

水雷出水模型突变的控制方法

肖敏^{1,2} 史忠科²

摘要 水雷水下发射攻击水上目标时出水瞬间数学模型发生突变,严重影响水雷出水的稳定性和打击概率,对这一过程设计了滑模变结构单控制器和组合控制器.利用微分几何的输入输出反馈线性化方法将非线性系统进行了线性化,并利用变结构控制策略及趋近律算法设计了姿态跟踪闭环控制系统,计算简便,易于实现.对两种控制器的优劣性进行了比较,通过数字仿真表明所设计的控制系统可以适用于水下攻击目标出水突变过程,并对系统参数摄动具有较强的鲁棒性.

关键词 出水模型突变,运动控制,水下发射,滑模变结构控制,跟踪控制

引用格式 肖敏,史忠科.水雷出水模型突变的控制方法.自动化学报,2012,38(10):1609–1617

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.01609

The Control Method for Catastrophe of Out-of-water Model of Underground Mine

XIAO Min^{1,2} SHI Zhong-Ke²

Abstract The mathematical model of a mine gets catastrophe at the out-of-water moment when it is launched underwater to attack the target on water, which seriously affects the out-of-water stability and hit rate of the mine. For this course, we design a single controller and a combined controller of sliding mode variable structure (SMVS). The input and output feedback linearization method of differential geometry is adopted to linearize the nonlinear system. Moreover, the variable structure control strategy and approaching law are used to design the closed-loop control system for attitude tracking, which is characterized by easy realization and simple calculation. Simulation result shows that the control system designed can be used in the out-of-water catastrophic course of the submerged attack and is robust to perturbation of system parameters.

Key words Catastrophe of out-of-water model, motion control, underwater launching, sliding mode variable structure (SMVS), tracking control

Citation Xiao Min, Shi Zhong-Ke. The control method for catastrophe of out-of-water model of underground mine. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(10): 1609–1617

随着水声通信技术的发展和 C3I 技术的应用,信息化、网络化、智能化成为未来水雷战的主要发展趋势.在水雷信息战、网络战条件下,水雷不仅可以通过自身探测平台发现目标,实施水下攻击,而且可以通过数据链获取水面和空中目标信息,出水攻击目标.美军已经用这种导弹式水雷进行了攻击气垫船或低空直升机等目标的试验.在国际竞争封锁和需求驱动下,我国在航空、航天、航海领域高科技的发展,要求一些自主的新理论和新方法,具有很强的工程背景和时代的先进性,是控制理论中最有活力的一部分.

我国现有的火箭助推上浮水雷采用的控制系统设计方法是传统的经典控制,是将被控对象的频率特性作为设计控制系统的主要依据,整个系统的性能指标也是通过引入控制器来整定开环系统频率特性的方法而实现的.由于被控对象的频率通常是靠实验测试等手段获得,因此,不可避免地带有不确定性,导致经典控制设计的控制器,在很大程度上必须依靠现场调试,才能获得满意的控制性能.在设计过程中并没有考虑模型的不确定性.因此,寻求鲁棒控制方法用于水雷控制系统设计显得尤为重要^[1–3].

我国学者在水雷控制方面开展了一些实际研究工作,对水雷控制电路中开关器件进行了可靠性分析,用定量反馈理论设计水雷战斗部动态逆控制器,用近似推理方法应用于水雷参数分析专家系统中,对空投水雷水下散布和弹道仿真进行了研究.但是上述方法与国际先进水下航行器相比,高技术导向的新理论与新方法的研究,特别是与军工有关的尖端技术有较大差距,难以适应复杂环境下的精确控制问题.对水雷出水攻击目标过程的控制,考虑不确定性、海流干扰和模型误差,建立出水突变过程模型,

收稿日期 2011-02-14 录用日期 2011-12-11
Manuscript received February 14, 2011; accepted December 11, 2011

国家自然科学基金(60134010)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60134010)

本文责任编辑 葛树志

Recommended by Associate Editor GE Shu-Zhi

1. 三峡大学计算机与信息学院 宜昌 443002 2. 西北工业大学自动化学院 西安 710072

1. College of Computer and Information Technology, Three Gorges University, Yichang 443002 2. College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

进行非线性控制系统设计和稳定性分析,同时实现姿态和弹道控制,发挥鲁棒控制方法的优越性,完成从水下发射到精确打击目标的全过程,有待新理论和新方法的探索和深入研究.

水雷经水下发射高速推进攻击水上目标时,经历流体介质的变化,并对水面产生扰动.由于水的密度是空气的 800 倍,并且几乎是不可压缩的,所以出水过程中流体动力都要发生巨大的变化,在出水瞬间水雷质量、质心及转动惯量会产生阶跃变化,从而导致水雷数学模型瞬间发生较大变化,这种现象属于一种突变,会引发水雷运动姿态的大幅振荡,严重影响攻击概率,运动稳定性是突出问题.在出水瞬间水雷数学模型发生突变,引起水雷姿态发生较大波动,对于运动中的水面舰艇或空中目标极易造成攻击失败和与预测弹道相差很大的严重后果.目前已有超空泡特性、模型参数估计分析仿真方面的研究^[4-6],而对于出水突变过程控制方法研究较少.突变理论用于系统突变现象的描述与预报,国内外研究成果大多局限于简单的实验模拟上,多数以静态分叉为研究对象.应用突变理论时涉及拓扑学、群论、奇异性理论、微分流形等,模型均采用简化的二阶模型,实际应用非常复杂,给工程实际带来了困难^[7-8].

水雷在攻击目标的整个过程中,重要的机动操作是快速跟踪俯仰角指令,定向攻击水面目标.为了保证在水下航行阶段都能实现俯仰角指令的跟踪,所设计的控制器必须对参数变化是鲁棒的.反馈线性化方法能够屏蔽系统的非线性特性,提供输入输出呈线性解耦的闭环表现.滑模控制对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识,物理实现简单^[9-11].因此,将微分几何与滑模变结构控制相结合,对出水突变过程设计跟踪控制器,利用非线性坐标变换使复杂的高维的水雷非线性动力学系统的设计简化,发挥滑动模态对系统摄动及扰动不变性.

