

控制与决策

Control and Decision

基于固定时间滑模干扰观测器的AUVs事件触发编队控制

苏博, 王洪斌, 王跃灵, 高静

引用本文:

苏博,王洪斌,王跃灵,高静. 基于固定时间滑模干扰观测器的AUVs事件触发编队控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1116–1126.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1419>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制

Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft

控制与决策. 2021, 36(5): 1049–1058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0968>

四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

基于反演算法的严格反馈非线性系统固定时间跟踪控制

Fixed-time tracking control for strict-feedback nonlinear systems based on backstepping algorithm

控制与决策. 2021, 36(1): 173–179 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0658>

输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation

控制与决策. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

Fal函数的改进及3种新型非线性扩张状态观测器

Advanced fal function and three novel nonlinear extended state observers

控制与决策. 2021, 36(7): 1655–1662 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1652>

基于固定时间滑模干扰观测器的 AUVs 事件触发编队控制

苏 博, 王洪斌[†], 王跃灵, 高 静

- (1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066000;
2. 燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要: 研究多自主水下机器人(AUVs)编队控制过程中存在外部未知扰动、模型参数摄动和节约控制器传输网络能耗的问题,提出一种抗扰动的固定时间相对阈值事件触发编队控制方法.首先,给出自适应固定时间积分滑模干扰观测器(AFISMDO),在固定时间内用来估计系统的复合扰动;其次,基于所设计的AFISMDO,将非线性滤波器引入到反步算法中,解决反步法多次微分求导造成计算量大的问题;然后,为了节约网络传输资源,降低控制器能耗,将相对阈值事件触发机制引入到多AUVs编队控制中,结合虚拟轨迹概念,设计固定时间分布式编队控制器,使得闭环系统是固定时间收敛的,且系统收敛时间仅取决于控制器设计参数,并通过理论推导排除Zeno现象.仿真实验结果表明,所设计的控制器是合理有效的.

关键词: 自适应固定时间积分滑模干扰观测器; 编队控制; 相对阈值事件触发机制; 虚拟轨迹; 固定时间控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1419

引用格式: 苏博,王洪斌,王跃灵,等.基于固定时间滑模干扰观测器的AUVs事件触发编队控制[J].控制与决策,2022,37(5):1116-1126.

Event-triggered formation control for AUVs with fixed-time sliding mode disturbance observer

SU Bo, WANG Hong-bin[†], WANG Yue-ling, GAO Jing

- (1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China; 2. Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: This paper studies the problem of unknown external disturbances, model parameter uncertainty, and saving the energy consumption of the controller transmission network of multiple AUVs formation control, and proposes an anti-disturbance fixed-time relative threshold event-triggered formation control method. First of all, an adaptive fixed-time integrated sliding mode interference observer (AFISMDO) is presented, which is used to estimate the compound disturbance of the system in a fixed time. Based on the designed AFISMDO, a nonlinear filter is introduced into the backstepping algorithm to solve the problem of a large amount of calculation caused by multiple differential derivations in the design of a backstepping method. Then, in order to save network transmission resources and reduce controller energy consumption, the relative threshold event-triggered mechanism is introduced into the formation control of multiple AUVs, combined with the concept of virtual trajectory, and a fixed-time distributed formation control method is designed. The presented controller makes the closed-loop system converge in a fixed time, and the system convergence time only depends on the controller design parameters, and the Zeno phenomenon is excluded through theoretical derivation. Finally, the simulation experiment results show that the designed controller is reasonable and effective.

Keywords: adaptive fixed time integrator sliding mode disturbance observer; formation control; relative threshold event-triggered mechanism; virtual trajectory; fixed-time control

0 引 言

自主水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV)作为一种进行海洋探索的辅助智能工具,在民用和军事领域发挥着重要的作用,例如海洋环境监

测、海图绘制、军事侦察、能源勘探等^[1-3].随着海洋作业需求的升级,单个水下机器人的执行能力有限,独立完成复杂任务的难度较大,外加水下机器人作业环境复杂、气象条件多变等自然因素,往往需要多

收稿日期: 2020-10-15; 录用日期: 2021-03-03.

基金项目: 河北省自然科学基金项目(F2016203496).

责任编委: 郭戈.

[†]通讯作者. E-mail: hb_wang@ysu.edu.cn.

AUVs相互配合,协同作业,提升作业效率,实现作业要求的性能和指标。多AUVs系统协调合作,可以克服单个AUV的功能缺陷和执行效率低的不足,具备节约时间、水下作业的高质高效的能力,同时增加了作业时的适应性,使得机器人完成水下作业任务更容易成功。因此,研究AUVs的鲁棒控制具有重要的现实意义^[4]。虚拟领航-跟随设计原理简单描述如下:选取假定的虚拟领航者作为跟随者的参考物,虚拟领航者与实际领航者保持相应的距离和角度,通过输入给控制器设计的控制算法使得跟随者跟踪上虚拟领航者的轨迹及状态,将编队控制问题转化为轨迹跟踪问题,从而实现系统编队控制。因为增加了虚拟领航者,使得编队控制不易因领航者失效而造成编队不稳定,得到了科研人员的青睐^[5]。

AUVs编队控制系统的一个难点是难以精确获得系统模型,同时,存在的外部扰动会严重影响控制系统的性能。为了处理模型参数不确定性及外界洋流干扰,文献[6-7]采用自适应技术对模型不确定性和外界扰动进行了补偿。AUV系统很难测量外部未知扰动,除了应用模糊自适应算法、神经网络技术等智能算法对其进行补偿外,还可以采用观测器重构技术对外部状态信息实时获取。为了得到更快的收敛速度及抗干扰能力,文献[8]提出了有限时间观测器的设计方法,对参数不确定及海洋扰动进行实时估计,从而获得全局有限时间稳定的跟踪性能。虽然基于有限时间的观测器可对扰动进行精确估计,但其收敛时间严重依赖于初始观测误差,限制了应用的可行性。积分滑模算法将符号函数引入积分项内,从而削弱了系统产生的抖振,同时又具有滑模算法的鲁棒性能优点,深得科研人员青睐。本文拟将积分滑模算法、自适应技术和固定时间理论相结合,设计一种固定时间收敛的积分滑模扰动观测器,扰动最大上界采用自适应算法进行估计,放宽了以往研究需要扰动上界已知这一假设条件,实现系统对外界扰动固定时间内收敛,且系统收敛时间与系统初始观测误差无关,提高系统应用可实施性。

此外,实现多AUVs编队快速收敛是控制系统的重要性能指标。以往多数AUVs编队控制是渐近稳定的^[9],意味着收敛速度以指数形式收敛,在渐近稳定控制器的作用下系统状态平衡位置不能在有限时间内收敛,而有限时间控制器能够确保系统状态在有限时间内收敛到平衡点^[10-11]。然而,有限时间稳定的系统收敛时间随着初值的变大而无限增长,大大削弱了系统的收敛性能。同时,实际工程中状态信息初始值

很难获知,造成算法在应用中受限。固定时间控制理论^[12]不仅能够提高系统收敛速度,而且最为关键的特点是系统收敛时间仅取决于控制器的设计参数,克服了对系统初始状态的依赖性。对于收敛时间严格和初始状态不能精确获取的系统,基于固定时间理论设计控制器更符合实际应用的需求。近年来,固定时间理论先后在积分器系统^[13]、多输入多输出非线性系统^[14]得到了发展,理论逐渐成熟,进一步为水下机器人应用提供了理论支撑。然而,以上科研成果,为了保证系统的稳定性和期望的控制性能,采样和控制的周期较小,因此,会造成传输过程中的大量数据更新^[15]。

另一方面,在传统的工程应用中,多智能体控制方案通常采用时间控制,需要在不中断的情况下向系统发送控制信号,如此造成了通信资源的浪费和计算量的增加。与传统控制方法不同的是,一种非周期控制技术,称为事件触发机制的控制策略近年来得到了发展。事件触发控制中,触发只发生在所设计的事件触发条件为真的时刻,可以减少双向数据传输,能够很好地解决资源浪费问题,在网络化控制系统中具有广泛的应用前景^[16]。因此,为了减少网络传输过程中的能量消耗,事件触发方法在一些文献中得到了应用。文献[17]研究了非线性系统的事件触发控制。文献[18]研究了事件触发机制下欠驱动水下机器人路径跟踪控制。AUVs系统的通信网络受限于有限的带宽和通信资源,以往的编队控制研究基于周期触发时间采样,连续的通信不仅会导致网络拥塞,还会造成不必要的信息传输,从而造成能源的进一步耗费。为了有效利用网络资源,减少控制器传输能耗,通过判定事件触发条件来决定是否进行控制器更新,减少个体之间信息资源传输的频率,降低水下机器人编队传输网络中的能耗,这不失为一种有效的控制方法。因此,研究基于事件触发机制的控制策略在水下机器人中的应用很有必要。同时,解决系统中集总扰动和传输网络资源能耗问题具有一定的难度与意义。

综上,本文以水下机器人编队为背景展开研究,提出一种基于自适应固定时间积分滑模扰动观测器与相对阈值事件触发策略相融合的控制算法。所设计的抗干扰相对阈值事件触发控制器,可以实现多AUVs系统编队控制的固定时间收敛。将系统模型参数不确定性和外界扰动设定为集总扰动,提出一种固定时间收敛的自适应积分滑模扰动观测器设计方法,采用自适应技术对扰动上界进行估计,放宽了扰动上界已知的假设条件,拓宽了观测器适用范围。进一步,

结合反步法、非线性滤波技术以及分布式相对阈值事件触发机制,设计固定时间事件触发编队控制器,缓解AUV个体之间的通信负担,降低控制器传输网络能耗.所设计的控制器既可实现系统固定时间有界收敛,又能保证系统收敛时间与初始状态无关,同时提高网络资源利用率,减少控制器频繁触发而产生的能耗.此外,通过理论证明,该方法可以排除事件触发策略Zeno现象,保证控制器设计的合理性.最后通过仿真验证了算法的有效性.

