

# 基于双通道事件触发机制的水面无人艇同时故障检测与控制

王旭东<sup>1,2</sup>, 费中阳<sup>3,4†</sup>, 杨 柳<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 湖南大学 机器人学院, 湖南 长沙 410082;

3. 大连理工大学 工业装备智能控制与优化教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;

4. 大连理工大学 控制科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 本文研究双通道事件触发通讯机制下水面无人艇(USV)的同时故障检测和控制(SFDC)问题. 考虑执行器故障和外部扰动, 建立了SFDC框架以同时实现控制和故障检测目标. 为了节约有限的通信资源和系统能源, 在传感器-控制器通道和控制器-执行器通道分别部署了积分型事件触发器. 在事件触发的通讯机制下, 提出了故障检测器和控制器的联合设计准则. 最后, USV的仿真结果验证了提出的基于事件触发的SFDC方法的有效性.

**关键词:** 双通道积分型事件触发机制; 故障检测与控制; 水面无人艇

**引用格式:** 王旭东, 费中阳, 杨柳. 基于双通道事件触发机制的水面无人艇同时故障检测与控制. 控制理论与应用, 2022, 39(4): 593 – 601

DOI: 10.7641/CTA.2021.00800

## Simultaneous fault detection and control for unmanned surface vehicles with a dual-channel event-triggered scheme

WANG Xu-dong<sup>1,2</sup>, FEI Zhong-yang<sup>3,4†</sup>, YANG Liu<sup>1</sup>

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. School of Robotics, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

3. Key Laboratory of Intelligent Control and Optimization for Industrial Equipment of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;

4. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

**Abstract:** This paper investigates the problem of simultaneous fault detection and control (SFDC) for an unmanned surface vehicle (USV) with a dual-channel event-triggered communication mechanism. Considering the actuator faults and external disturbance, an SFDC framework is established to achieve the control and fault detection objectives, simultaneously. To save limited communication and energy resources, two integral-based event generators are deployed in the sensor-to-controller channel and the controller-to-actuator channel, respectively. Under the event-triggered communication mechanism, the co-design criterion of fault detector and controller is proposed. Eventually, the effectiveness of the proposed event-triggered SFDC method for USV systems is demonstrated by a simulation case.

**Key words:** dual-channel integral-based event trigger; fault detection and control; unmanned surface vehicles

**Citation:** WANG Xudong, FEI Zhongyang, YANG Liu. Simultaneous fault detection and control for unmanned surface vehicles with a dual-channel event-triggered scheme. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(4): 593 – 601

## 1 引言

随着GPS定位、导航、自动化、卫星通信等技术的进步,水面无人艇(unmanned surface vehicle, USV)在过去数十年得到了长足的发展<sup>[1-3]</sup>. 由于USV具有重量轻、体积小、隐蔽性好、机动性强、价格低等优点,USV在包括环境监测、水文调研、海洋资源勘探、污染物追踪、海岸监控、紧急救援等诸多领域扮演着越

来越重要的角色<sup>[4-6]</sup>. 因此,USV的控制问题得到了学者的广泛关注. 文献[7]研究了基于网络的USV建模和动态输出反馈控制. 文献[8]研究了基于增量预测控制的网络环境下USV编队系统的输出一致性问题.

由于海浪侵蚀、超低温工作环境、超长工作时间,USV系统在实际工作时不可避免地可能发生执行器故障. 因此,为了提升USV系统的鲁棒性、安全性,研

收稿日期: 2020-11-14; 录用日期: 2021-08-16.

†通信作者. E-mail: feizhongyang@gmail.com.

本文责任编辑: 王韞维.

国家自然科学基金项目(61873310)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61873310).

究USV系统的故障诊断和容错控制至关重要. 作为故障诊断中的一项关键技术, 故障检测获得了研究者的大量关注<sup>[9-12]</sup>. 文献[9]研究了Takagi-Sugeno模糊Itô随机系统的鲁棒故障检测. 文献[10]研究了非线性系统基于自适应迭代学习的故障检测问题. 文献[12]研究了基于鲁棒滑模观测器的故障检测.

然而, 在上述文献中, 故障检测器和控制器是分别进行设计的, 导致较高的全局复杂度. 因此设计同时故障检测和控制(simultaneous fault detection and control, SFDC)模块同时实现系统故障检测和控制具有重要意义. 针对SFDC问题的研究在过去数十年取得了一些成果. 文献[13]针对SFDC问题提出了 $H_2/H_\infty$ 描述, 其中 $H_2$ 指标和 $H_\infty$ 指标分别用来度量故障检测目标和控制目标. 文献[14]研究了离散时间时滞切换系统的SFDC问题. 文献[15]研究了二维FM系统的SFDC问题. 文献[16]进行了网络化控制系统的故障检测滤波器和控制联合设计.

USV系统在实际中通常工作于网络环境中, 远程的SFDC模块通常位于母舰/陆地, 系统部件之间的信息交互通过共享的通讯网络进行. 由于USV系统能源储备有限, 大量的信号传输会造成能源的消耗, 因此需要更高效、节能的采样机制实现USV系统的SFDC目标. 事件触发机制由于其在减小网络带宽占用、计算成本、能量消耗方面的优异性能, 成为了时间触发机制的有效替代方案并引起了学者的大量关注. 文献[17]研究了基于事件触发的多智能体系统一致性控制. 文献[18]研究了基于事件触发通信的故障诊断问题. 文献[19]针对不确定离散时间随机系统, 研究了其在事件触发条件下的SFDC问题. 文献[20]研究了事件触发采样系统的集值反馈控制问题.

注意到前述工作所涉及的事件触发条件(event-triggered condition, ETC)依赖于瞬时测量值. 近期, 文献[21]提出了一种基于积分的事件触发机制, 其允许Lyapunov函数在两个连续的事件触发时刻间是非减的, 和传统触发机制相比, 该机制具有更小的保守性<sup>[22-23]</sup>.

基于以上分析, 本文针对带有执行器故障和外部扰动的USV系统进行其在积分型事件触发通信条件下的SFDC问题研究. 本文的贡献主要包括: 1) 设计了一种新的积分型事件触发机制, 触发间隔具有正值下界, 避免了Zeno现象; 2) 构建了双通道积分型事件触发条件下USV系统的SFDC框架; 3) 提出了事件触发条件下故障检测器和控制器的同时设计方法, 并给出了积分型事件触发参数的设计准则.

本文的结构如下: 第2节建立了USV系统在双通道事件触发机制下的SFDC框架; 第3节给出了故障检测

器、控制器、事件触发机制的联合设计准则; 第4节用仿真实验验证了所提方法的有效性; 第5节为结论.

符号说明:  $P^{-1}$ 和 $P^T$ 分别表示矩阵 $P$ 的逆和转置;  $P > 0$  ( $P < 0$ )表明矩阵 $P$ 是正定的(负定的);  $\text{diag}\{*\}$ 为分块对角矩阵;  $\text{col}\{*\}$ 为列向量;  $\mathcal{L}_2$ 是平方可积向量集合;  $[M]_s = M + M^T$ ;  $\lambda_{\max}(X)$ 和 $\lambda_{\min}(X)$ 分别为实对称矩阵的最大、最小特征值;  $\|x\|$ 表示向量 $x$ 的Euclidian范数;  $\|X\| \triangleq \sqrt{\lambda_{\max}(X^T X)}$ 为矩阵 $X$ 的诱导二范数.