1 水雷出水突变过程的数学模型

考虑到雷体外形的对称性、纵平面和水平面流体动力参数的一致性,因此对水雷出水突变过程建立纵向运动的非线性动力学模型.此过程分为出水前、水气过渡、出水后三个过程,出水后水雷的数学模型瞬间发生变化,针对出水前后攻击目标运动时受力分析,确定各种力及由此产生的力矩的求解公式,建立水中和空中非线性数学模型.

为了避免姿态角奇异条件下的控制难题,在 90° 附近俯仰角不是单调的(即绕 Z 轴正反转,俯仰角都减小),采用特殊坐标系定义,跟常用鱼雷、水下航行器坐标系不同,即使得 X 轴垂直向上,雷体初始姿态角为 0.区别于鱼雷和其他类型水雷^[12-13],上

浮水雷浮力、重力、重力力矩的方向沿地面坐标系 o_0x_0 轴的方向,雷体从水下出水攻击目标,坐标系定义如图 1.

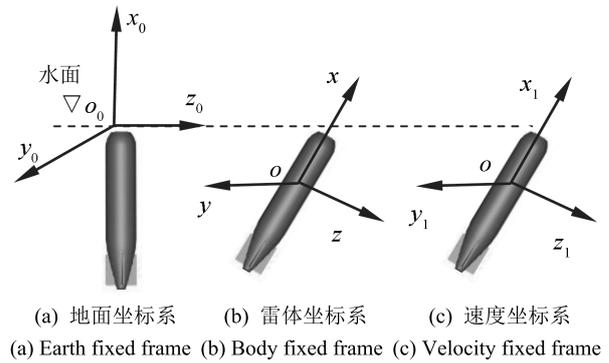


图 1 坐标系定义

Fig. 1 Definition of coordinate systems

水雷在水下作非定常运动时速度变化同时改变周围流体速度,产生流体惯性力为附加质量与水雷加速度的乘积.在坐标系选定后,水雷附加质量仅与几何外形有关,计算方法基于流体力学理论的势流理论,工程上常用切片法,把二元物体的附加质量公式引入到三维物体计算中.根据流体力学理论^[12],推导出水雷非线性数学模型为

$$\begin{aligned}
 (m + \lambda_{11})\dot{v}_x + m[-v_y\omega_z - x_c\omega_z^2] = & \\
 T - \frac{1}{2}\rho v^2 S C_{XS} - \Delta G \cos \theta & \\
 (m + \lambda_{22})\dot{v}_y + (m x_c + \lambda_{26})\dot{\omega}_z + m v_x \omega_z = & \\
 \frac{1}{2}\rho v^2 S (C_y^\alpha \alpha + C_y^\delta \delta_e + C_y^{\bar{\omega}_z} \bar{\omega}_z) - \Delta G \sin \theta & \\
 (J_{zz} + \lambda_{66})\dot{\omega}_z + (m x_c + \lambda_{26})\dot{v}_y + m x_c v_x \omega_z = & \\
 \frac{1}{2}\rho v^2 S L (m_z^\alpha \alpha + m_z^\delta \delta_e + m_z^{\bar{\omega}_z} \bar{\omega}_z) + & \\
 G(y_c \cos \theta + x_c \sin \theta) & \\
 \theta = \omega_z & \\
 \dot{x}_0 = v \cos(\theta - \alpha) & \\
 \dot{y}_0 = v \sin(\theta - \alpha) & \\
 \alpha = -\arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) & \\
 v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} & \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中, $\bar{\omega}_z = \omega_z L/r$, x_c, y_c 为重心坐标, x_0, y_0 为地面坐标系的浮心坐标, v, v_x, v_y 为浮心速度及其分量,水雷模型的总体参变量见表 1,通过流体力学工程估算获得水动力辨识参数,有确定临界范围,见表 2.

出水前后水雷数学模型发生突变, 并且是跨介质过程, 水中 $\rho = 1004 \text{ kg/m}^3$, 空中 $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$, 由于空中密度较小, 浮力和附加质量近似为零. 突变过程阻力、升力、阻尼力、俯仰力矩、阻尼力矩分别是水中的 $1/800$.

对于出水突变过程控制系统设计, 选取系统状态 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [v \ \alpha \ \omega_z \ \theta]^T$ 和控制变量 U

