

doi: 10.7690/bgzdh.2021.12.018

一种消除垂直面抖振的无人水下航行器控制策略

龙景豪, 周浩

(海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033)

摘要: 针对如何削降或消除无人水下航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)控制中常见的抖振现象, 提出一种新的姿态控制方案——模糊变结构控制。将通常变结构中的切换项变换为模糊控制输出, 建立 UUV 垂直面运动模型, 设计控制器, 并进行算例仿真与分析。仿真结果表明: 该方案可有效抑制抖振, 获得优良的跟踪稳态, 并且对 UUV 模型的不确定性及其参数变化具备较强鲁棒性。

关键词: UUV; 姿态控制; 模糊变结构控制; 抑制抖振; 鲁棒性

中图分类号: TJ99 **文献标志码:** A

A Control Strategy for Eliminating Vertical Chattering of Unmanned Underwater Vehicle

Long Jinghao, Zhou Hao

(College of Weapons Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at how to reduce or even eliminate the chattering phenomenon common in the unmanned underwater vehicle(UUV) control, a new attitude control scheme (fuzzy variable structure control) is proposed. By transforming the switching term of the variable structure into the fuzzy control output, establish UUV vertical motion model, design controller, and carry out example simulation and analysis. The simulation results show that the proposed control scheme can effectively suppress chattering and obtain excellent tracking steady state. Moreover, it has strong robustness to the uncertainty of the UUV model and its parameter changes.

Keywords: UUV; attitude control; fuzzy variable structure control; chattering suppression; robustness

0 引言

近年来, 无人水下航行器(UUV)作为一个复杂系统已涉及多门学科, 成为众多领域的研究热点, 而航行器姿态的精准控制是需要重点关注的首要问题。无人水下航行器的控制有其特殊性, 既要求系统具有较强的鲁棒性, 又要求系统能克服模型的不确定性, 并能对海洋环境具备一定抗扰能力。目前的研究进展^[1-6]表明, 变结构控制基本满足无人水下航行器的控制需求, 已得到较为广泛的应用。

因“结构”不固定而得名的变结构控制属于一种常见的非线性控制, 能在动态控制过程中不断根据系统当前状态而改变控制特性, 其突出优势是响应速度快、对参数的变化不灵敏、具有抗扰动性等。大量应用结果表明, 限制变结构控制广泛而深入应用的是控制系统频繁出现抖振现象。为了让变结构控制依然呈现其突出优势, 笔者结合模糊控制的独特优势提出一种模糊变结构控制方案——以变结构控制为基础, 合理柔化控制信号, 化不连续为连续, 针对航行器垂直面的具体控制模型, 设计出基于李

雅普诺夫稳定性理论的模糊变结构控制器, 并通过仿真验证该控制方案的有效性, 抑制抖振效果以及对模型、参数变化的鲁棒性。

1 UUV 垂直面运动模型

如图 1 所示, 依据国际拖曳水池会议(ITTC)的推荐和造船与轮机工程师协会(SNAME)的术语体系, 建立分析 UUV 姿态控制的坐标系——固定坐标系 $E-\xi\eta\zeta$ 和运动坐标系 $O-xyz$ 。