## 2 问题描述

USV的基于事件触发的SFDC结构如图1所示, USV和舰基/陆基的SFDC模块通过无线网络连接. 两个事件触发器被引入以节约有限的通信和能源资源, 系统输出、控制信号是否需要通过网络进行传输由触发器决定.

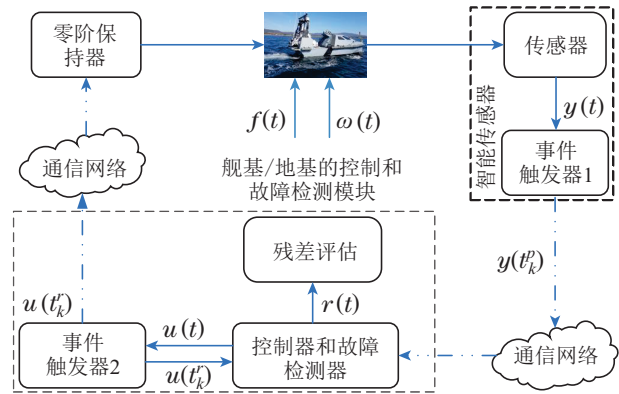


图1 USV的基于双通道事件触发的SFDC框架

Fig. 1 Dual-channel event-triggered SFDC for USV system

USV的运动包含6个自由度, 分别为纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇. 本文假设USV的前向速度为常值, 且只考虑横荡-艏摇-横摇子系统上的运动. USV的运动学方程可表示为<sup>[16]</sup>

$$\begin{cases} \dot{r}(t) = \frac{K_{vr}}{T_r} v(t) + \frac{1}{T_r} \omega_\psi(t) + \frac{K_{dr}}{T_r} \delta(t) - \frac{1}{T_r} r(t), \\ \dot{p}(t) = \omega_n^2 K_{dp} \delta(t) + \omega_n^2 \omega_\phi(t) + \omega_n^2 K_{vp} v(t) - \omega^2 \phi(t) - 2\zeta \omega_n p(t), \\ \dot{v}(t) = \frac{K_{dv}}{T_v} \delta(t) - \frac{1}{T_v} v(t), \\ \dot{\psi}(t) = r(t), \\ \dot{\phi}(t) = p(t), \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $r(t)$ ,  $p(t)$ ,  $v(t)$ 分别为艏摇角速度、横摇角速度和由舵角变化引起的横荡速度;  $\psi(t)$ ,  $\phi(t)$ ,  $\delta(t)$ 分别表示航向角、横摇角、方向舵偏角;  $\omega_\psi(t)$ ,  $\omega_\phi(t)$ 分别表示由海浪对航向角和横摇产生的扰动;  $K_{dp}$ ,  $K_{dr}$ ,  $K_{vp}$ ,  $K_{vr}$ 和 $K_{dv}$ 为已知增益;  $T_r$ 和 $T_v$ 为给定时间常

数;  $\omega_n$  和  $\zeta$  分别表示无阻尼自然频率和阻尼系数.

定义  $\mathbf{x}(t) = \text{col}\{v(t), r(t), \psi(t), p(t), \phi(t)\} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\boldsymbol{\omega}(t) = \text{col}\{\omega_\psi(t), \omega_\phi(t)\} \in \mathbb{R}^d$  及  $\mathbf{u}(t) = \delta(t) \in \mathbb{R}^m$ , 则系统可表示为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t) + E_1\boldsymbol{\omega}(t), \quad (2)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_v} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{vr}}{T_r} & -\frac{1}{T_r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_n^2 K_{vp} & 0 & 0 & -2\zeta\omega_n & -\omega_n^2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{K_{dv}}{T_v} & \frac{K_{dr}}{T_r} & 0 & \omega_n^2 K_{dp} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$E_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_n^2 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

考虑执行器故障, USV 系统可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t) + E_1\boldsymbol{\omega}(t) + E_2\mathbf{f}(t), \\ \mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t), \\ \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $\mathbf{f}(t) \in \mathbb{R}^l$  表示系统故障,  $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^p$  为系统输出,  $\mathbf{x}_0$  表示系统初始状态,  $E_2, C$  为给定常值矩阵.

**假设 1** 系统(3)中,  $\mathbf{f}(t), \boldsymbol{\omega}(t) \in \mathcal{L}_2$ ,  $(A, C)$  是可检测的,  $C$  是行满秩的.

为了实现同时故障检测和控制, 采用如下的基于观测器的 SFDC 模块:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = A\hat{\mathbf{x}}(t) + B\mathbf{u}(t) + L(\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t)), \\ \hat{\mathbf{y}}(t) = C\hat{\mathbf{x}}(t), \\ \mathbf{r}(t) = V(\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t)), \\ \mathbf{u}(t) = K\hat{\mathbf{x}}(t), \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\hat{\mathbf{x}}(t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $\hat{\mathbf{y}}(t) \in \mathbb{R}^p$ ,  $\mathbf{r}(t) \in \mathbb{R}^l$  分别表示观测器状态、观测器输出、残差信号;  $L, V, K$  为待设计的 SFDC 增益.

构建如下的残差评价函数  $\chi(t)$  和残差阈值  $\chi_{th}$  [26]:

$$\chi(t) = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t \mathbf{r}^T(s)\mathbf{r}(s)ds},$$

$$\chi_{th} = \sup_{\mathbf{f}(t)=0, \boldsymbol{\omega}(t) \in \mathcal{L}_2} \chi(t),$$

该残差评价方法不直接根据残差信号的大小来判断系统是否发生故障, 而是基于残差信号的平均能量进行判断. 相应的故障检测逻辑可表示为

$$\begin{cases} \chi(t) \leq \chi_{th} \Rightarrow \text{无系统故障}, \\ \chi(t) > \chi_{th} \Rightarrow \text{系统故障}, \end{cases} \quad (5)$$

当残差评价函数超出其相应阈值时, 则认为系统发生故障; 否则系统无故障.

如图1所示, 为了节约通信资源, 在传感器侧和控制站侧分别引入了事件触发器1和2, 其触发时刻分别表示为  $t_k^p$  和  $t_k^r$  ( $k \in \mathbb{N}$ ) 且满足如下的积分型ETC:

$$t_{k+1}^p = \inf\{t \geq t_k^p + \tau_y \mid \int_{t_k^p}^t \mathbf{e}_y^T \Omega_y \mathbf{e}_y ds > \delta_y \int_{t_k^p}^t \|\mathbf{y}\|^2 ds\}, \quad (6a)$$

$$t_{k+1}^r = \inf\{t \geq t_k^r + \tau_u \mid \int_{t_k^r}^t \mathbf{e}_u^T \Omega_u \mathbf{e}_u ds > \delta_u \int_{t_k^r}^t \|\mathbf{u}\|^2 ds\}, \quad (6b)$$

其中:  $\mathbf{e}_y(t) = \mathbf{y}(t_k^p) - \mathbf{y}(t)$ ,  $\mathbf{e}_u(t) = \mathbf{u}(t_k^r) - \mathbf{u}(t)$ , 待设计的事件触发参数  $\tau_y$  和  $\tau_u$  为静默时间,  $\delta_y$  和  $\delta_u$  为事件触发阈值, 矩阵  $\Omega_y$  和  $\Omega_u$  为事件触发权值矩阵. 从而可得,  $\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}(t_k^p)$ ,  $t \in [t_k^p, t_{k+1}^p)$  及  $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(t_k^r)$ ,  $t \in [t_k^r, t_{k+1}^r)$ .