$= \delta_e$, 其中 α 为攻角, θ 为俯仰角, ω_z 为俯仰角速度, δ_e 为升降舵角, 经过适当变形整理, 推导出水雷仿射非线性系统数学模型:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})U \quad (2)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(\mathbf{x}) &= [\mathbf{f}_1(\mathbf{x}) \ \mathbf{f}_2(\mathbf{x}) \ \mathbf{f}_3(\mathbf{x}) \ \mathbf{f}_4(\mathbf{x})]^T \\ \mathbf{f}_1(\mathbf{x}) &= \frac{(J_{zz} + \lambda_{66}) \left(\frac{1}{2} \rho v^2 S C_y^\alpha \alpha + \frac{1}{2} \rho v S L C_y^{\bar{\omega}_z} \omega_z - \Delta G \sin \theta - m \omega_z v \cos \alpha \right) \sin \alpha}{(m + \lambda_{22}) [(m x_c + \lambda_{26}) - (J_{zz} + \lambda_{66})]} + \\ &\quad \frac{[m x_c \omega_z v \cos \alpha - \frac{1}{2} \rho v^2 S L m_z^\alpha \alpha + \frac{1}{2} \rho v S L^2 m_z^{\bar{\omega}_z} \omega_z + G(y_c \cos \theta + x_c \sin \theta)] \sin \alpha}{(m x_c + \lambda_{26}) - (J_{zz} + \lambda_{66})} + \\ &\quad \frac{[m(-v \omega_z \sin \alpha + x_c \omega_z^2) + T - \frac{1}{2} \rho v^2 S C_{xS} - \Delta G \cos \theta] \cos \alpha}{(m + \lambda_{11})} \\ \mathbf{f}_2(\mathbf{x}) &= \frac{(J_{zz} + \lambda_{66}) \left(\frac{1}{2} \rho v S C_y^\alpha \alpha + \frac{1}{2} \rho S L C_y^{\bar{\omega}_z} \omega_z - \frac{1}{v} \Delta G \sin \theta - m \omega_z \cos \alpha \right) \cos \alpha}{(m + \lambda_{22}) [(m x_c + \lambda_{26}) - (J_{zz} + \lambda_{66})]} + \\ &\quad \frac{(m x_c \omega_z \cos \alpha - \frac{1}{2} \rho v S L m_z^\alpha \alpha + \frac{1}{2} \rho S L^2 m_z^{\bar{\omega}_z} \omega_z + \frac{1}{v} G(y_c \cos \theta + x_c \sin \theta)) \cos \alpha}{(m x_c + \lambda_{26}) - (J_{zz} + \lambda_{66})} - \\ &\quad \frac{[m(-v \omega_z \sin \alpha + x_c \omega_z^2) + T - \frac{1}{2} \rho v^2 S C_{xS} - \Delta G \cos \theta] \sin^2 \alpha}{v \sin \alpha (m + \lambda_{11})} \\ \mathbf{f}_3(\mathbf{x}) &= \frac{(m x_c + \lambda_{26}) [m v \omega_z \cos \alpha - \frac{1}{2} \rho v^2 S C_y^\alpha \alpha - \frac{1}{2} \rho v S L C_y^{\bar{\omega}_z} \omega_z + \Delta G \sin \theta]}{(m + \lambda_{22}) (J_{zz} + \lambda_{66}) - (m x_c + \lambda_{26})^2} - \\ &\quad \frac{(m + \lambda_{22}) [m x_c v \omega_z \cos \alpha - \frac{1}{2} \rho v^2 S L m_z^\alpha \alpha - \frac{1}{2} \rho v S L^2 m_z^{\bar{\omega}_z} \omega_z - G(y_c \cos \theta + x_c \sin \theta)]}{(m + \lambda_{22}) (J_{zz} + \lambda_{66}) - (m x_c + \lambda_{26})^2} \\ \mathbf{f}_4(\mathbf{x}) &= \omega_z \\ \mathbf{G}(\mathbf{x}) &= \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1(\mathbf{x}) & \mathbf{g}_2(\mathbf{x}) & \mathbf{g}_3(\mathbf{x}) & \mathbf{g}_4(\mathbf{x}) \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{g}_1(\mathbf{x}) &= \frac{(J_{zz} + \lambda_{66}) \frac{1}{2} \rho S v^2 C_y^{\delta_e}}{(m + \lambda_{22}) [(m x_c + \lambda_{26}) - (J_{zz} + \lambda_{66})]} \sin \alpha - \frac{\frac{1}{2} \rho v^2 S L m_z^{\delta_e}}{(m x_c + \lambda_{26}) - (J_{zz} + \lambda_{66})} \sin \alpha \\ \mathbf{g}_2(\mathbf{x}) &= \frac{(J_{zz} + \lambda_{66}) \frac{1}{2} \rho S v C_y^{\delta_e}}{(m + \lambda_{22}) [(m x_c + \lambda_{26}) - (J_{zz} + \lambda_{66})]} \cos \alpha - \frac{\frac{1}{2} \rho v S L m_z^{\delta_e}}{(m x_c + \lambda_{26}) - (J_{zz} + \lambda_{66})} \cos \alpha \\ \mathbf{g}_3(\mathbf{x}) &= \frac{(m x_c + \lambda_{26}) \frac{1}{2} \rho S C_y^{\delta_e} v^2 - (m + \lambda_{22}) \frac{1}{2} \rho S L m_z^{\delta_e} v^2}{(m + \lambda_{22}) (J_{zz} + \lambda_{66}) - (m x_c + \lambda_{26})^2} \\ \mathbf{g}_4(\mathbf{x}) &= 0 \end{aligned}$$

表 1 总体参变量
Table 1 General parameters

名称	符号	单位	备注
长度	L	m	
最大横截面积	S	m^2	
重量	G	N	$\Delta G = G - B$
浮力	B	N	
排水体积	V_b	m^3	
雷头浮心距	L_B	m	
初始质量	m	kg	
浮心转动惯量	J_{xx}	$kg \cdot m^2$	
	J_{yy}	$kg \cdot m^2$	$J_{yy} = J_{zz}$
发动机推力	T	N	

表 2 雷体流体动力参数
Table 2 Hydrodynamic parameters of mine body

名称	符号	备注
阻力系数	C_{xs}	
	C_y^α	$C_z^\beta = -C_y^\alpha$
	$C_y^{\delta_e}$	$C_z^{\delta_v} = -C_y^{\delta_e}$
升力系数	$C_y^{\bar{\omega}_z}$	$C_z^{\bar{\omega}_y} = -C_y^{\bar{\omega}_z}$
	m_z^α	$m_y^\beta = m_z^\alpha$
	$m_z^{\delta_e}$	$m_y^{\delta_v} = m_z^{\delta_e}$
俯仰力矩系数	$m_z^{\bar{\omega}_z}$	$m_y^{\bar{\omega}_y} = m_z^{\bar{\omega}_z}$
	λ_{11}	
	附加质量	λ_{22}
λ_{26}		$\lambda_{35} = -\lambda_{26}$
λ_{66}		$\lambda_{55} = \lambda_{66}$

2 输入输出反馈线性化

对于仿射非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})U \\ \mathbf{y} = \mathbf{H}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$, $U \in \mathbf{R}^m$ 及 $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^m$ 分别是系统状态、输入及输出向量; \mathbf{f} 为 n 维充分光滑的向量场; $\mathbf{G}(\mathbf{x}) = (g_1(\mathbf{x}), \dots, g_m(\mathbf{x}))$; $\mathbf{H}(\mathbf{x}) = (h_1(\mathbf{x}), \dots, h_m(\mathbf{x}))^T$; g_i ($i = 1, \dots, m$) 均为 n 维充分光滑的向量场; h_i ($i = 1, \dots, m$) 是充分光滑的标量函数.

