

文章编号: 1001-0920(2014)11-1951-08

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2013.1271

## 基于局部交叠异步切换的网络控制系统故障检测

王昭磊<sup>1a</sup>, 徐利杰<sup>2</sup>, 王青<sup>1a</sup>, 董朝阳<sup>1b</sup>

(1. 北京航空航天大学 a. 自动化科学与电气工程学院, b. 航空科学与工程学院, 北京 100191; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 针对存在时变短延和丢包的网路控制系统故障检测问题, 将非线性对象建模为线性切换系统. 考虑工程中存在的局部交叠切换律, 将切换系统划分为若干局部交叠切换子系统. 同时, 考虑滤波器切换滞后引起的异步切换问题, 进一步将系统增广为局部交叠异步切换系统. 在此基础上, 结合公共 Lyapunov 函数和平均驻留时间方法, 以 LMI 形式给出检测滤波器设计方法. 最后, 通过某网络化飞行器的全包线飞行验证了所提出方法的有效性.

**关键词:** 故障检测; 异步切换; 局部交叠; 时延及丢包

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

## Fault detection for the networked control systems with locally over-lapped asynchronous switching law

WANG Zhao-lei<sup>1a</sup>, XU Li-jie<sup>2</sup>, WANG Qing<sup>1a</sup>, DONG Chao-yang<sup>1b</sup>

(1a. School of Automation Science and Electrical Engineering, 1b. School of Aeronautical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China. Correspondent: WANG Zhao-lei, E-mail: beiliwz1123@163.com)

**Abstract:** For the fault detection problem of the networked control systems with the presence of time-varying short delay and packet dropouts, the dynamics of the nonlinear plant are modeled as a switched system. Considering the locally overlapped switching law in practice, the switched system above is divided into several locally overlapped switched systems. Also, considering the asynchronous switching phenomena between the filters and models, the systems are further augmented to be locally overlapped asynchronous switched systems. By combing the common Lyapunov function method and the average dwell time method, the fault detection filters are established in terms of LMIs. Finally, numerical examples based on a networked aircraft's full-envelope flight are given to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** fault detection; asynchronous switching; locally overlapped; delays and packet dropouts

### 0 引言

网络控制系统(NCS)近年来得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>, 为保证其可靠运行, NCS 故障检测问题也得到了广泛关注<sup>[3-4]</sup>. 对于非线性 NCS 的研究, 需要同时考虑被控对象的复杂非线性特性和网络时延、丢包等网络特性的影响, 建模和处理过程较为复杂<sup>[5-6]</sup>. 文献[5]研究了具有随机丢包和干扰的非线性 NCS 故障检测问题, 给出了基于观测器的检测滤波器设计方法. 文献[6]研究了多通道数据传输的非线性 NCS 的故障检测问题, 基于 Markov 跳变系统给出了模型依赖故障检测滤波器设计方法. 另一方面, 切换系统常用于非线性系统建模和分析<sup>[7-8]</sup>. 近年来, 切换信号滞后导致

的异步切换问题对系统性能的影响也逐渐引起了关注<sup>[9-10]</sup>, 但对于异步切换系统的故障检测问题的研究尚不充分. 文献[11]研究了存在测量丢失的异步离散切换系统的故障检测问题, 给出了检测误差满足指定指标的滤波器设计方法. 文献[12]研究了异步切换非线性系统的故障检测滤波器设计问题, 并证明了同步切换系统是异步情况下的特例.

目前, 研究成果多集中于任意切换律或基于(平均)驻留时间的慢切换律, 而对于局部交叠切换律的研究则相对较少. 局部交叠切换律存在于很多实际工程中<sup>[13]</sup>, 如汽车换档、变温调节、工业流水线作业、飞控中的助推器分离和飞行器沿弹道飞行等, 其特点

收稿日期: 2013-09-12; 修回日期: 2014-02-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074027).

作者简介: 王昭磊(1986—), 男, 博士生, 从事网络控制系统故障检测的研究; 王青(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 从事飞行器控制、故障诊断等研究.

是由激活子系统 1 切换至子系统 3 必须经过公共子系统 2. 该特性的产生是由于切换律自变量(如时间、系统状态等)是渐变的, 导致切换律也具有渐变特性.

鉴于目前对局部交叠异步切换系统的研究较少, 本文将一类非线性 NCS 对象建模为线性切换系统, 考虑切换律的局部交叠特性, 为降低设计保守性, 将其划分为若干局部交叠切换子系统 (LOSS). 考虑网络因素导致的异步切换问题, 进一步将系统增广为局部交叠异步切换系统, 并结合公共 Lyapunov 函数和平均驻留时间方法对系统稳定性和  $l_2$  性能进行分析, 给出鲁棒故障检测滤波器设计方法. 最后通过数值仿真表明了所提出方法的有效性.

