

## NNCS 混合容错控制方法

王君<sup>1†</sup>, 姚晓婉<sup>1,2</sup>, 李炜<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 青岛理工大学 琴岛学院, 山东 青岛 266106)

**摘要:** 针对执行器任意失效故障, 研究离散事件触发通讯机制下不确定 NNCS 主被动混合鲁棒  $H_\infty$  容错控制器设计问题, 该控制器对外界有限能量扰动具有良好的抑制性能. 首先, 基于 T-S 模糊模型, 建立离散事件触发通讯机制下不确定 NNCS 闭环故障模型; 然后, 基于  $H_\infty$  控制思想设计故障检测观测器并得到不确定 NNCS 鲁棒  $H_\infty$  容错控制设计准则; 最后, 通过 Matlab 仿真算例验证所设计的控制律对系统性能的改善以及事件触发条件的引入对网络资源的节约.

**关键词:** 主被动混合鲁棒容错控制; 非线性网络化控制系统; 离散事件触发机制; 故障检测

**中图分类号:** TQ302.8

**文献标志码:** A

## Hybrid fault-tolerant control method research of NNCS

WANG Jun<sup>1†</sup>, YAO Xiao-wan<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Qindao College, Qingdao Technological University, Qingdao 266106, China)

**Abstract:** Aimed at any actuator fault with failure, the design of a hybrid active-passive robust  $H_\infty$  fault-tolerant controller of uncertain nonlinear networked control system (NNCS) based on discrete event-triggered communication scheme (DETCS) is investigated, which has well rejection capability against external finite-energy disturbances. Firstly, a closed-loop fault model based on T-S fuzzy model is subsequently established for the uncertain NNCS under the DETCS. Then based on  $H_\infty$  control theory, a fault detection observer is designed and the design criteria of robust  $H_\infty$  fault-tolerant control for the uncertain NNCS is derived as well. Finally, Matlab numerical simulation results are presented to demonstrate the improvement of system performance benefits of the proposed control law and illustrate the saving of network resources derived from the introduction of event-triggered condition.

**Keywords:** hybrid active-passive robust fault-tolerant control; nonlinear networked control system; discrete event-triggered communication scheme; fault detection

## 0 引言

在实际的 NCS 中, 执行器故障往往是导致控制系统性能变坏甚至崩溃的原因之一, 由它所产生的安全性问题无论在理论上还是实际工程实践中都很难解决. 鲁棒容错控制 (FTC) 技术的出现不仅可以使得系统保持渐近稳定性, 而且能够保证系统的性能指标在可接受的范围内<sup>[1-2]</sup>. 一般而言, FTC 方法可以分为两大类: 被动容错控制 (PFTC)<sup>[3-4]</sup> 和主动容错控制 (AFTC)<sup>[5]</sup>. PFTC 是通过设计一个固定的控制器对一定范围内可预见的故障进行容错, 一旦故障发生, 它可以立即对故障进行容错而不需要借助于在线的故障检测观测器. 然而, PFTC 的容错能力有限, 保守

性较强. AFTC 需要一个故障检测与诊断 (FDD) 子系统来实时地对故障进行检测, 并根据检测到的故障信息重组/重构一个新的控制器来补偿故障带来的影响. 但是, 故障检测过程中误差的存在以及故障检测和控制器重组/重构之间的时延都可能导致系统失稳<sup>[6-7]</sup>. 虽然二者均有不可忽视的缺点, 但在 NCS 中结合二者优点的主-被动混合容错控制方法尚未得到广泛研究, 目前可查阅的文献仅有文献 [8].

除此之外, 现有的关于 NCS 容错控制研究的文献中大多采用时间触发通讯机制 (PTTCS), 数据被周期性地传输, 尽管采用 PTTCS 可以使系统的分析和设计过程大大简化, 但会导致严重的冗余问

收稿日期: 2016-11-15; 修回日期: 2017-03-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61463030, 61563031).

作者简介: 王君 (1973—), 女, 教授, 博士, 从事动态系统的故障诊断与容错控制、工业过程先进控制理论与应用等研究; 姚晓婉 (1992—), 女, 硕士生, 从事网络化控制系统的故障诊断与容错控制的研究.

†通讯作者. E-mail: wangj31901@163.com

题. 为了解决PTTCS所带来的问题, 一些学者提出了离散事件触发通讯机制<sup>[9-10]</sup>(DETCS), 其控制思想就是在保证NCS具有一定性能(如稳定)的情况下, 一旦预先设定好的事件触发条件成立, 控制任务便随即被执行, 从而能够大大节约有限的网络资源.

根据目前人们在NCS的容错设计中主要还是采用“时间触发通讯机制”下的AFTC或PFTC的现状, 并考虑到实际系统或多或少存在的不确定性和非线性特性<sup>[11-12]</sup>, 以及可能受到的外界有限能量扰动的影响, 本文采用状态反馈控制策略, 以基于T-S模糊模型的NNCS为研究对象, 针对执行器任意失效的故障情形, 通过建立“事件触发”闭环故障系统模型研究事件触发机制下NNCS主-被动混合鲁棒容错控制器的设计问题, 以使得系统在尽可能节约网络资源的情况下, 对已知和未知的故障均能有效容错, 并对外界有限能量扰动具有良好的抑制性能, 进而使得故障系统达到更为满意的控制效果.

## 1 系统描述

### 1.1 系统模型

考虑由T-S模糊模型描述的非线性系统, 第*i*条模糊规则可表示如下:

模糊规则  $R_i$ : 如果  $\theta_1(t)$  是  $N_{i1}$ , 且  $\dots$ , 且  $\theta_g(t)$  是  $N_{ig}$ , 则

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) + E_i f(t) + D_i w(t), \\ y(t) = C_i x(t). \end{cases}$$

其中:  $r$  是模糊推理规则数;  $x(t) \in R^n, u(t) \in R^m, y(t) \in R^p$  分别是系统的状态、输入、输出矢量;  $N_{is}(s = 1, 2, \dots, g)$  是模糊集合;  $\theta(t) = [\theta_1(t), \theta_2(t), \dots, \theta_g(t)]^T$  是已知模糊前件变量, 它可以是状态变量、外部干扰、时间函数或者这些向量的某种组合, 但假设其不是控制输入  $u(t)$  的函数, 因为这样可以避免在控制器设计时复杂的解模糊化过程;  $w(t \in R^q)$  是有限能量的外部扰动, 即  $w(t) \in L_2[0, \infty)$ ;  $f(t) \in R^r$  为执行器故障信号, 设  $f(t)$  为加性故障, 满足  $\|f(t)\| \leq f_0$ , 在故障未发生时取值为0, 故障发生时为时变或定值向量;  $A_i, B_i, C_i, D_i, E_i (i = 1, 2, \dots, r)$  分别为对应第*i*个子系统的具有适当维数的常数矩阵;  $\Delta A_i, \Delta B_i$  为满足如下关系的范数有界的时变参数不确定性矩阵:

$$[\Delta A_i \ \Delta B_i] = MF(t)[N_{ai} \ N_{bi}], \quad (1)$$

$M, N_{ai}$  和  $N_{bi}$  为已知的具有适当维数的常数矩阵,  $F(t)$  是具有 Lebesgue 可测的未知时变函数矩阵, 并满足  $F^T F(t) \leq I$ .

由带有单点模糊器、乘积推理机和中心平均解模糊器的模糊推理方法可得相应的模糊模型为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t))((A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) + E_i f(t) + D_i w(t)), \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t))C_i x(t). \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\theta(t) = [\theta_1(t), \theta_2(t), \dots, \theta_g(t)]^T$  且

$$h_i(\theta(t)) = \mu_i(\theta(t)) / \sum_{i=1}^r \mu_i(\theta(t)),$$

$$\mu_i(\theta(t)) = \prod_{s=1}^g N_{is}(\theta_s(t)).$$

$N_{is}(\theta_s(t))$  为  $(\theta_s(t))$  关于模糊集合  $N_{is}$  的隶属函数,  $u_i(\theta(t))$  为第*i*条规则的隶属度. 显然,  $u_i(\theta(t))$  满足  $\mu_i(\theta(t)) \geq 0 (i = 1, 2, \dots, r)$  且  $\sum_{i=1}^r \mu_i(\theta(t)) > 0$ . 因此, 归一化后的模糊隶属函数满足  $h_i(\theta(t)) \geq 0$  且  $\sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) = 1$ .

### 1.2 DETCS的引入

DETCS是指在NNCS中引入一个通讯约束条件, 根据采样周期内系统的状态或者状态误差是否满足事件触发条件来确定数据是否被传输. 这将使得系统在保持相应期望性能的情况下, 节省大量的网络资源, 从而提高网络利用的效率. DETCS下NNCS主被动混合鲁棒容错控制的结构如图1所示.

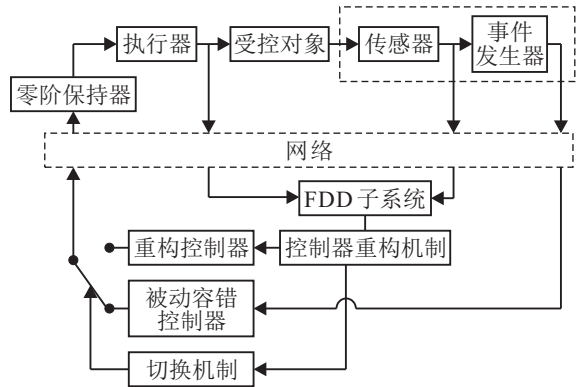


图1 系统结构

为了叙述方便, 给出以下假设:

**假设1** 传感器为时间驱动, 控制器和执行器为事件驱动, 记采样周期和采样时刻分别为  $h$  和  $i_k h$ , 则采样时刻集合为  $\{i_k h | i_k \in N\}$ .

**假设2** 设  $t_k h$  为传输时刻, 由采样状态  $x(i_k h)$  决定, 则传输时刻的集合记为  $\{t_k h | t_k \in N\}$ . 显然,  $\{t_k h | t_k \in N\}$  是采样时刻集合  $\{i_k h | i_k \in N\}$  的子集.