若 y_i 的相对阶为 γ_i , 通过李导数, 可得:

$$y_i^{\gamma_i} = L_f^{\gamma_i} h_i + \sum_{j=1}^m L_{G_j} L_f^{(\gamma_i-1)} h_i U_j \quad (4)$$

其中, 对于至少一个 j , 存在 $L_{G_j} L_f^{(\gamma_i-1)} h_i \neq 0$, 而 G_j 是 $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ 的第 j 列. 从式 (4) 可以得到输入输出动态方程:

$$\begin{bmatrix} y_1^{(\gamma_1)} \\ \vdots \\ y_m^{(\gamma_m)} \end{bmatrix} = B + A(\mathbf{x})U \quad (5)$$

其中, $B = \begin{bmatrix} L_f^{\gamma_1} h_1(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ L_f^{\gamma_m} h_m(\mathbf{x}) \end{bmatrix}$,

$$A(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{\gamma_1-1} h_1 & \cdots & L_{g_m} L_f^{\gamma_1-1} h_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{g_1} L_f^{\gamma_m-1} h_m & \cdots & L_{g_m} L_f^{\gamma_m-1} h_m \end{bmatrix}.$$

如果 $A(\mathbf{x})$ 非奇异, 通过选择 U , 系统可以输入输出线性化并解耦, 其形式如下:

$$U = -A^{-1}(\mathbf{x})B + A^{-1}(\mathbf{x})\mathbf{v} \quad (6)$$

则

$$\begin{bmatrix} y_1^{(\gamma_1)} \\ \vdots \\ y_m^{(\gamma_m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

下面给出 MIMO 系统的所谓标准形, 如果系统的总相对阶 $\gamma = \gamma_1 + \dots + \gamma_m < n$, 选取如下新的状态变量^[14]

$$\begin{cases} \xi_1^1 = h_1(\mathbf{x}), \xi_2^1 = L_f h_1(\mathbf{x}), \dots, \xi_{\gamma_1}^1 = L_f^{\gamma_1-1} h_1(\mathbf{x}) \\ \xi_1^2 = h_2(\mathbf{x}), \xi_2^2 = L_f h_2(\mathbf{x}), \dots, \xi_{\gamma_2}^2 = L_f^{\gamma_2-1} h_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ \xi_1^m = h_m(\mathbf{x}), \xi_2^m = L_f h_m(\mathbf{x}), \dots, \xi_{\gamma_m}^m = L_f^{\gamma_m-1} h_m(\mathbf{x}) \end{cases}$$

系统可变成如下伪线性系统:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\xi}_1^1 = \xi_2^1 \\ \vdots \\ \dot{\xi}_{\gamma_1}^1 = b_1(\xi, \eta) + \sum_{j=1}^m a_j^1(\xi, \eta)u_j \\ \vdots \\ \dot{\xi}_1^m = \xi_2^m \\ \vdots \\ \dot{\xi}_{\gamma_m}^m = b_m(\xi, \eta) + \sum_{j=1}^m a_j^m(\xi, \eta)u_j \\ \dot{\eta} = \mathbf{Q}(\xi, \eta) + \mathbf{P}(\xi, \eta)U \\ y_1 = \xi_1^1 \\ \vdots \\ y_m = \xi_1^m \end{array} \right. \quad (8)$$

其中,

$$\begin{aligned} b_i(\xi, \eta) &= L_f^{\gamma_i} h_i \cdot \Phi^{-1}(\xi, \eta) \\ a_j^i(\xi, \eta) &= L_{g_j} L_f^{\gamma_i - 1} h_i \cdot \Phi^{-1}(\xi, \eta) \\ q_i(\xi, \eta) &= L_f \eta_i \cdot \Phi^{-1}(\xi, \eta) \\ P_{ij}(\xi, \eta) &= L_{g_j} \eta_i \cdot \Phi^{-1}(\xi, \eta) \end{aligned}$$

注意 $\mathbf{P} \in \mathbf{R}^{(n-\gamma) \times m}$, $\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^{n-\gamma}$, 上述状态变换 $\Phi: \mathbf{x} \rightarrow (\xi, \eta)$ 是一个将 \mathbf{x} 映射至标准形坐标系的微分同胚. 反馈控制规律 (6) 使得部分状态变量 η 不能观.

$$\eta = \Phi(z, \eta, u) \quad (9)$$

若此内动态子系统稳定即为最小相位, 可以不对其进行控制, 工程实际中可以先不计算内动态子系统是否可控, 而在施加输入后, 观察控制过程中状态是否有界以验证子系统是否可控.

由于出水突变过程中数学模型发生突变, 必须解决姿态控制问题, 选择俯仰角状态变量, 状态变量的选择必须能保证在水雷非线性微分方程反馈线性化过程中的解耦矩阵非奇异, 并且内动态子系统是稳定的. 为此, 选择系统输出为

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) = x_4$$

由式 (8), 选择新的状态变量:

$$\left\{ \begin{array}{l} z_1 = \xi_1^1 = \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \theta \\ z_2 = \xi_2^1 = L_f \mathbf{h}(\mathbf{x}) = f_4 = \omega_z \end{array} \right. \quad (10)$$

系统解耦矩阵

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = L_g L_f \mathbf{h}(\mathbf{x}) = g_3(\mathbf{x}) \quad (11)$$

$\mathbf{A}(\mathbf{x})$ 非奇异, 则反馈控制规律为

$$U = -\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x})f_3 + \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{x})v \quad (12)$$

此时原系统简化为一个等效的二阶系统

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}v \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{z} \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{z} = [z_1, z_2]^T$, \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} 分别为 Brunovsky 标准形: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{C} = [1 \ 0]$.

由于矩阵 \mathbf{A} , \mathbf{B} 是可控的, 通过施加适当的控制输入, 方程 (13) 的控制目标能够达到.

3 出水突变过程控制系统设计

3.1 滑模变结构控制鲁棒性分析

从应用角度出发, 主要关心的是已线性化系统的外部动态, 要求外部动态不仅稳定而且具有优良的品质, 至于内部动态只要求其稳定即可. 如果系统的内动态稳定, 就可以不考虑内动态, 用滑模控制方法为其外动态设计稳定的鲁棒控制律^[15-16].

