

不对称欠驱动水面机器人事件触发全局渐近镇定控制

王锐^{1,2†}, 司昌龙¹, 马慧¹, 郝程鹏¹

(1. 中国科学院声学研究所 中科院水下航行器信息技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文研究了不对称欠驱动水面机器人事件触发全局渐近镇定控制问题. 首先, 引入坐标变换将系统全局渐近镇定控制问题转化为变换后模型欠驱动子系统的全局渐近镇定控制问题, 利用周期时间函数构造时变辅助变量提出了一种时变连续的镇定控制律, 并结合切换门限事件触发机制设计实际的事件触发推力与力矩控制输入使闭环系统全局渐近稳定. 所提出的方法仅在系统满足触发条件时对控制器进行更新, 能够节约系统资源以及减少执行器操纵次数, 同时不会降低原有的控制品质. 最后, 通过仿真验证了所提出方法的有效性.

关键词: 事件触发控制; 欠驱动水面机器人; 全局渐近镇定控制; 时变反馈; 坐标变换

引用格式: 王锐, 司昌龙, 马慧, 等. 不对称欠驱动水面机器人事件触发全局渐近镇定控制. 控制理论与应用, 2021, 38(6): 748 – 756

DOI: 10.7641/CTA.2020.00487

Event-triggered global asymptotic stabilization of asymmetrical under-actuated surface vessels

WANG Rui^{1,2†}, SI Chang-long¹, MA Hui¹, HAO Cheng-peng¹

(1. Key Laboratory of Information Technology for Autonomous Underwater Vehicles,

Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The event-triggered global asymptotic stabilization problem of asymmetrical under-actuated surface vessels is addressed in this paper. First, the problem is converted to globally asymptotically stabilizing an under-actuated subsystem of the transformed model by introducing two coordinate transformations. A periodic time function is then applied to construct two auxiliary variables to derive a time-varying continuous stabilization control law. By combining with a switching threshold event-triggering mechanism, the actual event-triggered force and moment control inputs are designed to make the closed-loop system globally asymptotically stable. The proposed method updates the controller only when the triggering conditions are satisfied, thus the system resources are saved and the times for actuator changes are reduced without degrading the performance of the controller. Simulation results illustrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: event-triggered control; under-actuated surface vessels; global asymptotic stabilization; time-varying feedback; coordinate transformations

Citation: WANG Rui, SI Changlong, MA Hui, et al. Event-triggered global asymptotic stabilization of asymmetrical under-actuated surface vessels. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(6): 748 – 756

1 引言

欠驱动水面机器人(under-actuated surface vessels, USVs)已在军事领域与民用领域得到了广泛的应用, 可以完成海上巡逻、自主航行、打捞、搜救等任务. 由于不存在侧向控制力, 使USV成为具有二阶非完整约束的欠驱动系统, 导致USV的控制问题具有一定的挑战性并得到了广泛关注^[1-2]. 根据不同任务需求, USV

的控制目标主要可以分为: 镇定控制^[2-12]、轨迹跟踪^[13-14]、路径跟踪^[15-17].

其中, 镇定控制可以使USV完成动力定位以及自主停靠等任务, 控制目标为设计控制器使USV所有状态均收敛至给定的参考点. 其难点在于USV系统原点不满足Brockett条件^[18], 即时不变光滑的状态反馈控制律无法使系统渐近稳定. 因此需要设计光滑时

收稿日期: 2020-07-29; 录用日期: 2020-12-30.

†通信作者. E-mail: ruiwang@mail.ioa.ac.cn; Tel.: +86 10-82547718.

本文责任编辑: 方勇纯.

国家自然科学基金项目(61971412), 中国科学院国防科技重点实验室基金项目(E029150101)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61971412) and the Foundation of Key Laboratory of National Defense Science and Technology of Chinese Academy of Sciences (E029150101).

变^[2-6]或不连续^[7-12]的控制律. 文献[3]首次利用坐标变换以及级联系统理论将USV的镇定控制问题简化为4阶子系统的镇定控制问题, 并引入关于时间 t 的三角函数设计光滑时变控制律使USV原点渐近收敛. 在文献[3]的基础上, 国内外学者们进行了一系列的改进^[4-11]. 文献[4]提出了若干光滑时变控制律, 首次实现了USV原点的指数收敛. 文献[5]利用频率实化的变周期函数代替周期三角函数设计了光滑时变控制律, 提高了系统的收敛速率; 文献[7]利用反步法设计了非光滑的控制律, 并利用切换控制律避免系统奇异现象; 文献[8]提出的切换控制律首次实现了系统原点的 κ 指数收敛. 为了增加系统的鲁棒性, 文献[9-10]提出了简单的比例微分(PD)控制器, 由于牺牲了终端姿态角的自由度来增加系统鲁棒性, 无法实现最终航向角的镇定, 仅实现了USV的位置镇定, 并利用中心流形定理以及LaSalle定理证明了位置坐标的渐近稳定性. 以上文献中均假设USV是上下对称的, 并不符合实际应用^[14], 需考虑USV不对称的情况. 文献[6, 11]利用坐标变换证明了不对称USV的镇定控制也可以等价于类似文献[3]中子系统的镇定控制问题, 并设计切换控制律使不对称USV原点渐近稳定^[11], 以及设计光滑时变控制律实现不对称USV原点的 κ 指数收敛^[6].

上述方法均是基于连续时间系统进行USV镇定控制器设计, 系统内部的采样时间是固定的, 即当系统到达下一个采样周期时, 完成对控制信号的更新. 若采样频率过高, 不仅过度占用系统的资源, 而且执行器执行次数过多, 会减少执行机构使用寿命^[15, 19], 而对控制品质提高的程度有限; 若采样频率过低, 虽然节约了系统资源, 但是控制品质随之变差. 为了解决上述问题, 文献[13, 15-17]利用事件触发机制(event-triggering mechanism, ETM)预设触发条件, 设计USV事件触发控制器(event-triggered controller, ETC)实现了USV的轨迹跟踪^[13]以及路径跟踪^[15-17]. ETC的优点在于, 系统仅在满足触发条件的时刻更新控制量, 可以节约系统资源以及减少执行器操纵次数, 同时维持原有的控制品质.

通过以上分析可知, 关于USV的ETC研究成果很少, 且多集中于轨迹跟踪以及路径跟踪问题. 文献[2, 20]指出, 由于需要同时约束USV的位置以及航向, USV的镇定控制比轨迹跟踪和路径跟踪更难实现, 因此用于轨迹跟踪以及路径跟踪的ETC对于不对称USV的镇定控制并不适用. 迄今仅文献[12]利用T-S模糊规则描述对称USV的数学模型, 结合ETM提出了ETC以实现对称USV的渐近镇定控制. 然而在利用模糊规则建模时限制了USV的状态变化范围, 导致结果并非全局的.

综上所述, 至今仍没有关于对称/不对称USV的ETC以保证系统原点全局渐近稳定. 为了解决这一问题, 结合实际的工程应用, 本文提出了一种ETC设计方法, 以实现不对称USV的全局渐近镇定控制. 受以上文献启发, 本文采用坐标变换以及级联系统理论将不对称USV的全局渐近镇定控制问题等价于欠驱动子系统的全局渐近镇定控制问题, 通过引入时变函数构造辅助变量以设计控制推力以及理想航向角速度, 进而设计控制力矩使不对称USV跟踪理想角速度, 并结合基于切换策略的ETM得到关于控制推力以及控制力矩的ETC输入, 使不对称USV闭环系统原点全局渐近稳定 (globally asymptotically stable, GAS), 最后通过仿真验证所设计ETC的有效性.

