量，可以忽略，且 $(x_G, y_G, z_G) = (x_B, y_B, z_B) = 0$，则由式(1)可得线性化方程组为

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

2　自适应模糊变结构控制器的设计

2.1　传统的滑模变结构控制器设计

变结构控制[5]是 20 世纪 50 年代在前苏联产生的一种控制策略，由于在其滑动模态上对系统的参数和干扰等不确定性具有不变性，近年来在控制理论研究领域受到了高度的重视，而且已经被用来解决许多实际问题，如机器人控制，飞机自适应控制等.

2.1.1　滑模变结构控制器设计　变结构控制的设计包括两个步骤：

1）求切换函数 $s(\boldsymbol{x})$，使切换面 $s(\boldsymbol{x}) = 0$ 上的滑动模态渐近稳定而且具有良好的动态性能；求切换函数的方法有很多，比如极点配置方法、最优控制方法和李亚普诺夫方法等等.

2）求变结构控制律 $u^{\pm}(\boldsymbol{x})$，使任一运动于有限时间内到达切换面，并且要求趋近模态具有良好的动态品质.

对于系统 $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{Ax} + \boldsymbol{Bu}$.

利用 1）中的某种方法可求得其切换函数

$$s(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{Cx}.$$

在滑动模态超平面上

$$\dot{s}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{CAx} + \boldsymbol{CB}u = 0.$$

由上式得到的控制力被称为等效控制力，记为

$$u_{\text{equ}} = (\boldsymbol{CB})^{-1}\boldsymbol{CAx}.$$

一般变结构控制律取趋近律形式，如等速趋近律

$$\dot{s}(\boldsymbol{x}) = -\varepsilon\,\text{sgn}(s(\boldsymbol{x})).$$

这时控制输入 $u = u_{equ} + u^{\pm}(\boldsymbol{x})$. 有的学者提出了基于边界层方法的准滑模控制,它采用饱和函数代替切换函数,可表示为 $\dot{s}(\boldsymbol{x}) = -\varepsilon sat(s(\boldsymbol{x}))$,这种方法有效地削弱了抖振,相对于传统的变结构控制器,它也消除了由于舍入误差引起的仿真抖振. 本文的变结构控制律 $u^{\pm}(\boldsymbol{x})$ 由模糊控制器给出.

2.1.2 变结构控制抖振现象 在变结构控制系统中,产生抖振的原因有物理系统中时间滞后开关、空间滞后开关和系统惯性的影响等,在理想运动情况下是不存在抖振现象的,但传统的变结构控制器数值仿真时,由于其本质的不连续开关特性和仿真中的舍入误差将引起系统的抖振,基于边界层法的准滑模控制能够消除这种抖振,同时也能削弱系统由于时间滞后开关等产生的抖振,滤波、高阶积分滑模等方法也能削弱系统的抖振,用遗传算法有效地优化的模糊变结构控制或神经网络变结构控制可达到消除抖振的最好效果[8].

2.2 自适应模糊变结构控制器的设计

模糊控制[10](fuzzy logic control)以 20 世纪 60 年代 Lotfi A. Zadeh 的模糊数学为基本理论基础,从 70 年代进入实际工程应用阶段,在过去 20 多年中,模糊控制作为一种有别于传统控制理论的控制方法,充分发挥其不需要对象数学模型,能充分运用控制专家的信息,在具有不精确和不确定信息的情况下,模糊控制的效果往往优于常规控制,其本身有着一定的鲁棒性.

2.2.1 模糊控制器的输入和输出 本文设计的模糊控制器有两个输入和一个输出. 两个输入为 $k_1 s(\boldsymbol{x})$ 和 $k_2 \dot{s}(\boldsymbol{x})$,其中 k_1 和 k_2 分别是变结构控制中的切换函数 $s(\boldsymbol{x})$ 和及其导数 $\dot{s}(\boldsymbol{x})$ 的比例因子;输出为变结构控制律的变化率 $\Delta u^{\pm}(\boldsymbol{x})/k_3$,其中 k_3 是量化因子.