**假设3** 系统状态完全可测, 系统在传递时刻

$t_k h$ 的总时延可归并为

$$\tau_{t_k} = \tau_{t_k}^{sc} + \tau_{t_k}^{ca} + \tau_{t_k}^c,$$

其中 $\tau_{t_k}^{sc}$ ,  $\tau_{t_k}^{ca}$ ,  $\tau_{t_k}^c$ 分别表示从传感器到控制器、从控制器到执行器的网络诱导时延以及系统计算时延。

**假设4** 故障信息在每个采样周期内均可以被传递给鲁棒故障检测观测器,即故障信息的检测不受事件触发条件的影响。

**假设5** 零阶保持器(ZOH)的作用是保存最近的数据包,即直到新数据到达执行器之前,ZOH将保持原有的输入值不变。

为了对时间有更明确的界定,将ZOH的保持区域( $t \in \Omega$ )划分为以下间隔子集:

$$\Omega = \bigcup \Omega_l,$$

$$\Omega_l = [i_k h + \tau_{i_k}, i_k h + h + \tau_{i_k+1}).$$

其中: $i_k h = t_k h + lh$ ,  $l = 0, \dots, t_{k+1} - t_k - 1$ ,  $i_k h$ 表示最新采样时刻, $\tau_{i_k}$ 和 $\tau_{i_k+1}$ 分别为采样时刻 $i_k h$ 和 $(i_k + 1)h$ 的网络诱导时延。

由图1可以看出,采样数据在通过网络进行传输之前需要先通过事件发生器,其作用就是决定是否将最新的采样数据传输给控制器.假设系统上一个最新传输的数据为 $x(t_k h)$ ,当前采样数据为 $x(i_k h)$ ,结合系统控制需求,并从节约网络资源角度出发,创建如下事件触发条件<sup>[13]</sup>:

$$t_{k+1} h = t_k h + \min\{lh | e_x^T(i_k h) \Xi e_x(i_k h) \geq \sigma x^T(i_k h) \Xi x(i_k h)\}. \quad (3)$$

其中:状态误差为

$$e_x(i_k h) = x(i_k h) - x(t_k h), \quad (4)$$

$h$ 是采样周期, $\Xi$ 是正定对称矩阵, $\sigma \in [0, 1)$ 是事件触发参数标量。

由式(3)可以看出,并非所有的采样数据都可以被传输,只有当 $x(i_k h)$ 和 $x(t_k h)$ 满足事件触发条件(3)时,事件发生器被触发,数据 $x(i_k h)$ 才会被传输给控制器.如果该事件触发条件设计合理,则DETCS将在保证系统性能的基础上,节约网络资源,提高网络资源的利用效率。

### 1.3 DETCS下NNCS故障模型

由假设3知,系统的状态完全可测,基于之前对受控对象(2)的描述,设计系统状态反馈控制器如下:

模糊规则 $R^i$ :如果 $\theta_1(t)$ 是 $N_{i1}$ ,且 $\dots$ ,且 $\theta_g(t)$ 是 $N_{ig}$ ,则 $u(t) = K_i x(t_k h)$ ,  $t \in [t_k h + \tau_{t_k}, t_{k+1} h + \tau_{t_k+1})$ .其中: $K_i$  ( $i = 1, 2, \dots, r$ )是定常的反馈控制器增益矩阵; $\tau_{t_k}$ ,  $\tau_{t_k+1}$ 分别是传输时刻 $t_k h$ ,  $t_{k+1} h$ 的网络诱导时延.同时,根据平行分布补偿(PDC)算法,可得整

个状态反馈控制律为

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) K_i x(t_k h). \quad (5)$$

定义

$$\tau(t) = t - i_k h, \quad t \in \Omega_l. \quad (6)$$

显然, $\tau(t)$ 是一个连续线性函数,满足 $0 < \tau_m \leq \tau(t) \leq \tau_M$ ,其中 $\tau_m$ ,  $\tau_M$ 分别为总时延的最小值和最大值.令 $\tau_s = \tau_M - \tau_m$ ,结合式(4)~(6), $u(t)$ 最终可表示为

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) K_i (x(t - \tau(t)) - e_x(i_k h)). \quad (7)$$

**注1** 由式(7)知,控制量中除包含状态变量外,还包含了式(3)中的状态误差 $e(i_k h)$ ,这就使得控制量的计算同时依赖于系统状态和系统误差,也即事件触发条件的引入。

考虑执行器可能发生失效故障的情形,引入开关矩阵 $L$ ,其形式为

$$L = \text{diag}\{l_1, \dots, l_m\}, \quad l_q \in [0, 1], \quad q = 1, 2, \dots, m.$$

其中: $l_q = 0$ 表示系统第 $q$ 个执行器完全失效, $l_q = 1$ 表示系统第 $q$ 个执行器正常, $l_q \in (0, 1)$ 表示系统第 $q$ 个执行器部分失效.定义故障分布矩阵 $E_i = -(B_i + \Delta B_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, r$ .由于 $f(t)$ 是执行器故障,可以令 $Lu(t) = u(t) - f(t)$ .则系统可由式(2)转化为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) ((A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) - (B_i + \Delta B_i)f(t) + D_i w(t)), \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) C_i x(t); \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) ((A_i + \Delta A_i)x(t) + (B_i + \Delta B_i)Lu(t) + D_i w(t)), \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) C_i x(t). \end{cases} \quad (9)$$

显然,NNCS故障模型(8)和(9)是等价的。

上述模型综合考虑了事件触发条件、网络诱导时延、执行器失效、外界有限能量扰动以及控制律等因素,这便为后面的主被动混合容错控制器设计提供了设计依据。

### 1.4 相关引理

**引理1**(Schur 补引理) 对于给定的对称矩阵 $Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & z_{12} \\ Z_{12}^T & Z_{22} \end{bmatrix}$ ,以下3个条件等价:

- 1)  $Z < 0$ ;
- 2)  $Z_{11} < 0, Z_{22} - Z_{12}^T Z_{11}^{-1} Z_{12} < 0$ ;

3)  $Z_{22} < 0, Z_{11} - Z_{12}Z_{22}^{-1}Z_{12}^T < 0.$

**引理2** 对于任意对称正定矩阵  $W \in R^{n \times n}, W = W^T > 0,$  参数  $0 \leq h(t) \leq h_M$  以及向量值函数  $\dot{x}: [-h_M, 0] \rightarrow R^n,$  以下积分不等式成立:

$$-h(t) \int_{-h(t)}^0 \dot{x}^T(t+s)W\dot{x}(t+s)ds \leq [x^T(t) \quad x^T(t-h(t))] \begin{bmatrix} -W & W \\ W & -W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h(t)) \end{bmatrix}.$$

**引理3**<sup>[14]</sup> 假设  $f_1, f_2, \dots, f_N: R^m \rightarrow R$  在开集  $D$  的子集中有正值,  $D \in R^m,$  则在集合  $D$  中  $f_i$  的互反凸组合满足

$$\min_{\{\alpha_i | \alpha_i > 0, \sum_i \alpha_i = 1\}} \sum_i \frac{1}{\alpha_i} f_i(t) = \sum_i f_i(t) + \max_{g_{i,j}(t)} \sum_{i \neq j} g_{i,j}(t).$$

其中

$$\left\{ g_{i,j}: R^m \rightarrow R, g_{j,i}(t) = g_{i,j}(t), \begin{bmatrix} f_i(t) & g_{i,j}(t) \\ g_{i,j}(t) & f_j(t) \end{bmatrix} \geq 0 \right\}.$$

**引理4**<sup>[15]</sup> 给定适当维数的矩阵  $Y, M, E,$  其中  $Y = Y^T,$  则  $Y + MF(t)E + E^T F^T(t)M^T < 0, \forall F: F^T F \leq I,$  当且仅当存在一个常数  $\varepsilon > 0,$  使得  $Y + \varepsilon MM^T + \varepsilon^{-1} E^T E < 0.$

**注2** 为证明方便,记

$$\begin{aligned} e(t) &= e, e(t - \tau(t)) = e_\tau, \\ e(t - \tau_m) &= e_{\tau_m}, e(t - \tau_M) = e_{\tau_M}, \\ h_i(\theta(t)) &= h_i, h_j(\theta(t)) = h_j, \\ x(t - \tau_M) &= x_{\tau_M}, x(t) = x, x(t - \tau(t)) = x_\tau, \\ x(t - \tau_m) &= x_{\tau_m}, w(t) = w, \\ \hat{f}(t) &= \hat{f}, f(t) = f, e_f(t) = f(t) - \hat{f}(t), \end{aligned}$$

符号 \* 表示由对称矩阵得到的相应矩阵块.