2 模型变换

不对称USV的运动学动力学模型为^[1, 13]

$$\dot{\eta} = \mathbf{J}(\psi)\mathbf{v}, \quad \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}, \quad (1)$$

其中: $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \psi]^T$, (x, y) 为USV在大地坐标系下的位置坐标, ψ 为航向角; $\mathbf{v} = [u \ v \ r]^T$, u, v, r 为USV在本体坐标系下的纵向速度, 横向速度与航向角速度; $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ 0 \ \tau_2]^T$, τ_1, τ_2 为控制推力与控制力矩;

$$\mathbf{J}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ -c_{13} & -c_{23} & 0 \end{bmatrix};$$

m_{ij}, d_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$)分别为质量参数以及水动力阻尼参数, 满足: $d_{23} \neq d_{32}$, $m_{23} = m_{32}$, $m_{22}m_{33} \neq m_{23}m_{32}$; 科氏项矩阵参数定义为: $c_{13} = -m_{22}v - m_{23}r$, $c_{23} = m_{11}u$.

构造坐标变换与输入变换^[13]:

$$\begin{cases} \bar{x} = x + \varepsilon(\cos \psi - 1), \\ \bar{y} = y + \varepsilon \sin \psi, \quad \bar{v} = v + \varepsilon r, \end{cases} \quad (2a)$$

$$\begin{cases} \bar{\tau}_u = p_1 \tau_1 + f_1, \\ \bar{\tau}_r = p_2 \tau_2 + f_2, \end{cases} \quad (2b)$$

式(2b)中:

$$f_1 = \frac{m_{22}}{m_{11}}vr + \frac{m_{23}}{m_{11}}r^2 - \frac{d_{11}}{m_{11}}u,$$

$$f_2 = \frac{(m_{11}m_{23} - m_{22}m_{23})ur}{m_{22}m_{33} - m_{23}m_{32}} + \frac{(m_{11}m_{22} - m_{22}^2)uv}{m_{22}m_{33} - m_{23}m_{32}} + \frac{(m_{23}d_{22} - m_{22}d_{32})v}{m_{22}m_{33} - m_{23}m_{32}} + \frac{(m_{32}d_{23} - m_{22}d_{33})r}{m_{22}m_{33} - m_{23}m_{32}}.$$

利用式(2), 可将系统(1)改写为

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = u \cos \psi - \bar{v} \sin \psi, \dot{\bar{y}} = u \sin \psi + \bar{v} \cos \psi, \\ \dot{u} = \bar{\tau}_u, \dot{\bar{v}} = -p_3 u r - p_4 \bar{v} + p_5 r, \dot{\psi} = r, \dot{r} = \bar{\tau}_r, \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= m_{23}/m_{22}, p_1 = 1/m_{11}, \\ p_2 &= m_{22}/(m_{22}m_{33} - m_{23}m_{32}), p_3 = m_{11}/m_{22}, \\ p_4 &= d_{22}/m_{22}, p_5 = (d_{22}m_{23} - d_{23}m_{22})/m_{22}^2. \end{aligned}$$

对式(3)再次利用坐标变换与输入变换^[3]:

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{p_4}{p_3}(z_1 + z_4) + \left(\frac{z_5}{p_4} - z_2 - \frac{p_5}{p_4}z_3\right)z_6 - \frac{p_3}{p_4}\bar{\tau}_u, \\ \omega_2 = \bar{\tau}_r, \end{cases} \quad (4a)$$

$$\begin{cases} z_1 = \bar{x} \cos \psi + \bar{y} \sin \psi, \\ z_2 = -\bar{x} \sin \psi + \bar{y} \cos \psi + \frac{1}{p_4}\bar{v} - \frac{p_5}{p_4}\psi, \\ z_3 = \psi, z_4 = -\frac{p_3}{p_4}u - z_1, \\ z_5 = \bar{v}, z_6 = r, \end{cases} \quad (4b)$$

则不对称USV系统模型可变换为如下方程:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -\frac{p_4}{p_3}z_1 + z_2z_6 + \frac{p_5}{p_4}z_3z_6 - \frac{p_4}{p_3}z_4 - \frac{z_5z_6}{p_4}, \\ \dot{z}_5 = -p_4z_5 + p_4z_4z_6 + p_4z_6z_1 + p_5z_6, \end{cases} \quad (5a)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_2 = z_4z_6, \dot{z}_3 = z_6, \\ \dot{z}_4 = \omega_1 = \bar{p}_1\tau_1 + \bar{f}_1, \\ \dot{z}_6 = \omega_2 = p_2\tau_2 + f_2, \end{cases} \quad (5b)$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{f}_1 &= -\frac{p_3}{p_4}f_1 + \frac{p_4}{p_3}(z_1 + z_4) - z_2z_6 + \frac{z_5z_6}{p_4} - \frac{p_5}{p_4}z_3z_6, \\ \bar{p}_1 &= -\frac{1}{d_{22}} < 0. \end{aligned}$$

对于系统(5), 利用文献[10]中的如下结论:

引理 1 状态变换(4)是全局微分同胚的, 系统(1)的镇定问题可以转化为系统(5)的镇定问题.

引理 2 如果存在控制律使子系统(5b)的状态全局有界且GAS, 则该控制律能使系统(5)的状态全局有界且GAS.

利用以上两个引理, 可将不对称USV全局渐近镇定控制任务转化为: 设计关于控制推力 τ_1 以及控制力矩 τ_2 的ETC, 使子系统(5b)的原点GAS.

3 主要结论

为了便于设计与分析, 给出如下定义与引理:

定义 1 $h_t(t)$ 为关于时间 t 的光滑周期函数, 记作 h_t , 满足 $|h_t|, |\dot{h}_t| \in L_\infty$, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{h}_t \neq 0$.

定义 2 $\rho_t(t)$ 为关于时间 t 的光滑函数, 记作 ρ_t , 满足: $\rho_t > 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \rho_t = 0$; 且存在一个常数 $\bar{\rho} > 0$, 使 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \rho_t(\chi) d\chi = \bar{\rho}$.

定义 3 对于所有的变量 $\xi_i \in \mathbb{R}$, $\Phi(\xi_i)$ 为关于 ξ_i 的 κ 类函数.

引理 3^[21] 对于所有的常数 $\rho > 0$ 以及变量 $z \in \mathbb{R}$, 不等式 $0 \leq |z| - \frac{z^2}{\sqrt{z^2 + \rho^2}} < \rho$ 恒成立.

3.1 ETC设计

定义采样误差 $\Delta_i = \varpi_i(t) - \tau_i(t)$, 其中 $\varpi_i(t)$ 为ETC控制信号. 受文献[22]的启发, 设计事件触发条件为

$$t_{i,k+1} = \begin{cases} \inf\{t \in \mathbb{R} \mid |\Delta_i| \geq C_i, |\tau_i(t)| \geq \Gamma_i\}, \\ \inf\{t \in \mathbb{R} \mid |\Delta_i| \geq \delta_i |\tau_i(t)| + D_i, \\ |\tau_i(t)| < \Gamma_i\}, \end{cases} \quad (6)$$

其中: $k \in \mathbb{Z}$ 表示记录控制器触发时刻的下标, $t_{i,0} = 0$ 为初始时刻; ETM设计参数满足: $C_i, D_i, \Gamma_i > 0; 0 < \delta_i < 1$.

观察式(5b)可知, 系统为欠驱动系统, 为了设计时变控制律以满足Brockett条件解决欠驱动问题, 利用时间周期函数 h_t 构造第1个辅助变量 $\xi_1 = z_4 + \Phi(z_2)h_t$. 首先利用 ξ_1 设计控制力 τ_1 与理想角速度 z_{6d} 渐近镇定系统(5b)的前3个方程, 再设计 τ_2 使 z_6 渐近跟踪 z_{6d} , 保证闭环系统GAS. 控制系统框图及ETC结构图如图1-2所示.

