

# Research on Sliding Mode Variable Structure Anti-disturbance Control Algorithm Based on ROV

Liang Cao

HaiZhuang Military Representative Office, Zhengzhou, Henan, 450006, China

## Abstract

Underwater robotic vehicles (ROVs), with their versatile operational capabilities, are extensively deployed in marine and lake environments for equipment maintenance and repair. However, ROVs inherently function as highly nonlinear, strongly coupled, and time-delayed systems. Dynamic uncertainties arise from hydrodynamic coefficient variations, modeling errors, and parameter disturbances, compounded by complex marine interference such as undercurrents, which pose significant challenges to their disturbance rejection control. This study employs sliding mode variable structure control (SMVSC) to enhance ROV's disturbance resistance, while integrating an ESO sliding mode disturbance observer (ESO-SDO) to further improve model robustness and disturbance tolerance.

## Keywords

ROV; sliding mode algorithm; disturbance rejection control

# 基于 ROV 的滑模变结构抗扰控制算法研究

曹亮

海装某军事代表室，中国·河南 郑州 450006

## 摘要

水下作业型机器人(ROV)因其广泛的作业能力，被广泛应用于海洋和湖泊等领域，如多种型号装备维修保障、海洋装备维修等领城。然而，ROV其本身是一个高度非线性、强耦合和时滞的系统，同时水动力系数的不确定、系统建模误差和参数扰动都会造成动力学的不确定性，加上海底暗流等很多复杂海洋环境干扰，使ROV的抗扰控制成为难题。本文使用滑模变结构控制算法增强ROV的抗扰能力，加上ESO滑模干扰观测器，进一步提高模型抗干扰能力和鲁棒性。

## 关键词

ROV；滑模算法；抗扰控制

## 1 引言

水下作业型机器人(ROV)是水下探测和作业的主力，广泛应用于海洋等项目中，如水下资源勘探等<sup>[1][2][3]</sup>。滑模变结构控制通过不断变化迫使系统基于预定的滑动模态函数进行运动，具有响应速度快、抗干扰能力强等优点，符合复杂的水下工况。

本文设计一种带 ESO 干扰观测器的滑模变结构控制算法，提出 ESO 滑模干扰观测器，用于估计误差，提升建模精度，从而达到更好的控制效果。

## 2 伴有 ESO 干扰观测器的滑模抗扰控制算法

### 2.1 算法概述

ROV 是高度非线性、强耦合和时滞的系统，而水动力

系数的不确定、建模误差等均会造成动力学的不确定性，使 ROV 的控制面临诸多困难。滑模变结构控制是一种非线性控制器，表现为控制不连续，该控制策略与其他控制器的差异在于系统的“结构”不固定，且不断变化，使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动。因滑模面可预先设计，当系统状态轨迹到达滑模面沿其滑动时，可保证暂态响应。因滑模面的设计与对象参数、模型等无关，使滑模变结构控制对系统参数变化及模型不确定性具有强鲁棒性，能有效抵抗外界扰动。为减少海底未知干扰估计的误差和提高响应、收敛速度，提出带有基于 ESO 的滑模干扰观测器。以路径规划仿真实验为例，从水下检修机器人运动学和动力学模型、ESO 滑模干扰观测器三方面概述该算法。

### 2.2 ROV 运动学建模

ROV 是六自由度的运动模型，为表示其运动状态，建立惯性、运动坐标系。惯性坐标系是固定在大地上的坐标系，记为  $E\text{-}XYZ$ ，其原点可以是海面上任意一点， $X$  正向指北， $Y$  正向指东， $Z$  正向则指向地心。运动坐标