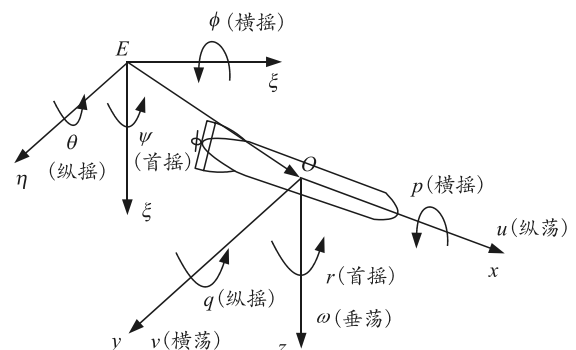


图 1 UUV 的固定坐标系与运动坐标系

图中: v 、 u 和 ω 分别为 UUV 在运动坐标系下

收稿日期: 2021-08-21; 修回日期: 2021-09-22

作者简介: 龙景豪(1999—), 男, 贵州人, 硕士, 从事兵器控制工程研究。E-mail: 1491565757@qq.com。

的横荡速度、纵荡速度和垂荡速度； p 、 q 和 r 分别为 UUV 在运动坐标系下的横摇角速度、纵摇角速度和首摇角速度； ϕ 、 θ 和 ψ 分别为 UUV 在固定坐标系下的横摇角、纵摇角和首摇角； ξ 、 η 和 ζ 为 UUV 在固定坐标系下的具体位置坐标。

为便于进行姿态控制的分析研究，将关注点从 UUV 实体六自由度模型的复杂性转移到控制策略的探讨上。考虑将 UUV 的运动进行分解，具体分解为垂直面内的运动和水平面内的运动^[7]。笔者始终针对 UUV 在垂直面内的姿态控制进行分析。

垂直面控制即航行器在垂直面内的垂荡运动控制和纵摇运动控制，其控制对象是深度 z 和纵摇角 θ ，控制量是航行器的水平舵角 δ 。其航行器垂直面的控制原理即由航行器深度 z 、纵摇角 θ 、纵摇角速度 q 和垂荡速度 w 的偏差共同组成滑模切换面函数 s ，设计滑模变结构的控制律达到 $s=0$ ，即能确保各个偏差为 0。采用模糊控制柔化控制响应来大幅削弱控制中的抖振问题，通过不断调试隶属函数获得更好的控制效果。

在假定除 UUV 轴向速度以外的轴向和横向参量均为 0(其中轴向速度设为恒值)的情况下，可将 UUV 六自由度模型简化为 UUV 垂直面运动模型，下列方程式是该垂直面运动的简化方程^[8]：

垂荡运动方程为：

$$m[\dot{w} - uq - x_G q - z_G q^2] = Z_{\dot{q}} \dot{q} + Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{uq} uq + Z_{uw} uw + Z_{|w|} w|w| + Z_{|q|} q|q| + (W - B) \cos \theta + Z_{u\delta} u^2 \delta_0 \quad (1)$$

纵摇运动方程为：

$$I_{yy} \dot{q} + m[x_G(-\dot{w} + uq) - z_G wq] = M_{\dot{q}} \dot{q} + M_{\dot{w}} \dot{w} + M_{uq} uq + M_{uw} uw + M_{|w|} w|w| + M_{|q|} q|q| + (x_G W - x_B B) \cos \theta - (z_G W - z_B B) \sin \theta + M_{u\delta} u^2 \delta_0 \quad (2)$$

坐标变换关系为：

$$\dot{z} = w \cos \theta - u \sin \theta, \quad \dot{\theta} = q \quad (3)$$

式中： m 为 UUV 质量； I 为转动惯量； Z 和 M 为水动力系数^[9]； W 和 B 分别为 UUV 受到的重力和浮力； z 、 θ 分别为深度和纵摇角； u 、 q 和 w 分别为纵荡速度、纵摇角速度和垂荡速度； x_G 、 z_G 和 x_B 、 z_B 分别为 UUV 重心和浮心位置坐标； δ 为水平舵角。

在对非线性控制系统进行分析时，通常会对其进行线性化处理，获取合理的线性近似表达，但只适用于状态变量较小的情形。在进行 UUV 运动姿态分析时，考虑到 UUV 受到外界干扰，将 θ 、 w 和 q 看作微小量；因此，干扰可看作受控对象在平衡