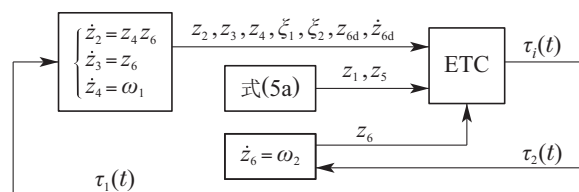


图1 控制系统框图

Fig. 1 Diagram of the control system

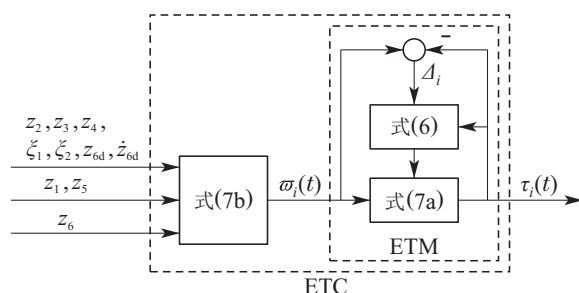


图2 ETC结构图

Fig. 2 Structure of the ETC

根据上述思路,ETC设计为

$$\tau_i(t) = \varpi_i(t_{i,k}), \forall t \in [t_{i,k}, t_{i,k+1}), i = 1, 2, \quad (7a)$$

$$\begin{cases} \varpi_1(t) = \frac{-(1+\delta_1)\alpha_1^2\xi_1}{\bar{p}_1\sqrt{(\alpha_1\xi_1)^2 + \rho_t^2}} + \frac{(1+\delta_1)\bar{D}_1^2\xi_1}{\sqrt{(\bar{D}_1\xi_1)^2 + \rho_t^2}} - \frac{l_1^\varpi}{\bar{p}_1}\xi_1, \\ \varpi_2(t) = \frac{-(1+\delta_2)\alpha_2^2\tilde{r}}{p_2\sqrt{(\alpha_2\tilde{r})^2 + \rho_t^2}} - \frac{(1+\delta_2)\bar{D}_2^2\tilde{r}}{\sqrt{(\bar{D}_2\tilde{r})^2 + \rho_t^2}} - \frac{l_2^\varpi}{p_2}\tilde{r}, \end{cases} \quad (7b)$$

其中:

$$\begin{cases} \alpha_1 = -k_1\xi_1 - \bar{f}_1 - \Phi(z_2)\dot{h}_t, \\ \alpha_2 = -k_3\tilde{r} - \frac{1}{\gamma_4}\xi_2 - f_2 + \dot{z}_{6d}, \end{cases} \quad (8)$$

角速度误差定义为 $\tilde{r} = z_6 - z_{6d}$; 第2个辅助变量为 $\xi_2 = \gamma_1\xi_1 \frac{d\Phi(z_2)}{dz_2} z_4 h_t + \gamma_2 z_2 z_4 + \gamma_3 z_3$, 设计参数满足 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4 > 0$; 函数 ρ_t 与 $\Phi(\cdot)$ 见定义2-3; ETC控制增益满足: $k_1, k_2, k_3, l_1^\varpi, l_2^\varpi > 0, \bar{D}_i > \max\{\frac{D_i}{1-\delta_i}, \frac{C_i}{1+\delta_i}\} (i = 1, 2)$.

利用辅助变量 ξ_2 设计理想航向角速度为

$$z_{6d} = -k_2\Phi(\xi_2). \quad (9)$$

注1 上述过程可以概括为ETC在触发时刻 $t_{i,k}$ 对信号 $\varpi_i(t)$ 进行采样,并在 $t \in [t_{i,k}, t_{i,k+1})$ 内保持为 $\tau_i(t) = \varpi_i(t_{i,k})$,当采样误差 Δ_i 再次满足触发条件(6)时,记录该触发时刻为 $t_{i,k+1}$ 并再次对 $\varpi_i(t)$ 进行采样,ETC控制量更新为 $\varpi_i(t_{i,k+1})$ 并保持至下一触发时刻.

注2 上述方法的优点在于预设切换门限 Γ_i , 当 $|\tau_i(t)| \geq \Gamma_i$ 时,控制幅值较大,此时ETC按固定门限策略 $|\Delta_i| \geq C_i$ 触发,可以避免控制信号产生突变,防止系统震荡;当 $|\tau_i(t)| < \Gamma_i$ 时,控制幅值较小,此时ETC按比例门限策略 $|\Delta_i| \geq \delta_i |\tau_i(t)| + D_i$ 触发,可以实现精确控制,保证系统控制精度.此外, $\forall t \in [t_{i,k}, t_{i,k+1})$,控制量大小恒为 $\varpi_i(t_{i,k})$,从而该时间段内ETC无需与外界通信,而且也减少了执行机构的操纵次数,节约系统资源.

注3 当 ξ_1 与 \tilde{r} 的幅值较大时,式(7b)中 $\varpi_i(t)$ 第1,3项起主要控制作用,可使 $|\xi_1|$ 与 $|\tilde{r}|$ 快速减小;当 $|\xi_1|$ 与 $|\tilde{r}|$ 接近于0时, $\varpi_i(t)$ 第1,2项起主要控制作用,可以补偿采样误差 Δ_i 对系统的影响,提高控制精度.

注4 文献[3]中已证明,利用坐标变换,对称USV的全局渐近镇定控制问题也可以转化为全局渐近镇定子系统(5b),因此本文所提出的ETC设计思路也适用于对称USV的全局渐近镇定控制任务.

3.2 稳定性分析

本文的主要结果由如下两个定理给出:

定理1 对于式(1)所描述的不对称USV系统,采用式(6)-(9)所设计的ETC,控制参数满足: $C_i, D_i, \Gamma_i, k_1, k_2, k_3, l_1^\varpi, l_2^\varpi > 0, 0 < \delta_i < 1, \bar{D}_i > \max\{\frac{D_i}{1-\delta_i}, \frac{C_i}{1+\delta_i}\} (i = 1, 2)$; 可以使闭环系统信号全局一致有界(globally uniformly bounded, GUB),且系统原点是GAS的.

证 定义Lyapunov函数

$$V_1(t) = \frac{\gamma_1}{2}\xi_1^2 + \frac{\gamma_2}{2}z_2^2 + \frac{\gamma_3}{2}z_3^2. \quad (10)$$

对式(10)求导并将式(9)代入可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &= \gamma_1\xi_1(\bar{p}_1\tau_1 + \bar{f}_1 + \Phi(z_2)\dot{h}_t) + (\gamma_1\xi_1 \frac{d\Phi(z_2)}{dz_2} z_4 h_t + \gamma_2 z_2 z_4 + \gamma_3 z_3)z_6 = \\ &= \gamma_1\xi_1(\bar{p}_1\tau_1 + \bar{f}_1 + \Phi(z_2)\dot{h}_t) + \xi_2(\tilde{r} + z_{6d}) = \\ &= \gamma_1\xi_1(\bar{p}_1\tau_1 + \bar{f}_1 + \Phi(z_2)\dot{h}_t) - \xi_2(k_2\Phi(\xi_2) - \tilde{r}). \end{aligned} \quad (11)$$

定义第2个Lyapunov函数

$$V_2(t) = V_1(t) + \frac{\gamma_4}{2}\tilde{r}^2. \quad (12)$$

对式(12)求导并将式(8)与式(11)代入可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &= \gamma_1\xi_1(\bar{p}_1\tau_1 + \bar{f}_1 + \Phi(z_2)\dot{h}_t) - k_2\Phi(\xi_2)\xi_2 + \gamma_4\tilde{r}(p_2\tau_2 + \frac{1}{\gamma_4}\xi_2 + f_2 - \dot{z}_{6d}) = \\ &= -k_1\gamma_1\xi_1^2 - k_2\Phi(\xi_2)\xi_2 - k_3\gamma_4\tilde{r}^2 + \gamma_1M_1 + \gamma_4M_2, \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $M_1 \triangleq \xi_1(\bar{p}_1\tau_1 - \alpha_1), M_2 \triangleq \tilde{r}(p_2\tau_2 - \alpha_2)$.

