

# 基于干扰观测器的 AUV 垂直面等效滑模控制

李广有<sup>a</sup>,王娜<sup>a,b</sup>,尹庆华<sup>a</sup>

(青岛大学 a. 自动化学院; b. 山东省工业控制技术重点实验室, 山东 青岛 266071)

**摘要:**为提高欠驱动自主水下机器人在外部干扰影响下的垂直面定深控制性能,设计一种基于干扰观测器的等效滑模控制器。遵循实际状况简化欠驱动自主水下机器人的垂直面模型,通过简化模型建立其状态方程;构造干扰观测器,基于干扰观测器设计系统的等效滑模控制器,根据 Lyapunov 稳定性理论证明闭环系统的稳定性。仿真结果表明:当存在外部干扰时,该控制器相比传统的滑模控制器能够更好地实现水下机器人的垂直面定深控制,具备良好的抗干扰性能。

**关键词:**欠驱动自主水下机器人;定深控制;干扰观测器;滑模控制

**中图分类号:**TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)02-0149-04

## Equivalent Sliding Mode Control of AUV Vertical Plane Based on Disturbance Observer

LI Guangyou<sup>a</sup>, WANG Na<sup>a,b</sup>, YIN Qinghua<sup>a</sup>

(a. College of Automation; b. Shandong Key Laboratory of Industrial Control Technology, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** In order to improve the vertical depth control performance of underactuated autonomous underwater vehicle under the influence of external disturbance, an equivalent sliding mode controller based on disturbance observer was designed. In line with the actual situation, the vertical plane model of the underactuated autonomous underwater vehicle was simplified to establish its state equation. The disturbance observer was constructed, based on which, the equivalent sliding mode controller of the system was designed, and the stability of the closed-loop system was proved according to Lyapunov stability theory. The simulation results show that the designed controller can better realize the vertical plane depth control of autonomous underwater vehicle than the traditional one with good anti-interference performance.

**Keywords:** underactuated autonomous underwater vehicle; depth control; disturbance observer; sliding mode control

## 0 引言

自主水下机器人(AUV)相对于有缆水下机器人而言,不再受电缆限制,具有更好的隐蔽性,可以更加快速灵活地完成多种海洋作战和作业任务。AUV 凭借其鲜明的特点被广泛用于多种领域,比如海图绘制、军事国防、海洋研究、海底资源探测等<sup>[1]</sup>。由于 AUV 在完成多种水下任务过程中,易受到各种未知干扰的影响,如风、海浪和海流<sup>[2]</sup>等,故设计具有抗干扰能力的运动控制器尤为重要。

定深控制中的姿态控制能力在 AUV 垂直面运动控制中,是最典型的控制要求之一。文献[1]针对 AUV 模型,提出一种基于趋近律的姿态控制方法和一种基于等效控制切换模糊化滑模变结构姿态控制方法;文献[2]将神经网络与滑模控制相结合,提出了一种鲁棒自适应姿态控制算法,使 AUV 更好地完成自动巡航任务;文献[3]针对 AUV 的深度姿态控制,设计了一种反步滑模控制器;文献[4]设计了一种 AUV 水下姿态平衡控制算法;文献[5]利用模糊滑模控制器进行更好的水下机器人姿态调节控制。

一般对 AUV 在水下环境中造成干扰的类型主要有海风、海浪和海流等随机扰动。文献[6]针对复杂海洋环境中的海流干扰,设计了性能优良的鲁棒控制器,减少了干扰对控制的影响;文献[7]考虑水下机器人临界不确定性以及由不可避免的外部干扰,如洋流引起对系统的外部干扰,提出了采用递阶滑模控制技术来设计控制方案。

当水下机器人系统存在外部干扰时,也可以从外部干扰本身出发,针对减少外部干扰的影响来改善控制效果。文献[8]针对存在未知外部干扰影响下的 AUV,设计了一种基于非线性干扰观测器的自适应控制方法,从干扰本身出发,对系统增加针对外部干扰的抵消输入,改善了欠驱动 AUV 垂直面深度跟踪控制。