## 1 模型建立

考虑一类非线性 NCS, 控制和检测单元与执行器直接连接, 与传感器通过数据总线连接. 假设非线性被控对象可分段线性化为如下线性切换系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_{c,\sigma(k)}x(t) + B_{c,\sigma(k)}u(t) + B_{cd,\sigma(k)}d(t) + \\ & B_{cf,\sigma(k)}f(t), \\ y(t) &= C_{c,\sigma(k)}x(t) + D_{cd,\sigma(k)}d(t) + D_{cf,\sigma(k)}f(t). \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $x \in R^n$  为状态;  $u \in R^m$  为输入;  $y \in R^q$  为输出;  $d \in R^p$ ,  $f \in R^r$  为  $L_2$  有界未知扰动和故障;  $A_{c,\sigma(k)}$ 、 $B_{c,\sigma(k)}$ 、 $C_{c,\sigma(k)}$ 、 $B_{cd,\sigma(k)}$ 、 $B_{cf,\sigma(k)}$ 、 $D_{cd,\sigma(k)}$ 、 $D_{cf,\sigma(k)}$  为适维常矩阵; 切换信号  $\sigma(k) \in \Upsilon$ , 且  $\Upsilon = \{1, 2, \dots, N\}$  为子系统标号全集.

**注 1** 切换指令  $\sigma(k)$  根据当前状态在线确定, 由于系统状态参数通过网络传输给切换决策模块时存在时延和丢包,  $\sigma(k)$  的更新存在延迟, 导致滤波器切换时刻滞后于模型切换时刻, 引发异步切换问题.

不失一般性, 给出如下假设.

**假设 1** 采样周期为  $T$ , 控制器和执行器节点均为事件驱动, 传感器节点采用时间驱动; 单包传输, 丢包满足伯努利分布, 丢包率为  $\rho$ , 随机时延  $\tau_k < T$ . 系统总采用最新数据, 即将长时延视为丢包. 采用输出反馈控制, 令  $z(k)$  为到达控制和检测单元的信号  $y(k)$ ,  $\bar{u}(k)$  为执行器端实际控制器信号.

定义随机变量  $\theta(k) \in \{0, 1\}$ ,  $\theta(k) = 1$  表示无丢包,  $\theta(k) = 0$  表示丢包;  $\Pr\{\theta(k) = 1\} = \rho$ ,  $\Pr\{\theta(k) = 0\} = 1 - \rho$ . 由于存在零阶保持器, 有

$$\begin{aligned} z(k) &= \theta(k)y(k) + (1 - \theta(k))z(k-1), \\ \bar{u}(k) &= \theta(k)u(k) + (1 - \theta(k))\bar{u}(k-1). \end{aligned} \quad (2)$$

当仅具有时延时, 系统 (1) 子模型  $i$  的离散模型为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_i x(k) + B_i^0 u(k) + B_i^1 \bar{u}(k-1) + \\ & B_{d,i} d(k) + B_{f,i} f(k), \end{aligned}$$

$$y(k) = C_i x(k) + D_{d,i} d(k) + D_{f,i} f(k). \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} A_i &= e^{A_{c,i}T}, B_i^0 = \int_0^{T-\tau_k} e^{A_{c,i}t} B_{c,i} dt, \\ B_i^1 &= \int_{T-\tau_k}^T e^{A_{c,i}t} B_{c,i} dt, B_{d,i} = \int_0^T e^{A_{c,i}t} B_{cd,i} dt, \\ B_{f,i} &= \int_0^T e^{A_{c,i}t} B_{cf,i} dt, C_i = C_{c,i}, D_{d,i} = D_{cd,i}, \\ D_{f,i} &= D_{cf,i}, \forall i \in \Upsilon = \{1, 2, \dots, N\}. \end{aligned}$$

发生丢包时, 子模型  $i$  的离散模型可表示为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \\ & A_i x(k) + B_i \bar{u}(k-1) + B_{d,i} d(k) + B_{f,i} f(k), \\ y(k) &= C_i x(k) + D_{d,i} d(k) + D_{f,i} f(k), \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $B_i = B_i^0 + B_i^1 = \int_0^T e^{A_{c,i}t} B_{c,i} dt$ . 由于  $\tau_k$  未知,  $B_i^0$  和  $B_i^1$  未知, 令  $\Delta u(k) = \bar{u}(k-1) - u(k)$ , 应用泰勒近似展开可得  $B_i^1 \Delta u(k) \approx e^{A_{c,i}T} B_{c,i} \Delta u(k) \tau_k$ .