通过式(6)可知,所设计的事件触发条件是基于 Γ_i 的大小对触发策略进行切换,因此需要根据 $|\tau_i(t)|$ 与 Γ_i 的大小关系对式(13)分情况讨论.

a) 固定门限. 当 $|\tau_i(t)| \geq \Gamma_i$ 时,由式(6)第1行可知, $\forall t \in [t_{i,k}, t_{i,k+1}), |\tau_i(t) - \varpi_i(t)| < C_i$. 因此存在函数 $\lambda_{1i}(t)$, 满足 $\lambda_{1i}(t_k) = 0, \lambda_{1i}(t_{k+1}) = \pm 1, |\lambda_{1i}(t)| \leq 1$, 使 $\varpi_i(t) = \tau_i(t) + \lambda_{1i}(t)C_i$, 即

$$\tau_i(t) = \varpi_i(t) - \lambda_{1i}(t)C_i. \quad (14)$$

将式(14)代入 M_1, M_2 展开可得

$$\begin{cases} M_1 = \xi_1\bar{p}_1\varpi_1(t) - \xi_1\bar{p}_1\lambda_{11}(t)C_1 - \alpha_1\xi_1, \\ M_2 = \tilde{r}p_2\varpi_2(t) - \tilde{r}p_2\lambda_{12}(t)C_2 - \alpha_2\tilde{r}. \end{cases} \quad (15)$$

由于 $0 < \delta_i < 1$, 易得 $-\xi_1\alpha_1 \leq (1+\delta_1)|\alpha_1\xi_1|, -\tilde{r}\alpha_2 \leq (1+\delta_2)|\alpha_2\tilde{r}|$; 又因为 $|\lambda_{1i}(t)| \leq 1, \bar{D}_i > \max\{\frac{D_i}{1-\delta_i},$

$\frac{C_i}{1 + \delta_i}$ }, 易得

$$\begin{aligned} -\xi_1 \bar{p}_1 \lambda_{11}(t) C_1 &\leq (1 + \delta_1) |\bar{p}_1| |\bar{D}_1 \xi_1|, \\ -\tilde{r} p_2 \lambda_{12}(t) C_2 &\leq (1 + \delta_2) |p_2| |\bar{D}_2 \tilde{r}|. \end{aligned}$$

利用上述不等式关系可得

$$\begin{cases} M_1 \leq \xi_1 \bar{p}_1 \varpi_1(t) + (1 + \delta_1) (|\bar{p}_1| |\bar{D}_1 \xi_1| + |\alpha_1 \xi_1|), \\ M_2 \leq \tilde{r} p_2 \varpi_2(t) + (1 + \delta_2) (p_2 |\bar{D}_2 \tilde{r}| + |\alpha_2 \tilde{r}|). \end{cases} \quad (16)$$

根据式(5b)可知, $\bar{p}_1 < 0$, 从而 $|\bar{p}_1| = -\bar{p}_1 > 0$; 将式(7b)代入式(16)可得

$$\begin{aligned} M_1 &\leq (1 + \delta_1) (|\alpha_1 \xi_1| - \frac{\alpha_1^2 \xi_1^2}{\sqrt{(\alpha_1 \xi_1)^2 + \rho_t^2}}) - l_1^\varpi \xi_1^2 + \\ &\quad (1 + \delta_1) |\bar{p}_1| (|\bar{D}_1 \xi_1| - \frac{\bar{D}_1^2 \xi_1^2}{\sqrt{(\bar{D}_1 \xi_1)^2 + \rho_t^2}}), \end{aligned} \quad (17a)$$

$$\begin{aligned} M_2 &\leq (1 + \delta_2) (|\alpha_2 \tilde{r}| - \frac{\alpha_2^2 \tilde{r}^2}{\sqrt{(\alpha_2 \tilde{r})^2 + \rho_t^2}}) - l_2^\varpi \tilde{r}^2 + \\ &\quad (1 + \delta_2) p_2 (|\bar{D}_2 \tilde{r}| - \frac{\bar{D}_2^2 \tilde{r}^2}{\sqrt{(\bar{D}_2 \tilde{r})^2 + \rho_t^2}}). \end{aligned} \quad (17b)$$

由于 $1 < 1 + \delta_i < 2$, 定义2中 $\rho_t > 0$, 对式(17)利用引理3可知

$$\begin{cases} M_1 \leq -l_1^\varpi \xi_1^2 + 2(1 + |\bar{p}_1|) \rho_t, \\ M_2 \leq -l_2^\varpi \tilde{r}^2 + 2(1 + p_2) \rho_t. \end{cases} \quad (18)$$

b) 比例门限. 当 $|\tau_i(t)| < \Gamma_i$ 时, 由式(6)第2行可知 $\forall t \in [t_{i,k}, t_{i,k+1})$, $|\tau_i(t) - \varpi_i(t)| < \delta_i |\tau_i(t)| + D_i$. 因此存在函数 $\lambda_{2i}(t)$ 和 $\lambda_{3i}(t)$, 满足 $|\lambda_{2i}(t)|, |\lambda_{3i}(t)| \leq 1$, 使 $\varpi_i(t) = (1 + \lambda_{2i}(t) \delta_i) \tau_i(t) + \lambda_{3i}(t) D_i$, 即

$$\tau_i(t) = \frac{\varpi_i(t) - \lambda_{3i}(t) D_i}{1 + \lambda_{2i}(t) \delta_i}. \quad (19)$$

将式(19)代入 M_1, M_2 展开可得

$$\begin{cases} M_1 = \frac{\xi_1 \bar{p}_1 \varpi_1(t) - \xi_1 \bar{p}_1 \lambda_{31}(t) D_1}{1 + \lambda_{21}(t) \delta_1} - \alpha_1 \xi_1, \\ M_2 = \frac{\tilde{r} p_2 \varpi_2(t) - \tilde{r} p_2 \lambda_{32}(t) D_2}{1 + \lambda_{22}(t) \delta_2} - \alpha_2 \tilde{r}. \end{cases} \quad (20)$$

由于 $|\lambda_{2i}(t)|, |\lambda_{3i}(t)| \leq 1, 0 < \delta_i < 1$, 可知 $0 < 1 - \delta_i < 1 + \lambda_{2i}(t) \delta_i < 1 + \delta_i$; 又根据式(7b)可知 $\xi_1 \bar{p}_1 \varpi_1(t) \leq 0, \tilde{r} p_2 \varpi_2(t) \leq 0$; 因此易得

$$\begin{aligned} \frac{\xi_1 \bar{p}_1 \varpi_1(t)}{1 + \lambda_{21}(t) \delta_1} &\leq \frac{\xi_1 \bar{p}_1 \varpi_1(t)}{1 + \delta_1} \leq 0; \\ \frac{\tilde{r} p_2 \varpi_2(t)}{1 + \lambda_{22}(t) \delta_2} &\leq \frac{\tilde{r} p_2 \varpi_2(t)}{1 + \delta_2} \leq 0; \end{aligned}$$

$$0 < \left| \frac{-\xi_1 \bar{p}_1 \lambda_{31}(t) D_1}{1 + \lambda_{21}(t) \delta_1} \right| \leq \frac{|\bar{p}_1| |D_1 \xi_1|}{1 - \delta_1} < |\bar{p}_1| |\bar{D}_1 \xi_1|;$$

$$0 < \left| \frac{-\tilde{r} p_2 \lambda_{32}(t) D_2}{1 + \lambda_{22}(t) \delta_2} \right| \leq \frac{p_2 |D_2 \tilde{r}|}{1 - \delta_2} < p_2 |\bar{D}_2 \tilde{r}|.$$