1 AUV模型描述与问题形成

1.1 AUV模型

假设所有AUV都有固定的姿态,每个跟随AUV相对位置和姿态信息已知,则跟随AUV的水平面运动学及动力学方程^[5]分别为

$$\dot{\eta} = R(\psi)v, \quad (1)$$

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau + \tau_w. \quad (2)$$

其中: $\eta = [x, y, \psi]^T$ 表示全局坐标系下的位置; $v = [u, v, r]^T$ 表示线性速度; ψ 为艏向角; $\tau = [\tau_u, \tau_v, \tau_r]^T$ 为系统控制输入; $\tau_w = [\tau_{wu}, \tau_{wv}, \tau_{wr}]^T$ 表示洋流干扰; M 为惯性矩阵,即

$$M = \text{diag}\{m_u, m_v, m_r\}, \quad (3)$$

$m > 0$ 为AUV质量, $m_u = m - X_{\dot{u}}$, $m_v = m - Y_{\dot{v}}$, $m_r = I_z - N_{\dot{r}}$, $X_{\dot{u}}$ 、 $Y_{\dot{v}}$ 、 $N_{\dot{r}}$ 为附加质量, I_z 是转动惯量;

$$D(v) = \begin{bmatrix} d_u & 0 & 0 \\ 0 & d_v & 0 \\ 0 & 0 & d_r \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$D(v) \in R^{3 \times 3}$ 代表非线性阻尼矩阵,元素 $d_u = -(X_u + X_{u|u}|u|)$, $d_v = -(Y_v + Y_{v|v}|v|)$, $d_r = -(N_r + N_{r|r}|r|)$; $R(\psi) \in R^{3 \times 3}$ 为旋转矩阵,满足等式 $R(\psi)R^T(\psi) = I_{3 \times 3}$,有

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_v v \\ 0 & 0 & m_u u \\ m_v v & -m_u u & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$C(v) \in R^{3 \times 3}$ 为科里奥利和向心力矩阵.AUV模型的参数含有不确定项形式 $M = M_0 + \Delta M$, $C = C_0 + \Delta C$, $D = D_0 + \Delta D$.其中: M_0 、 C_0 、 D_0 表示标称矩阵, ΔM 、 ΔC 、 ΔD 定义为参数不确定性.

根据以上分析,方程(2)整理如下:

$$\dot{v} = \frac{1}{M_0}(-C_0(v)v - D_0(v)v + \tau) + d(t), \quad (7)$$

其中 $d(t) = (-\Delta M\dot{v} - \Delta C(v)v - \Delta D(v)v + \tau_w)/M_0$ 定义为AUV的集总干扰项,由系统模型参数不确定项和外界环境变化引起的扰动组成.

1.2 虚拟领航跟随算法

虚拟轨迹由领航AUV期望的编队构型 $(d_{lf}^d, \varphi_{lf}^d)$ 形成.其中:横向距离 $d_x = d_{lf}^d \cos \varphi_{lf}^d$,纵向距离 $d_y = d_{lf}^d \sin \varphi_{lf}^d$.在惯性坐标系下,虚拟轨迹由下式给出:

$$\begin{cases} x_v = x_l + d_x \cos \psi_l - d_y \sin \psi_l, \\ y_v = y_l + d_x \sin \psi_l + d_y \cos \psi_l, \\ \psi_v = \psi_l. \end{cases} \quad (8)$$

方程(8)简单写成如下表达式:

$$\eta_v = \eta_l + R(\psi_l)\rho. \quad (9)$$

其中: $\rho = [d_x, d_y, 0]$, $\eta_l = [x_l, y_l, \psi_l]^T$ 表示领航者位置坐标, $\eta_v = [x_v, y_v, \psi_v]^T$ 表示虚拟领航者位置坐标.虚拟领航者代表期望的位置,代替真实领航者作为跟随者的参考,当跟随者到达虚拟领航者的位置时,意味着编队处在期望的运动状态,此时跟随者与领航者之间保持着预定的距离.

1.3 引理及假设

引理1^[12] 如果 $V: R^n \rightarrow R_+ \cup \{0\}$ 是连续的径向有界函数,则有:

$$1) V(x) = 0 \Leftrightarrow x = 0.$$

2) 若任意的 $x(t)$ 满足不等式

$$\dot{V}(x) \leq -\gamma_1 V^\alpha(x) - \gamma_2 V^\beta(x), \quad (10)$$

则系统是全局固定时间稳定的.其中: γ_1 、 γ_2 、 α 、 β 均是正常数, $0 < \alpha < 1$, $\beta > 1$.其收敛时间 T 有界且独立于系统的初始值,满足不等式

$$T \leq T_{\max} := \frac{1}{\gamma_1(1-\alpha)} + \frac{1}{\gamma_2(\beta-1)}. \quad (11)$$

3) 若任意的 $x(t)$ 满足不等式

$$\dot{V}(x) \leq -\gamma_1 V^\alpha(x) - \gamma_2 V^\beta(x) + \vartheta, \quad (12)$$

则该系统是实际固定时间稳定的,且存在正常数 γ_1 、 γ_2 、 α 、 β 和 θ , $0 < \alpha < 1$, $\beta > 1$, $0 < \theta < 1$.使得收敛时间 T 满足

$$T \leq T_{\max} := \frac{1}{\gamma_1\theta(1-\alpha)} + \frac{1}{\gamma_2\theta(\beta-1)}. \quad (13)$$

引理2^[13] 若 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_M \geq 0$,则有

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^M \varepsilon_i^\kappa \geq \left(\sum_{i=1}^M \varepsilon_i\right)^\kappa, & 0 < \kappa < 1; \\ \sum_{i=1}^M \varepsilon_i^\kappa \geq M^{1-\kappa} \left(\sum_{i=1}^M \varepsilon_i\right)^\kappa, & 1 < \kappa < \infty. \end{cases} \quad (14)$$

引理3^[19] 对于任意的 $c > 0, a \geq 0, b > 0$, 有如下不等式成立:

$$a^c(b-a) \leq \frac{1}{1+c}(b^{1+c} - a^{1+c}). \quad (15)$$

引理4^[19] 对于任意的 $c > 1, a > 0, b \leq a$, 有如下不等式成立:

$$(a-b)^c \geq b^c - a^c. \quad (16)$$

引理5^[20] 考虑如下系统 $\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3, \dots, \dot{x}_n = u$, 若控制器设计为

$$u = -k_1|x_1|^{a_1}\text{sgn}(x_1) - k_2|x_2|^{a_2}\text{sgn}(x_2) - \dots - k_n|x_n|^{a_n}\text{sgn}(x_n) - K_1|x_1|^{b_1}\text{sgn}(x_1) - K_2|x_2|^{b_2}\text{sgn}(x_2) - \dots - K_n|x_n|^{b_n}\text{sgn}(x_n),$$

控制增益 k_i 和 $K_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 分别保证 $s^n + k_n s^{n-1} + \dots + k_1, s^n + K_n s^{n-1} + \dots + K_1$ 是 Hurwitz, 则闭环系统是全局固定时间收敛的. 其中: 参数选择 $a_i \in (0, 1)$, 满足 $a_{i-1} = a_i a_{i+1} / (2a_{i+1} - a_i), i = 2, \dots, n, a_{n+1} = 1$ 和 $a_n = a; b_i > 1, i = 1, \dots, n$. 参数 $b_{i-1} = b_i b_{i+1} / (2b_{i+1} - b_i), i = 2, \dots, n, b_{n+1} = 1$ 和 $b_n = b. a \in (1 - \varepsilon, 1), b \in (1, 1 + \varepsilon_1)$; 极小值 $\varepsilon > 0, \varepsilon_1 > 0$. 此时系统收敛时间为 T_2 , 表达式如下:

$$T_2 \leq \frac{\lambda_{\max}^{\sigma_1}(P)}{r_0 \sigma_1} + \frac{1}{r_1 \omega r^\omega}. \quad (17)$$

其中

$$\sigma_1 = \frac{1-a}{a}, \omega = \frac{b-1}{b},$$

$$r_0 = \frac{\lambda_{\min}(Q)}{\lambda_{\min}(P)}, r_1 = \frac{\lambda_{\min}(Q_1)}{\lambda_{\min}(P_1)}, r \leq \lambda_{\min}(P_1);$$

Q, Q_1, P, P_1 代表正定矩阵, 且满足方程 $PA + A^T P = -Q, P_1 A_1 + A_1^T P_1 = -Q_1$; 矩阵 A 和 A_1 的形式见文献[20].