点周围作小尺度变化，令 $\sin \theta \approx \theta$ 且 $\cos \theta \approx 1$ ，再采取线性化处理，忽略二阶及二阶以上的非线性项，并且令 $(x_G, y_G, z_G) = (x_B, y_B, z_B) = (0, 0, 0)$ ，得到^[10]：

$$\begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & -Z_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ -M_{\dot{w}} & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{uw} u & (Z_{uq} + m)u & 0 & 0 \\ M_{uw} u & M_{uq} u & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{u\delta} u^2 \\ M_{u\delta} u^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_0 \quad (4)$$

式中： $M = \begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & -Z_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ -M_{\dot{w}} & I_{yy} - M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ；

$$A' = \begin{bmatrix} Z_{uw} u & (Z_{uq} + m)u & 0 & 0 \\ M_{uw} u & M_{uq} u & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -u & 0 \end{bmatrix} ; \quad B' = \begin{bmatrix} Z_{u\delta} u^2 \\ M_{u\delta} u^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} ;$$

$x = [w \ q \ \theta \ z]^T$ ； $u = \delta$ ； $A = M^{-1} A'$ ； $B = M^{-1} B'$ ；式(4)可简写为： $\dot{x} = Ax + Bu$ 。

将 REMU-S100 作为研究案例，根据文献[11]采用的参数为垂直面运动模型中的标称值，后续控制器设计时也会使用这些标称值，具体有^[12]：

$$\begin{aligned} m &= 30.48 \text{ kg}, \quad I_{yy} = 3.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \\ M_{\dot{q}} &= -4.88 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{rad}, \quad M_{|q|} = -188 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{rad}^2, \\ M_{\dot{w}} &= -1.93 \text{ kg} \cdot \text{m}, \quad M_{|w|} = 3.18 \text{ kg}, \\ M_{u\delta} &= -6.15 \text{ kg} / \text{rad}, \quad M_{uq} = -2 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{rad}, \\ M_{uw} &= 24 \text{ kg}, \quad Z_{\dot{q}} = -1.93 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{rad}, \\ Z_{|w|} &= -131 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{m}, \quad Z_{u\delta} = -6.15 \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{rad}), \\ Z_{|q|} &= -0.632 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{rad}^2, \quad Z_{uw} = -28.6 \text{ kg} / \text{m}, \\ Z_{uq} &= -5.22 \text{ kg} / \text{rad}, \quad Z_{\dot{w}} = -35.5 \text{ kg}. \end{aligned}$$

将各参量代入式(2)–(4)中，得到：

$$\begin{bmatrix} 65.98 & 1.93 & 0 & 0 \\ 1.93 & 8.33 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -28.6u & 25.26u & 0 & 0 \\ 24u & -2u & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -6.15u^2 \\ -6.15u^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_0$$

线性变换后得到：

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.52u & 0.432 & 5u & -0.010u & 0 \\ 3u & -0.340 & 5u & 0.354u & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -u & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.018 & 0u^2 \\ -0.180 & 5u^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_0$$

试取轴向速度 $u=3$ m/s, 因此建立的系统状态方程为：

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.56 & 1.297 & 5 & -0.030 & 0 \\ 9 & -1.021 & 5 & 1.062 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.162 & 0 \\ -1.624 & 5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_0 \quad (5)$$

考虑到 UUV 模型的不确定性, 将与水动力系数相关的不确定度取为 30%^[13]。即 $p_{\text{上限}}=1.3p$, $p_{\text{下限}}=0.7p$, 进而分别得到上限参量和下限参量为指标的 UUV 垂直面运动状态方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.028 & 1.686 & 7.5 & -0.039 & 0 \\ 11.700 & -1.327 & 9.5 & 1.380 & 6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.210 & 60 \\ -2.111 & 85 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_0 \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.092 & 0.908 & 2.5 & -0.021 & 0 \\ 6.300 & -0.715 & 0.5 & 0.743 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.113 & 40 \\ -1.137 & 15 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_0 \quad (7)$$