利用以上不等式易得

$$\begin{cases} M_1 \leq \frac{\xi_1 \bar{p}_1 \varpi_1(t)}{1 + \delta_1} + |\bar{p}_1| |\bar{D}_1 \xi_1| + |\alpha_1 \xi_1|, \\ M_2 \leq \frac{\tilde{r} p_2 \varpi_2(t)}{1 + \delta_2} + p_2 |\bar{D}_2 \tilde{r}| + |\alpha_2 \tilde{r}|. \end{cases} \quad (21)$$

将式(7b)代入式(21)可得

$$\begin{aligned} M_1 &\leq (|\alpha_1 \xi_1| - \frac{\alpha_1^2 \xi_1^2}{\sqrt{(\alpha_1 \xi_1)^2 + \rho_t^2}}) - l_1^\varpi \xi_1^2 + \\ &\quad |\bar{p}_1| (|\bar{D}_1 \xi_1| - \frac{\bar{D}_1^2 \xi_1^2}{\sqrt{(\bar{D}_1 \xi_1)^2 + \rho_t^2}}), \end{aligned} \quad (22a)$$

$$\begin{aligned} M_2 &\leq (|\alpha_2 \tilde{r}| - \frac{\alpha_2^2 \tilde{r}^2}{\sqrt{(\alpha_2 \tilde{r})^2 + \rho_t^2}}) - l_2^\varpi \tilde{r}^2 + \\ &\quad p_2 (|\bar{D}_2 \tilde{r}| - \frac{\bar{D}_2^2 \tilde{r}^2}{\sqrt{(\bar{D}_2 \tilde{r})^2 + \rho_t^2}}). \end{aligned} \quad (22b)$$

对式(22)利用引理3可知

$$\begin{cases} M_1 \leq -l_1^\varpi \xi_1^2 + (1 + |\bar{p}_1|) \rho_t, \\ M_2 \leq -l_2^\varpi \tilde{r}^2 + (1 + p_2) \rho_t. \end{cases} \quad (23)$$

通过式(18)与式(23)可知, 上述两种情况中, M_1, M_2 必然满足式(18). 因此结合式(18)与式(13)可知, $\dot{V}_2(t)$ 必然满足

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &\leq -\bar{k}_1 \xi_1^2 - k_2 \Phi(\xi_2) \xi_2 - \bar{k}_3 \tilde{r}^2 + \\ &\quad 2(\gamma_1 + \gamma_1 |\bar{p}_1| + \gamma_4 + \gamma_4 p_2) \rho_t, \end{aligned} \quad (24)$$

其中: $\bar{k}_1 \triangleq \gamma_1 (k_1 + l_1^\varpi), \bar{k}_3 \triangleq \gamma_4 (k_3 + l_2^\varpi)$.

由于 $\gamma_1, \gamma_4, \bar{p}_1, p_2$ 均为常数, 将式(24)两端对 t 积分, 并利用定义2中 $\rho_t > 0$ 以及 $0 < \int_0^t \rho_t(\chi) d\chi \leq \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \rho_t(\chi) d\chi = \bar{\rho}$ 可得

$$V_2(t) - V_2(0) \leq -\int_0^t Q(\chi) d\chi + c\bar{\rho}, \quad (25)$$

其中: $Q(t) \triangleq \bar{k}_1 \xi_1^2 + k_2 \Phi(\xi_2) \xi_2 + \bar{k}_3 \tilde{r}^2 \geq 0$, 常数 $c \triangleq 2(\gamma_1 + \gamma_1 |\bar{p}_1| + \gamma_4 + \gamma_4 p_2) > 0$.

重新整理式(25)可知

$$V_2(t) \leq V_2(t) + \int_0^t Q(\chi) d\chi \leq V_2(0) + c\bar{\rho}. \quad (26)$$

下面证明闭环系统是GUB的.

通过式(26)以及定义2易得 $V_2(t) \geq 0$ 全局有界, 从而 $V_1(t), V_2(t), \xi_1, z_2, z_3, \tilde{r} \in L_\infty$. 根据定义1可知 $|h_t|$

∈ L_∞ , 由于 $\xi_1 = z_4 + \Phi(z_2)h_t \in L_\infty$, 可知 $z_4 \in L_\infty$; 又因为 $\xi_2 = \gamma_1 \xi_1 \frac{d\Phi(z_2)}{dz_2} z_4 h_t + \gamma_2 z_2 z_4 + \gamma_3 z_3$, 可知 $\xi_2 \in L_\infty$. 结合式(9)可得 $\tilde{r} = z_6 + k_2 \Phi(\xi_2) \in L_\infty$, 又根据定义3可知 $\Phi(\xi_2) \in L_\infty$, 因此 $z_6 \in L_\infty$. 因此系统(5b)全局有界, 从而根据引理2可知 $z_j \in L_\infty, \{j \in \mathbb{Z} | 1 \leq j \leq 6\}$, 系统(5)全局有界. 利用引理1可知系统(1)的状态全局有界, 因此 $\bar{f}_1, f_2 \in L_\infty$. 将上述结果结合式(7)–(9)可知 $\tau_i(t) \in L_\infty$, 再次结合式(5)可知 $\dot{z}_j \in L_\infty, \{j \in \mathbb{Z} | 1 \leq j \leq 6\}$, 从而 z_j 一致连续, 系统(5) GUB.

下面证明闭环系统的渐近收敛性

根据式(26)可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t Q(\chi) d\chi \leq V_2(0) + c\bar{\rho}$, 将各项展开易得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \xi_1^2(\chi) d\chi \leq \frac{V_2(0) + c\bar{\rho}}{k_1}$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \tilde{r}^2(\chi) d\chi \leq \frac{V_2(0) + c\bar{\rho}}{k_3}$, 从而可知 $\xi_1, \tilde{r} \in L_2$, 由于 $\xi_1, \tilde{r} \in L_\infty$, 利用Barbálat引理^[23]可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \xi_1, \dot{\xi}_1, \tilde{r} = 0$; 根据定义3可知 $0 \leq \Phi(\xi_2)\xi_2 \in L_\infty$, 由于闭环系统GUB, 求导易得 $\frac{d}{dt}[\Phi(\xi_2)\xi_2] \in L_\infty$, 因此 $\Phi(\xi_2)\xi_2$ 一致连续; 结合式(26)可知 $0 \leq \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \Phi(\xi_2)\xi_2(\chi) d\chi \leq \frac{V_2(0) + c\bar{\rho}}{k_2}$, 再次利用Barbálat引理可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \Phi(\xi_2)\xi_2 = 0$, 从而 $\lim_{t \rightarrow \infty} \xi_2, \dot{\xi}_2 = 0$, 代入式(9)可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} z_{6d} = 0$. 由于已证明 $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{r} = \lim_{t \rightarrow \infty} (z_6 - z_{6d}) = 0$, 因此 $\lim_{t \rightarrow \infty} z_6 = 0$, 结合式(5b)可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{z}_2, \dot{z}_3, \dot{z}_6 = 0$.

再利用

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_1 = z_4 + \Phi(z_2)h_t = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_2 = \gamma_1 \xi_1 \frac{d\Phi(z_2)}{dz_2} z_4 h_t + \gamma_2 z_2 z_4 + \gamma_3 z_3 = 0. \end{cases} \quad (27)$$

可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} (\gamma_2 z_2 z_4 + \gamma_3 z_3) = 0$, 求导可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} (\gamma_2 \dot{z}_2 z_4 + \gamma_2 z_2 \dot{z}_4 + \gamma_3 \dot{z}_3) = 0$, 从而

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z_2 \dot{z}_4 = 0. \quad (28)$$

已证明 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\xi}_1 = 0$, 展开可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{z}_4 + \frac{d\Phi(z_2)}{dz_2} z_4 z_6 h_t + \Phi(z_2)\dot{h}_t) = 0$, 因此

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{z}_4 = -\Phi(z_2)\dot{h}_t. \quad (29)$$

将式(29)代入式(28)可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z_2 \Phi(z_2)\dot{h}_t = 0. \quad (30)$$

根据定义1可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{h}_t \neq 0$, 因此 $\lim_{t \rightarrow \infty} z_2 = 0$, 结合式(27)可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} z_3, z_4 = 0$.