**注 1** 不同于文献[16], 两个带有积分型ETC的事件触发器分别部署于传感器-控制器/滤波器通道和控制器/滤波器-执行器通道, 只有当系统输出/控制信号满足给定的ETC, 信号才通过共享的通讯网络进行传输. 因此, 和文献[16]相比, 所采用的双通道事件触发机制能够更为有效地降低网络带宽占用和资源消耗.

定义  $\mathbf{z}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)$ ,  $\mathbf{r}_e(t) = \mathbf{r}(t) - \mathbf{f}(t)$ ,  $A_k = A + BK$ ,  $A_l = A - LC$ , 由式(3)-(4)可得

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = A_k \mathbf{x}(t) - BK\mathbf{z}(t) + B\mathbf{e}_u(t) + E_1\boldsymbol{\omega}(t) + E_2\mathbf{f}(t), \\ \dot{\mathbf{z}}(t) = A_l \mathbf{z}(t) - L\mathbf{e}_y(t) + E_1\boldsymbol{\omega}(t) + E_2\mathbf{f}(t), \\ \mathbf{r}_e(t) = V(\mathbf{e}_y(t) + C\mathbf{z}(t)) - \mathbf{f}(t). \end{cases} \quad (7)$$

定义变量

$$\mathbf{x}_c(t) = \text{col}\{\mathbf{x}(t), \mathbf{z}(t)\}, \mathbf{e}(t) = \text{col}\{\mathbf{e}_u(t), \mathbf{e}_y(t)\}, \mathbf{v}(t) = \text{col}\{\boldsymbol{\omega}(t), \mathbf{f}(t)\},$$

可得增广系统如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_c(t) = A_c \mathbf{x}_c(t) + B_c \mathbf{e}(t) + E_c \mathbf{v}(t), \\ \mathbf{r}_e(t) = C_c \mathbf{x}_c(t) + D_c \mathbf{e}(t) + F_c \mathbf{v}(t), \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$A_c = \begin{bmatrix} A_k & -BK \\ 0 & A_l \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & -L \end{bmatrix},$$

$$E_c = \begin{bmatrix} E_1 & E_2 \\ E_1 & E_2 \end{bmatrix}, C_e = [0 \quad VC],$$

$$D_e = [0 \quad V], F_e = [0 \quad -I].$$

同时,由式(8)可得

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_u(t) = K[A_u \mathbf{x}_c(t) + B_u \mathbf{e}(t)], \\ \dot{\mathbf{x}}_y(t) = C[A_y \mathbf{x}_c(t) + B_y \mathbf{e}(t) + E_y \mathbf{v}(t)], \end{cases} \quad (9)$$

其中:

$$A_u = [A + BK \quad -(A + BK - LC)],$$

$$B_u = [B \quad L], E_y = [E_1 \quad E_2],$$

$$B_y = [B \quad 0], A_y = [A + BK \quad -BK].$$

本文旨在解决基于双通道事件触发的USV的同时故障检测和控制问题,即使得:

1) 增广系统(8)是渐近稳定的;

2) 零初始条件下,增广系统(8)具有 $H_\infty$ 性能指标 $\gamma$ ,即对于任意 $\mathbf{v}(t) \in \mathcal{L}_2$ 满足

$$\int_{t_0}^{\infty} \mathbf{r}_e^T(t) \mathbf{r}_e(t) dt \leq \gamma^2 \int_{t_0}^{\infty} \mathbf{v}^T(t) \mathbf{v}(t) dt. \quad (10)$$

本文主要结果的证明中用到以下引理:

**引理 1**<sup>[24]</sup> 给定一致连续函数 $\chi(t) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, t \in [0, \infty)$ . 假设 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \chi(s) ds$ 存在且有限,则可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \chi(t) = 0$ .

### 3 主要结果

本部分进行了积分型事件触发通讯机制下的故障检测器和控制器的联合设计,并根据设计的SFDC模块进行了事件触发参数的设计.

**定理 1** 给定正值参数 $\rho_1, \rho_2, \gamma, \theta \in (0, 1)$ , 以及SFDC增益 $L, V, K$ , 如果存在矩阵 $P_1 > 0, P_2 > 0, \Omega_u > 0, \Omega_y > 0$ 使不等式(11)成立, 则增广系统(8)是渐近稳定的且具有 $H_\infty$ 性能指标 $\gamma$ .

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} & \Gamma_{14} \\ * & \Gamma_{22} & 0 & \Gamma_{24} \\ * & * & \Gamma_{33} & \Gamma_{34} \\ * & * & * & \Gamma_{44} \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

其中:

$$\Gamma_{11} = \begin{bmatrix} [P_1 A_k]_s + \rho_1^2 I & -P_1 B K \\ * & [P_2 A_l]_s + \rho_1^2 I \end{bmatrix},$$

$$\Gamma_{12} = \begin{bmatrix} P_1 E_1 & P_1 E_2 \\ P_2 E_1 & P_2 E_2 \end{bmatrix}, \Gamma_{13} = \begin{bmatrix} P_1 B & 0 \\ 0 & -P_2 L \end{bmatrix},$$

$$\Gamma_{22} = \text{diag}\{(\rho_2^2 - \gamma^2)I, (\rho_2^2 - \gamma^2)I\},$$

$$\Gamma_{14} = [0 \quad VC]^T, \Gamma_{44} = -I, \Gamma_{24} = [0 \quad -I]^T,$$

$$\Gamma_{33} = \text{diag}\{-\Omega_u, -\Omega_y\}, \Gamma_{34} = [0 \quad V]^T,$$

且ETC(6)的参数满足

$$\begin{cases} \tau_u \leq \min\left\{ \sqrt{\frac{2\delta_u}{\bar{\lambda}_u(L_1^2 + \frac{L_2^2 \theta}{\lambda \tilde{\rho}_1^2})}}, \sqrt{\frac{\delta_{v_u}}{\bar{\lambda}_u \|K\|^2 \frac{L_2^2}{\lambda \tilde{\rho}_2^2}}} \right\}, \\ \tau_y \leq \min\left\{ \sqrt{\frac{2\delta_{v_y}}{3\bar{\lambda}_y(J_1^2 + \frac{J_2^2 \theta}{\lambda \tilde{\rho}_1^2})}}, \sqrt{\frac{2\delta_{v_y}}{3\bar{\lambda}_y \|C\|^2 (J_3^2 + \frac{J_2^2}{\lambda \tilde{\rho}_2^2})}} \right\}, \\ \delta_u \|K_c\|^2 + \delta_y \|C_c\|^2 < \theta \rho_1^2, \\ \delta_{v_u} + \delta_{v_y} < \rho_2^2, \end{cases} \quad (12)$$