假设1 假设集总复合扰动 $\|\hat{d}\| \leq d_m$, 满足 $0 < d_m \leq L, d_m$ 未知有界, 最大上界为 L .

假设2 假设领航AUV状态信息可用.

控制目标: 对于由运动学模型(1)和动力学模型(7)组成的AUV系统, 基于虚拟领航跟随算法, 设计相对阈值事件触发策略的抗干扰固定时间编队控制律, 使跟随AUV跟踪上虚拟领航AUV的轨迹, 进而实现编队控制目标, 同时保证所有闭环信号达到实际固定时间稳定. 数学表达为

$$\lim_{t \rightarrow T} \|\eta_f - \eta_v\| = 0. \quad (18)$$

其中: $T \in [0, \infty)$ 为系统收敛时间, 下标 v, f 用来区分虚拟领航AUV和跟随AUV.

2 主要设计过程

设计自适应固定时间积分滑模干扰观测器 (AFISMDO), 用来实时估计集总扰动; 基于

AFISMDO, 为跟随AUV设计相对阈值事件触发固定时间控制器.

2.1 自适应固定时间积分滑模干扰观测器的设计

为了补偿扰动对系统造成的影响, 设计固定时间积分滑模干扰观测器, 对控制系统(7)存在的复合扰动进行有效估计补偿. 将固定时间控制理论结合干扰观测器技术, 通过引入辅助变量定义积分滑模面, 设计具有固定时间收敛性能的滑模干扰观测器, 实现对系统复合扰动的精确估计.

定义滑模面 $s_0 = [s_{0u}, s_{0v}, s_{0r}]^T$, 有

$$s_0 = M_0 v - z, \quad (19)$$

其中 z 为辅助变量, 即

$$\dot{z} = (-C_0 v - D_0 v) + \tau + \hat{d}. \quad (20)$$

这里: \hat{d} 是 d 的干扰估计, d 代表由参数摄动和外界海流干扰组成的集总扰动. 选取第2个积分滑模面 $s_1 = [s_{1u}, s_{1v}, s_{1r}]^T$, 即

$$s_1 = \dot{s}_0 + \int [k_1|s_0|^{a_1}\text{sgn}(s_0) + K_1|s_0|^{b_1}\text{sgn}(s_0) + k_2|\dot{s}_0|^{a_2}\text{sgn}(\dot{s}_0) + K_2|\dot{s}_0|^{b_2}\text{sgn}(\dot{s}_0)] ds. \quad (21)$$

其中: $k_i, K_i (i = 1, 2)$ 均为设计参数且取值为正, $0 < a_{1 \sim 2} < 1, b_{1 \sim 2} > 1$ 为控制器设计参数. 观测器导数设计如下:

$$\begin{aligned} \hat{d} = & k_1|s_0|^{a_1}\text{sgn}(s_0) + K_1|s_0|^{b_1}\text{sgn}(s_0) + \\ & k_2|\dot{s}_0|^{a_2}\text{sgn}(\dot{s}_0) + K_2|\dot{s}_0|^{b_2}\text{sgn}(\dot{s}_0) + \\ & \lambda_1|s_1|^{a_3}\text{sgn}(s_1) + \lambda_2|s_1|^{b_3}\text{sgn}(s_1) + \\ & \lambda_0\text{sgn}(s_1) + \hat{L}\text{sgn}(s_1). \end{aligned} \quad (22)$$

其中: $\lambda_i (i = 0, 1, 2)$ 为设计参数且取值为正, $0 < a_{1 \sim 3} < 1, b_{1 \sim 3} > 1$ 为设计参数. 根据假设1可知, $\|\hat{d}\| \leq d_m \leq L$, 对 L 做自适应估计, 定义估计误差为

$$\tilde{L} = L - \hat{L}. \quad (23)$$

其中: \hat{L} 是 L 的估计值, \tilde{L} 是估计误差.

对式(19)和(21)求导, 得到如下表达式:

$$\begin{cases} \dot{s}_0 = d - \hat{d}, \\ \ddot{s}_0 = \dot{d} - \dot{\hat{d}}, \\ \dot{s}_1 = \dot{d} - \lambda_1|s_1|^{a_3}\text{sgn}(s_1) - \lambda_2|s_1|^{b_3}\text{sgn}(s_1) - \lambda_0\text{sgn}(s_1) - \hat{L}\text{sgn}(s_1). \end{cases} \quad (24)$$

根据引理3和引理4, 可得如下不等式:

$$\begin{aligned} \tilde{L}\hat{L}^p &= \hat{L}^p(L - \hat{L}) \leq \\ & \frac{1}{1+p}(L^{p+1} - \hat{L}^{p+1}) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{1+p}(L^{p+1} - (L - \tilde{L})^{p+1}) &\leq \\ \frac{1}{1+p}(L^{p+1} - (\tilde{L}^{p+1} - L^{p+1})) &= \\ \frac{1}{1+p}(2L^{p+1} - \tilde{L}^{p+1}). \end{aligned} \quad (25)$$

同理,可以得到

$$\begin{aligned} \tilde{L}\hat{L}^q &= \hat{L}^q(L - \hat{L}) \leq \\ \frac{1}{1+q}(L^{q+1} - \hat{L}^{q+1}) &= \\ \frac{1}{1+q}(L^{q+1} - (L - \tilde{L})^{q+1}) &\leq \\ \frac{1}{1+q}(L^{q+1} - (\tilde{L}^{q+1} - L^{q+1})) &= \\ \frac{1}{1+q}(2L^{q+1} - \tilde{L}^{q+1}). \end{aligned} \quad (26)$$

其中: $0 < p < 1, q > 1$ 为设计参数.

滑模干扰观测器自适应律选取如下:

$$\dot{\hat{L}} = \gamma(-\hat{L}^p - \hat{L}^q + \|s_1\|). \quad (27)$$

定理 1 针对存在集总扰动的水下机器人控制系统(1)和(7),如果选取自适应律 $\dot{\hat{L}} = \gamma(-\hat{L}^p - \hat{L}^q + \|s_1\|)$ 和自适应固定时间积分滑模干扰观测器(19)~(22),则可以保证集总扰动在固定时间内被估计,即估计误差 $\tilde{d} = d - \hat{d}$ 在固定时间内达到.

证明 应用式(24)可以得到 $\dot{s}_0 = d - \hat{d}$,为了证明自适应固定时间积分滑模干扰观测器误差的稳定性,选取李雅普诺夫函数 V_d 如下:

$$V_d = \frac{1}{2}s_1^T s_1 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{L}\tilde{L}. \quad (28)$$

对上式求导,得

$$\begin{aligned} \dot{V}_d &= s_1^T \dot{s}_1 + \frac{1}{\gamma}\tilde{L}\dot{\tilde{L}} = \\ &- \lambda_1 \|s_1\|^{a_3+1} - \lambda_2 \|s_1\|^{b_3+1} + \\ &s_1^T (-\lambda_0 \text{sgn}(s_1) - \hat{L}_0 \text{sgn}(s_1) + \dot{d}) - \tilde{L}\dot{\tilde{L}} \leq \\ &- \lambda_1 \|s_1\|^{a_3+1} - \lambda_2 \|s_1\|^{b_3+1} - \\ &\|s_1\|(\lambda_0 + \hat{L} - L) - \tilde{L}\dot{\tilde{L}}. \end{aligned} \quad (29)$$