综上可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} z_2, z_3, z_4, z_6 = 0$, 结合引理2与系统GUB的结论, 可以证明系统(1)的原点GAS. 证毕.

定理 2 由式(6)–(9)所设计的ETC最小触发间隔的下界为正, 闭环系统不会产生Zeno现象, 控制器是因果可实现的.

证 在定理1中已证明所有信号均GUB, 由于 C_i, D_i, δ_i 均为正常数, 结合式(6)–(9)可知, 存在一个常数 $k_{\dot{\omega}} > 0$, 满足

$$|\dot{\Delta}_i| = |\dot{\omega}_i(t)| \leq k_{\dot{\omega}}, \forall t \in [t_{i,k}, t_{i,k+1}). \quad (31)$$

由式(6)易知

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow t_{i,k}} |\Delta_i| = 0, \\ \lim_{t \rightarrow t_{i,k+1}^-} |\Delta_i| = C_i, |\tau_i(t)| \geq \Gamma_i, \\ \lim_{t \rightarrow t_{i,k+1}^-} |\Delta_i| = \delta_i |\tau_i(t)| + D_i, |\tau_i(t)| < \Gamma_i. \end{cases} \quad (32)$$

结合式(31)与式(32)可知, 触发间隔 ΔT 下界必然满足 $\inf(t_{i,k+1}^- - t_{i,k})k_{\dot{\omega}} \geq \min\{|\Delta_i|\}$, 即

$$\Delta T \geq \frac{\min\{C_i, \delta_i |\tau_i(t)| + D_i\}}{k_{\dot{\omega}}} > 0. \quad (33)$$

从而证明所设计ETC的最小触发间隔必然为正, 防止了Zeno现象的产生. 此外, 通过式(6)–(9)可知, 控制推力 $\tau_1(t)$ 中不含变量 z_4 , 理想角速度 z_{6d} 中不含变量 z_6 , 控制力矩 $\tau_2(t)$ 中不含变量 z_6 , 因此所设计的ETC是因果可实现的. 证毕.

4 仿真实验

考虑文献 [13] 所研究的不对称 USV, 模型参数为: $m_{11} = 25.8 \text{ kg}, m_{22} = 33.8 \text{ kg}, m_{23} = m_{32} = 6.2 \text{ kg} \cdot \text{m}, m_{33} = 2.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, d_{11} = 12 \text{ kg/s}, d_{22} = 17 \text{ kg/s}, d_{23} = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m/s}, d_{32} = 0.5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}, d_{33} = 0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$; 针对不对称USV的自主停靠任务, 初始状态为: $x(0) = -2 \text{ m}, y(0) = 2 \text{ m}, \psi(0) = -\frac{\pi}{2} \text{ rad}, u(0) = 0 \text{ m/s}, v(0) = 0 \text{ m/s}, r(0) = 0 \text{ rad/s}$, 系统原点为镇定控制的目标点.

控制参数选取为: $k_1 = 0.9, k_2 = 0.1, k_3 = 8; l_1^\omega = 0.1, l_2^\omega = 0.5; \gamma_1 = 2, \gamma_2 = 30, \gamma_3 = 2, \gamma_4 = 10$; 控制器函数定义为: $\Phi(z_2) = \frac{z_2}{10}, \Phi(\xi_2) = \xi_2, h_t = \sin(0.1t), \rho_t = 0.1e^{-0.01t}$; 假设控制力矩满足饱和约束 $|\tau_2| \leq 5 \text{ N} \cdot \text{m}$, ETM参数选取为

$$\Gamma_1 = 40, C_1 = 4, D_1 = 0.05, \delta_1 = 0.1, \bar{D}_1 = 4;$$

$$\Gamma_2 = 3, C_2 = 0.7, D_2 = 0.01, \delta_2 = 0.05, \bar{D}_2 = 0.7.$$

为了验证所提方法的有效性, 本文与文献[4]中的方法进行了对比, 采样周期设为0.05 s. 仿真结果如图3–12所示.