2 控制器设计

在建立 UUV 垂直面运动模型后, 便可进行控

制器的设计, 其姿态控制方案如图 2 所示。

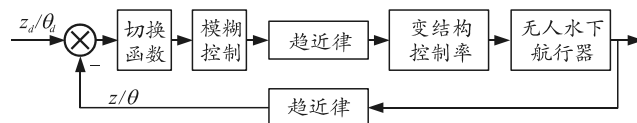


图 2 模糊化变结构控制构架原理

图中： z_d 、 θ_d 分别为 UUV 的目标航行深度与目标纵摇角； z 、 θ 分别为其实际航行深度与实际纵摇角。

2.1 变结构控制器

综上所述, 线性系统的方程：

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B(u + f(t)) \\ s = Cx \end{cases} \quad (8)$$

式中： A 与 B 按式(5)选取； $f(t)$ 为正态分布的微量随机扰动^[13]。

显然 $\text{rank}[B, AB, A^2B, A^3B]=4$, 系统 $\Sigma(A, B)$ 完全可控, 可进行极点的任意配置, 现设置 $\lambda_1 = -1$, $\lambda_2 = -\sqrt{2}/2 + (\sqrt{2}/2)i$, $\lambda_3 = -\sqrt{2}/2 - (\sqrt{2}/2)i$, λ_4 设为负无穷远处, 属系统非主导极点。采用 Ackermann 公式^[14]来设计切换面函数 $s=Cx$, 式中 C 值为：

$$C = [0, \dots, 0, 1][B, AB, \dots, A^{n-1}B]^{-1}P(A) \quad (9)$$

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^[14], 有：

$$C = [0.797 \ 0, -1.464 \ 5, -1.729 \ 0, 0.411 \ 3]$$

切换控制为：

$$u = u_{eq} - M \cdot \text{sgn}(s) \quad (10)$$

式中： u_{eq} 为等效控制； $\text{sgn}(\bullet)$ 为符号函数； M 为待定常数。

2.2 模糊化变结构控制器

针对式(5), 选取 Lyapunov 函数为 $V = s^2/2 \geq 0$, 于是 $\dot{V} = s\dot{s} = s(CAx + CBu)$; 式(10)中, 选取 $M = \varepsilon(CB)^{-1}$, 其中 ε 大于 0, 则有 $\dot{V} = -\varepsilon s \text{sgn}(s) \leq 0$ 。假定系统存在外界干扰, 则有 $\dot{V} = s\dot{s} = s(CAx + CB(u + f(t)))$, 此时只要取 $\varepsilon > \max |f(t)|$, V 函数的导数仍为非正。

进一步优化的方案：将模糊控制的输出替换符号函数, 达到切换模糊化, 于是得到趋近律 $u = u_{eq} - M \cdot \text{fuzzy}(s)$, 式中 $\text{fuzzy}(\bullet)$ 为模糊控制规则。

由于模糊控制为 SISO, 则输入与输出的论域分别为：

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

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

上述表达是模糊控制中的模糊语言为变量，其含义为：NB 为负大，NM 为负中，NS 为负小，ZO 为 0，PS 为正小，PM 为正中，PB 为正大。模糊控制输入和输出的取值范围显然都是[-3,3]，其模糊规则为：

如果输入量为 $A=A_i$ ，那么输出量为 $B=B_i$ ，即：

If $A=\text{NB}$ then $B=\text{NB}$; If $A=\text{NM}$ then $B=\text{NM}$; If $A=\text{NS}$ then $B=\text{NS}$;

If $A=\text{ZO}$ then $B=\text{ZO}$; If $A=\text{PS}$ then $B=\text{PS}$; If $A=\text{PM}$ then $B=\text{PM}$;

If $A=\text{PB}$ then $B=\text{PB}$.