2.2.2 隶属度函数的选取 模糊控制输入和输出均选择三角形和梯形模糊集合,模糊分割的数目都为 7,模糊语言名称均为 NB(负大),NM(负中),NS(负小),ZE(零),PS(正小),PM(正中),PB(正大). 为了获得更好的控制性能,控制输入采用压缩宽度隶属度函数(shrinking - span membership functions)[11],模糊分割点可表示为 $X_i = i/ms_f^{m-|i|}$;模糊控制输出采用扩张宽度隶属函数(dilating - span membership functions),模糊分割点可表示为

$$X_i = \frac{i - m\mathrm{sgn}(i)}{m} d_f^{m-|i-m\mathrm{sgn}(i)|} + \mathrm{sgn}(i).$$

选择 $s_f = d_f = 0.5, m = 3$.

2.2.3 模糊规则及清晰化计算 本文模糊变结构控制器的模糊规则是:If $k_1 s(x)$ is A and $k_2 \dot{s}(x)$ is B, then $\Delta u^{\pm}(x)/k_3$ is C, 如表 1,清晰化计算采用加权平均法(面积重心法 centroid).

表 1 模糊控制规则

$k_1 s(\boldsymbol{x})$	$k_2 \dot{s}(\boldsymbol{x})$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	NS
NS	PB	PB	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	MB
PS	PM	PS	ZE	NS	NM	MB	NB
PM	PS	ZE	NS	NM	MB	NB	NB
PB	ZE	NS	NM	MB	NB	NB	NB

2.2.4 自适应调整比例因子机制 为了更好地削弱变结构控制系统中的抖振,本文基于一定的模糊规则来自适应调整上面模糊变结构控制器中的比例因子和量化因子,取 $k_i = k'_i k, i = 1,2,3$,其中 k'_i 为给定的恒值,k 为设计的一个模糊控制器的输出;取 $\tilde{z} = z - z_d$,该控制器以 $\tilde{z}$ 和 $\dot{\tilde{z}}$ 为模糊控制器的输入,也采用压缩扩张隶属度函数,具体如图 1. 模糊规则是:If $\tilde{z}$ is A and $\dot{\tilde{z}}$ is B, then k is C,具体规则如表 2.

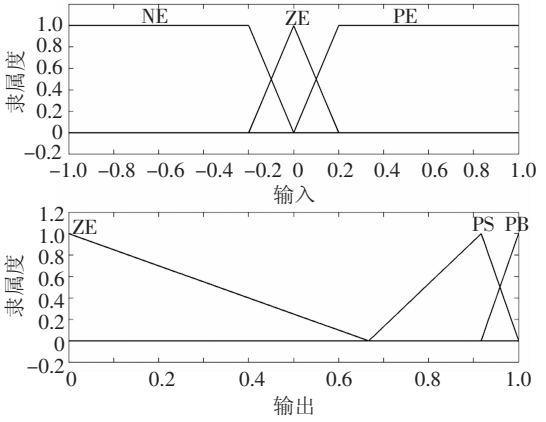


图 1 输入输出隶属度函数

表 2 模糊规则

$\dot{\tilde{z}}$	$\tilde{z}$		
	NE	ZE	PE
NE	PB	PS	PS
ZE	PB	ZE	PB
PE	PS	PS	PB

3 数值仿真

3.1 仿真模型的建立

3.1.1 标称模型的确立 取轴向速度为 2 m/s,基于国外某一典型 AUV 的水动力系数[12]得标称

模型为

$$\begin{bmatrix}\dot{w}\\ \dot{q}\\ \dot{\theta}\\ \dot{z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-1.040 & 0.865 & -0.020 & 0\\ 6.000 & -0.681 & 0.708 & 0\\ 0 & 1.000 & 0 & 0\\ 1.000 & 0 & -2.000 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}w\\ q\\ \theta\\ z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-0.072\\ -0.722\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\delta_s(t)\ . \tag{2}$$

本文的模糊变结构控制器是基于该标称模型使用前面介绍的控制方法设计的.

3.1.2　不确定模型的确立　为了检验基于标称模型(式(2))设计的模糊变结构控制器的鲁棒性,下面给出考虑水动力系数的时变性、时滞特性和未建模动态等不确定性的系统模型.