## 2 主要结果

在 DETCS 下,考虑任意的执行器失效故障,在外界有限能量扰动的影响下,不确定 NNCS 主被动混合鲁棒  $H_\infty$  容错控制器的设计目标如下:

- 1) 使系统尽可能少占用网络资源;
- 2) 对有/无先验知识的故障均具有容错能力,并保证闭环故障系统的渐近稳定性;
- 3) 对外界有限能量扰动具有良好的  $\gamma$  扰动抑制性能.

### 2.1 鲁棒故障检测观测器设计

考虑 NNCS 系统模型 (2), 在无故障的情况下其状态是可观测的, 设  $\hat{x}(t) \in R^n$  为  $x(t)$  的估计状态,  $\hat{y}(t)$  为观测器的输出, 根据 PDC 算法, 并由式 (8) 设计

鲁棒故障检测观测器如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t))((A_i + \Delta A_i)\hat{x}(t) + (B_i + \Delta B_i)u(t) + G_i(y(t - \tau(t)) - \hat{y}(t - \tau(t)))) \\ \hat{y}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t))C_i\hat{x}(t). \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $C_i$  为状态反馈控制器增益矩阵,  $G_i$  为状态观测器增益矩阵.

定义残差、状态估计误差和残差误差分别为

$$r(t) = W(y(t) - \hat{y}(t)), \quad (11)$$

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t), \quad (12)$$

$$r_e(t) = r(t) - f(t), \quad (13)$$

其中  $W$  为残差增益矩阵, 则转化为模糊模型为

$$r(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t))WC_i e(t), \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(\theta(t))h_j(\theta(t))(A_i e(t) - G_i C_j e(t - \tau(t)) - B_i f(t)), \\ r_e(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t))(WC_i e(t) - f(t)). \end{aligned} \quad (15)$$

$$r_e(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\theta(t))(WC_i e(t) - f(t)). \quad (16)$$

基于观测器进行故障估计的方法是借鉴  $H_\infty$  控制思想得到的, 即观测器与实际系统的残差误差满足如下关系:

$$\|r_e(t)\|_2 \leq \gamma_1^2 \|f(t)\|_2 + \gamma_2^2 \|w(t)\|_2.$$

其中  $\gamma_1, \gamma_2$  为给定常数, 它们的选取应尽量使估计故障受故障的影响较大.

定义  $H_\infty$  性能指标为

$$J_1 = \int_0^t (r_e^T(t)r_e(t) - \gamma_1^2 f^T(t)f(t) - \gamma_2^2 w^T(t)w(t))dt.$$

**定理1** 给定正定标量  $\tau_m, \tau_M, \tau_s, a, b, c, \varepsilon, \gamma_1$  和  $\gamma_2,$  如果存在正定对称矩阵  $P, V_i, W, Q_i (i = 1, 2, \dots)$  满足如下线性矩阵不等式:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \Phi_{13} & \Phi_{14} & \Phi_{15} & \Phi_{16} \\ * & \Phi_{22} & \Phi_{23} & \Phi_{24} & 0 & 0 \\ * & * & \Phi_{33} & \Phi_{34} & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi_{44} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Phi_{55} & 0 \\ * & * & * & * & * & \Phi_{66} \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\left[ \begin{array}{cccccc} \Phi_{17} & \Phi_{18} & \Phi_{19} & \Phi_{110} & \Phi_{111} & \Phi_{112} \\ 0 & \Phi_{28} & \Phi_{29} & \Phi_{210} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Phi_{57} & \Phi_{58} & \Phi_{59} & \Phi_{510} & 0 & \Phi_{512} \\ 0 & \Phi_{68} & \Phi_{69} & \Phi_{610} & 0 & 0 \\ \Phi_{77} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & \Phi_{88} & 0 & 0 & \Phi_{811} & 0 \\ * & * & \Phi_{99} & 0 & \Phi_{911} & 0 \\ * & * & * & \Phi_{1010} & \Phi_{1011} & 0 \\ * & * & * & * & \Phi_{1111} & 0 \\ * & * & * & * & * & \Phi_{1212} \end{array} \right] \leq 0.$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi_{11} &= PA_i + A_i^T P + Q_1 - Q_3 - Q_4, \\ \Phi_{12} &= -V_i C_j, \Phi_{13} = Q_3, \Phi_{14} = Q_4, \\ \Phi_{15} &= -PB_i, \Phi_{16} = PD_i, \Phi_{17} = C_j^T W^T, \\ \Phi_{18} &= \tau_m A_i^T P, \Phi_{19} = \tau_M A_i^T P, \\ \Phi_{110} &= \tau_s A_i^T P, \Phi_{111} = PM, \Phi_{112} = N_{ai}^T, \\ \Phi_{22} &= -2Q_5 + M_{12}^T + M_{12}, \Phi_{23} = Q_5 - M_{12}, \\ \Phi_{24} &= Q_5 - M_{12}^T, \Phi_{28} = \tau_m C_i^T V_i^T, \\ \Phi_{29} &= -\tau_M C_j^T V_i^T, \Phi_{210} = -\tau_s C_j^T V_i^T, \\ \Phi_{33} &= Q_2 - Q_1 - Q_3 - Q_5, \Phi_{34} = M_{12}^T, \\ \Phi_{44} &= -Q_2 - Q_4 - Q_5, \Phi_{55} = -\gamma_1^2 I, \\ \Phi_{57} &= -I, \Phi_{58} = -\tau_m B_i^T P, \\ \Phi_{59} &= -\tau_M B_i^T P, \Phi_{510} = -\tau_s B_i^T P, \\ \Phi_{512} &= -N_{bi}^T, \Phi_{66} = -\gamma_2^2 I, \\ \Phi_{68} &= -\tau_m D_i^T P, \Phi_{69} = -\tau_M D_i^T P, \\ \Phi_{610} &= -\tau_s D_i^T P, \Phi_{77} = -I, \\ \Phi_{88} &= -2aP + a^2 Q_3, \Phi_{811} = \tau_m PM, \\ \Phi_{99} &= -2bP + b^2 Q_4, \Phi_{911} = \tau_M PM, \\ \Phi_{1010} &= -2cP + c^2 Q_5, \Phi_{1011} = \tau_s PM, \\ \Phi_{1111} &= -\varepsilon^{-1} I, \Phi_{1212} = -\varepsilon I. \end{aligned}$$

则故障诊断观测器可使故障估计误差满足

$$\|r_e(t)\|_2 \leq \gamma_1^2 \|f(t)\|_2 + \gamma_2^2 \|w(t)\|_2,$$

且观测器增益矩阵为  $G_i = P^{-1}V_i$ .

**证明** 选取 Lyapunov-Krasovskii 函数如下:

$$\begin{aligned} V(t) &= e^T(t)Pe(t) + \int_{t-\tau_m}^t e^T(s)Q_1e(s)ds + \\ &\int_{t-\tau_M}^{t-\tau_m} e^T(s)Q_2e(s)ds + \\ &\int_{-\tau_m}^0 \int_{t+\theta}^t \tau_m \dot{e}^T(s)Q_3\dot{e}(s)dsd\theta + \\ &\int_{-\tau_M}^0 \int_{t+\theta}^t \tau_M \dot{e}^T(s)Q_4\dot{e}(s)dsd\theta + \\ &\int_{-\tau_m}^0 \int_{t+\theta}^t \tau_s \dot{e}^T(s)Q_5\dot{e}(s)dsd\theta. \end{aligned}$$

沿式(15)对  $V(t)$  求导,得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \\ &2e^T P \dot{e} + e^T Q_1 \dot{e} - e_{\tau_m}^T Q_1 e_{\tau_m} + \\ &e_{\tau_m}^T Q_2 e_{\tau_m} - e_{\tau_M}^T Q_2 e_{\tau_M} + \tau_m^2 \dot{e}^T Q_3 \dot{e} - \\ &\tau_m \int_{t-\tau_m}^t \dot{e}^T Q_3 \dot{e} ds + \tau_M^2 \dot{e}^T Q_4 \dot{e} - \\ &\tau_M \int_{t-\tau_M}^t \dot{e}^T Q_4 \dot{e} ds + \tau_s^2 \dot{e}^T Q_5 \dot{e} - \\ &\tau_s \int_{t-\tau_M}^{t-\tau_m} \dot{e}^T Q_5 \dot{e} ds + r_e^T(t)r_e(t) - \\ &\gamma_1^2 f^T(t)f(t) - \gamma_2^2 w^T(t)w(t) - r_e^T(t)r_e(t) + \\ &\gamma_1^2 f^T(t)f(t) + \gamma_2^2 w^T(t)w(t). \end{aligned} \tag{17}$$

由引理2,得

$$-\tau_m \int_{t-\tau_m}^t \dot{e}^T Q_3 \dot{e} ds \leq \begin{bmatrix} e \\ e_{\tau_m} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -Q_3 & Q_3 \\ * & -Q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ e_{\tau_m} \end{bmatrix}, \tag{18}$$

$$-\tau_M \int_{t-\tau_M}^t \dot{e}^T Q_4 \dot{e} ds \leq \begin{bmatrix} e \\ e_{\tau_M} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -Q_4 & Q_4 \\ * & -Q_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ e_{\tau_M} \end{bmatrix}. \tag{19}$$

由引理3,得

$$-\tau_s \int_{t-\tau_M}^{t-\tau_m} \dot{e}^T Q_5 \dot{e} ds \leq \begin{bmatrix} e_{\tau} - e_{\tau_M} \\ e_{\tau_m} - e_{\tau} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -Q_5 & M_{12} \\ * & -Q_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{\tau} - e_{\tau_M} \\ e_{\tau_m} - e_{\tau} \end{bmatrix}.$$