模糊控制的效果主要依赖隶属函数和清晰化方法，图 3 与 4 分别给出了所确定的模糊控制输入变量与输出变量的隶属函数。实际上使用取大——取小近似推理及模糊蕴含规则实现了输入的模糊化，具体是采用面积中心法^[15]。

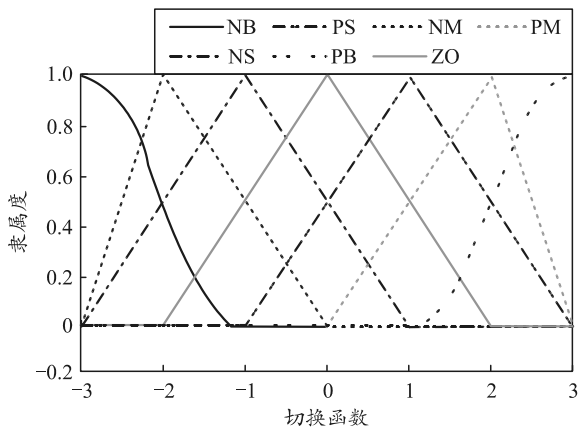


图 3 输入变量隶属函数

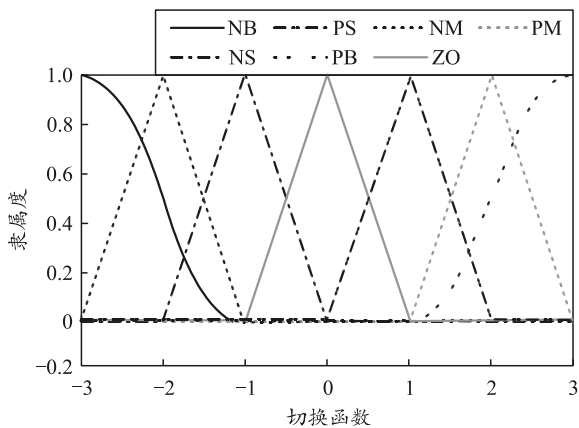


图 4 输出变量隶属函数

3 算例仿真与分析

为验证笔者设计方案的实际效果，针对 UUV

垂直面运动模型，利用 Matlab 搭建 simulink 仿真模块系统最终完成数值仿真。仿真条件如下：UUV 初始状态深度 z_d 为 1 m、纵摇角 θ_d 为 0.1 rad、纵摇角速度 q_d 为 0.1 rad/s 和垂荡速度 w_d 为 0.05 m/s，UUV 受到外界小扰动 $f(t)$ 的作用而在平衡状态(即纵摇角 θ 、纵摇角速度 q 和垂荡速度 w 均为 0)附近进行小幅运动。

3.1 标称系统算例仿真

前文曾提到普通变结构控制和模糊化变结构控制 2 种控制方案，采用上述 UUV 垂直面标称系统算例式(5)进行不同控制方案的仿真。

如图 5 与 6 所示，分别给出了普通变结构与模糊变结构 2 种不同控制方案下的舵角与切换面函数响应曲线。不难发现，模糊变结构控制能够更加有效地抑制抖振，而且控制舵角幅值明显小于变结构控制舵角幅值，切换面函数幅值明显小于变结构控制切换面函数幅值。