本文针对 AUV 垂直面模型存在未知外部干扰的情况,设计基于干扰观测器的滑模控制器(DOBSMC)。首先在文献[8]设计干扰观测器的基础上,利用不同的简化方式,考虑垂荡速度对干扰观测器的影响,构造干扰观测器估计 AUV 受到的外界干扰。然后基于干扰估计值设计复合滑模控制器补偿干扰影响,从而改善欠驱动 AUV 垂直面姿态控制性能。本文所设计的 DOBSMC 与传统滑模控

**基金项目:**国家自然科学基金项目(61703221)

**第一作者简介:**李广有(1996—),男,山东滨州人,硕士研究生,研究方向为水下机器人抗干扰控制。

制器相比,能进一步提高跟踪精度,改善控制器的抗干扰能力。

## 1 欠驱动 AUV 垂直面模型

AUV 的六自由度运动学及动力学模型:

$$\begin{cases} \mathbf{B}\mathbf{V}+\mathbf{C}(\mathbf{V})\mathbf{V}+\mathbf{D}(\mathbf{V})\mathbf{V}+\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})=\boldsymbol{\tau}+D_{\text{ext}} \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}=\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{V} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{V}=[u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ , 为定义在刚体坐标系中的速度和角速度向量,其 6 个分量分别对应表示纵荡速度、横荡速度、垂荡速度以及横摇角速度、纵摇角速度、航向角速度(首摇角速度);  $\boldsymbol{\eta}=[x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \phi]^T$ , 为定义在惯性系中的位置和姿态向量,其姿态分量分别对应表示横摇角、纵摇角和首摇角(航向角);  $\mathbf{B}$  为矢量矩阵;  $\mathbf{C}(\mathbf{V})$  为科氏力和向心力阵;  $\mathbf{D}(\mathbf{V})$  为水动力流体阻尼阵;  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  为重力、浮力等恢复力矩构成的向量;  $\boldsymbol{\tau}$  为 AUV 的控制输入;  $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$  为坐标系转换矩阵;  $D_{\text{ext}}$  为外部环境对 AUV 造成的外部干扰。

假设 AUV 运动过程中其水平面的运动与垂直面的运动相互解耦,并满足  $p=r=0, v=0, \varphi=\phi=0$ , 且假设忽略横摇运动对垂荡运动和纵摇运动造成的影响,则可以得到以下简化的垂直面模型:

$$\begin{cases} I_{yy}\dot{q}+m[X_C(uq-\dot{w})+Z_Cwq]=M_y\dot{q}+M_w\dot{w}+M_{uw}uq+ \\ M_{uw}uw+M_{w|w|}w|w|+M_{|q|q|}q|q|+(x_CW-x_BB)\cos\theta- \\ (z_CW-z_BB)\sin\theta+M_{u\delta}u^2\delta+D_{\text{ext}} \\ m[\dot{w}-uq-x_C\dot{q}-z_Cq^2]=Z_y\dot{q}+Z_w\dot{w}+Z_{uq}uq+Z_{uw}uw+ \\ Z_{w|w|}w|w|+Z_{|q|q|}q|q|+(W-B)\cos\theta+Z_{u\delta}u^2\delta \\ \dot{Z}=w\cos\theta-u\sin\theta \\ \dot{\theta}=q \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $w$  为垂荡速度;  $q$  为纵倾角速度;  $\theta$  为纵倾角;  $Z$  为 AUV 下潜深度;  $u$  为纵向速度,假设其维持在常值;  $m$  为 AUV 质量;  $W$  为 AUV 重力;  $B_0$  为 AUV 所受浮力;  $I_{yy}$  为绕  $y$  轴转动惯量;  $M_{uw}$  和  $Z_{uw}$  为舵角系数,  $M_{(\cdot)}$  和  $Z_{(\cdot)}$  分别为水动力参数和黏滞参数;  $\delta$  为舵角控制输入;  $D_{\text{ext}}$  为作用在 AUV 上的干扰力矩。