其中

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} Q_5 & M_{12} \\ * & Q_5 \end{bmatrix} \geq 0; \\ &\begin{cases} \tau_m^2 \dot{e}^T Q_3 \dot{e} = \tau_m^2 \xi^T(t) \varepsilon'^T Q_3 \varepsilon' \xi(t), \\ \tau_M^2 \dot{e}^T Q_4 \dot{e} = \tau_M^2 \xi^T(t) \varepsilon'^T Q_4 \varepsilon' \xi(t), \\ \tau_s^2 \dot{e}^T Q_5 \dot{e} = \tau_s^2 \xi^T(t) \varepsilon'^T Q_5 \varepsilon' \xi(t). \end{cases} \end{aligned} \tag{20}$$

这里

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= \\ &[(A_i + \Delta A_i) \quad -G_i C_j \quad 0 \quad 0 \quad -(B_i + \Delta B_i) \quad D_i], \\ \xi^T(t) &= [e^T \quad e_{\tau}^T \quad e_{\tau_m}^T \quad e_{\tau_M}^T \quad f^T(t) \quad w^T(t)]. \end{aligned}$$

由  $H_{\infty}$  性能指标,得

$$\begin{aligned} J_1 &= \int_0^t (r_e^T(t)r_e(t) - \gamma_1^2 f^T(t)f(t) - \\ &\gamma_2^2 w^T(t)w(t) + \dot{V}(t))dt - \int_0^t \dot{V}(t)dt < \\ &\int_0^t (r_e^T(t)r_e(t) - \gamma_1^2 f^T(t)f(t) - \\ &\gamma_2^2 w^T(t)w(t) + \dot{V}(t))dt + V(0). \end{aligned}$$

因此,如果

$$r_e^T(t)r_e(t) - \gamma_1^2 f^T(t)f(t) - \gamma_2^2 w^T(t)w(t) + \dot{V}(t) < 0,$$



$$\Phi''' = \begin{bmatrix} \Phi'''_{11} & \Phi'''_{12} & \Phi'''_{13} & \Phi'''_{14} & \Phi'''_{15} \\ * & \Phi'''_{22} & \Phi'''_{23} & \Phi'''_{24} & 0 \\ * & * & \Phi'''_{33} & \Phi'''_{34} & 0 \\ * & * & * & \Phi'''_{44} & 0 \\ * & * & * & * & \Phi'''_{55} \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \Phi'''_{16} & \Phi'''_{17} & \Phi'''_{18} & \Phi'''_{19} & \Phi'''_{110} \\ 0 & 0 & \Phi'''_{28} & \Phi'''_{29} & \Phi'''_{210} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi'''_{57} & \Phi'''_{58} & \Phi'''_{59} & \Phi'''_{510} \\ \Phi'''_{66} & 0 & \Phi'''_{68} & \Phi'''_{69} & \Phi'''_{610} \\ * & \Phi'''_{77} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & \Phi'''_{88} & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi'''_{99} & 0 \\ * & * & * & * & \Phi'''_{1010} \end{bmatrix} \leq 0.$$

这里

$$\begin{aligned} \Phi'''_{11} &= PA_i + A_i^T P + Q_1 - Q_3 - Q_4, \\ \Phi'''_{12} &= -PG_i C_j, \Phi'''_{13} = Q_3, \Phi'''_{14} = Q_4, \\ \Phi'''_{15} &= -PB_i, \Phi'''_{16} = PD_i, \\ \Phi'''_{17} &= C_j^T W^T, \Phi'''_{18} = \tau_m A_i^T Q_3, \\ \Phi'''_{19} &= \tau_M A_i^T Q_4, \Phi'''_{110} = \tau_s A_i^T Q_5, \\ \Phi'''_{22} &= -2Q_5 + M_{12}^T + M_{12}, \\ \Phi'''_{23} &= Q_5 - M_{12}, \Phi'''_{24} = Q_5 - M_{12}^T, \\ \Phi'''_{28} &= -\tau_m C_j^T G_i^T Q_3, \\ \Phi'''_{29} &= -\tau_M C_j^T G_i^T Q_4, \\ \Phi'''_{210} &= -\tau_s C_j^T G_i^T Q_5, \\ \Phi'''_{33} &= Q_2 - Q_1 - Q_3 - Q_5, \Phi'''_{34} = M_{12}^T, \\ \Phi'''_{44} &= -Q_2 - Q_4 - Q_5, \Phi'''_{55} = -\gamma_1^2 I, \\ \Phi'''_{57} &= -I, \Phi'''_{58} = -\tau_m B_i^T Q_3, \\ \Phi'''_{59} &= -\tau_M B_i^T Q_4, \Phi'''_{510} = -\tau_s B_i^T Q_5, \\ \Phi'''_{66} &= -\gamma_2^2 I, \Phi'''_{68} = \tau_m D_i^T Q_3, \\ \Phi'''_{69} &= \tau_M D_i^T Q_4, \Phi'''_{610} = \tau_s D_i^T Q_5, \\ \Phi'''_{77} &= -I, \Phi'''_{88} = -Q_3, \\ \Phi'''_{99} &= -Q_4, \Phi'''_{1010} = -Q_5. \end{aligned}$$

对  $\Phi''$  运用 Schur 补, 得

$$\Phi'' = \begin{bmatrix} \Phi'''_{11} & \Phi'''_{12} & \Phi'''_{13} & \Phi'''_{14} & \Phi'''_{15} & \Phi'''_{16} \\ * & \Phi'''_{22} & \Phi'''_{23} & \Phi'''_{24} & 0 & 0 \\ * & * & \Phi'''_{33} & \Phi'''_{34} & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi'''_{44} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Phi'''_{55} & 0 \\ * & * & * & * & * & \Phi'''_{66} \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \Phi'''_{17} & \Phi'''_{18} & \Phi'''_{19} & \Phi'''_{110} & PM & N_{ai}^T \\ 0 & \Phi'''_{28} & \Phi'''_{29} & \Phi'''_{210} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Phi'''_{57} & \Phi'''_{58} & \Phi'''_{59} & \Phi'''_{510} & 0 & -N_{bi}^T \\ 0 & \Phi'''_{68} & \Phi'''_{69} & \Phi'''_{610} & 0 & 0 \\ \Phi'''_{77} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & \Phi'''_{88} & 0 & 0 & \tau_m Q_3 M & 0 \\ * & * & \Phi'''_{99} & 0 & \tau_M Q_4 M & 0 \\ * & * & * & \Phi'''_{1010} & \tau_s Q_5 M & 0 \\ * & * & * & * & -\varepsilon^{-1} I & 0 \\ * & * & * & * & * & -\varepsilon I \end{bmatrix} \leq 0.$$

对  $\Phi''$  两边同时乘以  $\text{diag}\{I, I, I, I, I, I, I, PQ_3^{-1}, PQ_4^{-1}, PQ_5^{-1}, I, I\}$  及其转置, 并且由  $-a^2 Q_3 + 2aP - PQ_3^{-1}P \leq -(aQ_3 - P)Q_3^{-1}(aQ_3 - P) \leq 0$ , 得

$$\begin{cases} -PQ_3^{-1}P \leq -2aP + a^2 Q_3, \\ -PQ_4^{-1}P \leq -2bP + b^2 Q_4, \\ -PQ_5^{-1}P \leq -2cP + c^2 Q_5. \end{cases}$$

令  $PG_i = V_i$  即可得  $\Phi$ .

综上所述, 可得

$$\dot{V}(t) + r_e^T(t)r_e(t) - \gamma_1^2 f^T(t)f(t) - \gamma_2^2 w^T(t)w(t) \leq \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j \xi^T(t) \Phi \xi(t).$$

当  $f(t) = 0, w(t) = 0$  时, 若满足  $\Phi < 0$ , 则  $\dot{V}(t) < 0$ , 误差系统渐近稳定.

对于任意不为零的  $w(t) \in [0, \infty)$ , 两边从  $t_0 \rightarrow t$  积分, 可得

$$V(t) - V(t_0) < - \int_{t_0}^t (r_e^T(t)r_e(t) - \gamma_1^2 f^T(t)f(t) - \gamma_2^2 w^T(t)w(t))dt,$$

在零初始条件下, 当  $t \rightarrow \infty$  时, 则有



设计的被动容错控制器,  $\hat{f}(t)$  代表故障的估计值. 将式(22)代入(8), 得

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & \sum_{i=1}^r h_i((A_i + \Delta A_i)x + (B_i + \Delta B_i)(u_p(t) - \\ & F^+ E_i \hat{f}) + E_i f + D_i w) = \\ & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j((A_i + \Delta A_i)x + (B_i + \Delta B_i)(K_j X_\tau - \\ & e_x(i_k h)) - F^+ E f) + E_i f + D_i w) = \\ & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j((A_i + \Delta A_i)x + (B_i + \Delta B_i)K_j X_\tau - \\ & (B_i + \Delta B_i)K_j e_x(i_k h) + E_i e_f(t) + D_i w), \\ y(t) = & \sum_{i=1}^r h_i C_i x. \end{aligned} \quad (23)$$

其中  $e_f(t)$  为故障估计误差, 考虑到定理1中所设计的故障诊断观测器可以保证误差值渐近收敛,  $e_f(t)$  可被视为一种外界干扰, 故式(23)可以转化为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & \sum_{i=1}^r h_i h_j((A_i + \Delta A_i)x + (B_i + \Delta B_i)K_j x_\tau - \\ & (B_i + \Delta B_i)K_j e_x(i_k h) + D_i' w'), \\ y(t) = & \sum_{i=1}^r h_i C_i x. \end{aligned} \quad (24)$$

其中:  $D_i' = [E_i \ D_i] = [-(B_i + \Delta B_i) \ D_i]$ ,  $w'(t) = [e_f^T(t) \ w^T(t)]^T$ .