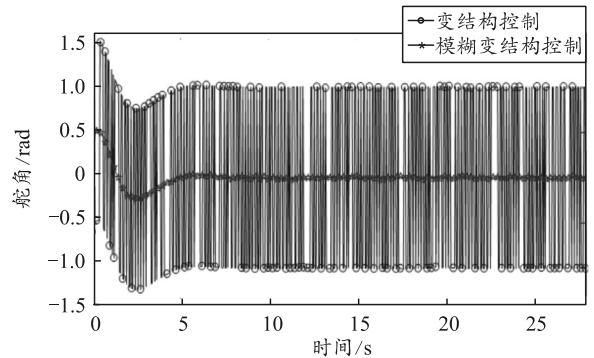


图 5 不同方案下舵角响应

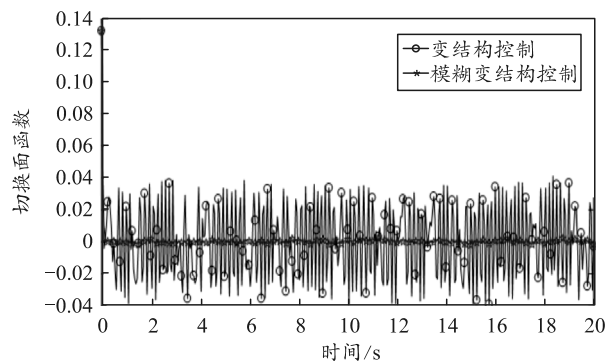


图 6 不同方案下切换面函数响应

如图 7 与 8 所示，分别给出了不同方案下的深度响应曲线与纵摇角响应曲线。不难发现，控制工程中常见的抖振现象能被模糊变结构控制方案很好地抑制，变结构控制所需的舵角值也比模糊变结构控制所需的舵角值要大得多，同样对于切换面函数的大小也有类似结论。

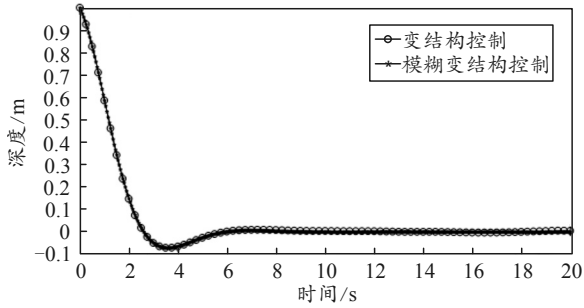


图 7 不同方案下深度响应曲线

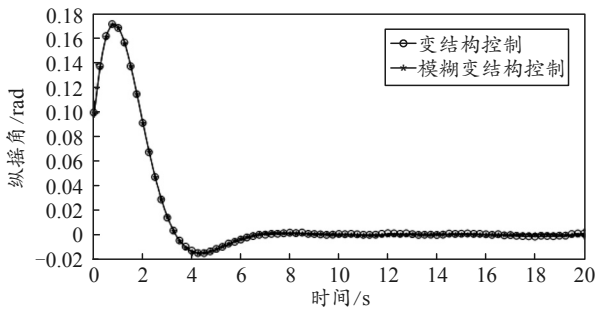


图 8 不同方案下纵摇角响应曲线

如图 9 与 10 所示,分别给出了不同方案下的纵摇角速度响应曲线和垂荡速度响应曲线。不难看出,2 种控制方案的整体响应速度相似,不过模糊变结构控制的纵摇角速度和垂荡速度的响应更加平滑,显然控制效果更好。