将自适应律(27)、不等式放缩结果(25)和(26)共同代入式(29),并根据引理2,得到如下不等式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_d &\leq \\ &- \lambda_1 \|s_1\|^{a_3+1} - \lambda_2 \|s_1\|^{b_3+1} + \\ &\frac{1}{1+p}(2L^{p+1} - \tilde{L}^{p+1}) + \frac{1}{1+q}(2L^{q+1} - \tilde{L}^{q+1}) \leq \\ &- \lambda_1 \|s_1\|^{2\frac{a_3+1}{2}} - \lambda_2 \|s_1\|^{2\frac{b_3+1}{2}} - \frac{1}{1+p}\tilde{L}^{2\frac{p+1}{2}} - \\ &\frac{1}{1+q}\tilde{L}^{2\frac{q+1}{2}} + \frac{1}{1+p}2L^{p+1} + \frac{1}{1+q}2L^{q+1} \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &- \min \left\{ \lambda_1 2^{\frac{p+1}{2}}, \frac{1}{1+p}(2\gamma)^{\frac{p+1}{2}} \right\} \times \\ &\left(\frac{1}{2}\|s_1\|^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{L}^2 \right)^{\frac{p+1}{2}} + \vartheta - \\ &\min \left\{ \lambda_2 2^{\frac{q+1}{2}}, \frac{1}{1+q}(2\gamma)^{\frac{q+1}{2}} \right\} 2^{\frac{1-q}{2}} \times \\ &\left(\frac{1}{2}\|s_1\|^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{L}^2 \right)^{\frac{q+1}{2}} \leq \\ &- \gamma_1 V_d^{\frac{p+1}{2}} - 2^{\frac{1-q}{2}} \gamma_2 V_d^{\frac{q+1}{2}} + \vartheta, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\vartheta = \frac{1}{1+p}2L^{p+1} + \frac{1}{1+q}2L^{q+1}. \quad (31)$$

根据引理1,选取参数 $0 < p = a_1 = a_2 < 1, q = b_1 = b_2 > 1$,参数

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \min \left(\lambda_1 2^{\frac{p+1}{2}}, \frac{1}{1+p}(2\gamma)^{\frac{p+1}{2}} \right), \\ \gamma_2 &= \min \left(\lambda_2 2^{\frac{q+1}{2}}, \frac{1}{1+q}(2\gamma)^{\frac{q+1}{2}} \right), \end{aligned}$$

则式(30)是实际固定时间收敛的.取 $A_0 = \gamma_1, B_0 = 2^{\frac{1-q}{2}}\gamma_2, \kappa_{01} = (p+1)/2, \kappa_{02} = (q+1)/2$,则固定时间观测器收敛时间满足

$$T_1 \leq \frac{1}{A_0\theta(1 - \kappa_{01})} + \frac{1}{B_0\theta(\kappa_{02} - 1)},$$

其中 $0 < \theta < 1$. 系统状态在固定时间 T_1 有界收敛.

接下来判断 s_1 的收敛性. 选取正定的李雅普诺夫函数 $V_d = \frac{1}{2}s_1^T s_1$, 计算其导数

$$\begin{aligned} \dot{V}_d &= s_1^T (\dot{d} - \lambda_1 |s_1|^{a_3} \text{sgn}(s_1) - \lambda_2 |s_1|^{b_3} \text{sgn}(s_1) - \\ &\lambda_0 \text{sgn}(s_1) - \hat{L} \text{sgn}(s_1)) \leq \\ &- \lambda_1 \|s_1\|^{a_3+1} - \lambda_2 \|s_1\|^{b_3+1} - \lambda_0 \|s_1\| + \\ &\|s_1\|L - \hat{L}\|s_1\| \leq \\ &- \lambda_1 \|s_1\|^{a_3+1} - \lambda_2 \|s_1\|^{b_3+1} - \\ &(\lambda_0 - \tilde{L})\|s_1\| \leq \\ &- \lambda_1 \|s_1\|^{a_3+1} - \lambda_2 \|s_1\|^{b_3+1}. \end{aligned} \quad (32)$$

当选取参数 $\lambda_0 \geq \tilde{L}$ 时,可以保证式(32)是固定时间收敛的.于是可以得出系统的状态在固定时间内到达滑动模态 s_1 ,式(21)中 $s_1 = 0$,即式(21)可以写成

$$\begin{aligned} \dot{s}_{0i} &= - [k_1 |s_{0i}|^{a_1} \text{sgn}(s_{0i}) + K_1 |s_{0i}|^{b_1} \text{sgn}(s_{0i}) + \\ &k_2 |\dot{s}_{0i}|^{a_2} \text{sgn}(\dot{s}_{0i}) + K_2 |\dot{s}_{0i}|^{b_2} \text{sgn}(\dot{s}_{0i})]. \end{aligned} \quad (33)$$

由引理5可知, s_0 在固定时间收敛到零. 由于 $\dot{s}_0 = d - \hat{d}$,表明观测误差在固定时间内收敛到零. 即当 $t \geq T_1$ 时,有 $\tilde{d} = 0$. 因此,AFSIMDO的总收敛时间 T_{dz} 包括滑模到达时间 T_1 和滑模运动时间 T_2 ,数学表达式为 $T_{dz} \leq T_1 + T_2$. 根据式(33)和引理5,可得 T_2 数学表达式. □

注 1 式(30)中 ϑ 的取值是含有设计参数的变

量,即可满足引理1. 根据式(30),可以计算系统的界为

$$-\gamma_1 V_d^{\frac{p+1}{2}} - 2^{\frac{1-n}{2}} \gamma_2 V_d^{\frac{q+1}{2}} + \vartheta = 0.$$

上式很难得到精确的解,最终的界可以大致估计为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V_d(t) \leq \min\{(\vartheta/\gamma_1)^{\frac{2}{p+1}}, (\vartheta/(2^{\frac{1-q}{2}} \gamma_1))^{\frac{2}{q+1}}\}.$$

由此可以推出 V_d 是有界的, V_d 的有界性意味着状态 s_1 和 \tilde{L} 有界,以此类推,系统内所有信号都是有界的. 因此,可以确定一正定的常数 ς , 满足 $\vartheta \leq \varsigma \gamma_1 V_d^{\frac{p+1}{2}}$. 式(30)可以进一步整理为如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_d \leq & -\gamma_1 V_d^{\frac{p+1}{2}} - 2^{\frac{1-q}{2}} \gamma_2 V_d^{\frac{q+1}{2}} + \varsigma \gamma_1 V_d^{\frac{p+1}{2}} \leq \\ & -(1-\varsigma)\gamma_1 V_d^{\frac{p+1}{2}} - 2^{\frac{1-q}{2}} \gamma_2 V_d^{\frac{q+1}{2}}. \end{aligned}$$

由上式可知,通过选取适当控制参数满足 $0 < \varsigma < 1$, 系统便可稳定在原点的任意小邻域内. 因此, ς 的取值是含有设计参数的变量,可以满足有界性条件.

注2 式(21)中的积分项保证了滑模干扰观测器固定时间收敛性能. 此外,符号函数存在于干扰观测器的积分项内,可以有效地减弱滑模算法存在的抖振现象.

注3 假设1中 $\|\dot{d}\| \leq d_m \leq L$, L 未知有界. 如果考虑干扰上界已知,则本文仅需要设计固定时间积分滑模干扰观测器(FISMDO)就可以估计出外界扰动值,同时保证观测器是固定时间稳定的,滑模面 s_1 、 s_0 在固定时间内可达. FISMDO 观测器形式设计如下:

$$\begin{cases} \dot{s}_0 = d - \hat{d}, \\ \ddot{s}_0 = \dot{d} - \dot{\hat{d}}, \\ \dot{s}_1 = \dot{d} - \lambda_1 |s_1|^{a_3} \text{sgn}(s_1) - \lambda_2 |s_1|^{b_3} \text{sgn}(s_1) - L \text{sgn}(s_1), \\ \dot{\hat{d}} = k_1 |s_0|^{a_1} \text{sgn}(s_0) + K_1 |s_0|^{b_1} \text{sgn}(s_0) + k_2 |\dot{s}_0|^{a_2} \text{sgn}(\dot{s}_0) + K_2 |\dot{s}_0|^{b_2} \text{sgn}(\dot{s}_0) + \lambda_1 |s_1|^{a_3} \text{sgn}(s_1) + \lambda_2 |s_1|^{b_3} \text{sgn}(s_1) + L \text{sgn}(s_1), \end{cases} \quad (34)$$

其中参数定义与AFISMDO的设计一致. 重新选取李雅普诺夫函数 $V_d = \frac{1}{2} s_1^T s_1$, 计算 V_d 的导数,有

$$\begin{aligned} \dot{V}_d = & s_1^T (\dot{d} - \lambda_1 |s_1|^{a_3} \text{sgn}(s_1) - \\ & \lambda_2 |s_1|^{b_3} \text{sgn}(s_1) - L \text{sgn}(s_1)) \leq \\ & -\lambda_1 \|s_1\|^{a_3+1} - \lambda_2 \|s_1\|^{b_3+1} + \\ & \|\dot{d}\| \|s_1\| - L \|s_1\| \leq \\ & -\lambda_1 \|s_1\|^{a_3+1} - \lambda_2 \|s_1\|^{b_3+1} \leq \end{aligned}$$

$$-\lambda_1 2^{\frac{a_3+1}{2}} V_d^{\frac{a_3+1}{2}} - \lambda_2 2^{\frac{b_3+1}{2}} V_d^{\frac{b_3+1}{2}}. \quad (35)$$

根据式(35)和引理1,滑模面 s_1 在固定时间内可达,且FISMDO是固定时间收敛的. 此时,根据式(21)和(33),可以推出扰动观测误差 $\tilde{d} = 0$.