**定理3** 在DETCS下, 给定正数  $\tau_m, \tau_M, \tau_s, \varepsilon, \gamma, \sigma \in [0, 1)$ , 混合容错控制器(22)可保证系统稳定且满足如下  $H_\infty$  性能指标:

$$J_3 = \int_0^t (y^T(t)y(t) - \gamma^2 w'^T(t)w'(t))dt. \quad (25)$$

如果存在正定对称矩阵  $X$ , 矩阵  $R_i > 0, i = 1, 2, \dots, 5$  及  $V, Y_j$ , 对于任意的执行器失效故障  $L$  及可接受的参数不确定性, 满足如下线性矩阵不等式:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \Phi_{13} & \Phi_{14} & \Phi_{15} & \Phi_{16} \\ * & \Phi_{22} & \Phi_{23} & \Phi_{24} & 0 & 0 \\ * & * & \Phi_{33} & \Phi_{34} & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi_{44} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Phi_{55} & 0 \\ * & * & * & * & * & \Phi_{66} \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\left[ \begin{array}{cccccc} \Phi_{17} & \Phi_{18} & \Phi_{19} & \Phi_{110} & \Phi_{111} & \Phi_{112} \\ \Phi_{27} & \Phi_{28} & \Phi_{29} & 0 & \Phi_{211} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Phi_{57} & \Phi_{58} & \Phi_{59} & 0 & \Phi_{511} & 0 \\ \Phi_{67} & \Phi_{68} & \Phi_{69} & 0 & \Phi_{611} & 0 \\ \Phi_{77} & 0 & 0 & \Phi_{710} & 0 & 0 \\ * & \Phi_{88} & 0 & \Phi_{810} & 0 & 0 \\ * & * & \Phi_{99} & \Phi_{910} & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi_{1010} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Phi_{1111} & 0 \\ * & * & * & * & * & \Phi_{1212} \end{array} \right] < 0.$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi_{11} = & A_i X + X A_i^T - 2X - R_1 + R_3 + R_4, \\ \Phi_{12} = & B_i Y_j, \Phi_{13} = 2X - R_3, \Phi_{14} = 2X - R_4, \\ \Phi_{15} = & -B_i Y_j, \Phi_{16} = D_i' X, \Phi_{17} = \tau_m X A_i^T, \\ \Phi_{18} = & \tau_M X A_i^T, \Phi_{19} = \tau_s X A_i^T, \Phi_{110} = M, \\ \Phi_{111} = & X N_{ai}^T, \Phi_{112} = C_i X^T, \\ \Phi_{22} = & \sigma(2X - V) + 2R_5 - R_6 - R_6^T, \\ \Phi_{23} = & R_6 - R_5, \Phi_{24} = R_6^T - R_5, \\ \Phi_{27} = & \tau_m Y_j^T B_i^T, \Phi_{28} = \tau_M Y_j^T B_i^T, \\ \Phi_{29} = & \tau_s Y_j^T B_i^T, \Phi_{211} = Y_j^T N_{bi}^T, \\ \Phi_{33} = & R_1 + R_3 + R_5 - R_2 - 4X, \\ \Phi_{34} = & 2X - R_6^T, \\ \Phi_{44} = & R_2 + R_4 + R_5 - 6X, \Phi_{55} = -2X + V, \\ \Phi_{57} = & -\tau_m Y_j^T B_i^T, \Phi_{58} = -\tau_M Y_j^T B_i^T, \\ \Phi_{59} = & -\tau_s Y_j^T B_i^T, \Phi_{511} = -Y_j^T N_{bi}^T, \\ \Phi_{66} = & -X \gamma^2 I X, \Phi_{67} = \tau_m X D_i'^T, \\ \Phi_{68} = & \tau_M X D_i'^T, \Phi_{69} = \tau_s X D_i'^T, \\ \Phi_{77} = & -R_3, \Phi_{710} = \tau_m M, \Phi_{88} = -R_4, \\ \Phi_{810} = & \tau_M M, \Phi_{99} = -R_5, \Phi_{910} = \tau_s M, \\ \Phi_{1010} = & -\varepsilon^{-1} I, \Phi_{1111} = -\varepsilon I, \Phi_{1212} = -I. \end{aligned}$$

**证明** 构造如下Lyapunov-Krasovskii泛函:

$$\begin{aligned} V(t) = & x^T(t) P x(t) + \int_{t-\tau_m}^t x^T(s) Q_1 x(s) ds + \\ & \int_{t-\tau_M}^{t-\tau_m} x^T(s) Q_2 x(s) ds + \\ & \int_{-\tau_m}^0 \int_{t+\theta}^t \tau_m \dot{x}^T(s) Q_3 \dot{x}(s) ds d\theta + \\ & \int_{-\tau_M}^0 \int_{t+\theta}^t \tau_M \dot{x}^T(s) Q_4 \dot{x}(s) ds d\theta + \\ & \int_{-\tau_m}^0 \int_{t+\theta}^t \tau_s \dot{x}^T(s) Q_5 \dot{x}(s) ds d\theta. \end{aligned}$$

其中  $P^T = P > 0, Q_i^T = Q_i > 0, i = 1, 2, \dots, 5$ . 沿

系统(24)对  $V(t)$  求导,得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & 2x^T P \dot{x} + x^T Q_1 x - x_{\tau_m}^T Q_1 x_{\tau_m} + \\ & x_{\tau_m}^T Q_2 x_{\tau_m} - x_{\tau_M}^T Q_2 x_{\tau_M} + \tau_m^2 \dot{x}^T Q_3 \dot{x} - \\ & \tau_m \int_{t-\tau_m}^t \dot{x}^T Q_3 \dot{x} ds + \tau_M^2 \dot{x}^T Q_4 \dot{x} - \\ & \tau_M \int_{t-\tau_M}^t \dot{x}^T Q_4 \dot{x} ds + \tau_s^2 \dot{x}^T Q_5 \dot{x} - \\ & \tau_s \int_{t-\tau_s}^t \dot{x}^T Q_5 \dot{x} ds + e_x^T(i_k h) \Xi e_x(i_k h) - \\ & e_x^T(i_k h) \Xi e_x(i_k h) + y^T(t) y(t) - \\ & \gamma^2 w^T(t) w'(t) + \gamma^2 w'^T(t) w'(t) - y^T(t) y(t). \end{aligned}$$

对于传输机制(3),当  $i_k h \in [t_k h, t_{k+1} h)$  时,有

$$e_x^T(i_k h) \Xi e_x(i_k h) \leq \sigma x^T(i_k h) \Xi x(i_k h).$$

同时,由引理2,得

$$\begin{aligned} & -\tau_m \int_{t-\tau_m}^t \dot{x}^T Q_3 \dot{x} ds \leq \\ & \begin{bmatrix} x \\ x_{\tau_m} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -Q_3 & Q_3 \\ * & -Q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{\tau_m} \end{bmatrix}, \\ & -\tau_M \int_{t-\tau_M}^t \dot{x}^T Q_4 \dot{x} ds \leq \\ & \begin{bmatrix} x \\ x_{\tau_M} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -Q_4 & Q_4 \\ * & -Q_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_{\tau_M} \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

由引理3,得

$$\begin{aligned} & -\tau_s \int_{t-\tau_s}^t \dot{x}^T Q_5 \dot{x} ds \leq \\ & - \begin{bmatrix} x_\tau & -x_{\tau_M} \\ x_{\tau_m} & -x_\tau \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Q_5 & M_{12} \\ * & Q_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\tau & -x_{\tau_M} \\ x_{\tau_m} & -x_\tau \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} Q_5 & M_{12} \\ * & Q_5 \end{bmatrix} \geq 0, \\ & \begin{cases} \tau_m^2 \dot{x}^T Q_3 \dot{x} = \tau_m^2 \eta^T(t) \varepsilon'^T Q_3 \varepsilon' \eta(t), \\ \tau_M^2 \dot{x}^T Q_4 \dot{x} = \tau_M^2 \eta^T(t) \varepsilon'^T Q_4 \varepsilon' \eta(t), \\ \tau_s^2 \dot{x}^T Q_5 \dot{x} = \tau_s^2 \eta^T(t) \varepsilon'^T Q_5 \varepsilon' \eta(t). \end{cases} \end{aligned}$$

这里

$$\begin{aligned} \varepsilon' = & [(A_i + \Delta A_i) \quad (B_i + \Delta B_i) K_j \quad 0 \quad \rightarrow \\ & \leftarrow 0 \quad -(B_i + \Delta B_i) K_j \quad D_i'], \\ \eta^T(t) = & [x^T \quad x_\tau^T \quad x_{\tau_m}^T \quad x_{\tau_M}^T \quad e_x^T(i_k h) \quad w'^T(t)]. \end{aligned}$$