为更好地检验本文设计的控制器的鲁棒性,设所有系统参数均具有较大不确定性. 为便于表述,取p代表所有水动力系数标称值,p^*代表实际水动力系数. 设所有相关水动力系数有 30% 的相对不确定度,取两个水动力系数状态 p_1 和 p_2,可表示为

$$p_2 = 0.7p \leqslant p^* \leqslant 1.3p = p_1.$$

本文基于 p_1 和 p_2 两个状态建立两个参数摄动和考虑未建模不确定性的模型,根据式(1),在水动力系数无不确定性时并考虑未建模不确定性的系统表示为

$$\begin{bmatrix}\dot{w}\\ \dot{q}\\ \dot{\theta}\\ \dot{z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-1.040 & 0.865 & -0.020 & 0\\ 6.000 & -0.681 & 0.708 & 0\\ 0 & 1.000 & 0 & 0\\ 1.000 & 0 & -2.000 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}w\\ q\\ \theta\\ z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-0.072\\ -0.722\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\delta_s(t)+\begin{bmatrix}-2.010\,|w| & 0.665\,|q| & 0 & 0\\ 0.848\,|w| & -22.700\,|q| & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}w\\ q\\ \theta\\ z\end{bmatrix}.$$

基于水动力系数 p_1 考虑未建模不确定性的系统表示为

$$\begin{bmatrix}\dot{w}\\ \dot{q}\\ \dot{\theta}\\ \dot{z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-1.190 & 0.730 & -0.020 & 0\\ 6.680 & -0.718 & 0.603 & 0\\ 0 & 1.000 & 0 & 0\\ 1.000 & 0 & -2.000 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}w\\ q\\ \theta\\ z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-0.0783\\ -0.796\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\delta_s(t)+\begin{bmatrix}-2.260\,|w| & 0.813\,|q| & 0 & 0\\ |w| & -25.200\,|q| & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}w\\ q\\ \theta\\ z\end{bmatrix}.$$

基于水动力系数 p_2 考虑未建模不确定性的系统表示为

$$\begin{bmatrix}\dot{w}\\ \dot{q}\\ \dot{\theta}\\ \dot{z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0.950 & 1.050 & -0.021 & 0\\ 9.280 & -0.615 & 0.858 & 0\\ 0 & 1.000 & 0 & 0\\ 1.000 & 0 & -2.000 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}w\\ q\\ \theta\\ z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}-0.0628\\ -0.615\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\delta_s(t)\cdot\begin{bmatrix}-1.670\,|w| & 0.462\,|q| & 0 & 0\\ 0.653\,|w| & -19.300\,|q| & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}w\\ q\\ \theta\\ z\end{bmatrix}.$$

滞后时间的确定:由于控制器计算处理、数字转换和电机驱动都需要一定的时间,所以作为控制输入的舵角的偏转就有一定的相对时间滞后,文[13]根据其研究 AUV 的性能估计的滞后时间为 0.1 s,AUV 成本不同,滞后时间也不同,假设本文研究的 AUV 所用器件更便宜,成本更低,其舵角控制输入的滞后时间选为 0.18 s.

3.1.3　数值仿真相关参数　本文的仿真参数为

$$\boldsymbol{C} = [0.51 \quad -0.5 \quad -0.73 \quad 0.5],$$

$$\boldsymbol{x} = [w \quad q \quad \theta-\theta_d \quad z-z_d],$$

$$z_d = 10\ \text{m}, \theta_d = 0°.$$

自适应模糊变结构控制器部分:输入加权系数 $k'_1 = 1, k'_2 = 20$,输出加权系数 $k'_3 = 1$.

模糊变结构控制器部分:输入加权系数 $k_1 = 1, k_2 = 20$,输出加权系数 $k_3 = 0.4$.

准滑模变结构控制器:$\varepsilon = 0.4$.

初始状态:$w_0 = 0.5$ m/s,$q_0 = -0.3$ (°/s),$\theta_0 = 0.2°$,$z_0 = 0$ m.

3.2　数值仿真及其结果分析

首先通过不同控制器对具有标称水动力系数,未建模动态和控制输入存在一定时滞的 AUV 系统进行数值仿真对比,以论证本文设计的自适应模糊变结构控制有更好的削弱抖振性能;然后通过对具有水动力系数不确定性,未建模动态和

控制输入存在一定时滞的 AUV 系统的数值仿真，来论证本文设计的控制器有很强的鲁棒性和很好的削弱抖振性能.

3.2.1 变结构控制器数值仿真对比 许多相关研究已证明准滑模变结构控制能够削弱传统滑模变结构控制抖振现象，所以本文将对自适应模糊变结构控制器、模糊变结构控制器和准滑模控制器进行仿真对比，仿真结果如图 2 ~3.