前述非线性系统可以通过选择合适的输入变换来消除系统的非线性, 然而输入-输出线性化仅当模型是精确建模时才是有效的. 为了保证模型存在不确定时控制的鲁棒性, 例如参数不确定或者未建模动态特性等, 对变换后的线性方程引入了变结构控制策略. 考虑非线性系统 (2), 通过输入-输出线性化, 带有不确定性的系统方程 (5) 变为^[17-18]

$$\begin{bmatrix} y_1^{r_1} \\ y_2^{r_2} \\ \vdots \\ y_m^{r_m} \end{bmatrix} = \mathbf{B} + \Delta\mathbf{B} + [\mathbf{A}(\mathbf{x}) + \Delta\mathbf{A}]U \quad (14)$$

其中不确定项 $\|\Delta\mathbf{B}\|$, $\|\Delta\mathbf{A}\|$ 是有界的, 选择如下切换面^[18-19]:

$$s_i = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_i \right)^{r_i - 1} (y_i - y_{id}) \quad (15)$$

其中, λ_i 是一个正数而 y_{id} 是期望响应, 将式 (15) 微分得下式:

$$\dot{s}_i = y_i^{r_i} + \sum_{j=0}^{r_i - 1} c_{ij} (y_i^j - y_{id}^j) - y_{id}^{r_i} \quad (16)$$

设计鲁棒控制器, 对于线性化后的变结构控制策略采用指数趋近律方法, 根据文献 [14] 的输入形式得:

$$U = \mathbf{A}(\mathbf{x})^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} y_{1d}^{r_1} \\ y_{2d}^{r_2} \\ \vdots \\ y_{md}^{r_m} \end{bmatrix} - \mathbf{B} - \mathbf{C}\mathbf{Y} - \varepsilon \text{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{K}\mathbf{S} \right\}$$

其中, $\mathbf{CY} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{r_1-1} c_{1j}(y_1^j - y_{1d}^j) \\ \sum_{j=0}^{r_2-1} c_{2j}(y_2^j - y_{2d}^j) \\ \vdots \\ \sum_{j=0}^{r_m-1} c_{mj}(y_m^j - y_{md}^j) \end{bmatrix}$, 将控制 U 和

式 (14) 代入式 (16), 得:

$$\dot{\mathbf{S}} = \Delta B - \varepsilon \text{sgn}(\mathbf{S}) - \mathbf{KS} - \Delta A(\mathbf{x})A(\mathbf{x})^{-1} \times [\mathbf{CY} + \mathbf{KS} + \varepsilon \text{sgn}(\mathbf{S}) + B - \mathbf{Y}_d] \quad (17)$$

其中, $\mathbf{Y}_d = \begin{bmatrix} y_{1d}^{r_1} \\ y_{2d}^{r_2} \\ \vdots \\ y_{md}^{r_m} \end{bmatrix}$.

为使控制系统是渐近稳定的, 必须使 $\mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} < 0$, 整理并将不等式放大可得:

$$\mathbf{S} \dot{\mathbf{S}} \leq \|\mathbf{S}\| [\|\Delta B\| - \varepsilon + \|\Delta A A^{-1} \mathbf{CY}\| + \varepsilon \|\Delta A A^{-1}\| + \|\Delta A A^{-1} B\| + \|\Delta A A^{-1} \mathbf{Y}_d\|] + \mathbf{K} \|\mathbf{S}\|^2 (-1 + \|\Delta A A^{-1}\|) \quad (18)$$

因此, 当输入系数满足条件 $\|\Delta A\| < \|A\|$ 时, 取 \mathbf{K} 和 ε 满足 $\mathbf{K} > 0, \varepsilon > (\|\Delta B\| + \|\Delta A A^{-1} \mathbf{CY}\| + \|\Delta A A^{-1} B\| + \|\Delta A A^{-1} \mathbf{Y}_d\|) / (1 - \|\Delta A A^{-1}\|)$, 则 $\mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} < 0$, 即滑动模的到达条件成立, 从而由滑模控制律 U 保证了期望的滑动模运动是可以实现的.

选择满足上述条件的合适参数可以保证控制系统的稳定性与鲁棒性. 这只是滑模到达的一个充分条件而非充要条件, 并且由于不确定性表达式难以精确表达, 而经过非线性变换后简单的不确定性信息也变得更为复杂, 一般不会精确计算这些公式, 但是从工程应用角度看, 总可以通过参数和结构的调整来实现控制目标.

3.2 滑模变结构单控制器和组合控制器设计

为了满足实际工程需求, 减少控制器设计的复杂度, 设计单控制器仅对出水前模型进行状态变换与控制器的设计, 将出水后模型看作以出水前模型为标称模型的带有建模不确定性模型, 出水过程只需一个控制器, 但非线性模型发生了变化.

本系统经过输入输出反馈线性化后, 系统为二阶伪线性系统:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega_z \\ \dot{\omega}_z = v \end{cases} \quad (19)$$

定义系统跟踪误差为

$$e = \theta - \theta_d$$

θ_d 为指令信号, 根据攻击目标运动信息给定. 误差变化率为

$$\dot{e} = \dot{\theta} - \dot{\theta}_d$$

设 $\mathbf{C} = [c, 1]$, 误差向量为 $\mathbf{E} = [e \ \dot{e}]^T$, 切换函数为^[20]

$$\begin{aligned} s &= \mathbf{CE} = ce + \dot{e} = c(\theta - \theta_d) + \dot{\theta} - \dot{\theta}_d \\ \dot{s} &= c(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) + \ddot{\theta} - \ddot{\theta}_d \end{aligned}$$

其滑动面方程为 $\dot{s} = 0$, 只要选择合适的 c 就能使滑动面具有期望的理想特性.

上述证明过程中变结构控制策略采用了趋近律方法, 即:

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s) - ks \quad (20)$$

其中, ε 和 k 是大于零的常数. ε 和 k 的选取原则是: ε 较小而 k 较大, 这样既能加快正常运动的速度, 又不至于使状态点“冲过”切换面而发生较大的“抖动”, 并且工程上容易实现^[20].

因此得滑模变结构控制律:

$$v = -\varepsilon \text{sgn}(s) - ks - c(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) + \ddot{\theta}_d \quad (21)$$

为避免滑模控制系统中固有的抖振现象, 采用 Burton 提出的函数光滑化方法, 即用函数^[21]

$$l(s) = \frac{s}{|s| + \delta}, \delta > 0 \quad (22)$$

来代替符号函数 $\text{sgn}(s)$.

系统结构和主程序结构见图 2 和图 3 所示.