其中:

$$L_1 = \|A_u\|, L_2 = \|B_u\|, J_1 = \|A_y\|, J_2 = \|B_y\|,$$

$$J_3 = \|E_y\|, K_c = [K \quad -K], C_c = [C \quad 0],$$

$$\underline{\lambda} = \lambda_{\min}(\Omega), \Omega = \text{diag}\{\Omega_u, \Omega_y\}, \bar{\lambda}_u = \lambda_{\max}(\Omega_u),$$

$$\bar{\lambda}_y = \lambda_{\max}(\Omega_y), \tilde{\rho}_i = \frac{1}{\rho_i} (i = 1, 2).$$

**证** 构建Lyapunov函数如下:

$$V(t) = \mathbf{x}^T(t) P_1 \mathbf{x}(t) + \mathbf{z}^T(t) P_2 \mathbf{z}(t). \quad (13)$$

为了建立增广系统的 $H_\infty$ 性能, 定义函数

$$\mathfrak{J}(t) = \dot{V}(t) + \mathbf{r}_e^T(t) \mathbf{r}_e(t) - \gamma^2 \mathbf{v}^T(t) \mathbf{v}(t). \quad (14)$$

定义 $\boldsymbol{\xi}(t) = \text{col}\{\mathbf{x}_c(t), \mathbf{v}(t), \mathbf{e}(t)\}$ , 则对给定正数 $\rho_1, \rho_2$ 可得

$$\mathfrak{J}(t) \leq \boldsymbol{\xi}^T(t) \Phi \boldsymbol{\xi}(t) + \mathbf{e}^T(t) \Omega \mathbf{e}(t) - \rho_1^2 \mathbf{x}_c^T(t) \mathbf{x}_c(t) - \rho_2^2 \mathbf{v}^T(t) \mathbf{v}(t),$$

其中:

$$\Phi = \tilde{\Phi} + \tilde{\Gamma}^T \tilde{\Gamma}, \tilde{\Gamma} = [C_e \quad F_e \quad D_e],$$

$$\tilde{\Phi} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ * & \Gamma_{22} & 0 \\ * & * & \Gamma_{33} \end{bmatrix}.$$

由Schur可知, 不等式 $\Phi < 0$ 等价于不等式(11). 同时, 假设如下不等式成立:

$$\int_{t_0}^t \mathbf{e}^T \Omega \mathbf{e} ds \leq \theta \rho_1^2 \int_{t_0}^t \mathbf{x}_c^T \mathbf{x}_c ds + \rho_2^2 \int_{t_0}^t \mathbf{v}^T \mathbf{v} ds. \quad (15)$$

下面证明不等式(15)在积分型ETC(6)下成立. 由式(9)可得

$$\frac{d}{dt} \|\mathbf{e}_u(t)\| \leq L_{1,u} \|\mathbf{x}_c(t)\| + L_{2,u} \|\mathbf{e}(t)\|, \quad (16a)$$

$$\frac{d}{dt} \|\mathbf{e}_y(t)\| \leq J_{1,y} \|\mathbf{x}_c(t)\| + J_{2,y} \|\mathbf{e}(t)\| + J_{3,y} \|\mathbf{v}(t)\|, \quad (16b)$$

其中:

$$\begin{aligned} L_{1,u} &= \|K\|L_1, L_{2,u} = \|K\|L_2, L_1 = \|A_u\|, \\ L_2 &= \|B_u\|, J_{1,y} = \|C\|J_1, J_{2,y} = \|C\|J_2, \\ J_{3,y} &= \|C\|J_3, J_1 = \|A_y\|, J_2 = \|B_y\|, J_3 = \|E_y\|. \end{aligned}$$

定义系统触发时刻  $\{t_k\}_{k=1}^\infty = \{t_k^r\} \cup \{t_k^p\}$ . 首先证明不等式(15)在  $t \in [t_0, t_1)$  上成立. 定义

$$\begin{aligned} T_0 &= \inf_{t > t_0} \{t \mid \int_{t_0}^t e^T \Omega e ds = \\ &\quad \theta \rho_1^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \rho_2^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{v}\|^2 ds\}. \end{aligned}$$

考虑  $e(t_0) = 0$ , 因此  $T_0$  存在. 明显地, 若  $T_0 \geq t_1$ , 不等式(15)在  $t \in [t_0, t_1)$  上成立. 若  $T_0 < t_1$ , 对于  $t \in [t_0, T_0]$  可得

$$\int_{t_0}^t e^T \Omega e ds \leq \theta \rho_1^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \rho_2^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{v}\|^2 ds. \quad (17)$$

对于  $e_u(t)$ , 考虑  $T_0 - t_0 \leq \tau_u$ . 由式(16a)可得

$$\|e_u\|^2 \leq 2(t - t_0) \int_{t_0}^t (L_{1,u} \|\mathbf{x}_c\|)^2 + (L_{2,u} \|e\|)^2 ds.$$

对上式积分可得

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t \|e_u\|^2 ds &\leq (t - t_0)^2 \int_{t_0}^t (L_{1,u} \|\mathbf{x}_c\|)^2 + \\ &\quad (L_{2,u} \|e\|)^2 ds. \end{aligned}$$

由式(17), 对于  $t \in [t_0, T_0]$ , 可得

$$\underline{\lambda} \int_{t_0}^t \|e\|^2 ds \leq \theta \rho_1^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \rho_2^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{v}\|^2 ds,$$

其中  $\underline{\lambda} = \lambda_{\min}(\Omega)$ . 由式(12), 对于  $t \in [t_0, T_0]$ , 下式成立:

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t e_u^T \Omega_u e_u ds &\leq \\ \bar{\lambda}_u (t - t_0)^2 (L_{1,u}^2 + \frac{L_{2,u}^2 \theta}{\underline{\lambda} \tilde{\rho}_1^2}) \int_{t_0}^t \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \\ \bar{\lambda}_u (t - t_0)^2 \frac{L_{2,u}^2}{\underline{\lambda} \tilde{\rho}_2^2} \int_{t_0}^t \|\mathbf{v}\|^2 ds &\leq \\ \delta_u \|K_c\|^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \delta_{v_u} \int_{t_0}^t \|\mathbf{v}\|^2 ds, \end{aligned} \quad (18)$$

其中:  $K_c = [K \quad -K]$ ,  $\bar{\lambda}_u = \lambda_{\max}(\Omega_u)$ ,  $\tilde{\rho}_i = \frac{1}{\rho_i}$  ( $i = 1, 2$ ).