2.2 相对阈值事件触发策略下固定时间编队控制器设计

考虑多AUVs系统外界扰动、系统参数不确定性和传输网络资源受限的问题,基于AFISMDO实时观测系统由外界扰动和参数不确定性组成的复合干扰项,基于相对阈值事件触发策略,解决系统控制器传输网络能耗问题,结合非线性滤波器处理反步法多次求导计算造成的微分项过大问题,对每个跟随AUV设计固定时间控制器,使跟随AUV跟踪虚拟AUV轨迹,进而实现AUVs的编队控制. 构造分布式相对阈值事件触发编队控制器的设计过程如下.

step 1: 定义跟随AUV位置误差为

$$z_1(t) = \eta_f(t) - \eta_v(t). \quad (36)$$

结合式(1)和(9),计算 $z_1(t)$ 的导数为

$$\dot{z}_1 = R(\psi_f) v_f(t) - R(\psi_l) v_l(t) - R(\psi_l) S(r_l) \rho. \quad (37)$$

其中: 变换矩阵 $R(\psi)^{-1} = R(\psi)^T$, $\dot{R}(\psi) = R(\psi) S(r_l)$, r_l 为领导者的艏偏角速度,并且有 $S(r_l) = [0 \ -r_l \ 0, r_l \ 0 \ 0, 0 \ 0 \ 0]^T$.

运动学控制器 $\alpha_{vf}(t)$ 设计如下:

$$\begin{aligned} \alpha_{vf}(t) = & R^{-1}(\psi_f) [-\lambda_3 |z_1(t)|^{a_1} \text{sgn}(z_1(t)) - \\ & \lambda_4 |z_1(t)|^{b_1} \text{sgn}(z_1(t)) + \\ & R(\psi_l) v_l(t) + R(\psi_l) S(r_l) \rho], \end{aligned} \quad (38)$$

其中 $\lambda_i (i = 3, 4)$ 为设计参数且取值为正.

为了求得 α_{vf} 的导数,同时避免反步法多次求导运算量过大的问题,引入非线性滤波器, α_{vf} 为滤波器输入量,通过非线性滤波器计算新变量 α_{vf}^d 和 $\dot{\alpha}_{vf}^d$, 其表达式为

$$\begin{cases} \tau_1 \dot{\alpha}_{vf}^d = -|\alpha_{vf}^d - \alpha_{vf}|^{a_1} \text{sgn}(\alpha_{vf}^d - \alpha_{vf}) - \\ \quad |\alpha_{vf}^d - \alpha_{vf}|^{b_1} \text{sgn}(\alpha_{vf}^d - \alpha_{vf}), \\ \alpha_{vf}^d(0) = \alpha_{vf}(0). \end{cases} \quad (39)$$

α_{vf}^d 和 $\dot{\alpha}_{vf}^d$ 是滤波器输出信号,且参数满足 $\tau_1 > 0$.

定义跟随AUV速度误差为

$$z_2(t) = v_f(t) - \alpha_{vf}^d(t). \quad (40)$$

根据式(37)~(40)得

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) \leq & -\lambda_3 |z_1(t)|^{a_1} \text{sgn}(z_1(t)) - \\ & \lambda_4 |z_1(t)|^{b_1} \text{sgn}(z_1(t)) + R(\psi_f) z_2. \end{aligned} \quad (41)$$

选取正定的李雅普诺夫函数 $V_1(t)$ 为

$$V_1(t) = \frac{1}{2} z_1^T(t) z_1(t). \quad (42)$$

对上式求导,根据式(41)得到如下不等式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) \leq & z_1^T(t) [-\lambda_3 |z_1(t)|^{a_1} \text{sgn}(z_1(t)) - \\ & \lambda_4 |z_1(t)|^{b_1} \text{sgn}(z_2(t)) + R(\psi_f) z_2]. \quad (43) \end{aligned}$$

step 2: 计算跟随AUV速度跟踪误差(40)的导数,有

$$\dot{z}_2(t) = \dot{v}_f(t) - \dot{a}_{vf}^d(t). \quad (44)$$

根据式(7),有

$$\begin{aligned} \dot{z}_2(t) = & M_0^{-1} [-C_0(v_f(t))v_f(t) - D_0(v_f(t))v_f(t) + \\ & \tau_f(t)] + d(t) - \dot{a}_{vf}^d(t). \quad (45) \end{aligned}$$

基于相对阈值事件触发策略设计控制器,事件触发控制考虑变化阈值的情况,能使控制系统采样间隔更加灵活. 相对阈值事件触发控制器设计如下:

$$\begin{cases} \tau_f(t) = w(t_k), \forall t \in [t_k, t_{k+1}); \\ t_{k+1} = \inf\{t \in R | |e_{0i}(t)| \geq \Delta |\tau_{fi}(t)| + l_i\}. \end{cases} \quad (46)$$

其中: $\inf\{\cdot\}$ 表示下确界; t_k 表示触发时刻; $0 < \Delta < 1$ 和 $l_i > 0$ ($i = u, v, r$) 为正定可调参数; 定义测量误差 $e_0 = w(t) - \tau_f(t)$, $t \in [t_k, t_{k+1})$; 控制器 $w(t)$ 将在后续设计中给出. 事件触发控制方法定义从触发时刻 t_k 到下一触发时刻 t_{k+1} 之间, $\tau_f(t)$ 均保持 $w(t_k)$ 在 t_k 时刻的控制输入,直到下一触发信号来临才会更新控制输入,相对阈值事件触发策略设计的控制器阈值可变. 当控制信号 $\tau_f(t)$ 幅值维持较大时,较大的阈值可以避免频繁触发;当系统稳定, $\tau_f(t)$ 幅值维持较小时,较小的阈值能够获得更好的控制性能. 为了获得控制器 $\tau_f(t)$,对于任意 $t \in [t_k, t_{k+1})$,触发条件(46)可以等效为

$$\tau_f(t) = \frac{w(t)}{1 + \theta_1(t)\Delta} - \frac{\theta_2(t)l}{1 + \theta_1(t)\Delta}, \quad (47)$$

其中 $\theta_1(t)$ 和 $\theta_2(t)$ 是两个时变参数,且满足 $|\theta_i(t)| \leq 1, i = 1, 2$.

构造如下正定的李雅普诺夫函数 $V_2(t)$:

$$V_2(t) = \frac{1}{2} z_1^T(t) z_1(t) + \frac{1}{2} z_2^T(t) z_2(t). \quad (48)$$

计算 $V_2(t)$ 导数,有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) = & z_1^T(t) \dot{z}_1(t) + z_2^T(t) \dot{z}_2(t) = \\ & z_1^T(t) [-\lambda_3 |z_1(t)|^{a_1} \text{sgn}(z_1(t)) - \\ & \lambda_4 |z_1(t)|^{b_1} \text{sgn}(z_2(t))] + \\ & z_2^T(t) \left[M_0^{-1} \left(-C_0(v_f)v_f - D_0(v_f)v_f + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left. \frac{w(t)}{1 + \theta_1(t)\Delta} - \frac{\theta_2(t)l}{1 + \theta_1(t)\Delta} \right) + \\ & \left. d - \dot{a}_{vf}^d + z_1^T R(\psi_f) \right]. \quad (49) \end{aligned}$$

事件触发控制器设计如下:

$$\begin{aligned} w(t) = & \\ & - (1 + \Delta) \left[\alpha_{2vf} \tanh\left(\frac{z_2^T \alpha_{2vf}}{\mu_2}\right) + \bar{l} \tanh\left(\frac{z_2^T \bar{l}}{\mu_2}\right) \right]. \quad (50) \end{aligned}$$

其中: $\mu_2 > 0, \min \bar{l} > \max(l/(1 - \Delta)), \alpha_{2vf}$ 随后给出. 因为存在 $\rho_1 \in \mathbf{R}$, 并且有 $\mu_2 > 0$, 所以 $-\rho_1 \times \tanh(\rho_1/\mu_2) \leq 0$ 成立. 联合式(50), 有 $z_2^T w(t) \leq 0$. 于是, 不等式处理如下:

$$\frac{z_2^T w}{1 + \theta_1(t)\Delta} \leq \frac{z_2^T w}{1 + \Delta}, \quad \left| \frac{z_2^T \theta_2(t)l}{1 + \theta_1(t)\Delta} \right| \leq \left| \frac{z_2^T l}{1 - \Delta} \right|. \quad (51)$$