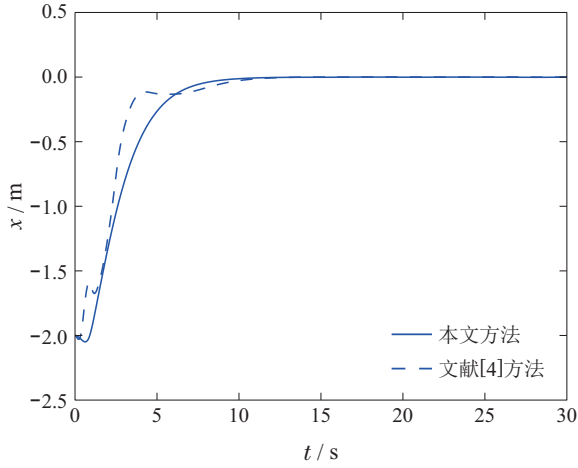


图3 x 轴位置坐标

Fig. 3 x -coordinate position

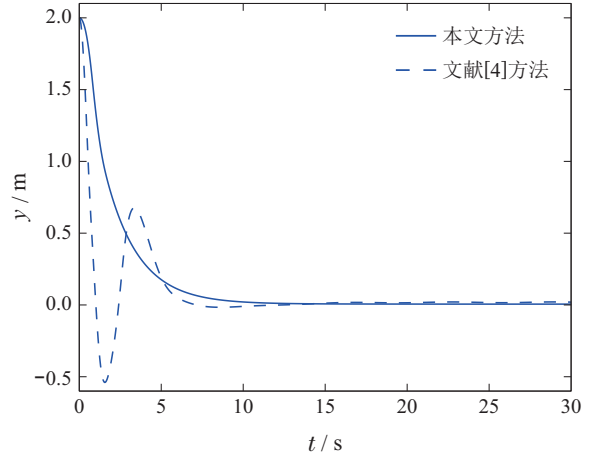


图4 y 轴位置坐标

Fig. 4 y -coordinate position

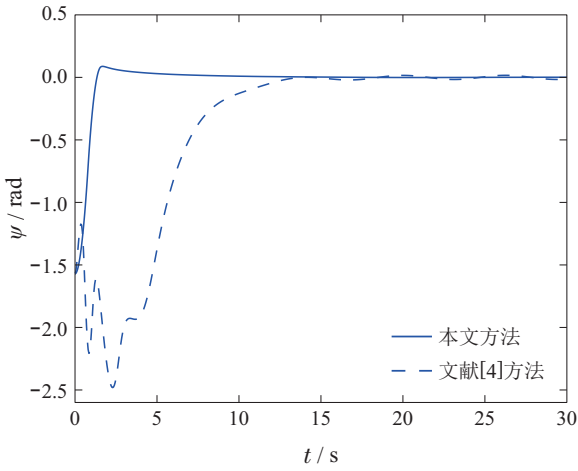


图5 航向角 ψ

Fig. 5 Yaw angle ψ

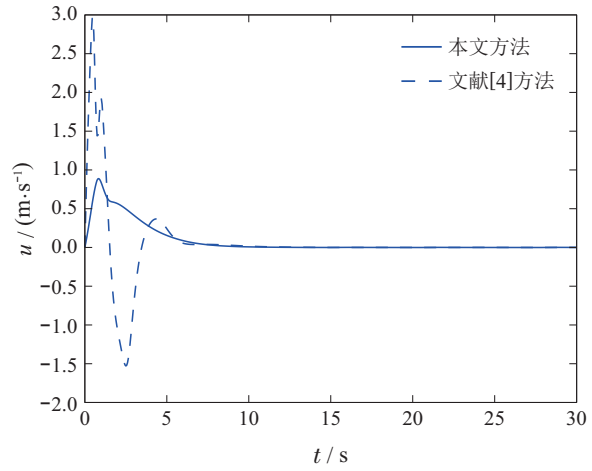


图6 纵向速度 u

Fig. 6 Surge velocity u

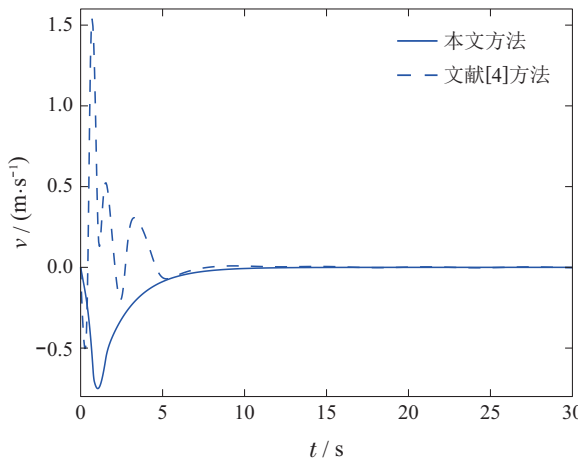


图7 横向速度 v

Fig. 7 Sway velocity v

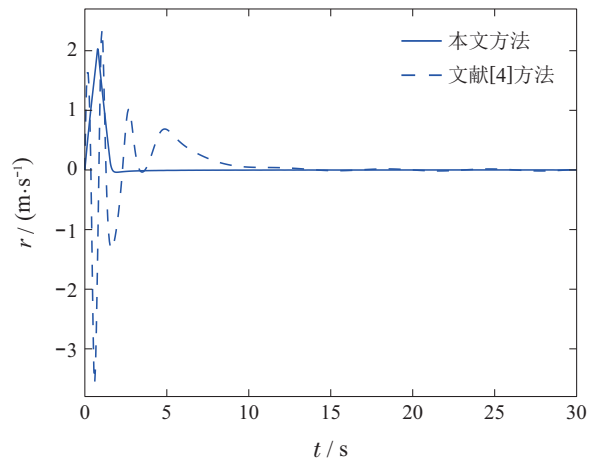


图8 航向角速度 r

Fig. 8 Yaw angular velocity r

图3-8为不对称USV的状态变化曲线, 结果表明, 相比于文献[4]中提出的方法, 本文所提出的ETC具有更小的震荡与超调. 这是由于初始时刻文献[4]的控制输入幅值较大且受到零阶保持器的作用, 导致了系统各个状态变化剧烈.

由图8可知, 系统最大瞬时航向角速度达到了 -3 rad/s 以上, 对于USV系统来说是不可能实现的. 由于本文引入了切换门限ETM并补偿了 Δ_i , 可以避免控制信号的剧烈变化, 防止系统震荡.

图9-10为本文控制输入的变化曲线, 由图可知,

τ_i 在触发时刻对信号 $\varpi_i(t)$ 采样并对控制输入进行更新. 定义能量消耗指标 $P = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \{\tau_1^2(\chi) + \tau_2^2(\chi)\} d\chi$, 变化曲线如图13所示, 由图可知文献[4]的方法控制幅值较大, 需消耗更多能量, 而本文所提出的ETC利用更少的能量可以达到更好的控制效果.

图11-12为本文ETC中 τ_i 各触发时刻的间隔, 结合图14可知, 文献[4]中由于采样周期为0.05 s, 控制输入在前30 s更新了600次; 而采用本文设计的ETC, 在前30 s控制力 τ_1 更新了62次, 控制力矩 τ_2 更新了90次, 执行机构的操纵次数显著减少, 可以减轻系统的负担.