证明同定理1,得

$$\begin{aligned} & \dot{V} + y^T(t) y(t) - \gamma^2 w'^T(t) w'(t) \leq \\ & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j (\eta^T(t) (\Phi' + \tau_m^2 \varepsilon'^T Q_3 \varepsilon' + \\ & \tau_M^2 \varepsilon'^T Q_4 \varepsilon' + \tau_s^2 \varepsilon'^T Q_5 \varepsilon') \eta(t)), \end{aligned}$$

其中

$$\Phi' = \begin{bmatrix} \Phi'_{11} & \Phi'_{12} & \Phi'_{13} & \Phi'_{14} & \Phi'_{15} & \Phi'_{16} \\ * & \Phi'_{22} & \Phi'_{23} & \Phi'_{24} & 0 & 0 \\ * & * & \Phi'_{33} & \Phi'_{34} & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi'_{44} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Phi'_{55} & 0 \\ * & * & * & * & * & \Phi'_{66} \end{bmatrix} < 0.$$

这里

$$\begin{aligned} \Phi'_{11} = & P(A_i + \Delta A_i)(A_i + \Delta A_i)^T P + \\ & Q_1 - Q_3 - Q_4 + C_i^T C_i, \end{aligned}$$

$$\Phi'_{12} = P(B_i + \Delta B_i) K_j, \quad \Phi'_{13} = Q_3,$$

$$\Phi'_{14} = Q_4, \quad \Phi'_{15} = -P(B_i + \Delta B_i) K_j,$$

$$\Phi'_{16} = P D_i', \quad \Phi'_{22} = \sigma \Xi - 2Q_5 + M_{12}^T + M_{12},$$

$$\Phi'_{23} = Q_5 - M_{12}, \quad \Phi'_{24} = Q_5 - M_{12}^T,$$

$$\Phi'_{33} = Q_2 - Q_1 - Q_3 - Q_5, \quad \Phi'_{34} = M_{12}^T,$$

$$\Phi'_{44} = -Q_2 - Q_4 - Q_5, \quad \Phi'_{55} = -\Xi, \quad \Phi'_{66} = -\gamma^2 I.$$

$$\text{令 } \Phi'' = \Phi' + \tau_m^2 \varepsilon'^T Q_3 \varepsilon' + \tau_M^2 \varepsilon'^T Q_4 \varepsilon' + \tau_s^2 \varepsilon'^T Q_5 \varepsilon',$$

由Schur补性质合并,得

$$\Phi'' = \begin{bmatrix} \Phi''_{11} & \Phi''_{12} & \Phi''_{13} & \Phi''_{14} & \Phi''_{15} & \Phi''_{16} & \Phi''_{17} & \Phi''_{18} & \Phi''_{19} \\ * & \Phi''_{22} & \Phi''_{23} & \Phi''_{24} & 0 & 0 & \Phi''_{27} & \Phi''_{28} & \Phi''_{29} \\ * & * & \Phi''_{33} & \Phi''_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi''_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Phi''_{55} & 0 & \Phi''_{57} & \Phi''_{58} & \Phi''_{59} \\ * & * & * & * & * & \Phi''_{66} & \Phi''_{67} & \Phi''_{68} & \Phi''_{69} \\ * & * & * & * & * & * & \Phi''_{77} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & \Phi''_{88} & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & \Phi''_{99} \end{bmatrix} < 0.$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi''_{11} = & P(A_i + \Delta A_i)(A_i + \Delta A_i)^T P + \\ & Q_1 - Q_3 - Q_4 + C_i^T C_i, \end{aligned}$$

$$\Phi''_{12} = P(B_i + \Delta B_i) K_j, \quad \Phi''_{13} = Q_3,$$

$$\Phi''_{14} = Q_4, \quad \Phi''_{15} = -P(B_i + \Delta B_i) K_j,$$

$$\Phi''_{16} = P D_i', \quad \Phi''_{17} = \tau_m (A_i + \Delta A_i)^T Q_3,$$

$$\Phi''_{18} = \tau_M (A_i + \Delta A_i)^T Q_4,$$

$$\Phi''_{19} = \tau_s (A_i + \Delta A_i)^T Q_5,$$

$$\Phi''_{22} = \sigma \Xi - 2Q_5 + M_{12}^T + M_{12},$$

$$\Phi''_{23} = Q_5 - M_{12}, \quad \Phi''_{24} = Q_5 - M_{12}^T,$$

$$\Phi''_{27} = \tau_m K_j^T (B_i + \Delta B_i)^T Q_3,$$

$$\Phi''_{28} = \tau_M K_j^T (B_i + \Delta B_i)^T Q_4,$$

$$\begin{aligned} \Phi''_{29} &= \tau_s K_j^T (B_i + \Delta B_i)^T Q_5, \\ \Phi''_{33} &= Q_2 - Q_1 - Q_3 - Q_5, \Phi''_{34} = M_{12}^T, \\ \Phi''_{44} &= -Q_2 - Q_4 - Q_5, \Phi''_{55} = -\Xi, \\ \Phi''_{57} &= -\tau_m K_j^T (B_i + \Delta B_i)^T Q_3, \\ \Phi''_{58} &= -\tau_M K_j^T (B_i + \Delta B_i)^T Q_4, \\ \Phi''_{59} &= -\tau_s K_j^T (B_i + \Delta B_i)^T Q_5, \\ \Phi''_{66} &= -\gamma^2 I, \Phi''_{67} = \tau_m D_i^T Q_3, \\ \Phi''_{68} &= \tau_M D_i^T Q_4, \Phi''_{69} = \tau_s D_i^T Q_5, \\ \Phi''_{77} &= -Q_3, \Phi''_{88} = -Q_4, \Phi''_{99} = -Q_5. \end{aligned}$$

由引理4,将 $\Phi''$ 转化为 $\Phi'' = \Phi''' + \varepsilon M_2 M_2^T + \varepsilon^{-1} E_2^T E_2$ . 其中

$$\begin{aligned} M_2 &= [M^T P \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \rightarrow \\ &\quad \leftarrow \tau_m M^T Q_3 \quad \tau_M M^T Q_4 \quad \tau_s M^T Q_5], \\ E_2 &= [N_{ai} \quad N_{bi} K_j \quad 0 \quad 0 \quad -N_{bi} K_j \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], \\ \Phi''' &= \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \Phi'''_{11} & \Phi'''_{12} & \Phi'''_{13} & \Phi'''_{14} & \Phi'''_{15} & \Phi'''_{16} & \Phi'''_{17} & \Phi'''_{18} & \Phi'''_{19} \\ * & \Phi'''_{22} & \Phi'''_{23} & \Phi'''_{24} & 0 & 0 & \Phi'''_{27} & \Phi'''_{28} & \Phi'''_{29} \\ * & * & \Phi'''_{33} & \Phi'''_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi'''_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Phi'''_{55} & 0 & \Phi'''_{57} & \Phi'''_{58} & \Phi'''_{59} \\ * & * & * & * & * & \Phi'''_{66} & \Phi'''_{67} & \Phi'''_{68} & \Phi'''_{69} \\ * & * & * & * & * & * & \Phi'''_{77} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & \Phi'''_{88} & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & \Phi'''_{99} \end{bmatrix} < 0.$$

这里

$$\begin{aligned} \Phi'''_{11} &= P A_i + A_i^T P + Q_1 - Q_3 - Q_4 + C_i^T C_i, \\ \Phi'''_{12} &= P B_i K_j, \Phi'''_{13} = Q_3, \Phi'''_{14} = Q_4, \\ \Phi'''_{15} &= -P B_i K_j, \Phi'''_{16} = P D_i', \Phi'''_{17} = \tau_m A_i^T Q_3, \\ \Phi'''_{18} &= \tau_M A_i^T Q_4, \Phi'''_{19} = \tau_s A_i^T Q_5, \\ \Phi'''_{22} &= -2Q_5 + M_{12}^T + M_{12} + \sigma \Xi, \\ \Phi'''_{23} &= Q_5 - M_{12}, \Phi'''_{24} = Q_5 - M_{12}^T, \\ \Phi'''_{27} &= \tau_m K_j^T B_i^T Q_3, \Phi'''_{28} = \tau_M K_j^T B_i^T Q_4, \\ \Phi'''_{29} &= \tau_s K_j^T B_i^T Q_5, \Phi'''_{33} = Q_2 - Q_1 - Q_3 - Q_5, \\ \Phi'''_{34} &= M_{12}^T, \Phi'''_{44} = -Q_2 - Q_4 - Q_5, \\ \Phi'''_{55} &= -\Xi, \Phi'''_{57} = -\tau_m K_j^T B_i^T Q_3, \\ \Phi'''_{58} &= -\tau_M K_j^T B_i^T Q_4, \Phi'''_{59} = -\tau_s K_j^T B_i^T Q_5, \\ \Phi'''_{66} &= -\gamma^2 I, \Phi'''_{67} = \tau_m D_i^T Q_3, \\ \Phi'''_{68} &= \tau_M D_i^T Q_4, \Phi'''_{69} = \tau_s D_i^T Q_5, \\ \Phi'''_{77} &= -Q_3, \Phi'''_{88} = -Q_4, \Phi'''_{99} = -Q_5. \end{aligned}$$