在仿真图 2 中，3 个变结构控制器几乎同时无稳态误差到达 z_d，且都无抖振现象；在图 3 中，自适应模糊变结构控制器舵角在约 60 s 之后就为 0，且其后基本无抖振现象，而模糊变结构器和准滑模控制器舵角都有一定的抖振现象，所以自适应模糊变结构控制器削弱抖振性能更好，具有更好的控制性能.

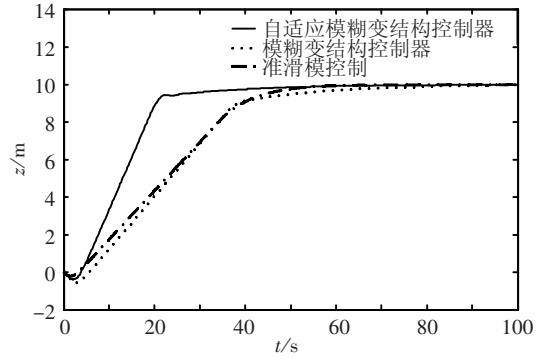


图 2 3 个变结构控制器的深度响应曲线

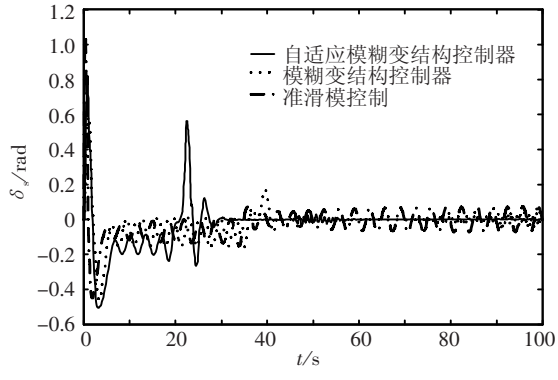


图 3 3 个变结构控制器的舵角响应曲线

3.2.2 模型不确定时滞 AUV 系统的仿真 将本文设计的控制器应用于具有水动力系数不确定性，未建模动态和控制输入存在一定时滞的 AUV 系统，检验本文设计的模糊变结构控制器的鲁棒性及削弱抖振的性能，仿真结果如图 4 ~6.

图 4 和图 5 表明本文设计的自适应模糊变结构控制器在 AUV 存在较大的水动力系数不确定性，未建模动态和控制输入存在一定时滞，且仅有一个控制输入情况下很好地实现了欠驱动自主水下航行器的深度控制和舵角镇定，表明该控制器具有很强的鲁棒性. 图 6 表明在变结构系统到达基本平衡状态后，基于标称水动力系数和基于水动力系数 p_1 的系统基本无抖振现象，基于水动力系数 p_2 的系统也仅有很弱的抖振现象；在控制过程中舵角偏转较小，次数也较少，控制成本很小，而对于 AUV 而言，由于其携带能量有限，能量损耗的多少是衡量 AUV 控制器好坏的一个极其重要的标准，这说明该控制器非常适于欠驱动 AUV 的运动控制. 所以，本文设计的自适应模糊变结构控制器很好地实现了对具有时滞不确定性欠驱动 AUV 的运动控制.