【作者简介】曹亮（1987–），男，中国湖南益阳人，硕士，工程师，从事导弹发射装置研究。

系是固联在 ROV 重心上的坐标系, 记为  $O-X_bY_bZ_b$ , 其中,  $X_b$  是水下运载器的艏向, 其正方向是从船尾指向船首的方向;  $Y_b$  的正方向是从重心指向右舷, 并垂直于  $X_b$ ;  $Z_b$  的正方向通过右手定则来确定。ROV 的位置坐标是本体坐标系的原点表示在惯性坐标系下的三维坐标点, 记为  $\eta = [x \ y \ z]^T$ ; 姿态则是通过体坐标系和惯性坐标系之间的关系表示的, 目前常用的表示方式有欧拉角和四元数两种。惯性坐标系下作业机器人的位置和姿态向量可以记为欧拉角形式  $\eta = [\eta^T \ \eta^T]^T$  或者四元数形式  $\eta = [x^T \ \Omega^T]^T = [x \ y \ z \ \Omega^T]^T$ 。ROV 惯性坐标下的速度, 通过位置、姿态的微分形式表示; 体坐标系下的速度向量定义为  $v = [v_1^T \ v_2^T]^T = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ , 其中,  $v_1 = [u \ v \ w]^T$  体坐标系下的线速度,  $v_2 = [p \ q \ r]^T$  是角速度。

### 2.3 ROV 动力学建模

ROV 可视作运行在理想空间中的刚体。根据牛顿定律与动量守恒, 分析其受力平衡关系, 得到 ROV 的刚体运动表达式, 如下所示, 详细参数定义如下所示。描述了在体坐标系下力的平衡关系。

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{env} + \tau_{pro} \quad (1)$$

$M_{RB}$  为质量惯性矩阵,  $C_{RB}$  为科里奥利力和力矩矩阵,  $\tau_{env}$  为外部环境作用于机器人的力与力矩,  $\tau_{pro}$  为推进器推力和力矩输出。质量惯性矩阵  $M_{RB} \in R^{6 \times 6}$  定义如下示。其中  $m$  为 ROV 的质量,  $I_0$  为转动惯量,  $s(r_g^b)$  与 ROV 质心到体坐标系的向量, 由于该型 ROV 的体坐标系原点位于质心, 所以此项为零。

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_g^b) \\ mS(r_g^b) & I_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

在考虑水作用时, ROV 水动力  $\tau_{hydro}$  可以用分力的形式线性叠加到刚体运动方程上, 如下式所示。

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{env} + \tau_{hydro} + \tau_{pro} \quad (4)$$

其中根据 Fossen 的水动力模型,  $\tau_{hydro}$  表达式如下式所示。

$$\tau_{hydro} = -M_A\dot{v} - C_A(v)v - D(|v|)v - g(\eta) \quad (5)$$

将式(5)带入(4)中, 得到 ROV 六自由度水动力学模型, 如式(6)所示。

$$(M_{RB} + M_A)\dot{v} + (C_{RB} + C_A(v))v + D(|v|)v + g(\eta) = \tau_{pro} + \tau_{env} + \tau_{hydro} \quad (6)$$

$M_A$  为附加质量矩阵,  $C_A$  为科里奥利力和力矩的附加质量部分,  $D(|v|)$  为阻尼矩阵,  $g(\eta)$  为回复力,  $\tau_{hydro}$  为水动力。当水下物体与液体处于非相对静止时, 在制定系统方程就须考虑附加质量  $M_A$ 。对于大多数低速水下机器人,  $M_A$  矩阵非对角线元素对水下机器人影响较小, 常被忽略。对于形状复杂的机器人附加质量的计算难以通过经验公式得到, 因此本文将在后文中通过流体软件计算  $M_A$ 。

阻尼矩阵是由线性阻尼项和二次项组成的矩阵, 为方便表示, 将阻尼矩阵划分线性阻尼  $D$  与二次型阻尼  $D_n(|v|)$  两部分。

$$D(|v|) = D + D_n(|v|) \quad (7)$$

科氏力  $C_A$  是由附加质量产生的科氏力,  $\tau_{env}$  是环境干扰输入力与力矩。通常, 海洋环境下的风浪流对水下检修机器人的干扰较大。本文将风浪流的干扰作为一种不确定性因素, 在滑模变结构控制器的设计过程中考虑其影响, 并对其进行抑制。 $\tau_{pro}$  是推进器输出力与力矩。

### 2.4 基于 ESO 的滑模干扰观测器设计

为减少干扰估计所产生的误差并收敛速度, 提出基于 ESO 的滑模干扰观测器, 在有限时间内将估计误差收敛至特定半径集合内。

该观测器的设计分两部分, 首先设计一个 ESO 观测器用于提供系统的状态估计以及对部分干扰  $\tau_d$  的估计, 然后基于估计的信息设计滑膜干扰观测器的滑膜面及相应结构对其余干扰  $\tau_w$  进行估计。