考虑情况  $T_0 - t_0 > \tau_u$ . 根据ETC(6b)和式(18), 对于  $t \in [t_0, t_1)$ , 下式成立:

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t e_u^T \Omega_u e_u ds &\leq \delta_u \|K_c\|^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \\ &\quad \delta_{v_u} \int_{t_0}^t \|\mathbf{v}\|^2 ds. \end{aligned} \quad (19)$$

同理, 可对  $e_y(t)$  进行分析, 可得

$$\int_{t_0}^t e_y^T \Omega_y e_y ds \leq \delta_y \|C_c\|^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{x}_c\|^2 ds +$$

$$\delta_{v_y} \int_{t_0}^t \|\mathbf{v}\|^2 ds. \quad (20)$$

从而, 结合式(19)–(20)和事件触发参数(12), 对于  $t \in [t_0, t_1)$ , 下式成立:

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t e^T \Omega e ds &= \\ \int_{t_0}^t e_u^T \Omega_u e_u ds + \int_{t_0}^t e_y^T \Omega_y e_y ds &< \\ \theta \rho_1^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \rho_2^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{v}\|^2 ds. \end{aligned} \quad (21)$$

明显地, 上式与  $T_0$  的定义矛盾. 因此,  $T_0 \geq t_1$  在ETC (6)下恒成立, 即不等式(15)在  $t \in [t_0, t_1)$  上可由式(12)保证.

接下来, 对区间  $[t_k, t_{k+1})$  进行分析. 首先假设不等式(15)对  $t \in [t_0, t_k)$  成立, 定义  $T_k$  为

$$\begin{aligned} T_k &= \inf_t \{t > t_k \mid \int_{t_0}^t e^T \Omega e ds = \\ &\quad \theta \rho_1^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \rho_2^2 \int_{t_0}^t \|\mathbf{v}\|^2 ds\}. \end{aligned}$$

若事件触发器1和2在  $t_k$  时同时触发, 明显地

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_k} e^T \Omega e ds &\leq \\ \theta \rho_1^2 \int_{t_0}^{t_k} \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \rho_2^2 \int_{t_0}^{t_k} \|\mathbf{v}\|^2 ds. \end{aligned}$$

若事件触发器1或2在  $t_k$  时没有触发, 例如触发器2没有触发, 可得

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_k} e_u \Omega_u e_u ds &\leq \\ \delta_u \|K_c\|^2 \int_{t_0}^{t_k} \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \delta_{v_u} \int_{t_0}^{t_k} \|\mathbf{v}\|^2 ds. \end{aligned}$$

从而证明了  $T_k$  的存在性. 同时, 若  $T_k \geq t_{k+1}$ , 不等式(15)在区间  $[t_k, t_{k+1})$  上显然成立. 若  $T_k < t_{k+1}$ , 对于  $t \in [t_0, t_k)$ , 不等式(17)在  $t \in [t_k, T_k]$  上成立.

对  $e_u(t)$ , 分别讨论  $t_k^r = t_k$  和  $t_k^r < t_k$  的情况.

若  $t_k^r = t_k$ , 不等式(19)显然在  $t \in [t_0, t_k]$  上成立. 通过分析  $T_k - t_k \geq \tau_u$  和  $T_k - t_k < \tau_u$  的情形, 对于  $t \in [t_k, t_{k+1})$ , 可得

$$\begin{aligned} \int_{t_k}^t e_u^T \Omega_u e_u ds &\leq \\ \delta_u \|K_c\|^2 \int_{t_k}^t \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \delta_{v_u} \int_{t_k}^t \|\mathbf{v}\|^2 ds. \end{aligned} \quad (22)$$

若  $t_k^r < t_k$ , 则存在  $\bar{k}$  满足  $0 \leq \bar{k} < k$  且  $t_k^r = t_{\bar{k}}$ . 从而不等式(22)在  $t \in [t_k, t_{k+1})$  上成立.

在区间  $t \in [t_k, t_{k+1})$  上对  $e_y(t)$  进行分析可得

$$\begin{aligned} \int_{t_k}^t e_y^T \Omega_y e_y ds &\leq \\ \delta_y \|C_c\|^2 \int_{t_k}^t \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \delta_{v_y} \int_{t_k}^t \|\mathbf{v}\|^2 ds. \end{aligned} \quad (23)$$

结合式(22)–(23), 在  $t \in [t_k, t_{k+1})$  上下式成立:

$$\int_{t_k}^t e^T \Omega e ds < \theta \rho_1^2 \int_{t_k}^t \|\mathbf{x}_c\|^2 ds + \rho_2^2 \int_{t_k}^t \|\mathbf{v}\|^2 ds.$$

从而,在  $t \in [t_k, t_{k+1})$  上下式成立:

$$\int_{t_0}^t e^T \Omega e ds < \theta \rho_1^2 \int_{t_0}^t \|x_c\|^2 ds + \rho_2^2 \int_{t_0}^t \|v\|^2 ds,$$

这与  $T_k$  的定义矛盾. 因此  $T_k \geq t_k$  在事件触发机制下总是成立的, 即不等式(15)在式(12)给定的事件触发参数下对于区间  $t \in [t_0, t_{k+1})$  成立.

基于上述分析, 可得

$$\begin{aligned} \int_0^t \mathfrak{J}(s) ds \leq & \int_0^t \xi^T \Phi \xi ds + \int_0^t e^T \Omega e - \rho_1^2 x_c^T x_c - \rho_2^2 v^T v ds \leq \\ & \int_0^t e^T \Omega e - \rho_1^2 x_c^T x_c - \rho_2^2 v^T v ds \leq 0. \end{aligned}$$

当  $t \rightarrow \infty$ , 在零初始条件下, 不等式(10)成立. 当  $v \equiv 0$ , 可得

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t e^T \Omega e ds \leq & \theta \rho_1^2 \int_{t_0}^t x_c^T x_c ds, \\ V(t) - V(0) \leq & -(1 - \theta) \rho_1^2 \int_{t_0}^t x_c^T x_c ds < 0, \end{aligned}$$

即增广系统是稳定的. 同时, 函数

$$-(1 - \theta) \rho_1^2 \int_{t_0}^T x_c^T x_c ds$$

的极限存在且以  $-V(t_0)$  为下界. 由引理1可知,  $\|x_c\|^2$  收敛到零. 因此增广系统(8)是渐近稳定的且具有  $H_\infty$  性能  $\gamma$ . 证毕.

**注2** 在定理1中, SFDC增益和未知矩阵变量耦合, 不能用已有的工具箱进行求解. 因此, 提出以下定理求取故障检测器增益和控制器增益.

**定理2** 给定正值参数  $\rho_i, \kappa_i (i = 1, 2), \gamma, \theta \in (0, 1)$ , 如果存在对称矩阵  $W > 0, \Omega_u > 0, \bar{\Omega}_y > 0$ , 可逆矩阵  $N$  及矩阵  $\bar{K}, \bar{L}, \bar{V}$  满足约束(24)和(25), 则增广系统(8)是渐近稳定的且具有  $H_\infty$  性能指标  $\gamma$ .