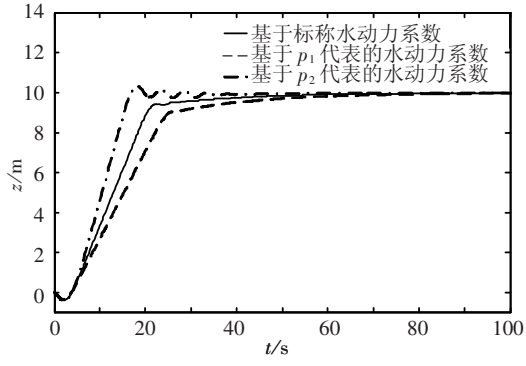


图 4 深度 z 仿真曲线

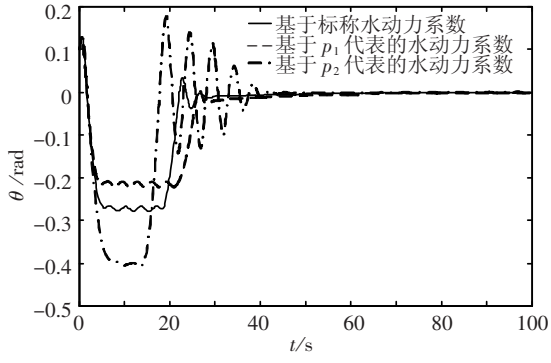


图 5 俯仰角 θ 仿真曲线

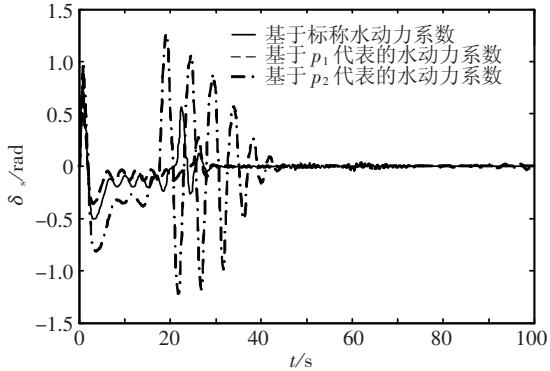


图 6 舵角 δ_s 仿真曲线

4 结 论

本文设计的自适应模糊变结构控制器具有很强的鲁棒性，能够在控制成本很小而且基本无抖振现象的情况下实现欠驱动自主水下航行器的垂直面控制.

将来需要将遗传算法和模糊变结构控制有效地结合，优化模糊规则和某些相关重要参数以达到削弱抖振的最好效果.

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] FOSSEN T I. Guidance and Control of Ocean Vehicles [M]. Chichester, U. K.: Wikey, 1994.

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

[4] REPOULIAS F, PAPADOPOULOS E. Planar trajectory planning and tracking control design for underactuated AUVs[J]. Ocean Engineering, 2007, 34:1650 – 1667.

[5] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京：科学出版社，1996.

[6] ROBERTO C, PAPOULIAS F A, JEALEY A J. Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1990, 15(3):152 – 160.

[7] 朱计华，苏玉民，李晔，等. AUV 近水面运动的积分变结构控制及仿真[J]. 系统仿真学报，2007，19(22)：5321 – 5324.

[8] 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)：8.

[9] NAIL M S, SINGH S N. State-dependent Riccati equation-based robust dive plane control of AUV with control constraints [J]. Ocean Engineering, 2007, 34:1711 – 1723.

[10] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京：清华大学出版社，2003.

[11] CHEN C L, HSIEH C T. User – friendly design method for fuzzy logic controller [J]. IEE Proceedings – Control Theory and Applications, 1996, 143(4), 358 – 366.

[12] PRESTERO T. Verification of a six – degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicles [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Tecnology, 2001.

[13] KENNEDY J. Decoupled modelling and controller design for the hybrid autonomous underwater vehicle: MACO [D]. Canada: University of Victoria, 2002.

（编辑　张　宏）

国内第一部量子优化算法方面的专著

——评《量子计算与量子优化算法》

沈　毅

（哈尔滨工业大学 航天学院副院长，教授，博士生导师）

随着科学技术的发展，人们对计算机计算速度的要求也随之提高，利用多个计算体的并行计算、分布计算等应运而生，同时探索如何提高单个计算体的计算速度以及新的计算体制与方法也逐渐展开，量子计算和量子计算机被寄予了极大的期望.

量子计算有何特点？如何利用这些特点提高优化算法的性能？这是很多学者关心和探讨的问题之一.

李士勇教授等的《量子计算与量子优化算法》一书，从与量子计算和量子优化相关的量子力学基础出发，在介绍量子计算基础和基本量子算法的基础上，着重介绍了作者近几年在国家自然科学基金资助下，探索研究的量子搜索算法、量子遗传算法、量子优化算法，以及量子优化算法与神经网络、模糊控制等结合方面，取得了多项重要的研究成果.

该书是国内第一部有关量子优化算法方面的专著，作者对量子计算及量子优化算法的国内外有关研究进行了很好的综述，并详细介绍了作者在此方面的创新性研究成果，包括算法的原理、结构、实现步骤、收敛性分析、仿真对比以及算法源程序清单等.

该书内容具有多种前沿学科的交叉性，在写作上由浅入深、层次清晰、可读性好，对相关科技人员和研究生是一部很有价值的参考书.