定义 ROV 系统中的各阶状态量为  $f_1 = \eta$ ,  $f_2 = \dot{\eta}$ , 定义扩张状态  $f_3 = \hat{M}^{-1}\tau_d$ , 则有以下形式:

$$\begin{cases} f_1 = f_2 \\ f_2 = \hat{M}^{-1}\tau_c - \hat{M}^{-1}\hat{C}f_2 + \hat{\tau}_w + f_3 \\ f_3 = \hat{M}^{-1}\tau_d \end{cases} \quad (8)$$

设计如下 ESO 对上述系统的状态进行估计:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + l_1 e_b \\ \dot{z}_2 = \hat{M}^{-1}\tau_c - \hat{M}^{-1}\hat{C}z_2 + \hat{\tau}_w + z_3 + l_1 e_b \\ \dot{z}_3 = l_0 e_b \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $e_b = f_1 - z_1 = \eta - z_1$ ,  $z_1, z_2, z_3$  分别是  $f_1, f_2, f_3$  的估计值, 所以  $\tau_d$  的估计为:

$$\hat{\tau}_d = \hat{M}z_3 \quad (10)$$

注意到  $\hat{\tau}_w$  和  $\tau_w$  的估计, 将由待设计的滑模干扰观测器给出。而估计误差  $e_b$  的表达如下:

$$e_b^{(3)} + l_2 \ddot{e}_b + l_1 \dot{e}_b + l_0 e_b = -M^{-1}C(\ddot{e}_b + l_2 \dot{e}_b) + \dot{f}_3 \quad (11)$$

令  $\mathbf{x} = [e_b^T, \dot{e}_b^T, \ddot{e}_b^T]^T$ , 状态空间形式如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + B\dot{f}_3 \\ \mathbf{e}_{ob} = C\mathbf{x} \end{cases} \quad (12)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \\ -l_0 \mathbf{I} & -l_1 \mathbf{I} - l_2 \mathbf{M}^{-1} \hat{\mathbf{C}} & -l_2 \mathbf{I} - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = [\mathbf{I} \ 0 \ 0] \end{aligned} \quad (13)$$

分析可得, 如果选取  $l_0, l_1, l_2$  使得矩阵  $\mathbf{A}$  为 Hurwitz 矩阵, 则  $\mathbf{x}$  能指数收敛至半径为  $\frac{\alpha_1 K}{\lambda}$  的集合内, 即估计误差  $\mathbf{e}_b$  有界。

下面将设计滑模干扰观测器, 并给出  $\tau_w$ 。定义如下滑模面:

$$\mathbf{s} = \mathbf{z}_2 - \boldsymbol{\alpha} \quad (14)$$

其中  $\boldsymbol{\alpha}$  满足以下辅助动态方程 (其中,  $\mathbf{e}^* = \dot{\mathbf{e}}_b + l_2 \mathbf{e}_b$  ) :

$$\hat{\mathbf{M}} \dot{\boldsymbol{\alpha}} + \hat{\mathbf{C}} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{\tau}_c + \hat{\boldsymbol{\tau}}_d + \hat{\boldsymbol{\tau}}_w + \lambda_1 \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) - \hat{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{e}}^* \quad (15)$$

基于 ESO 的滑模干扰观测器设计为 (其中,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  为观测器增益) :

$$\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{\tau}}}_w = \xi + \lambda_2 \hat{\mathbf{M}} \mathbf{z}_2 \\ \dot{\xi} = \lambda_2 (L - (\boldsymbol{\tau}_c + \hat{\boldsymbol{\tau}}_w)) + \hat{\mathbf{C}} \mathbf{e}^* + \hat{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{e}}^* + \lambda_3 \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) \\ L = \hat{\mathbf{C}} \mathbf{z}_2 - \hat{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{z}}_2 - \hat{\boldsymbol{\tau}}_d \end{cases} \quad (16)$$

## 2.5 伴随扰动的数值仿真实验

设两个仿真实验, 一是先定深后执行路径跟踪, 模拟实际定点作业工况; 二是给定水下坐标点, 进行路径跟随。两组实验控制器参数为: 滑模控制器:  $\rho = 0.1, l_2 = 0.5, \kappa_0 = 9, \kappa_1 = 5.3$ ; 扩张状态观测器:  $\rho = 0.1, l_2 = 0.5, \kappa_0 = 9, \kappa_1 = 5.3$ ; 滑模干扰观测器:  $\bar{\tau}_w = 20, \lambda_2 = 12, \lambda_3 = 15$ 。