应用双曲正切函数性质, 存在 $\rho_1 \in \mathbf{R}$ 和 $\mu > 0$, 满足 $0 \leq |\rho_1| - \rho_1 \tanh(\rho_1/\mu) \leq 0.2785\mu^{[21]}$, 并且根据不等式(51), 有下式成立:

$$\begin{aligned} z_2^T \tau_f = & z_2^T \left(\frac{w(t)}{1 + \theta_1(t)\Delta} - \frac{\theta_2(t)l}{1 + \theta_1(t)\Delta} \right) \leq \\ & z_2^T \left[-\alpha_{2vf} \tanh\left(\frac{z_2^T \alpha_{2vf}}{\mu_2}\right) - \bar{l} \tanh\left(\frac{z_2^T \bar{l}}{\mu_2}\right) \right] + \\ & \left| \frac{z_2^T l}{1 - \Delta} \right| \leq 1.671\mu_2 + z_2^T \alpha_{2vf}. \quad (52) \end{aligned}$$

将式(50)和(52)代入(49), 有

$$\begin{aligned} \alpha_{2vf} = & M_0 [-\lambda_5 |z_2(t)|^{a_2} \text{sgn}(z_2(t)) - \\ & \lambda_6 |z_2(t)|^{b_2} \text{sgn}(z_2(t)) - \\ & \hat{d} - z_1^T R(\psi_f) + \dot{a}_{vf}^d(t)] + \\ & C_0(v_f(t))v_f(t) + D_0(v_f(t))v_f(t), \quad (53) \end{aligned}$$

其中 λ_i ($i = 5, 6$) 为设计参数且取值为正数. 式(49)化简得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) = & -\lambda_3 \|z_1(t)\|^{a_1+1} - \lambda_4 \|z_1(t)\|^{b_1+1} - \\ & \lambda_5 \|z_2(t)\|^{a_2+1} - \lambda_6 \|z_2(t)\|^{b_2+1} \times \\ & \frac{1}{2} \bar{d}^2 + 1.671\mu_2. \quad (54) \end{aligned}$$

根据定理1, 当 $t \geq T_1$ 时, $s_0 = 0$, 此时 $d = \hat{d}, \bar{d} = 0$. 进一步化简上式, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) = & -\lambda_3 \|z_1(t)\|^{a_1+1} - \lambda_4 \|z_1(t)\|^{b_1+1} - \\ & \lambda_5 \|z_2(t)\|^{a_2+1} - \lambda_6 \|z_2(t)\|^{b_2+1} + \\ & 1.671\mu_2. \quad (55) \end{aligned}$$

2.3 可行性分析

本文主要结果以定理2给出.

定理2 考虑被控对象(1)和(7)组成的AUV系

统,将相对阈值事件触发控制引入AUVs编队控制策略中,结合AFISMDO(19)~(22),设计出基于相对阈值事件触发的控制器(50)、运动学控制器(38)和虚拟控制器(53),则多AUVs编队系统满足实际固定时间稳定,收敛时间存在最大上界 T_z ,其表达式后续给出.同时对于任意的 $t > 0$,通过理论证明,可以排除芝诺行为发生.

证明 式(55)进一步化简得到如下表达式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) = & -\lambda_3 2^{\frac{a_1+1}{2}} \left(\frac{1}{2} z_1^T z_1(t)\right)^{\frac{a_1+1}{2}} - \\ & \lambda_4 2^{\frac{b_1+1}{2}} \left(\frac{1}{2} z_1^T z_1(t)\right)^{\frac{b_1+1}{2}} - \\ & \lambda_5 2^{\frac{a_2+1}{2}} \left(\frac{1}{2} z_2^T z_2(t)\right)^{\frac{a_2+1}{2}} - \\ & \lambda_6 2^{\frac{b_2+1}{2}} \left(\frac{1}{2} z_2^T z_2(t)\right)^{\frac{b_2+1}{2}} + 1.671\mu_2. \end{aligned} \quad (56)$$

根据引理2整理如下:

$$\dot{V}_2(t) \leq -\gamma_3 V_2^{\frac{m_0+1}{2}} - 2^{\frac{1-n_0}{2}} \gamma_4 V_2^{\frac{n_0+1}{2}} + \vartheta. \quad (57)$$

根据引理1,控制器参数满足如下关系:

$$\begin{aligned} 0 < m_0 = a_1 = a_2 < 1, \\ n_0 = b_1 = b_2 > 1, \vartheta = 1.671\mu_2, \\ \gamma_3 = \min\left(\lambda_3 2^{\frac{a_1+1}{2}}, \lambda_5 2^{\frac{a_2+1}{2}}\right), \\ \gamma_4 = \min\left(\lambda_4 2^{\frac{b_1+1}{2}}, \lambda_6 2^{\frac{b_2+1}{2}}\right). \end{aligned}$$

由引理1可知,系统(57)是实际固定时间稳定的.

进一步对式(57)进行整理,有

$$\dot{V}(t) \leq -AV^{\kappa_1}(t) - BV^{\kappa_2}(t) + \vartheta. \quad (58)$$

其中: $A = \gamma_3, B = 2^{\frac{1-n_0}{2}} \gamma_4, \kappa_1 = (m_0 + 1)/2, \kappa_2 = (n_0 + 1)/2$.

根据引理1,此时多AUV编队系统收敛时间 T_c 表达式如下:

$$T_c \leq T_{\max} := \frac{1}{A\theta(1 - \kappa_1)} + \frac{1}{B\theta(\kappa_2 - 1)}. \quad (59)$$

综上所述,基于AFSIMDO和相对阈值事件触发机制的分布式编队控制算法总收敛时间满足 $T_z \leq T_{dz} + T_c$.事件触发通讯策略若存在Zeno行为,则会使其控制器被无限次触发而导致系统无法正常运行,从而使得控制策略间接失效,造成系统陷入瘫痪的局面,因此,成功设计相对阈值事件触发控制器的关键问题是排除Zeno现象的发生.通过证明任意两次触发的时间间隔 $\{t_{k+1} - t_k, k \in \mathbf{N}\}$ 存在正的最小下界,即可说明触发控制器设计中无Zeno现象发生.由 $e_0(t) = w(t) - \tau_f(t), t \in [t_k, t_{k+1})$,并且根据式(46)和引理2得到如下不等式:

$$\frac{d}{dt} \|e_0(t)\| \leq \frac{d}{dt} (e_0^T(t) \times e_0(t))^{\frac{1}{2}} \leq \|\dot{w}\|, \quad (60)$$

其中: \dot{w} 是 w 的导数,因为系统中所有信号都是有界的,所以必然存在一个正常数 ϖ ,使得 $\|\dot{w}\| \leq \varpi$.由初始条件 $e_0(t_k) = 0, \lim_{t \rightarrow t_{k+1}} |e_{0i}(t)| > l_i$ 知,触发时间间隔一定大于 l_i/ϖ ,因此可以避免Zeno行为的发生. □

3 数值仿真研究

为了验证所设计控制器的有效性,仿真实验选取3个AUV进行验证.其中:AUV₀为虚拟领航者,AUV₁和AUV₂为2个跟随者.

3.1 仿真实验设定

仿真实验选取所有AUV具有相同的物理模型结构,AUV物理模型参数见表1.

表1 AUVs的模型参数

变量名称	取值	变量名称	取值
m/kg	185	$X_{\dot{u}}/\text{kg}$	-30
$Y_{v v }/(\text{kg}/\text{m})$	-200	$Y_{\dot{v}}/\text{kg}$	-80
$Y_v/(\text{kg}/\text{s})$	-100	$N_{\dot{r}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	-30
$N_r/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	-50	$X_{u u }/(\text{kg}/\text{m})$	-100
$N_{r r }/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	-100	$X_u/(\text{kg}/\text{s})$	-70

观测器参数给定如下: $k_1 = k_2 = K_1 = K_2 = 2, \lambda_1 = \lambda_2 = 0.5, \gamma = 1, \lambda_0 = 0.1, p = 0.7, q = 1.1$.控制器参数设计如下: $\Delta = 0.05, \lambda_3 = \lambda_4 = 0.5, \lambda_5 = \lambda_6 = 5, l_i = 0.1, \bar{l}_i = 0.5, m_0 = p, n_0 = q$.非线性滤波器参数 $\tau_1 = 30$.给定领航AUV的轨迹: $u_l = 1 \text{ m/s}, v_l = 0.5 \text{ m/s}, r_l = 0.1 \text{ m/s}$.表2中的AUV₀给出了领航者的初始状态.系统模型参数不确定性考虑为标称值的20%.假设海流扰动由下式模拟给出:

$$\begin{cases} \tau_{iww} = 1.5 + 2 \sin(0.02t) + 1.5 \sin(0.1t) \text{ (N)}, \\ \tau_{iuv} = 1 + 2 \sin(0.02t - \pi/6) + 1.5 \sin(0.3t) \text{ (N)}, \\ \tau_{iwr} = -2 + 2 \sin(0.05t) + 2 \sin(0.1t) \text{ (N} \cdot \text{m)}. \end{cases}$$

表2 AUVs的任意初始状态

状态	AUV ₀	AUV ₁	AUV ₂
$\eta(0)$	$[0, 0, 0]^T$	$[-1, -4, 2]^T$	$[-2, -6, 4]^T$
$v(0)$	$[0, 0, 0]^T$	$[0.01, 0, 0]^T$	$[0.01, 1, 1]^T$

3.2 仿真结果

为了验证算法收敛速度与系统初始状态无关,给定跟随AUV₁和AUV₂不同的初始值,取值见表2.