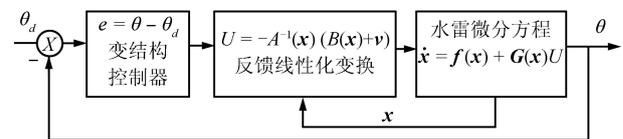


图 2 控制系统结构图

Fig. 2 The structure of control system

由于水下和空中状态系统参数差异巨大, 单控制器设计仅对出水前模型进行控制器设计, 为了提高控制精度, 需要解决的最大问题是雷体在水下段和空中段特性不同, 应分别设计控制器, 必要时修改流体动力布局. 为此, 设计组合控制器, 对出水前后模型分别进行状态变换和控制器设计, 出水瞬间进行控制器切换.

考虑出水过渡阶段, 对出水前模型进行状态变换与控制器设计, 出水后控制器类似得到.

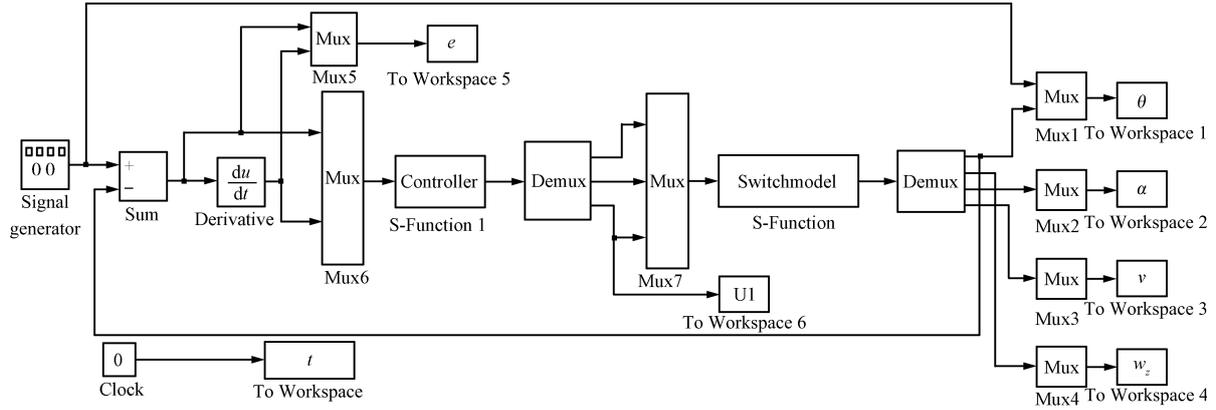


图 3 Simulink 主程序结构图

Fig. 3 The structure of simulink main program

通过输入输出反馈线性化, 出水前后反馈控制规律

$$U = (L_g L_f h(x))^{-1} (-L_f^2 h(x) + v) = -g_3^{-1}(x) f_3 + g_3^{-1}(x) v$$

$$\tilde{U} = (L_{\tilde{g}} L_{\tilde{f}} h(x))^{-1} (-L_{\tilde{f}}^2 h(x) + v) = -\tilde{g}_3^{-1}(x) \tilde{f}_3 + \tilde{g}_3^{-1}(x) v$$

出水前后两个控制器在参数不确定性分别满足条件 (18) 时, 所设计的控制系统具有鲁棒性. 根据上述变结构跟踪控制方法, 得到出水前后组合控制律 U 和 \tilde{U} .

4 非线性仿真结果及不确定性分析比较

水雷水下发射后在所设计的俯仰角指令跟踪控制下, 能够达到在较短时间内沿着规划好的预测弹道打击水面和空中目标的目的.

单控制器系统试验, 系统的技术指标为 $c = 5$, $\varepsilon = 0.01$, $k = 8$, 初始状态为 $x(0) = [20 \text{ m/s } 0^\circ 0 \text{ rad/s } 0^\circ]$, 目标跟踪俯仰角指令信号为 20° , 推力 $T = 3.1 \text{ t}$, 发射速度 $v = 20 \text{ m/s}$. 在 $t = 5 \text{ s}$, 水雷攻击水面目标时出水, 其非线性模型发生了变化, 但是控制器仍然是为出水前模型设计的控制器, 仿真结果如图 4 所示, 系统均在前 2s 达到了平衡态, 5s 时出水过渡过程俯仰角无明显变化, 过渡过程平缓, 保证了出水突变过程的姿态稳定性和高打击概率.

以上仿真是针对出水前精确模型进行的, 但是实际中存在着建模和外界干扰的综合不确定性误差, 这将导致流体动力参数、初始速度、初始姿态角等参数的变化. 由于变结构控制方法具有强鲁棒性, 对参数变化存在最大和最小误差满足条件 (18) 时进行仿真. 需要说明的是流体动力参数、初始速度、初始姿态角等参数的变化都将引起仿真结果的变化, 限于篇幅仅做一组仿真图. 从图 5 中可以看出所设计单

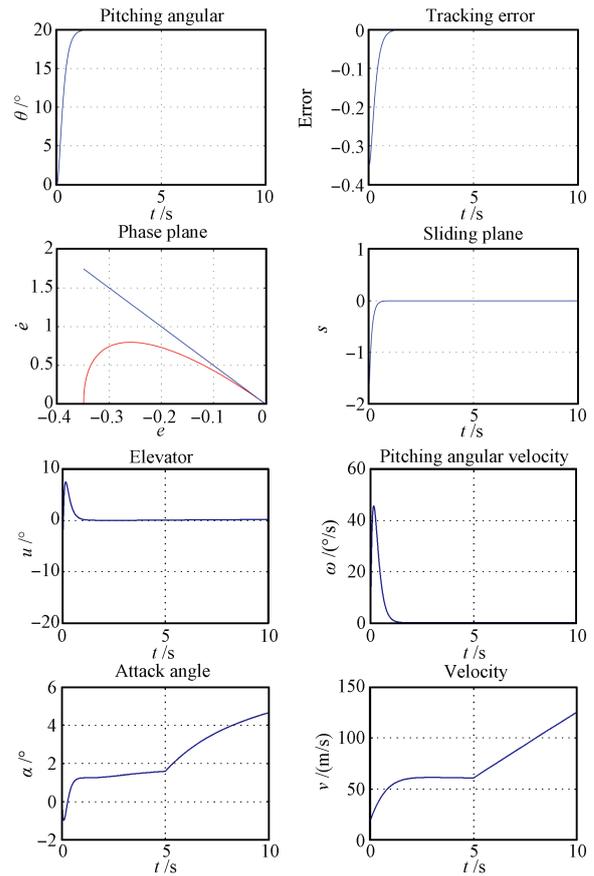


图 4 不考虑模型参数不确定系统响应

Fig. 4 The responses of the system without model parameter uncertainties

控制器对于参数不确定性具有鲁棒性, 出水过程过渡平缓, 保证了水雷攻击目标的姿态跟踪精度.