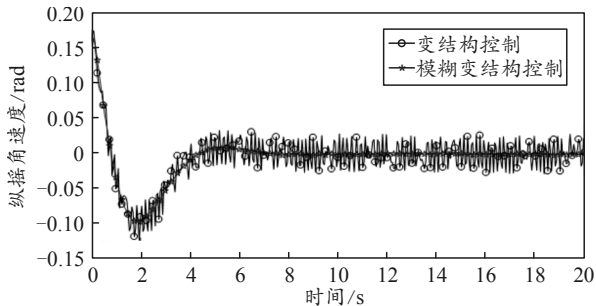


图 9 不同方案下纵摇角速度响应曲线

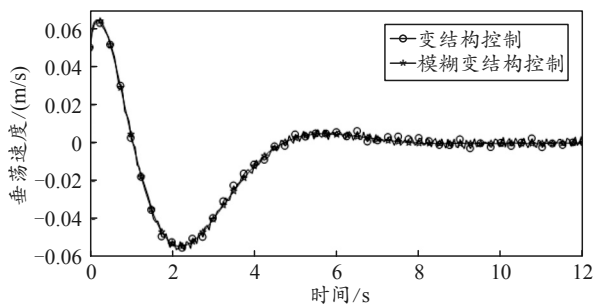


图 10 不同方案下垂荡速度响应曲线

3.2 模型不确定系统算例仿真

为验证普通变结构与模糊变结构 2 种控制方案对和参数不确定系统或时变系统的鲁棒性,对 UUV 垂直面控制中的标称系统(p)、上限系统($1.3 p$)、下

限系统($0.7 p$)进行仿真对比。

如图 11—16 所示,分别将标称系统、上限系统与下限系统 3 类系统同时进行仿真获得的舵角响应曲线、切换面响应曲线、深度响应曲线、纵摇角响应曲线、纵摇角速度响应曲线和垂荡速度响应曲线。不难看出,尽管模型参数的变化较大(30%),但其控制效应相当,说明在模型不确定或其参数变化的情况下,变结构控制具有较强鲁棒性。