由上式知,对 $\Phi''$ 再次运用Schur补,得

$$\begin{aligned} \Phi'' &= \begin{bmatrix} \Phi'''_{11} & \Phi'''_{12} & \Phi'''_{13} & \Phi'''_{14} & \Phi'''_{15} & \Phi'''_{16} \\ * & \Phi'''_{22} & \Phi'''_{23} & \Phi'''_{24} & 0 & 0 \\ * & * & \Phi'''_{33} & \Phi'''_{34} & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi'''_{44} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Phi'''_{55} & 0 \\ * & * & * & * & * & \Phi'''_{66} \rightarrow \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} \Phi'''_{17} & \Phi'''_{18} & \Phi'''_{19} & P M & N_{ai}^T \\ \Phi'''_{27} & \Phi'''_{28} & \Phi'''_{29} & 0 & K_j^T N_{bi}^T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Phi'''_{57} & \Phi'''_{58} & \Phi'''_{59} & 0 & -K_j^T N_{bi}^T \\ \leftarrow \Phi'''_{67} & \Phi'''_{68} & \Phi'''_{69} & 0 & 0 \\ \Phi'''_{77} & 0 & 0 & \tau_m Q_3 M & 0 \\ * & \Phi'''_{88} & 0 & \tau_M Q_4 M & 0 \\ * & * & \Phi'''_{99} & \tau_s Q_5 M & 0 \\ * & * & * & -\varepsilon^{-1} I & 0 \\ * & * & * & * & -\varepsilon I \end{bmatrix} \leq 0. \end{aligned}$$

对 $\Phi''$ 两边同时乘以 $\text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}, Q_3^{-1}, Q_4^{-1}, Q_5^{-1}, I, I\}$ 及其转置,令

$$\begin{cases} X = P^{-1}, K_j X = Y_j, \Xi^{-1} = V; \\ Q_i^{-1} = R_i, i = 1, 2, \dots, 5; \\ M_{12}^{-1} = R_6. \end{cases}$$

并作如下变换:

$$\begin{cases} P^{-1} Q_i P^{-1} \geq 2P^{-1} - Q_i^{-1} = 2X - R_i, \\ \quad i = 1, 2, \dots, 5; \\ P^{-1} \Xi P^{-1} \geq 2P^{-1} - \Xi^{-1} = 2X - V; \\ P^{-1} M_{12} P^{-1} \geq 2P^{-1} - M_{12}^{-1} = 2X - R_6. \end{cases}$$

即可得到矩阵不等式 $\Phi$ ,其中 $K_j = Y_j X^{-1}$ 为系统(24)需要设计的鲁棒容错控制器增益矩阵, $\Xi = V^{-1}$ 为需要设计的离散事件触发权矩阵.

综上所述,可得

$$\begin{aligned} \dot{V} + y^T(t)y(t) - \gamma^2 w^T(t)w(t) &\leq \\ &\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j \eta^T(t) \Phi \eta(t). \end{aligned}$$

当 $w'(t) = 1$ 时,若满足 $\Phi < 0$ ,则 $\dot{V}(t) < 0$ ,误差系统渐近稳定.

对于任意不为零的  $w'(t) \in [0, \infty)$ , 对两边从  $t_0 \rightarrow t$  积分, 可得

$$V(t) - V(t_0) < - \int_{t_0}^t (y^T(t)y(t) - \gamma^2 w'^T(t)w'(t))dt.$$

在零初始条件下, 当  $t \rightarrow \infty$  时, 有

$$\int_0^\infty y^T(t)y(t)dt < \int_0^\infty \gamma^2 w'^T(t)w'(t)dt,$$

即  $\|y(t)\|_2 \leq \gamma \|w'(t)\|_2$ . 由此可知故障模型 (24) 具有  $\gamma$  扰动抑制性能.  $\square$

### 3 仿真算例

选用文献 [17] 中的 NNCS 模型数据, 并选取模糊隶属度函数为

$$M_1(x_2) = \sin^2 x_2, M_2(x_2) = \cos^2 x_2.$$

系统的模糊规则如下:

R1: 如果  $x_2$  是  $M_1$ , 则

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \\ (A_1 + \Delta A_1)x(t) + (B_1 + \Delta B_1)u(t) + \\ E_1 f(t) + D_1 w(t), \\ y(t) = C_1 x(t); \end{cases}$$

R2: 如果  $x_2$  是  $M_2$ , 则

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \\ (A_2 + \Delta A_2)x(t) + (B_2 + \Delta B_2)u(t) + \\ E_2 f(t) + D_2 w(t), \\ y(t) = C_2 x(t). \end{cases}$$

其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -0.5 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.4 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.4 \end{bmatrix}.$$

矩阵  $\Delta A_i, \Delta B_i (i = 1, 2)$  满足如下关系:

$$[\Delta A_i \ \Delta B_i] = MF(t)[N_{ai} \ N_{bi}],$$

且

$$N_{ai} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, N_{bi} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \sin t & 0 \\ 0 & \cos t \end{bmatrix};$$

$$w(t) = \begin{cases} \cos(2 \times \pi \times t) \times \exp(-0.3 \times t), \\ 5 \leq t \leq 10; \\ 0, \text{其他.} \end{cases}$$

系统初始状态选取  $x(0) = [2 \ -2]^T$ . 设采样周期为  $h = 0.05 \text{ s}$ ,  $\tau_m = 0.2$ ,  $\tau_M = 0.3$ , 则  $\tau_s = 0.1$ , 触发参数  $\sigma = 0.3, \varepsilon = 2, a = 0.1, b = 0.2, c = 0.5, \gamma_1 = 2.3, \gamma_2 = 2, \gamma = 3$ .

根据定理 2, 取故障集内失效故障为

$$L_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, L_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.8 \end{bmatrix}, L_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

求得被动容错控制器增益矩阵以及事件触发权矩阵分别为

$$K_1 = \begin{bmatrix} -0.8646 & -1.8911 \\ 0.7798 & 1.7022 \end{bmatrix},$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -1.2030 & -2.4905 \\ -0.0605 & -0.0807 \end{bmatrix},$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} 15.8168 & 32.3181 \\ 32.3181 & 68.0575 \end{bmatrix}.$$

再由定理 1, 求得故障检测观测器的增益矩阵以及残差增益矩阵分别为

$$G_1 = \begin{bmatrix} -0.2587 & 0.5433 \\ 0.4299 & 0.6942 \end{bmatrix},$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} 0.1970 & 0.5727 \\ 0.4734 & 0.6567 \end{bmatrix},$$

$$W = \begin{bmatrix} 1.3634 & -0.1126 \\ -0.1126 & -1.1653 \end{bmatrix}.$$

假设 5 s 以前系统可以正常运行, 运行至 5 s 时执行器发生故障集内故障, 运行至 10 s 时执行器发生故障集外故障  $f = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5 \end{bmatrix}$ .

仿真效果图如下: 图 2 为由鲁棒故障检测观测器估计的故障图; 图 3 和图 4 分别为在初始条件  $x(0) = [2 \ -2]^T$  下, 当执行器发生不同类型的故障集内和故障集外故障时, 其状态分量  $x_1, x_2$  在被动、主动以及混合容错控制下的效果对比, 分别由曲线  $S_1, S_2, S_3$  表示; 图 5 为当  $\sigma = 0.3$  时, DETCS 下 NNCS 主被动混合鲁棒  $H_\infty$  容错控制事件触发图.

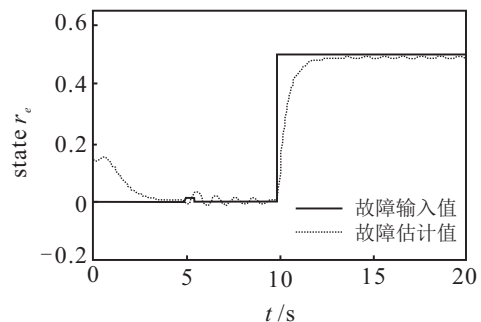
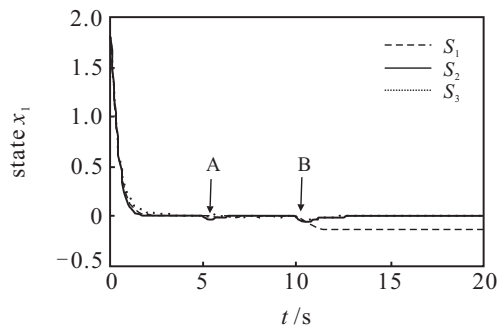
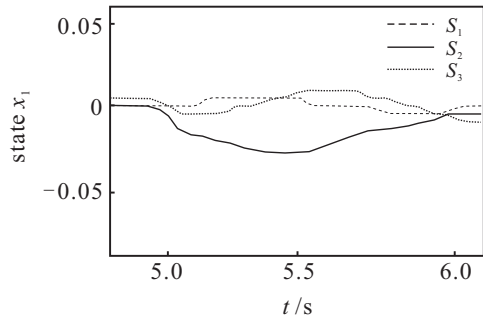