为进一步研究和简化模型(式(2)),假设 AUV 模型满足  $w \approx 0$ , 且  $\dot{w} \approx 0$ , 纵倾角  $\theta$  变化的范围和幅度较小,基本满足  $\sin\theta \approx \theta, \cos\theta \approx 1$ , 忽略二阶及二阶以上项,代入已知系数和已知量<sup>[8]</sup>, 取轴向速度  $u=2 \text{ m/s}$ , 得到新的垂直面运动模型:

$$\begin{cases} \dot{w}=-1.04w+0.865q-0.02\theta-0.072\delta \\ \dot{q}=6w-0.681q+0.708\theta-0.722\delta+d \\ \dot{\theta}=q \\ \dot{z}=w-2\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中  $d=\frac{1}{I_{yy}-M_y}d_{\text{ext}}$ 。

令  $x_1=z, x_2=\theta, x_3=q, x_4=w$ 。则可以将垂直面模型(式(3))转化为 AUV 垂直面模型的状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1=x_4-2x_2 \\ \dot{x}_2=x_3 \\ \dot{x}_3=6x_4-0.681x_3+0.708x_2-0.722\delta+d \\ \dot{x}_4=-1.04x_4+0.865x_3-0.02x_2-0.072\delta \end{cases} \quad (4)$$

## 2 干扰观测器的设计

为了实现 AUV 的定深控制,使各个姿态稳定在目标值,通过基于干扰观测器继而设计控制器,便可以从外部干扰本身出发,得到来自于干扰观测器的补偿输入,克服未知外界干扰的影响,复合控制器可以弥补单一控制器应对未知干扰的能力不足问题。

为方便干扰观测器(DO)的设计,定义状态变量  $\mathbf{x}=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ , 则状态方程可以写成向量形式:

$$\dot{\mathbf{x}}=\mathbf{A}\mathbf{x}+\mathbf{B}\delta+\mathbf{D}d \quad (5)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A}=\begin{bmatrix} 0 & 1 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 6 & -0.681 & 0.708 & 0 \\ -1.04 & 0.865 & -0.02 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}=[-0.072 \ -0.722 \ 0 \ 0]^T; \mathbf{D}=[0 \ 0 \ 1 \ 0]^T。$$

构造 NDO 如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{d}}=m+T(\mathbf{x}) \\ \dot{\hat{m}}=\mathbf{L}[\mathbf{A}\mathbf{x}-\mathbf{B}\hat{d}-\mathbf{D}(m+T(\mathbf{x}))] \end{cases} \quad (6)$$

令  $T(\mathbf{x})=T_1x_1+T_2x_2+T_3x_3+T_4x_4, \mathbf{L}=\frac{\partial T(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}=[T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4]$ 。其中  $T_1, T_2, T_3$  和  $T_4$  均为常数,且  $T_1>0, T_2>0, T_3>0, T_4>0$ 。

定义  $\tilde{d}=d-\hat{d}$ , 本文假设干扰  $d$  是慢时变的,为了方便分析,可假设  $d$  的导数近似为 0, 即

$$\tilde{d}=d-\hat{d}=-\mathbf{L}\mathbf{Q}_2(\mathbf{x})\tilde{d}=-T_3\tilde{d} \quad (7)$$

构建 Lyapunov 函数:  $V_{\text{obs}}=\frac{1}{2}\tilde{d}^2$ , 求导得  $\dot{V}_{\text{obs}}=\tilde{d}\dot{\tilde{d}}=-T_3\tilde{d}^2 \leq 0$ , 故干扰估计误差最终可以收敛到 0。