$$\begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} & \Pi_{13} & \Pi_{14} & \Pi_{15} \\ * & \Pi_{22} & 0 & \Pi_{24} & 0 \\ * & * & \Pi_{33} & \Pi_{34} & 0 \\ * & * & * & \Pi_{44} & 0 \\ * & * & * & * & \Pi_{55} \end{bmatrix} < 0, \quad (24)$$

$$CW = N^T C, \quad (25)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Pi_{11} &= \begin{bmatrix} \kappa_1 [AW + B\bar{K}]_s & -\kappa_1 B\bar{K} \\ * & \kappa_2 [AW - \bar{L}C]_s \end{bmatrix}, \\ \Pi_{12} &= \begin{bmatrix} \kappa_1 E_1 & \kappa_1 E_2 \\ \kappa_2 E_1 & \kappa_2 E_2 \end{bmatrix}, \Pi_{13} = \begin{bmatrix} \kappa_1 B & 0 \\ * & -\kappa_2 \bar{L} \end{bmatrix}, \\ \Pi_{14} &= [0 \ \bar{V} \ C]^T, \Pi_{24} = [0 \ -I]^T, \\ \Pi_{34} &= [0 \ \bar{V}]^T, \Pi_{15} = \begin{bmatrix} W & 0 \\ 0 & W \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{22} &= \begin{bmatrix} (\rho_2^2 - \gamma^2)I & 0 \\ 0 & (\rho_2^2 - \gamma^2)I \end{bmatrix}, \\ \Pi_{33} &= \begin{bmatrix} -\Omega_u & 0 \\ 0 & -\bar{\Omega}_y \end{bmatrix}, \Pi_{55} = \begin{bmatrix} -\bar{\rho}_1^2 & 0 \\ 0 & -\bar{\rho}_1^2 \end{bmatrix}, \\ \Pi_{44} &= -I. \end{aligned}$$

且ETC参数满足式(12), 其中SFDC增益及矩阵  $\Omega_y$  可由下式求得:

$$\begin{cases} K = \bar{K}W^{-1}, L = \bar{L}N^{-T}, \\ V = \bar{V}N^{-T}, \Omega_y = N^{-1}\bar{\Omega}_yN^{-T}. \end{cases} \quad (26)$$

**证** 假设  $P_1^{-1} = \frac{1}{\kappa_1}W, P_2^{-1} = \frac{1}{\kappa_2}W$ , 其中  $\kappa_1, \kappa_2$  为给定正数. 定义  $F = \text{diag}\{W, W, I, I, I, N, I\}$ . 将不等式(11)前后分别乘以矩阵  $F$  和  $F^T$ . 定义  $\bar{K} = KW, \bar{L} = LN^T, \bar{V} = VN^T, \bar{\Omega}_y = N\Omega_yN^T$ . 由Schur补, 不等式(11)可由不等式(24)保证. 同时, SFDC增益以及矩阵  $\Omega_y$  可由式(26)求得. 采用定理1中的方法, 可证得增广系统(8)的渐近稳定性和  $H_\infty$  性能. 证毕.

**注3** 定理2给出了SFDC和ETC的设计准则, 但是定理2中的等式约束(25)不能用已有的工具箱进行有效求解. 为了解决这一问题, 提出下面的定理消除等式约束.

**定理3** 给定正值参数  $\gamma, \rho_i, \kappa_i (i = 1, 2)$ , 如果存在矩阵  $W_{11} > 0, W_{22} > 0, \Omega_u > 0, \bar{\Omega}_y > 0, \bar{K}, \bar{L}, \bar{V}$  使得不等式(27)成立, 则增广系统(8)是渐近稳定的且具有  $H_\infty$  性能指标  $\gamma$ .

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Pi}_{11} & \tilde{\Pi}_{12} & \tilde{\Pi}_{13} & \tilde{\Pi}_{14} \\ * & \tilde{\Pi}_{22} & 0 & 0 \\ * & * & \tilde{\Pi}_{33} & 0 \\ * & * & * & \tilde{\Pi}_{44} \end{bmatrix} < 0, \quad (27)$$

其中: 变量  $\tilde{\Pi}_{ij}$  可由  $\Pi_{ij}$  通过替换  $W$  为  $X_1^T W_{11} X_1 + X_2^T W_{22} X_2$  得到(其中  $X_1$  和  $X_2$  在式(28)中给出), 且ETC参数满足式(12). 同时, SFDC增益以及矩阵  $\Omega_y$  可由下式求得:

$$\begin{aligned} K &= \bar{K}(X_1^T W_{11} X_1 + X_2^T W_{22} X_2)^{-1}, \\ L &= \bar{L}Y\Sigma W_{11}^{-1}\Sigma^{-1}Y^T, \\ V &= \bar{V}Y\Sigma W_{11}^{-1}\Sigma^{-1}Y^T, \\ \Omega_y &= (Y\Sigma^{-1}W_{11}^{-1}\Sigma Y^T)\bar{\Omega}_y(Y\Sigma W_{11}^{-1}\Sigma^{-1}Y^T). \end{aligned}$$

**证** 对于行满秩矩阵存在正交矩阵  $X \in \mathbb{R}^{n \times n}, Y \in \mathbb{R}^{p \times p}$  满足

$$XC^T Y = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} C^T Y = \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

其中:  $X_1 \in \mathbb{R}^{p \times n}, X_2 \in \mathbb{R}^{(n-p) \times n}, \Sigma = \text{diag}\{s_1, s_2, \dots, s_p\}, s_i$  表示矩阵  $C^T$  的非零特征值. 根据文献

[25]中的引理2, 若矩阵 $W$ 可表示为

$$W = X^T \begin{bmatrix} W_{11} & 0 \\ 0 & W_{22} \end{bmatrix} X = X_1^T W_{11} X_1 + X_2^T W_{22} X_2,$$

其中:  $W_{11} > 0, W_{22} > 0$ , 则存在矩阵 $N$ 满足 $CW = N^T C$ . 将式(24)中的变量 $W$ 替换为 $X_1^T W_{11} X_1 + X_2^T W_{22} X_2$ 可得不等式(27). 由此, 定理2中的约束式(24)和式(25)可由式(27)保证. 采用相同的方法, 可证得增广系统(8)的渐近稳定性和 $H_\infty$ 性能 $\gamma$ . 证毕.

**注4** 定理3给出了SFDC增益和事件触发权值矩阵的设计准则. 通过求解凸优化问题(27)容易得到最优 $H_\infty$ 性能指标 $\gamma$ . 然而, 这就可能导致事件触发条件(6)中的静默时间、触发阈值变小, 使得触发条件更易被触发, 网络通信负载大大增加. 因此, 在实际中通常需要在故障检测性能和网络通信负载之间寻找折中点. 在满足故障检测性能的前提下, 尽量有效降低通信网络的带宽占用.

**注5** 本文所提出的SFDC设计方法可离线获取控制器和故障检测滤波器增益. 式(6)中积分型事件触发机制实际中可由累加器得以实现, 从而大大降低了计算负载.

#### 4 仿真示例

为了阐明所提出的事件触发的SFDC方法的有效性, 考虑实际USV系统的参数如下所示<sup>[16]</sup>:

$$\begin{aligned} T_v &= 0.5263, T_r = 0.4211, K_{dr} = -0.0103, \\ K_{dp} &= -0.0202, K_{dv} = 0.0380, K_{vp} = 0.7980, \\ K_{vr} &= -0.4600, \omega_n = 1.6300, \zeta = 2.0840. \end{aligned}$$

假设

$$\begin{aligned} E_2 &= [0.6 \quad -1 \quad 2 \quad 0.8 \quad 1]^T, \\ C &= [1 \quad 0.8 \quad 1 \quad -1 \quad 0.6], \end{aligned}$$