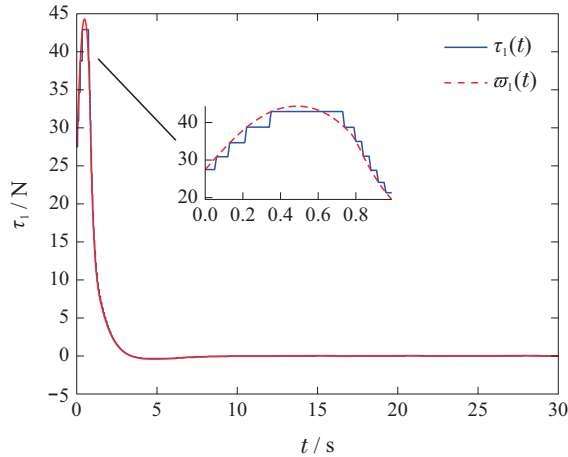


图 9 控制推力 τ_1

Fig. 9 Control force τ_1

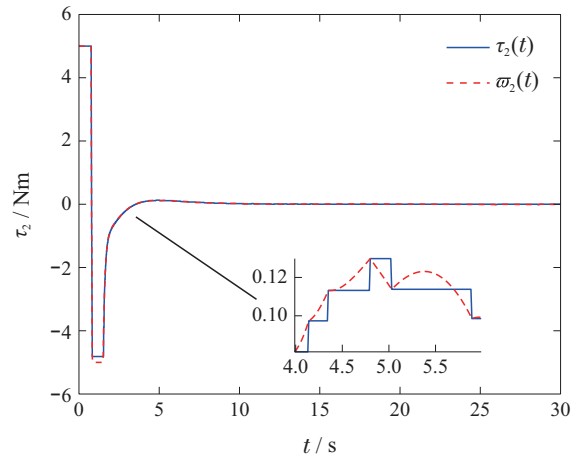


图 10 控制力矩 τ_2

Fig. 10 Control moment τ_2

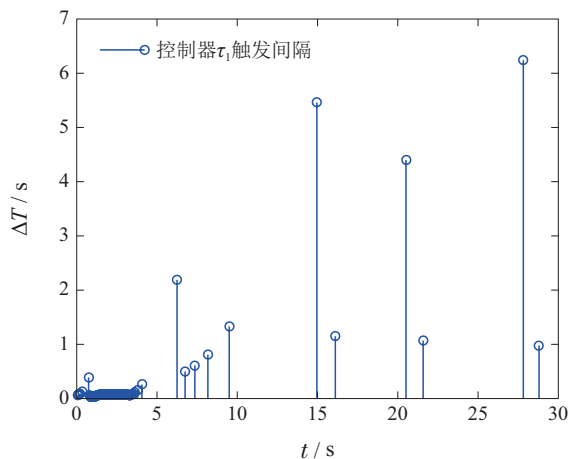


图 11 τ_1 触发间隔

Fig. 11 Triggering intervals of τ_1

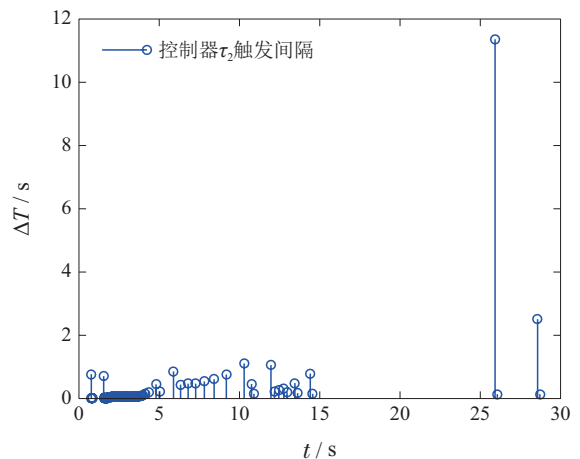


图 12 τ_2 触发间隔

Fig. 12 Triggering intervals of τ_2

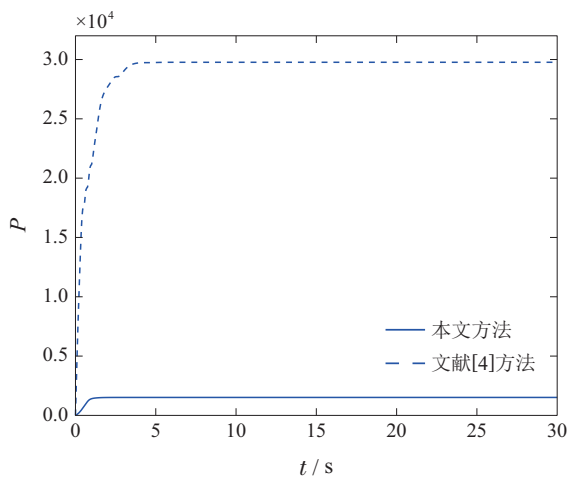


图 13 控制器能量消耗

Fig. 13 Energy consumption of the controllers

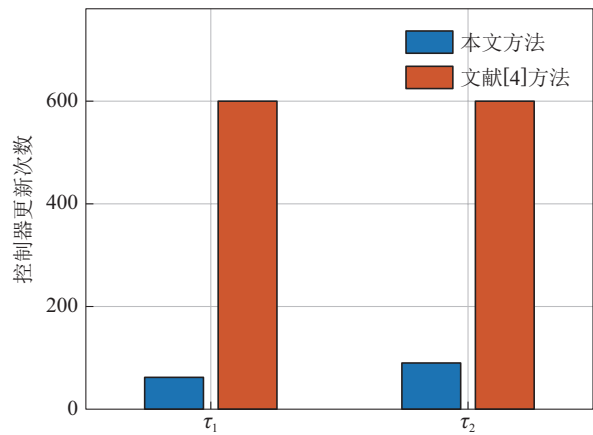


图 14 控制器更新次数

Fig. 14 Times for update of the controllers

5 结论

本文通过坐标变换将不对称欠驱动水面机器人的全局渐近镇定控制问题转化为欠驱动子系统的全局渐近镇定控制问题, 针对变换后的系统, 利用周期时间函数构造时变辅助变量设计控制推力以及理想航向角速度, 并设计控制力矩实现对理想航向角速度的渐近跟踪, 结合切换门限事件触发机制设计事件触发全局渐近镇定控制器使闭环系统全局渐近稳定, 并证明了该控制器是因果可实现的且不会发生Zeno现象. 本文方法仅在系统满足触发条件时对控制器进行更新, 能够节约系统资源以及减少执行器操纵次数, 同时不会降低原有的控制品质. 最后, 仿真结果验证了所提出方法的有效性.

参考文献:

- [1] FOSSEN T I. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Trondheim: Marine Cybernetics, 2002.
- [2] XIE W, MA B. Robust global uniform asymptotic stabilization of underactuated surface vessels with unknown model parameters. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, 2015, 25(7): 1037 – 1050.
- [3] MAZENC F, PETERSEN K, NIJMEIJER H. Global uniform asymptotic stabilization of an underactuated surface vessel. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(10): 1759 – 1762.
- [4] DONG W, GUO Y. Global time-varying stabilization of underactuated surface vessel. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(6): 859 – 864.
- [5] ZHANG Pengfei, GUO Ge. Global asymptotic stabilization control with variable periods for underactuated surface vessels. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(5): 746 – 752.
(张鹏飞, 郭戈. 欠驱动水面机器人变周期全局渐近镇定控制. 控制理论与应用, 2019, 36(5): 746 – 752.)
- [6] GHOMMAM J, MNIF F, BENALI A, et al. Asymptotic backstepping stabilization of an underactuated surface vessel. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(6): 1150 – 1157.
- [7] MA B L. Global κ -exponential asymptotic stabilization of underactuated surface vessels. *Systems & Control Letters*, 2009, 58(3): 194 – 201.
- [8] XIE W, MA B. Robust position stabilization of underactuated surface vessels with unknown modeling parameters via simple P/D-like feedback: The center manifold approach. *Asian Journal of Control*, 2015, 17(4): 1222 – 1232.
- [9] XIE W, MA B, FERNANDO T, et al. A simple robust control for global asymptotic position stabilization of underactuated surface vessels. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, 2017, 27(18): 5028 – 5043.
- [10] ZHANG Z, WU Y. Switching-based asymptotic stabilisation of underactuated ships with non-diagonal terms in their system matrices. *IET Control Theory & Applications*, 2015, 9(6): 972 – 980.
- [11] YU Ruiting, ZHU Qidan, LIU Zhilin, et al. Decoupling implementation of global κ -exponential stabilization of underactuated non-symmetric surface vessel. *Control and Decision*, 2012, 27(5): 781 – 786.
(于瑞亭, 朱齐丹, 刘志林, 等. 欠驱动不对称船舶全局 κ 指数镇定的解耦实现. 控制与决策, 2012, 27(5): 781 – 786.)
- [12] MA Y, NIE Z, YU Y, et al. Event-triggered fuzzy control of networked nonlinear underactuated unmanned surface vehicle. *Ocean Engineering*, 2020, 213: 107540.
- [13] DO K D, PAN J. Global tracking control of underactuated ships with off-diagonal terms. *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*. Maui, Hawaii USA: IEEE, 2004, 2: 1250 – 1255.
- [14] DENG Y, ZHANG X, IM N, et al. Model-based event-triggered tracking control of underactuated surface vessels with minimum learning parameters. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2019, DOI: 10.1109/TNNLS.2019.2951709, 1 – 41.
- [15] LI M, LI T, GAO X, et al. Adaptive NN event-triggered control for path following of underactuated vessels with finite-time convergence. *Neurocomputing*, 2020, 379: 203 – 213.
- [16] DENG Y, ZHANG X, IM N, et al. Event-triggered robust fuzzy path following control for underactuated ships with input saturation. *Ocean Engineering*, 2019, 186: 106 – 122.
- [17] DENG Y, ZHANG X. Event-triggered composite adaptive fuzzy output feedback control for path following of autonomous surface vessels. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, DOI: 10.1109/tfuzz.2020.3006562.
- [18] BROCKETT R W, MILLMAN R S, SUSSMANN H S. *Differential Geometric Control Theory*. Boston: Birkhouser, 1983.
- [19] KHALIL K H. *Nonlinear Systems, Third Edition*. New York: Prentice Hall, 2002.
- [20] DO K D, PAN J. *Control of Ships and Underwater Vehicles: Design for Underactuated and Nonlinear Marine Systems*. London, U.K.: Springer, 2009.
- [21] WANG C. Decentralized adaptive tracking control for a class of interconnected nonlinear time-varying systems. *Automatica*, 2015, 54: 16 – 24.
- [22] XING L, WEN C, LIU Z, et al. Event-triggered adaptive control for a class of uncertain nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(4): 2071 – 2076.
- [23] JIAO J, WANG G. Event triggered trajectory tracking control approach for fully actuated surface vessel. *Neurocomputing*, 2016, 182: 267 – 273.

作者简介:

王锐 博士研究生, 助理研究员, 目前研究方向为欠驱动系统事件触发控制, E-mail: ruiwang@mail.ioa.ac.cn;

司昌龙 硕士, 副研究员, 目前研究方向为导航制导与控制, E-mail: sichanglong@mail.ioa.ac.cn;

马慧 博士, 研究员, 目前研究方向为机器人控制技术, E-mail: ma.huia@126.com;

郝程鹏 博士, 研究员, 目前研究方向为智能制导与控制, E-mail: haochengp@mail.ioa.ac.cn.