定义观测器输出控制量为

$$\delta_d=\frac{1}{M_1}\hat{d} \quad (8)$$

式中  $M_1=-0.722$ 。

## 3 DOBSMC 设计

深度是垂荡运动控制的控制对象,纵倾角为纵摇运动控制的控制对象,垂荡运动控制和纵摇运动控制统称为 AUV 垂直面内的姿态控制。其控制原理为:为了使深度  $z$ 、升沉速度  $w$ 、纵倾角  $\theta$  和纵倾角速度  $q$  的偏差为 0, 使用深度  $z$ 、升沉速度  $w$ 、纵倾角  $\theta$  和纵倾角速度  $q$  的偏差组成滑模切换面函数  $S$ , 依靠设计的滑模变结构控制律使  $S=0$ , 则可保证各偏差趋向于 0。

针对线性系统式(5), 容易验证:

$$\text{rank}[\mathbf{B} \ \mathbf{A}\mathbf{B} \ \mathbf{A}^2\mathbf{B} \ \mathbf{A}^3\mathbf{B}]=4=n$$

即系统完全能控,因此可以任意配置极点,本文采用Ackerman公式设计切换函数 $S=Cx$ 中的 $C$ 值:

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

式中 $P(A)$ 为期望特征多项式 $P(s)$ 中复变量 $s$ 换成 $A$ 所得的矩阵多项式<sup>[9]</sup>。

$$\text{得 } C=[0.797 \ 0 \ -1.464 \ 5 \ -1.729 \ 0 \ 0.411 \ 3]。$$

基于等效控制的滑模切换控制:

$$\delta_s = \delta_{ec} - M \text{sgn}(s) \quad (9)$$

式中: $\delta_{ec}$ 为等效控制; $M$ 为待定常数,文中取 $M=0.5$ ; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数:

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1, & s > 0 \\ 0, & s = 0 \\ -1, & s < 0 \end{cases}$$

构建Lyapunov函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \geq 0 \quad (10)$$

$$\text{则 } \dot{V} = s \dot{s} = s(CAx + CB\delta)$$

$$\text{取 } M = \delta(CB)^{-1}$$

式中:

$$\dot{V} = s \dot{s} = s(CAx + CB\delta) = \delta s \text{sgn}(s) \leq 0 \quad (11)$$

此时考虑系统外界干扰存在的情况:

$$\dot{V} = s \dot{s} = s(CAx + CB\delta + Dd)$$

取 $\delta > \max |Dd|$ ,  $\dot{V} = -\delta s \text{sgn}(s) \leq 0$  仍然成立。

$$\delta = \delta_s + \delta_d = \delta_{ec} - M \text{sgn}(s) - \frac{1}{M_1} \hat{d} \quad (12)$$

则可保证AUV垂直面闭环控制系统渐近稳定。

## 4 仿真实验

仿真中AUV模型相关物理参数见文献[1],因为干扰存在于第三通道,则选取设计干扰观测器的参数 $T_1=1$ ;  $T_2=1$ ;  $T_3=9$ ;  $T_4=1$ 。取轴向速度 $u=0.5$  m/s,在AUV运动过程的开始便对AUV施加外部干扰力矩 $D_{ext}$ ,模拟其在海洋环境中遭遇的外部环境影响。仿真条件设置为水下机器人的初始状态为: $w_0=0.1$  m/s;  $q_0=0.2$  rad/s;  $\theta_0=0.7$  rad;起始深度为 $z_0=5$  m。AUV最终维持在平衡状态: $w_d=0$  m/s;  $q_d=0$  rad/s;  $\theta_d=0$  rad;目标深度 $z_d=0$  m。

当要求AUV完成实际任务时,AUV的定深控制发挥重要的作用。AUV各姿态越稳定,AUV的抖震越小,认为其定深控制效果越良好。本部分通过仿真对比传统滑模控制器(SMC)和DOB SMC的控制效果。