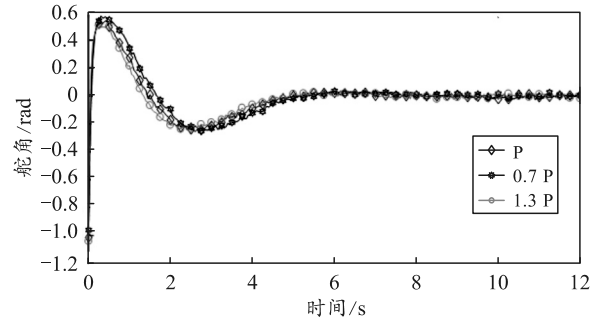


图 11 3 类系统舵角响应曲线

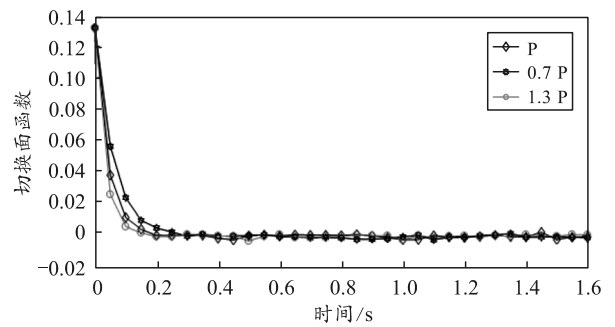


图 12 3 类系统切换面函数响应曲线

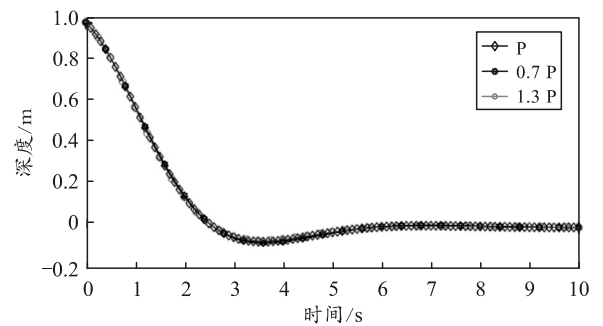


图 13 3 类系统深度响应曲线

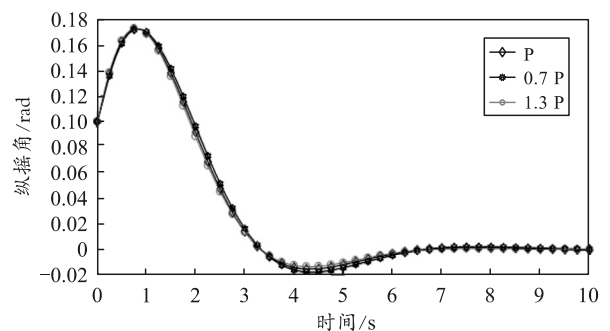


图 14 3 类系统纵摇角响应曲线

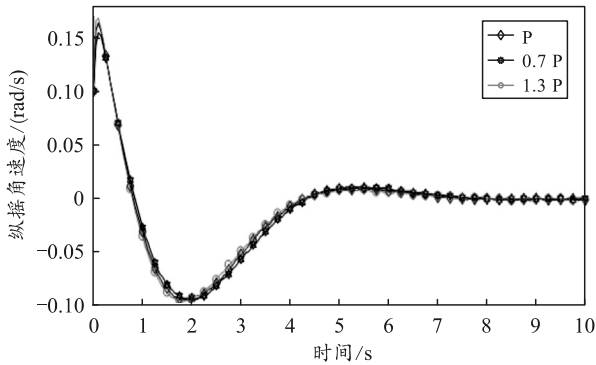


图 15 3 类系统纵摇角速度响应曲线

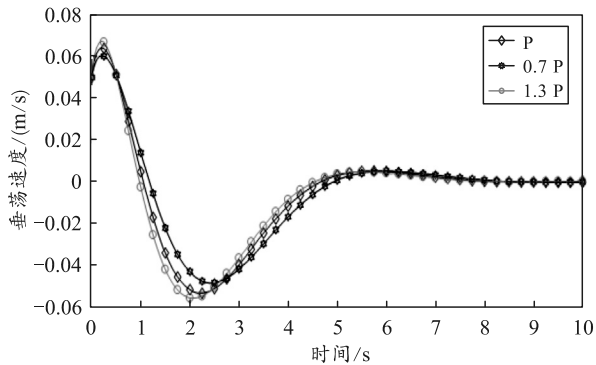


图 16 3 类系统垂荡速度响应曲线

上述仿真结果表明：在变结构控制中，通过引入切换模糊化方案，UUV 垂直面运动的控制效果能得到提升，而且其控制具有较强鲁棒性，能较大尺度地削降抖振，提高了抗扰能力，拓展了变结构控制的应用范围。

4 结束语

笔者围绕 UUV 垂直面的控制问题，提出了消除抖振的一种控制方案。通过建立 UUV 垂直面方向运动的数学模型，设计出基于李亚普诺夫稳定性理论的模糊变结构控制器，即将通常变结构中的切换项变换为模糊控制输出，能达到柔化控制效应并提高控制品质，特别是对于非线性运动模型的应用，能实现超出预期的控制效果。仿真结果表明：在不依赖于控制对象具体模型时，该控制方案依然能有效抑制抖振，获得优良的跟踪稳态，并且对 UUV 模型的不确定性及其参数变化还具有较强鲁棒性。

参考文献：

- [1] 孙现有, 马琪. 美海军 UUV 使命任务必要性与技术可行性分析[J]. 鱼雷技术, 2010, 18(3): 231-235.
- [2] 刘青. 小型自主水下航行器垂直面的运动控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [3] CHEN B, LIN C, LIU X P, et al. Adaptive fuzzy tracking control for a class of MIMO nonlinear systems in non-strict-feedback form[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 45(12): 2743-2755.
- [4] 李聪, 贾红军. 无人水下航行器的智能航行控制[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(4A): 3-6.
- [5] 徐健, 汪慢, 乔磊. 欠驱动无人水下航行器 3 维轨迹跟踪的反步控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1589-1596.
- [6] 张玉平, 王有成, 赵铜星, 等. 区间直觉模糊决策在联合作战指挥员能力评估中的应用[J]. 兵工自动化, 2013, 32(11): 45-48.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 毕凤阳. 欠驱动自主水下航行器的非线性鲁棒控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [11] NAIK M S, SINGH S N. State-dependent riccati equation-based robust dive plane control of AUV with control constraints[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(11-12): 1711-1723.
- [12] PRESTERO T. Verification of a six degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicles[D]. USA: MIT, 2001.
- [13] 郑大钟. 线性系统理论[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 135-209.
- [14] 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.
- [15] 苏玉氏, 曹健, 徐峰, 等. 鱼雷型水下机器人非线性航迹跟踪控制[J]. 上海交通大学学报(自然科学版), 2012, 46(6): 977-983.