选取相同的系统技术指标, 对组合控制器与单控制器进行比较试验, 此时出水前后模型设计的控制器切换, 对模型参数存在最大和最小误差满足条件 (18) 时与标称系统进行对比仿真, 从图 6 和图 7 中可以看出, 所设计组合控制器同样对于参数不确定性

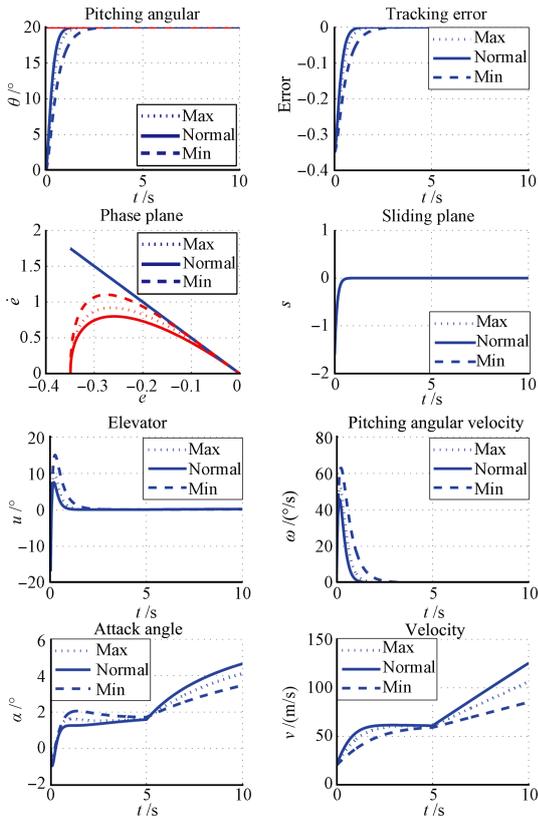


图5 考虑模型参数不确定系统响应

Fig.5 The responses of the system with model parameter uncertainties

具有鲁棒性,出水过程过渡平缓,保证了水雷攻击目标的可靠性和较高的跟踪精度.

比较单控制器仿真图4和图5和组合控制器仿真图6和图7,可以看出,在控制系统的作用下,水雷对目标的打击都能较好地实现俯仰角跟踪,有预期达到期望弹道;雷体俯仰角θ均在0.2s内收敛,收敛到期望的俯仰角为20°,收敛误差均为0;2.0s内水雷速度均处于加速上升状态,且状态响应较好,2.0s后由于控制系统的作用,速度均趋于收敛和渐近稳定,5.0s水雷出水,两种控制器出水速度均约为60m/s,出水后由于流体动力特性的急剧变化,速度呈增大趋势,组合控制器出水后速度增大趋势低于单控制器.出水前攻角均约为1.6°,出水后攻角组合控制器低于单控制器.

从仿真结果看,所设计的单控制器和组合控制器都可以适应出水突变过程的姿态控制,单控制器只用一个控制器完成了突变过程的控制,组合控制器通过两个控制器切换提高了控制精确,攻角抑制作用优于单控制器,从工程实际需求可以适当选择其优劣性.

5 结论

利用了水雷方程的非线性变换和滑模变结构系

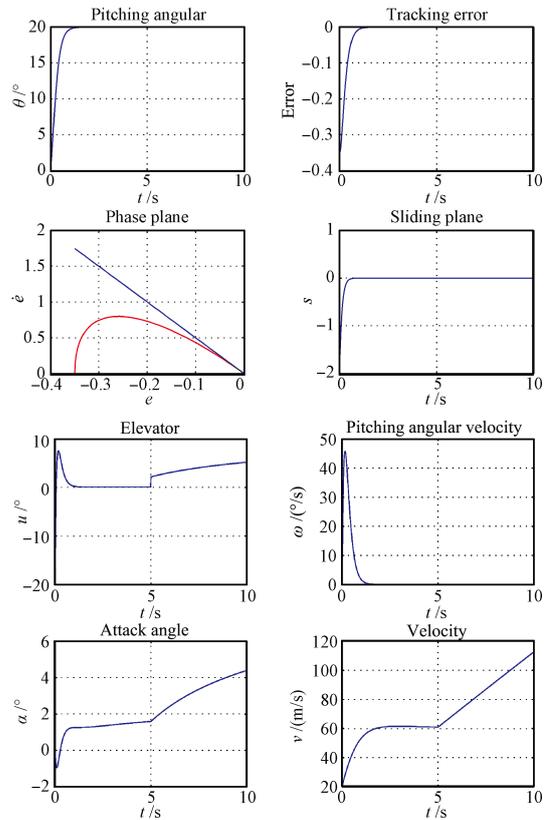
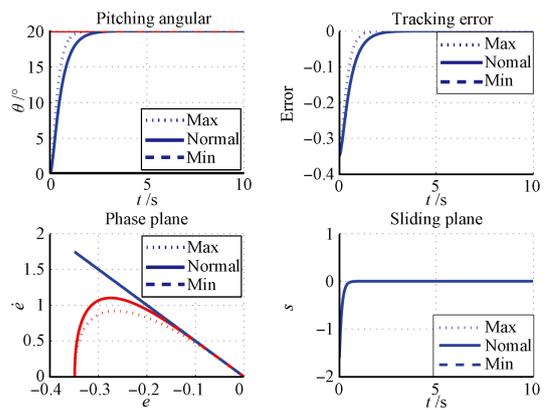


图6 不考虑模型参数不确定系统响应

Fig.6 The responses of the system without model parameter uncertainties

统对摄动及干扰的鲁棒性,甚至是不变性特征,获得了较好的出水突变动态性能.设计了滑模变结构单控制器和组合控制器,简化了受控系统的非线性控制器设计,保证了出水突变过程的鲁棒性,提高了控制精度,仿真验证比较了两种控制器的有效性和优劣性,计算简便,有利于工程实现.此方法适合于各类水雷、高速水下航行体、空间航行体突变模型过程控制试验,保证了复杂临界环境下的稳定性和安全性,以实现经典控制难以达到的控制精度和鲁棒性,解决水雷控制的核心技术问题,为国家海洋工程及新型水雷的研发提供技术支撑.