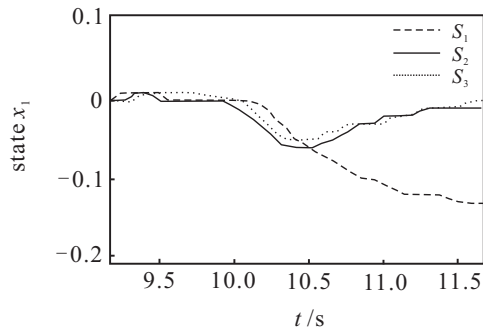
图 2 故障估计



(a)  $x_1$ 在不同控制作用下的响应曲线



(b) 响应曲线局部放大 A

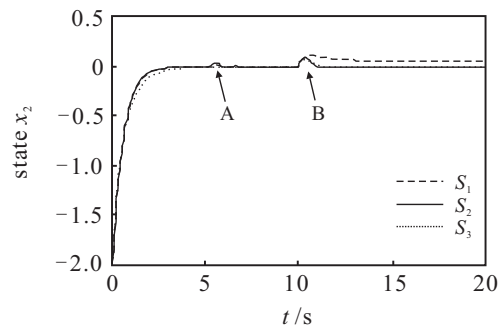


(c) 响应曲线局部放大 B

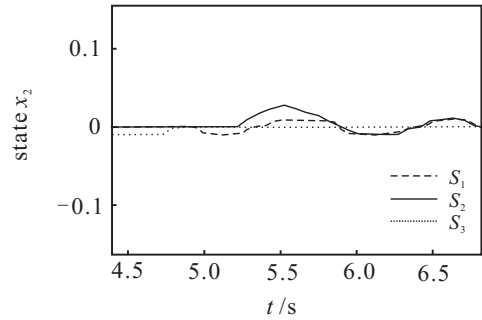
图3 状态  $x_1$  在不同控制作用下的响应曲线

由图2可以看出:本文提出的故障估计方法能够有效地估计故障的大小,故障估计值相对于故障输入值而言,由于时延的存在,除在5s和10s时稍有滞后,其后的时间均可以实现完全跟踪。

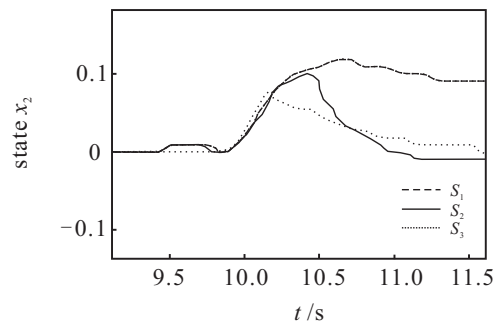
由图3和图4可以看出:当执行器未发生故障时,AFTC和PFTC均可以保持系统稳定,但AFTC的性能优于PFTC;当执行器发生故障集内故障时,PFTC对故障具有良好的容错能力,并能始终保持系统稳定,而AFTC需要根据检测到的故障信息重构控制器,这势必会消耗一些时间而使系统重新恢复稳定,因此出现了一些抖动;当发生故障集外故障时,PFTC失去了对故障的容错能力,系统失稳,而AFTC则显示出优越性,虽然出现了幅值跳变,但能迅速进行故障检测与控制器重构,使系统重新恢复稳定;混合容错控制结合了二者的优点,既能在发生故障集内故障时保持系统稳定,避免出现大的抖动现象,又能在发生故障集外故障时减缓系统性能恶化的速度,并快速重构控制器,使系统保持稳定且具有一定的 $\gamma$ 扰动抑制能力。



(a)  $x_2$ 在不同控制作用下的响应曲线



(b) 响应曲线局部放大 A



(c) 响应曲线局部放大 B

图4 状态  $x_2$  在不同控制作用下的响应曲线

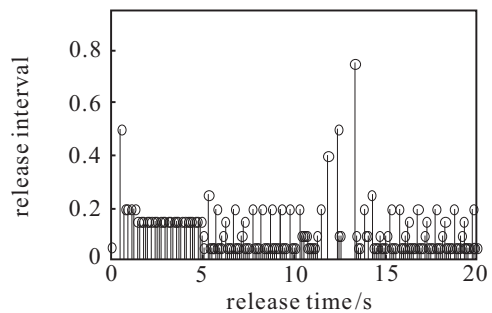


图5 事件触发机制下NNCS主被动混合容错控制的传输时刻与传输间隔

为了说明加入事件发生器确实节约了部分网络资源,在采样周期 $h = 0.05\text{ s}$ , $\sigma = 0.3$ 时截取了20s的仿真时段,横轴代表信息传输时刻,纵轴代表信息发送周期。从图5中可以看出,相比PTTCS,数据的传输量大大减少,说明本文所引用的事件触发条件在主被动混合鲁棒 $H_\infty$ 容错控制中有效地节约了网络资源,进而提高了网络利用的效率。

### 4 结论

本文研究了不确定NNCS故障诊断与主被动混

合容错控制器的集成设计问题. 以往的NCS容错控制方法主要单纯地采用AFTC或者PFTC,然而这两种方法同时针对故障集内故障和故障集外故障时,其容错能力均无法令人满意,并且大部分此类研究采用PTTCS,这势必会造成有限网络资源的浪费. 针对此问题,本文在DETCS下,采用结合了AFTC和PFTC各自优点的主被动混合容错控制方法,对具有执行器任意失效故障以及外界有限能量扰动的不确定NNCS进行 $H_\infty$ 控制器设计,并通过数学推导证明了所采用的算法理论上是正确的. 仿真结果表明,与传统的AFTC或PFTC相比,采用主被动混合容错控制方法不仅可以使系统在出现故障集内故障时保持稳定,而且当系统出现故障集外故障时也能有效地减缓系统性能恶化的速度,并快速重构控制器使系统重新恢复稳定. 除此之外,DETCS的引入,有效地节约了网络资源,避免了数据传输冗余的出现,从而大大提高了网络资源的利用效率.

#### 参考文献(References)

- [1] Xie Chunhua, Yang Guanghong. Data-based fault-tolerant control for uncertain linear systems with actuator faults[J]. Control Theory and Applications, 2016, 10(3): 265-272.
- [2] 罗小元, 袁园. 具有丢包、通讯约束的非线性时滞网络化控制系统鲁棒故障检测[J]. 控制与决策, 2014, 29(11): 2048-2054.  
(Luo X Y, Yuan Y. Fault-detection for nonlinear time-delays networked control systems with packet dropouts and access constraints[J]. Control and Decision, 2014, 29(11): 2048-2054.)
- [3] Zhang Jinhui, Feng Gang. Event-driven observer-based output feedback control for linear systems[J]. Automatica, 2014, 50(7): 1852-1859.
- [4] 金小峥, 杨光红, 常晓恒, 等. 容错控制系统鲁棒 $H_\infty$ 和自适应补偿设计[J]. 自动化学报, 2013, 39(1): 31-42.  
(Jin X Z, Yang G H, Chang X H, et al. Robust fault-tolerant  $H_\infty$  control with adaptive compensation[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(1): 31-42.)
- [5] Wang Huijiao, Zhou Bo, Lim Chengchew, et al.  $H_\infty$  fault-tolerant control of networked control systems with actuator failures[J]. Control Theory and Applications, 2014, 8(12): 1127-1136.
- [6] Zhang Yong, Fang Huajing, Luo Zhen.  $H_\infty$ -based fault detection for nonlinear networked systems with random packet dropout and probabilistic interval delay[J]. J of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(5): 825-831.
- [7] 王君, 李淑真, 李炜. 基于事件触发的线性网络化控制系统主-被动混合容错控制设计[J]. 上海应用技术学院学报: 自然科学版, 2015, 15(2): 178-184.  
(Wang J, Li S Z, Li W. Design of hybrid fault-tolerant networked control system based on event-triggered scheme[J]. J of Shanghai Institute of Technology: Natural Science, 2015, 15(2): 178-184.)
- [8] Peng Chen, Han Qinglong, Yue Dong. To transmit or not to transmit: A discrete event-triggered communication scheme for networked Takagi-Sugeno fuzzy systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2013, 21(1): 164-170.
- [9] Shao Mingyuan, Yu Hao, Hao Fei. On event-triggered tracking control of certain and uncertain linear systems[C]. Proc of the 33rd Chinese Control Conf. Nanjing, 2014: 5779-5784.
- [10] Liu Jinliang, Gu Zhou, Fei Shumin. Reliable control for nonlinear systems with stochastic actuators fault and random delays through a T-S fuzzy model approach[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2016, 32(2): 395-406.
- [11] 肖会芹, 何勇, 吴敏, 等. 基于T-S模糊模型的采样数据网络控制系统 $H_\infty$ 输出跟踪控制[J]. 自动化学报, 2015, 41(3): 661-668.  
(Xiao H Q, He Y, Wu M, et al. Output tracking control for sampled-data networked control systems in T-S fuzzy model[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(3): 661-668.)
- [12] 李炜, 闫坤. 基于离散事件触发的不确定NNCS鲁棒完整性设计[J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(2): 83-90.  
(Li W, Yan K. Integrity design of uncertainty nonlinear networked control system based on discrete event-triggered scheme[J]. J of Lanzhou University of Technology, 2015, 41(2): 83-90.)
- [13] Poogeon Park, Jeong Wanko, Changki Jeong. Reciprocally convex approach to stability of systems with time-varying delays[J]. Automatica, 2010, 47(1): 235-238.
- [14] Xie Lihua. Output feedback  $H_\infty$  control of systems with parameter uncertainty[J]. Int J of Control, 1996, 63(4): 741-750.
- [15] 邱爱兵, 吉虹钢, 顾菊平. 非均匀采样数据系统时变故障估计与调节最优集成设计[J]. 自动化学报, 2014, 40(7): 1493-1504.  
(Qiu A B, Ji H G, Gu J P. Optimal integrated design of time-varying fault estimation and accommodation for nonuniformly sampled data systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(7): 1493-1504.)
- [16] Wang Jun, Li Wei, Guan Ling. Fuzzy observer-based robust  $H_\infty$  guaranteed cost fault-tolerant design for nonlinear NCS[J]. Open Electrical and Electronic Engineering J, 2014, 8(1): 71-76.

(责任编辑: 曹洪武)