图1为DOB SMC和SMC的垂直面位移对比图,垂直面位移是鉴定定深控制的重要参数,当要求AUV完成定深运动时,其垂直面上的位移越小,说明控制效果越好。采用SMC的AUV在受到外部干扰时,在垂直面上存在0.8 m幅值的位移,震动较大。采用DOB SMC的AUV在受到外部干扰时,在垂直面上的位移稳定在0.5 m以内,具有较好的控制效果。

图2为DOB SMC和SMC的垂荡速度响应曲线,垂荡速度意味着AUV机身在纵向上运动的快慢。当要求AUV做定深运动时,垂荡速度越小,说明外部干扰对AUV位置的影响

越慢。采用SMC的AUV在受到外部干扰时,垂荡速度可以达到0.04 m/s,AUV机身移动较为激烈。采用DOB SMC的AUV在受到外部干扰时,稳定后垂荡速度维持在0.02 m/s以内,进一步减小了外部干扰对垂荡速度的干扰。

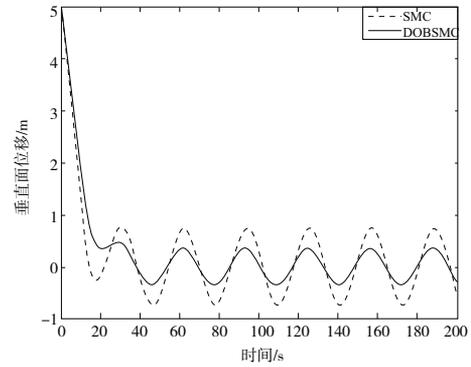


图1 DOBSMC和SMC的垂直面位移对比图

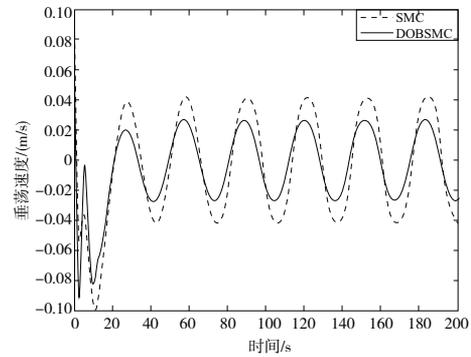


图2 DOBSMC和SMC的垂荡速度响应曲线

图3为DOB SMC和SMC的纵摇角速度响应曲线,纵摇角速度意味着AUV机身在纵向上姿态转动的快慢,当要求AUV做定深运动时,纵摇角速度越小,说明外部干扰对AUV姿态的影响越慢。采用SMC的AUV在受到外部干扰时,纵摇角速度可以达到0.05 rad/s,AUV机身姿态转动较为激烈。采用DOB SMC的AUV在受到外部干扰时,纵摇角速度在0.025 rad/s以内,包含有DOB SMC的AUV面对外部干扰时更加稳定,外部干扰的影响更加缓慢。

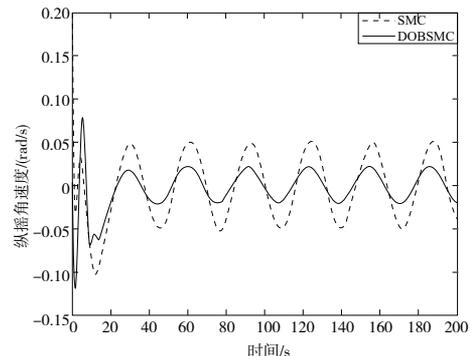


图3 DOBSMC和SMC的纵摇角速度响应曲线

图4为DOB SMC和SMC的纵摇角响应曲线,纵摇角

意味着 AUV 机身在纵向上姿态转动幅度的大小,当要求 AUV 做定深运动时,纵摇角变化越小,说明外部干扰对 AUV 姿态的影响越小。采用 SMC 的 AUV 在受到外部干扰时,纵摇角可以达到  $0.28^\circ$ , AUV 机身姿态转动幅度较为明显。采用 DOBSMC 的 AUV 在受到外部干扰时,纵摇角在  $0.13^\circ$  以内,采用 DOBSMC 的 AUV 面对外部干扰时较大幅度改善了震动幅度,外部干扰的影响更加微小。