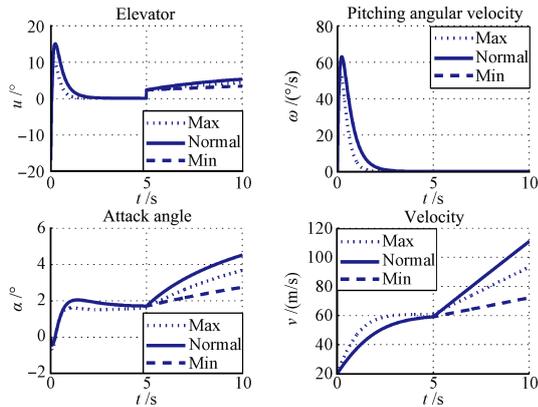


图7 考虑模型参数不确定系统响应

Fig.7 The responses of the system with model parameter uncertainties

References

- Chai Tian-You, Zhang Ya-Jun. Nonlinear adaptive switching control method based on unmodeled dynamics compensation. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(7): 773–786 (柴天佑, 张亚军. 基于未建模动态补偿的非线性自适应切换控制方法. 自动化学报, 2011, **37**(7): 773–786)
- Xiao Qiang, Xie Wei. A GIMC architecture for time-delay systems. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(4): 464–470 (肖强, 谢巍. 针对时滞系统的一般化内模控制方法. 自动化学报, 2011, **37**(4): 464–470)
- Zhang W A, Yu L. A robust control approach to stabilization of networked control systems with short time-varying delays. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(1): 87–91
- Ivan N K, James S U. Overview of high-speed supercavitating vehicle control. *AIAA-2006-6442*, 2006
- Wei Ying-Jie, Wang Jing-Hua, Zhang Jia-Zhong, Cao Wei, Huang Wen-Hu. Nonlinear dynamics and control of underwater supercavitating vehicle. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, **28**(6): 179–204 (魏英杰, 王京华, 张嘉钟, 曹伟, 黄文虎. 水下超空泡航行体非线性动力学与控制. 振动与冲击, 2009, **28**(6): 179–204)
- Nathan D R, Jeffrey F M. Application of robust state and parameter estimation to a supercavitating torpedo model. *AIAA-2006-6444*, 2006
- Tadeusiewicz M, Halgas S. An efficient method for simulation of multiple catastrophic faults. In: Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. St. Julien's: IEEE, 2008. 356–359
- Xie Z K, Fan W C, Wang Q A. Catastrophe mechanism and classification of discontinuity behavior in thermal science (I) – fold catastrophe. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(19): 1813–1817
- Chiou J C, Wu S D. Constraint violation stabilization using input-output feedback linearization in multibody dynamic analysis. *AIAA-1996-35765*, 1996
- Liu Jin-Kun, Sun Fu-Chun. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control. *Control Theory and Applications*, 2007, **24**(3): 407–418 (刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展. 控制理论与应用, 2007, **24**(3): 407–418)
- Wu B J, Li S, Wang X H. Discrete-time adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicle in the dive plane. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 157–164
- Zhang Yu-Wen. *Torpedo Trajectory and Trajectory Design*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1999. 42–96 (张宇文. 鱼雷弹道与弹道设计. 西安: 西北工业大学出版社, 1999. 42–96)
- Duan Fu-Hai, Zhang Wei-Guo, He Chang-An. A nonlinear PID control method with optimal correction function and its application in torpedo trajectory control system. *Control Theory and Applications*, 2000, **17**(1): 65–68 (段富海, 章卫国, 何长安. 一种非线性优化控制方法及其在鱼雷控制中的应用. 控制理论与应用, 2000, **17**(1): 65–68)
- Hu Yue-Ming. *Nonlinear Control Systems Theory and Applications*. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. 154–174 (胡跃明. 非线性控制理论与应用. 北京: 国防工业出版社, 2005. 154–174)
- Laghrouchea S, Plestanb F, Glumineaub A. Higher order sliding mode control based on integral sliding mode. *Automatica*, 2007, **43**(3): 531–537
- Duan Fu-Hai, He Chang-An, Zhang Wei-Guo, Shen Yi. Application of feedback linearization and continuous sliding mode control to a nonlinear helicopter model. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2000, **18**(3): 378–381 (段富海, 何长安, 章卫国, 沈毅. 反馈线性化与连续滑模控制方法在直升机中的应用. 西北工业大学学报, 2000, **18**(3): 378–381)
- Elamli H, Olgac N. Robust output tracking control of nonlinear MIMO systems via sliding mode technique. *Automatica*, 1992, **28**(1): 145–151
- Lin Y Y, Liu S S. Integrated projection guidance and nonlinear control of unmanned air vehicle. *AIAA-1998-4536*, 1998
- Lin Y Y, Lin G L. Robust nonlinear attitude control of spacecraft with flexible structures. *AIAA-2000-4357*, 2000
- Gao Wei-Bing. *Variable Structure Control Theoretical Basis*. Beijing: China Science and Technology Press, 1990 (高为炳. 变结构控制理论基础. 北京: 中国科学技术出版社, 1990)
- Burton J A, Zinober A S I. Continuous approximation of variable structure control. *International Journal of System Science*, 1986, **17**(6): 875–885



肖敏 三峡大学副教授. 2006年和2010年分别获得西北工业大学硕士学位和博士学位. 主要研究方向为鲁棒控制, 空间航行体控制. 本文通信作者.

E-mail: xiaomin2013@163.com

(XIAO Min Associate professor at Three Gorges University. She received

her master and Ph.D. degrees from Northwestern Polytechnical University in 2006 and 2010, respectively. Her research interest covers robust control and space vehicle control. Corresponding author of this paper.)



史忠科 西北工业大学教授. 主要研究方向为控制理论与控制工程, 飞行试验.

E-mail: zkeshi@nwpu.edu.cn

(SHI Zhong-Ke Professor at Northwestern Polytechnical University. His research interest covers control science and engineering, and flight test.)