仿真1 依据本文提出的控制策略对跟随AUV₁和AUV₂在不同初始状态下(详见表2)进行仿真实验,仿真结果见图1~图7.图1给出了跟随AUV位置跟踪误差 $z_1(t)$,可见 $z_1(t)$ 很好地收敛到原点附近.图2描绘了速度误差 $z_2(t), z_2(t)$ 收敛误差很小.图3为跟随AUV₁和AUV₂的运动学控制器 $\alpha_{vfi} (i = u, v, r)$;图4为跟随者AUV控制器 τ_f ,图中用 $\tau_i (i =$

u, v, r) 表示. 从图3和图4可以看出, AUV₁ 和 AUV₂ 在不同初始状态下收敛到平衡点的时间趋于一致. 图5为AFSIMDO的仿真结果, 显然, 干扰观测器快速收敛到实际值曲线上, 可以准确地估计出集总扰动, 从而能够实时补偿外部扰动对AUVs系统的影响; 此外, 对于跟随者 AUV₁ 和 AUV₂ 选取了不同的初始

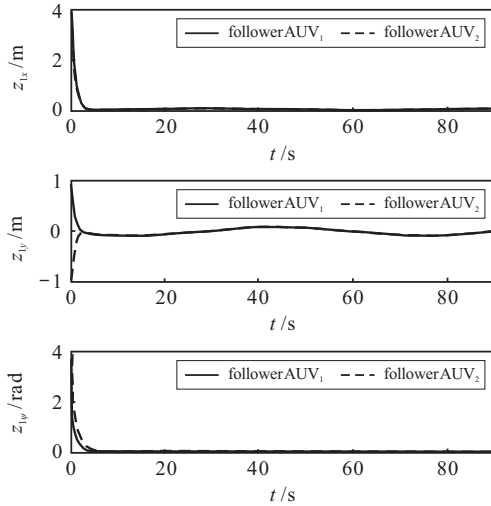


图1 位置跟踪误差 z_1

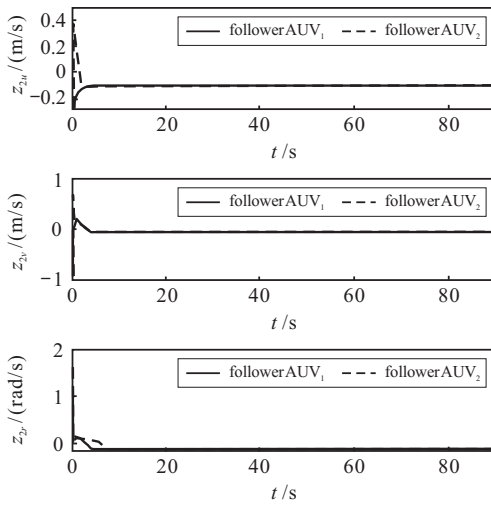


图2 速度跟踪误差 z_2

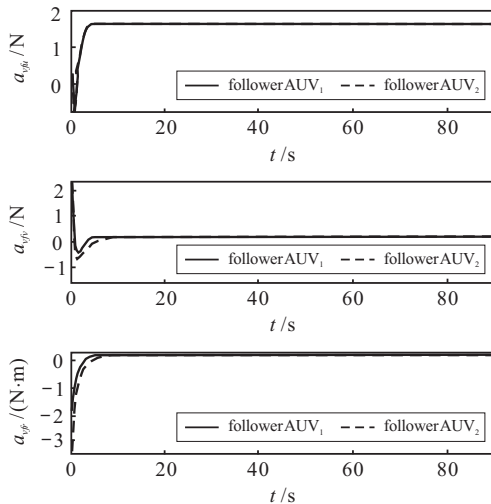


图3 虚拟控制律 a_{vf}

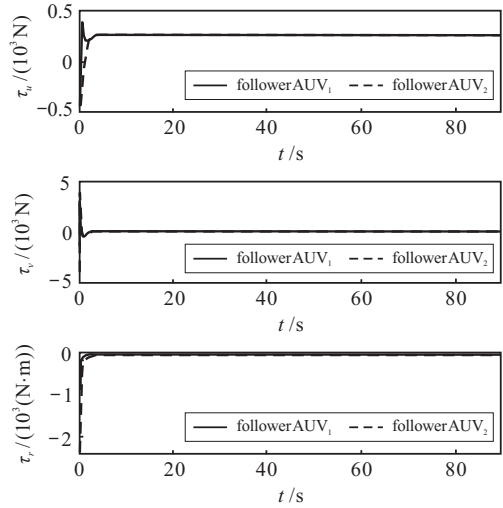


图4 控制输入 τ_f

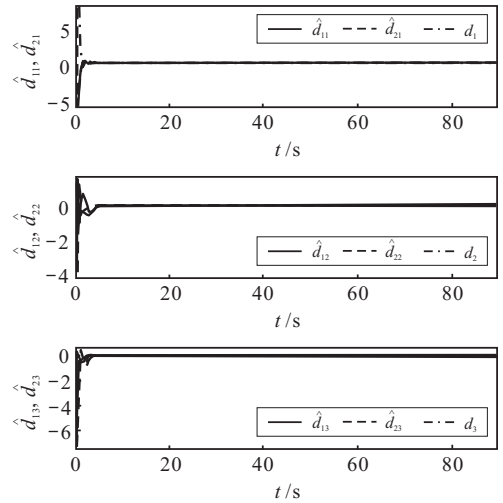


图5 集总扰动估计

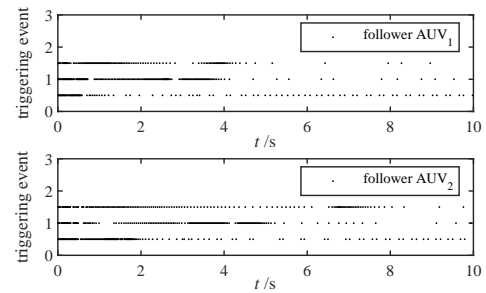


图6 事件触发时刻仿真图

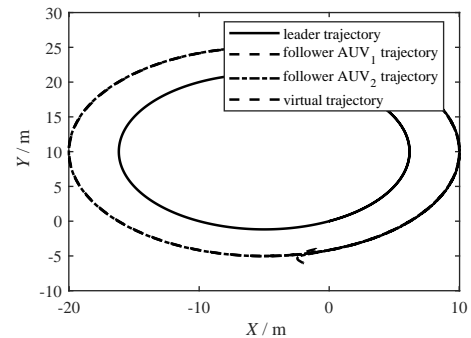


图7 领航AUV轨迹、虚拟轨迹及跟随AUV_{1,2} 轨迹

状态,其收敛速度趋于一致,表明所设计的AFSIMDO是固定时间收敛的.图6为AUVs相对阈值事件触发控制器的触发时刻示意图,可以看出,每个跟随AUV的控制分量触发点的密集程度均不同,表明触发次数并不一样,随着系统收敛稳定后,触发点逐渐稀疏,触发次数逐渐减小.图7给出了AUVs平面轨迹,跟随AUV₁和AUV₂可以很好地跟踪上虚拟领航AUV的轨迹,达到编队控制要求,且跟随AUVs的起始点与表2数据初始状态重合,进一步表明所设计的控制器是固定时间收敛的,即不同的初始状态,系统收敛的时刻保持一致.

综上,从仿真结果图1~图7可以看出,系统初始状态与期望状态差别较大的情况下,本文算法的收敛时间并不受其影响而改变,从而表明了基于相对阈值事件触发固定时间编队控制算法的有效性.

仿真2 为了更好地说明基于事件触发机制的控制器的工作原理,从而说明控制器具有在网络传输过程中减少能耗的性能,针对跟随AUV₁的实际控制输入的仿真结果给出解释说明.图8分别给出连续时间控制方式和基于相对阈值事件触发策略的结果.由图8可见,相比于时间控制方式的连续控制器 $\tau_f(t)$ (用 $\tau_i(i = u, v, r)$ 表示),事件触发的控制器 $w(t_k)$ (用 $\tau_i(i = utk, vtk, rtk)$ 表示),其事件触发控制曲线出现分段情况,每一段的起止时刻为跟随AUV₁的触发时刻, $w(t_k)$ 在触发时刻更新,在非触发时刻之间保持上一触发时刻值不变,此时控制器不动作,从而不产生信息传输能耗.