### 2.5.1 定深后路径跟随仿真实验

本节实验 ROV 首先定深至 1m, 然后在水下 1m 处进行路径点跟踪, 模拟 ROV 定位到检修点后定点前往作业的工况。通过加入正弦波干扰, 模拟水下海流等扰动, 通过分析定深、跟随过程中以及不加扰动的深度、航向、航速数据, 验证本节算法的抗扰能力。本节仿真实验的参数为: 深度取值 1m, 航速取值 2kn, 航向为  $0^\circ$ , 扰动为正弦波, 仿真时间取值为 120s, 本文算法为 SMC(滑模变结构控制算法)。

经过定深后路径跟随仿真, 得出如下试验结论: 在不加扰动时, 路径跟随效果较好; 加正弦扰动后, 因扰动航迹偏移黑实线, 完成抗扰路径精准跟踪。深度控制仿真如图 1 所示, 前 40s 处于稳定下潜阶段, 40-120s 稳定控制在水下 1m, 整个过程控制效果较好。航向控制仿真如图 2 所示, 在 40s 时如图中红框所示, 进入直线航行并原地转圈阶段, 导致航向有一定的变动。

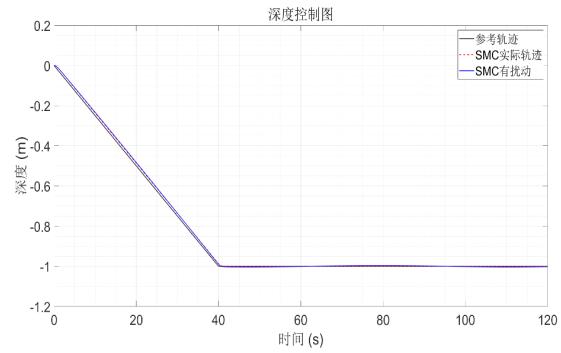


图 1 深度控制仿真图

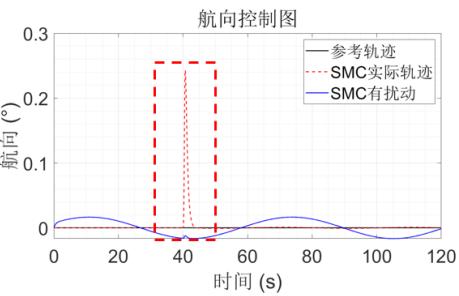


图 2 航向控制仿真图

### 2.5.2 水下路径点跟踪仿真实验

本节仿真实验的参数为: 坐标点 P1 取值为 [0,0,0]; 坐标点 P2 取值为 [10,10,-15]; 坐标点 P3 取值为 [15,10,-15]; 坐标点 P4 取值为 [25,15,-8]; 坐标点 P5 取值为 [35,15,-10]; 航速为 2km; 航向为  $0^\circ$ ; 扰动为正弦波; 仿真时间取 120s; 本文算法为 SMC(滑模变结构控制算法)。

经仿真计算, 整体上无扰动情况下路径跟踪效果最好; 添加正弦扰动后, 跟随效果稍微偏离预设路径, 但整体跟随效果良好; 在大深度下潜并伴随扰动时, 算法控制效果误差大; 一定深度后, 效果良好, 跟踪效果更精准。伴随扰动情况下的误差比无扰动要差, 整体航向控制精度较好。

## 3 结语

本文针对 PID 算法存在参数整定困难、抗干扰能力有限, 采用滑模控制算法。出带有基于 ESO 的滑模干扰观测器的滑模控制器, 设计 ESO 预测该干扰项, 并融入模型, 提升整体抗干扰能力。

## 参考文献

- [1] 潘光, 宋保维, 黄桥高, 等. 水下无人系统发展现状及其关键技术[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(2): 44–51.
- [2] 李经. 水下无人作战系统装备现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(1): 1–5, 36.
- [3] 钱东, 赵江, 杨芸. 军用 UUV 发展方向与趋势(上)——美军用无人系统发展规划分析解读[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(2): 1–30.