USV和SFDC模块的初始状态为 $\hat{x}(0) = x_0 = [-1.3 \quad 1.4 \quad -0.2 \quad -0.7 \quad 0.8]$ . 系统扰动 $\omega_\psi$ 为高斯分布噪声 $N(0, 0.03)$ , 扰动

$$\omega_\phi(t) = \begin{cases} \omega_\phi = 0.3 \sin(2t), & t \in [0, 4], \\ 0, & \text{其他}. \end{cases}$$

设系数 $\kappa_1 = 1.8, \kappa_2 = 1, \rho_1 = 0.35, \rho_2 = 3.16, \theta = 0.96$ . 在平衡故障检测性能和网络通信负载后, 选取 $H_\infty$ 性能指标 $\gamma = 13.6$ , 由定理3可得SFDC增益

$$\begin{aligned} K &= [2.6122 \quad 3.3818 \quad 4.3608 \quad -2.6196 \quad 2.6896], \\ L &= [0.4295 \quad 0.3455 \quad 0.4283 \quad -0.4276 \quad 0.2569], \\ V &= 0.0689. \end{aligned}$$

基于约束(12), ETC参数设计如下:

$$\begin{aligned} \tau_y &= 0.0059, \Omega_y = 0.3709, \delta_y = 0.0011, \\ \tau_u &= 0.0060, \Omega_u = 0.5000, \delta_u = 0.0011. \end{aligned}$$

USV系统状态响应如图2所示, 在双通道事件触发的通信机制下系统状态渐近收敛到零点.

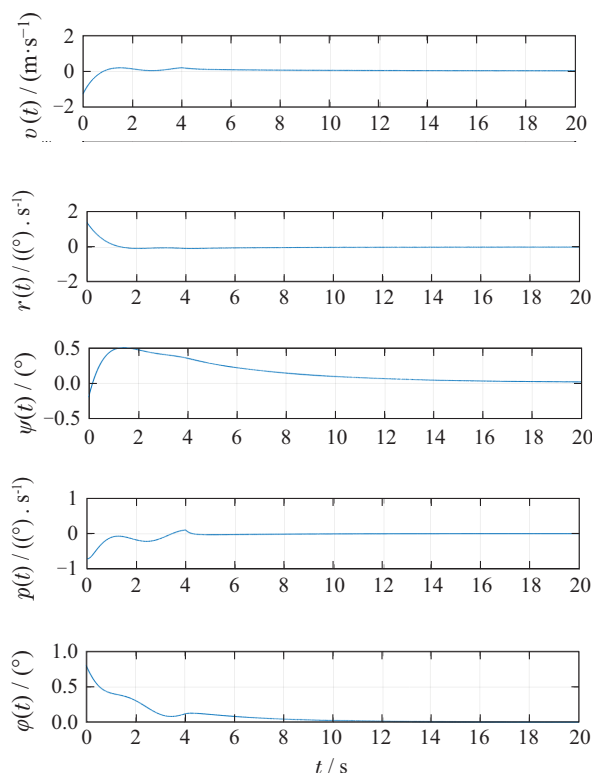


图2 无故障系统状态响应

Fig. 2 Evolution of system states with no fault

为评估所提出方法的故障检测性能, 考虑执行器故障

$$f(t) = \begin{cases} 1, & t \in [3, 8], \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \quad (29)$$

SFDC模块的残差响应如图3所示, 故障的发生( $t = 3$  s)对残差信号产生了显著的影响, 这有助于减小故障检测所需的时间. 残差评价函数及其阈值如图4所示, 其中阈值 $\chi_{th} = 0.0035$ , SFDC模块在 $t = 3.224$  s检测到系统故障, 即故障检测时间为0.224 s. 注意到评价函数可能受到外部扰动信号 $\omega(t)$ 的影响, 所提出的基于事件触发的SFDC方法不仅能够及时检测到系统故障, 也能避免由外部扰动信号造成的误报. 图5为事件触发器的触发时刻和触发间隔, 在20 s的仿真时间里, 事件触发器1和2的发包量仅分别为57和54个, 与周期采样相比, 通讯网络的带宽占用得到了显著降低.

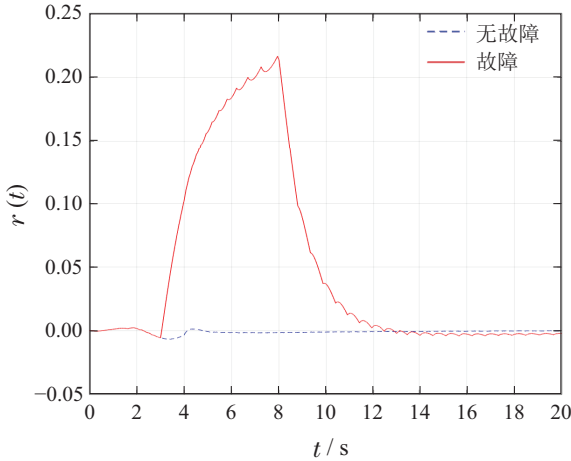


图3 残差响应

Fig. 3 Evolution of residual

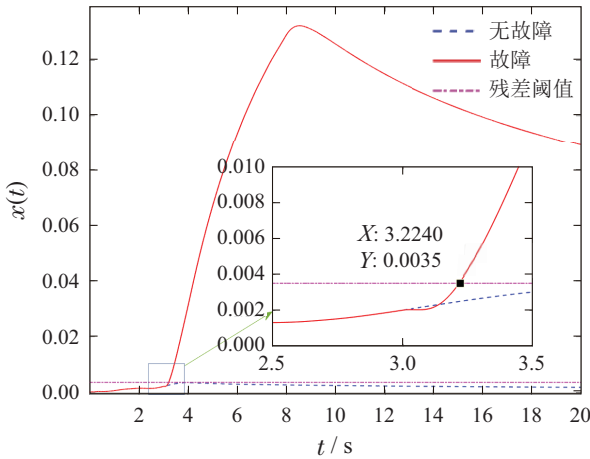
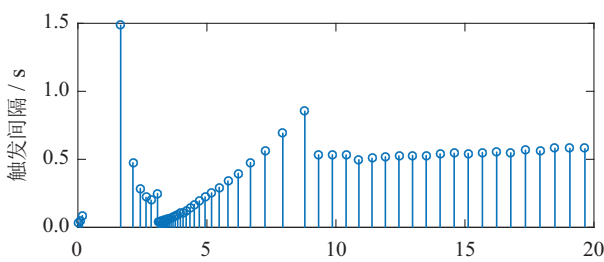
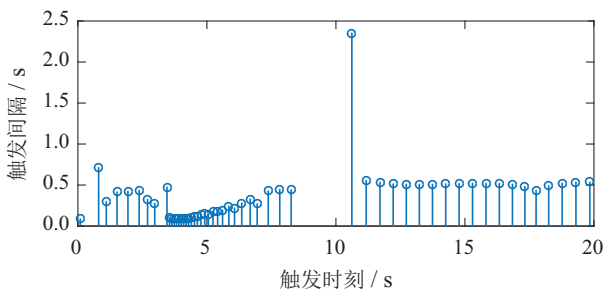


图4 残差评价函数响应

Fig. 4 Residual evaluation response  $\chi(t)$ 

(a) 时间触发器1



(b) 时间触发器2

图5 故障系统触发时刻

Fig. 5 Evolution of event generators with fault

## 5 结论

本文研究了双通道积分型事件触发通信机制下USV系统的SFDC问题. 两个积分型的事件触发器分别部署在传感器一侧和控制器一侧来减少通信资源的占用和系统能源的消耗. 文章提出了基于观测器的故障检测器和控制器联合设计方法, 并基于获得的SFDC增益提出了事件触发条件的设计准则. 所提出的方法不仅能够同时实现USV系统的故障检测和控制, 也能有效降低通讯网络的发包量. 最后, USV系统的仿真结果验证了所提出方法的有效性.