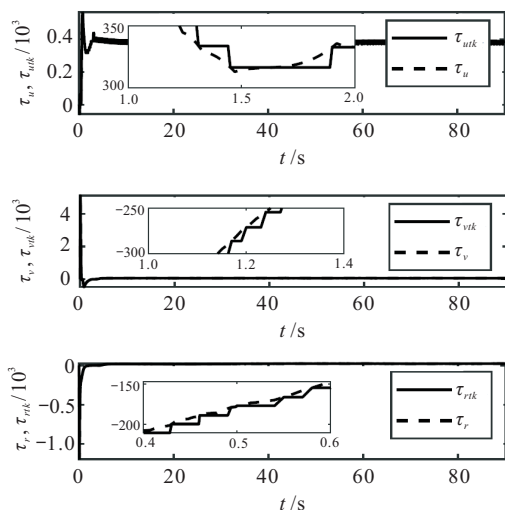


图8 跟随AUV₁的控制输入 τ_f

此外,从触发次数情况来说明引入事件触发机制可节约通信资源.系统采样周期设定为0.01 s,将跟随AUV₁和AUV₂的触发次数统计结果在表3中给出.以跟随AUV₁的数据为例,在90 s内,采用时间控制方式的控制器触发次数为9 000,而相对阈值事件触发控制器的触发次数分别为382、336、230,远小

于时间控制方式控制器的触发次数,从而节约了网络传输过程中控制器频繁触发更新带来的能源耗费问题;另外,跟随AUV₁三个控制分量触发次数均不相同,说明事件触发控制器是分布式的.仿真结果表明了本文将相对阈值事件触发通讯机制引入多AUVs编队系统中的有效性和合理性,同时,与以往连续通讯机制相比,在有限传输网络带宽条件下,减少了信息通讯次数,从而进一步降低了通信能耗,节省了网络资源.

表3 跟随者AUVs的事件触发次数和触发率(仿真1)

跟随者	时间触发次数	事件触发次数
AUV ₁	9 000	382, 336, 230
AUV ₂	9 000	398, 306, 252

仿真3 为了验证干扰观测器的有效性,不考虑系统参数不确定性对系统的影响,仅考虑外界海洋干扰的观测器的仿真结果见图9.观测器参数为 $k_1 = K_1 = 2, k_2 = K_2 = 4, \lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$. $\hat{d}_{1i}(i = 1, 2, 3)$ 和 $\hat{d}_{2i}(i = 1, 2, 3)$ 分别代表不同初值状态下,AUV₁和AUV₂的干扰估计值.从仿真结果来看,本文所设计的干扰观测器收敛速度快,观测误差较小,且收敛时间不受系统初始值影响,观测器可以很好地逼近外界扰动.

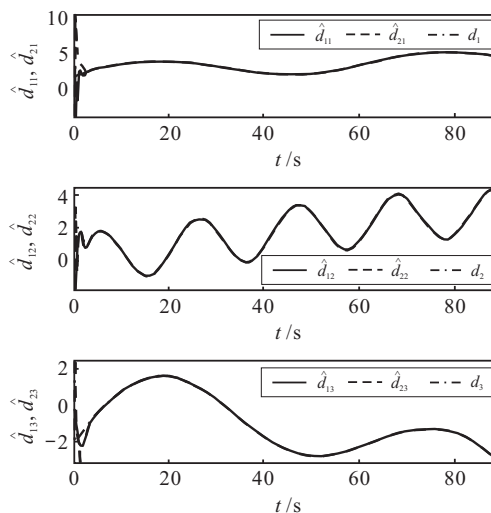


图9 跟随AUV₁和AUV₂干扰逼近

4 结论

本文以多AUVs系统为研究对象,针对多AUVs系统协同编队过程中存在的外界未知干扰和传输网络能源耗费问题,结合固定时间方法,提出了一种抗干扰的相对阈值事件触发编队控制策略.经过理论证明和仿真研究,可以得到如下结论:

- 1) 所提出的自适应固定时间积分滑模干扰观测器用来逼近系统集总扰动,增强了系统的鲁棒性,保证系统观测误差是实际固定时间收敛的.

2) 所设计的基于干扰观测器固定时间理论的多AUVs编队控制策略可以保证闭环系统实际固定时间稳定,所提出的方法收敛时间不受系统初值影响,克服了实际工程中不易精确获得系统初态的难题。

3) 引入相对阈值事件触发机制,节约了系统能耗,减少了控制器频繁触发引起的网络传输过程中的能源浪费。

参考文献(References)

- [1] He S M, Kou L W, Li Y J, et al. Robust orientation-sensitive trajectory tracking of underactuated autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(9): 8464-8473.
- [2] Braginsky B, Baruch A, Guterman H. Development of an autonomous surface vehicle capable of tracking autonomous underwater vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106868.
- [3] Yang T T, Yu S H, Yan Y. Formation control of multiple underwater vehicles subject to communication faults and uncertainties[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 82: 109-116.
- [4] 李娟, 袁锐锟, 张宏瀚. 基于领航跟随法的多AUV编队控制算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(6): 237-246.
(Li J, Yuan R K, Zhang H H. Research on multiple AUVs formation control algorithm based on leader-follower method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(6): 237-246.)
- [5] 高振宇, 郭戈. 基于扰动观测器的AUVs固定时间编队控制[J]. *自动化学报*, 2019, 45(6): 1094-1102.
(Gao Z Y, Guo G. Fixed-time formation control of AUVs based on a disturbance observer[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(6): 1094-1102.)
- [6] Skjetne R, Fossen T I, Kokotovi P V. Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory[J]. *Automatica*, 2005, 41(2): 289-298.
- [7] Peng Z, Hu X, Wang D. Robust adaptive formation control of underactuated autonomous surface vehicles with uncertain dynamics[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2011, 5(12): 1378-1387.
- [8] Huang C F, Zhang X K, Zhang G Q. Improved decentralized finite-time formation control of underactuated USVs via a novel disturbance observer[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 174: 117-124.
- [9] Li J, Du J L, Chang W J. Robust time-varying formation control for underactuated autonomous underwater vehicles with disturbances under input saturation[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 179: 180-188.
- [10] Li T S, Zhao R, Chen C L P, et al. Finite-time formation control of under-actuated ships using nonlinear sliding mode control[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(11): 3243-3253.
- [11] Wang N, Sun Z, Yin J C, et al. Finite-time observer based guidance and control of underactuated surface vehicles with unknown sideslip angles and disturbances[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 14059-14070.
- [12] Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(8): 2106-2110.
- [13] Zuo Z Y. Nonsingular fixed-time consensus tracking for second-order multi-agent networks[J]. *Automatica*, 2015, 54: 305-309.
- [14] Jin X. Adaptive fixed-time control for MIMO nonlinear systems with asymmetric output constraints using universal barrier functions[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(7): 3046-3053.
- [15] Lv M, Wang D, Peng Z H, et al. Event-triggered neural network control of autonomous surface vehicles over wireless network[J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 63(5): 1-14.
- [16] Wang A Q, Liu L, Qiu J B, et al. Event-triggered robust adaptive fuzzy control for a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, 27(8): 1648-1658.
- [17] Xing L T, Wen C Y, Liu Z T, et al. Event-triggered adaptive control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(4): 2071-2076.
- [18] Deng Y J, Zhang X K, Im N, et al. Event-triggered robust fuzzy path following control for underactuated ships with input saturation[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 186: 106122.
- [19] Yang H J, Ye D. Adaptive fixed-time bipartite tracking consensus control for unknown nonlinear multi-agent systems: An information classification mechanism[J]. *Information Sciences*, 2018, 459: 238-254.
- [20] Basin M, Shtessel Y, Aldukali F. Continuous finite- and fixed-time high-order regulators[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2016, 353(18): 5001-5012.
- [21] Liu Y L, Ma H J. Adaptive fuzzy tracking control of nonlinear switched stochastic systems with prescribed performance and unknown control directions[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(2): 590-599.

作者简介

苏博(1987—),女,博士生,从事水下机器人非线性控制的研究, E-mail: bosu@stumail.yzu.edu.cn;

王洪斌(1966—),男,教授,博士生导师,从事过程自动化、机器人控制技术、变结构控制系统、鲁棒控制和视觉伺服等研究, E-mail: hb_wang@yzu.edu.cn;

王跃灵(1978—),男,讲师,博士,从事智能控制、自适应控制等研究, E-mail: yuelingw@yzu.edu.cn;

高静(1995—),女,硕士生,从事自主水下航行器编队控制的研究, E-mail: jing1883049@163.com.

(责任编辑:李君玲)