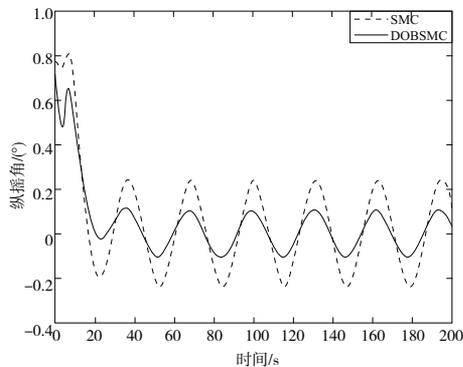


图4 DOBSMC 和 SMC 的纵摇角响应曲线

图5为采用 DOBSMC 的 AUV 系统中干扰观测值和干扰实际值,外部干扰力矩的实际值  $d$  与干扰观测器得到的估计值  $\hat{d}$  在运动稳定后峰值和频率相差较小,说明干扰观测器在 AUV 运动过程中可以估计出实际干扰。

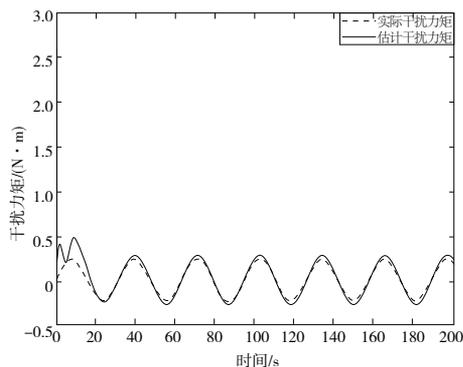


图5 采用 DOBSMC 的 AUV 系统中干扰观测值和干扰实际值

## 5 结语

为了得到简化的欠驱动 AUV 垂直面状态方程,有条件地简化欠驱动 AUV 垂直面模型。考虑实际过程中 AUV 会受到外部干扰的情况,从干扰本身出发,引入干扰观测器,继而设计了 DOBSMC。通过仿真实验,得到在外部干扰作用下 AUV 各个系统状态变量曲线,包括深度  $z$  响应曲线、升沉速度  $w$  响应曲线、纵摇角  $\theta$  响应曲线和纵摇角速度  $q$  响应曲线,说明 AUV 系统可以在 DOBSMC 控制下实现更好的定深控制效果和姿态控制效果,仿真结果验证了所设计控制器良好的控制性能。

### 参考文献:

- [1] 郝阳. 自主水下航行器模糊滑模控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2014.
- [2] 蒋云彪,郭晨,于浩森. 自主水下航行器的鲁棒自适应姿态控制算法[J]. 计算机工程与应用,2019,55(17):266-270.
- [3] 贾鹤鸣,何东旭,林荣鹏,等. 基于反步滑模的 AUV 深度控制研究[J]. 科技创新与生产力,2018(6):21-24,27.
- [4] ZHANG L J, QI X, PANG Y J. Adaptive output feedback control based on DRFNN for AUV [J]. Ocean Engineering, 2009, 36(9/10):716-722.
- [5] 周克秋,李钦奉. 作业型水下机器人姿态调节控制研究[J]. 计算机技术与发展,2020,30(3):142-146.
- [6] 曲星儒. 海流干扰下欠驱动 AUV 航迹跟踪控制研究[D]. 大连:大连海事大学,2018.
- [7] VU Q, DINH T A, VAN NGUYEN T, et al. An adaptive hierarchical sliding mode controller for autonomous underwater vehicles[J]. Electronics,2021,10(18):2316.
- [8] 蒋云彪. 欠驱动 AUV 自适应轨迹跟踪控制研究[D]. 大连:大连海事大学,2019.
- [9] 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.

收稿日期:2021-11-16