## 参考文献:

- [1] KIM J. Target following and close monitoring using an unmanned surface vehicle. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 50(11): 4233 – 4242.
- [2] QIAN Zhengfang, LU Jiang, SUN Xiaoshuai. Brief analysis of deep learning application in future unmanned surface vehicle platform. *Shipbuilding of China*, 2020, 61(S1): 6 – 13. (钱正芳, 陆江, 孙小帅. 浅析深度学习在未来水面无人艇平台的应用. *中国造船*, 2020, 61(S1): 6 – 13.)
- [3] SHI Y, SHEN C, FANG H, et al. Advanced control in marine mechatronic systems: A survey. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(3): 1121 – 1131.
- [4] JIANG Y, PENG Z, WANG D, et al. Line-of-sight target enclosing of an underactuated autonomous surface vehicle with experiment results. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 16(2): 832 – 841.
- [5] FENG Aiguo, LIU Xixiang, WU Wei. Design of unmanned vehicle navigation remote control system. *Fire Control & Command Control*, 2017, 42(8): 150 – 154. (冯爱国, 刘锡祥, 吴炜. 水面无人艇导航与控制系统设计与实现. *火力与指挥控制*, 2017, 42(8): 150 – 154.)
- [6] PENG Yan, WU Weiqing, LIU Mei, et al. USV tracking control based on cascade GPC-PID. *Control Engineering of China*, 2014, 21(2): 245 – 248. (彭艳, 吴伟清, 刘梅, 等. 无人艇航迹跟踪GPC-PID串级控制. *控制工程*, 2014, 21(2): 245 – 248.)
- [7] WANG Y L, HAN Q L. Network-based modelling and dynamic output feedback control for unmanned marine vehicles in network environments. *Automatica*, 2018, 91: 43 – 53.
- [8] LIU Z Q, WANG Y L, WANG T B. Incremental predictive control-based output consensus of networked unmanned surface vehicle formation systems. *Information Sciences*, 2018, 457: 166 – 181.
- [9] WU L, HO D W C. Fuzzy filter design for It stochastic systems with application to sensor fault detection. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, 17(1): 233 – 242.
- [10] CHEN Zhengquan, HAN Lu, HOU Yandong. Fault detection and estimation based on adaptive iterative learning algorithm for nonlinear systems. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(4): 837 – 846. (陈政权, 韩路, 侯彦东. 基于自适应迭代学习算法的一类非线性系统故障检测与估计. *控制理论与应用*, 2020, 37(4): 837 – 846.)
- [11] WANG Shenquan. *Researches on robust fault deletion and fault tolerant control of time-delay systems*. Shenyang: Northeastern University, 2013. (王申全. 时滞系统的鲁棒故障检测与容错控制方法研究. 沈阳: 东北大学, 2013.)
- [12] CHU Xiaoyan, NIAN Xiaohong, LIU Jingjing. Fault detection and isolation for multi-motor web-winding system via robust sliding mode observers. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(6): 795



- 804.  
(楚晓艳, 年晓红, 刘静静. 基于鲁棒滑模观测器的多电机卷绕系统故障检测和隔离. 控制理论与应用, 2018, 35(6): 795 – 804.)
- [13] KHOSROWJERDI M J, NIKOUKHAH R, SAFARI-SHAD N. A mixed  $H_2/H_\infty$  approach to simultaneous fault detection and control. *Automatica*, 2004, 40(2): 261 – 267.
- [14] ZHONG G X, YANG G H. Simultaneous control and fault detection for discrete-time switched delay systems under the improved persistent dwell time switching. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 10(7): 814 – 824.
- [15] WU Xiaoxue, DING Dawei, REN Yingying, et al. Simultaneous fault detection and control of two-dimensional fornasini-marchesini systems. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(1): 224 – 234.  
(吴小雪, 丁大伟, 任莹莹, 等. 二维FM系统的同时故障检测与控制. 自动化学报, 2021, 47(1): 224 – 234.)
- [16] WANG Y L, HAN Q L. Network-based fault detection filter and controller coordinated design for unmanned surface vehicles in network environments. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(5): 1753 – 1765.
- [17] LIU Yuanshan, YANG Hongyong, LIU Fan, et al. Active disturbance rejection control for multi-agent systems based on distributed event-triggered strategy. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(5): 969 – 977.  
(刘远山, 杨洪勇, 刘凡, 等. 事件触发下多智能体系统一致性的干扰主动控制. 控制理论与应用, 2020, 37(5): 969 – 977.)
- [18] QIU Aibing, HU Xian, QIU Weidong, et al. An integrated design of event-triggered fault diagnosis and dynamic fault accommodation. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(8): 1159 – 1166.  
(邱爱兵, 胡贤, 邱卫东, 等. 基于事件触发的故障诊断与动态调节集成设计. 控制理论与应用, 2018, 35(8): 1159 – 1166.)
- [19] NING Z, YU J, WANG T. Simultaneous fault detection and control for uncertain discrete-time stochastic systems with limited communication. *Journal of the Franklin Institute*, 2017, 354(17): 7794 – 7811.
- [20] JIANG Y, SHI D, FAN J, et al. Set-valued feedback control and its application to event-triggered sampled-data systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(11): 4965 – 4972.
- [21] MOUSAVI S H, GHODRAT M, MARQUEZ H J. Integral-based event-triggered control scheme for a general class of non-linear systems. *IET Control Theory & Applications*, 2015, 9(13): 1982 – 1988.
- [22] YU H, HAO F. Input-to-state stability of integral-based event-triggered control for linear plants. *Automatica*, 2017, 85: 248 – 255.
- [23] WANG A, MU B, SHI Y. Consensus control for a multi-agent system with integral-type event-triggering condition and asynchronous periodic detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(7): 5629 – 5639.
- [24] KHALIL H K, GRIZZLE J W. *Nonlinear Systems*. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall, 2002.
- [25] YANG F, WANG Z, HUNG Y S, et al.  $H_\infty$  control for networked systems with random communication delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(3): 511 – 518.
- [26] NING Z, YU J, PAN Y, et al. Adaptive event-triggered fault detection for fuzzy stochastic systems with missing measurements. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2017, 26(4): 2201 – 2212.

#### 作者简介:

王旭东 助理教授, 目前研究方向为故障诊断、容错控制、网络化控制系统、事件触发机制等, E-mail: wang\_xudong@foxmail.com;

费中阳 教授, 目前研究方向为2-D系统、鲁棒控制、时滞系统、切换系统、事件触发控制, E-mail: feizhongyang@gmail.com;

杨柳 博士研究生, 目前研究方向为2-D系统、切换系统、事件触发控制, E-mail: yangliu\_hit@163.com.