定义  $u_\tau(k) = \Delta u(k) \tau_k$ ,  $B_{\tau,i} = e^{A_{c,i}T} B_{c,i}$ . 综合式 (3) 和 (4), 子模型  $i$  对应离散线性 NCS 模型表示为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_i x(k) + B_i \bar{u}(k) + B_{d\tau,i} d_\tau(k) + B_{f,i} f(k), \\ y(k) &= C_i x(k) + D_i d_\tau(k) + D_{f,i} f(k). \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} B_{d\tau,i} &= [\theta(k) B_{\tau,i} \quad B_{d,i}], D_i = [0 \quad D_{d,i}], \\ d_\tau(k) &= [u_\tau^T(k) \quad d^T(k)]^T. \end{aligned}$$

下面首先给出局部交叠切换律的数学描述.

**定义 1** 如果存在有限的集合  $\Upsilon_n, n \in \Gamma, \bigcup_{n=1}^r \Upsilon_n = \Upsilon$ , 且  $\forall l \in \Gamma, \Upsilon_l \cap \left( \bigcup_{m=1, m \neq l}^r \Upsilon_m \right) \neq \emptyset$ , 使得  $\forall k \geq 0, \sigma(k+1) \in \bigcup_{n \in \{m | \sigma(k) \in \Upsilon_m\}} \Upsilon_n$  成立, 则切换律  $\sigma(k)$  称为可局部化的. 其中:  $\Gamma = \{1, 2, \dots, r\}$  为自然数集合,  $r$  为交叠子系统 (LOSS) 个数.

基于定义 1, 可将切换系统 (1) 重写为如下局部交叠切换系统, 即 LOSS  $\sigma_n(k)$ :

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_{\sigma_n(k)} x(k) + B_{\sigma_n(k)} \bar{u}(k) + \\ & B_{d\tau,\sigma_n(k)} d_\tau(k) + B_{f,\sigma_n(k)} f(k), \\ y(k) &= C_{\sigma_n(k)} x(k) + D_{\sigma_n(k)} d_\tau(k) + \\ & D_{f,\sigma_n(k)} f(k). \end{aligned} \quad (6)$$

其中:  $\sigma_n(k) \rightarrow \Upsilon_n, \bigcup_{n=1}^r \Upsilon_n = \Upsilon, n \in \Gamma = \{1, 2, \dots, r\}$ .

## 2 问题描述

构造模态依赖故障检测滤波器

$$\begin{aligned} x_\eta(k+1) &= A_{\eta,\sigma(k)} x_\eta(k) + B_{\eta,\sigma(k)} z(k), \\ r(k) &= C_{\eta,\sigma(k)} x_\eta(k) + D_{\eta,\sigma(k)} z(k). \end{aligned} \quad (7)$$

其中:  $\sigma(k) \in \mathcal{T}$ ,  $x_\eta \in R^{\bar{h}}$ ,  $r \in R^{\bar{b}}$  分别为滤波器状态和残差,  $A_{\eta,\sigma(k)}$ ,  $B_{\eta,\sigma(k)}$ ,  $C_{\eta,\sigma(k)}$ ,  $D_{\eta,\sigma(k)}$  为待求参数阵.

假设  $k_1, k_2, \dots, k_{r-1}, k_r$  分别为 LOSS 1 ~  $r$  的激活时刻,  $k_{n,1}, k_{n,2}, \dots$  为 LOSS  $n$  ( $n \in \Gamma$ ) 内各工作点的激活时刻, 当  $k \in [k_{n,l}, k_{n,l+1})$  ( $l \in N$ ) 时, 工作点  $\sigma(k_{n,l})$  被激活. 定义  $\mathcal{T}_\downarrow(k_{n,l}, k_{n,l+1})$  和  $\mathcal{T}_\uparrow(k_l, k_{l+1})$  分别代表区间  $[k_{n,l}, k_{n,l+1})$  中 Lyapunov 函数减小或增加的分散区间的并集<sup>[9]</sup>,  $[k_{n,l}, k_{n,l+1}) = \mathcal{T}_\downarrow(k_{n,l}, k_{n,l+1}) \cup \mathcal{T}_\uparrow(k_{n,l}, k_{n,l+1})$ , 符号  $\mathcal{T}_\downarrow(k_{n,l+1} - k_{n,l})$  和  $\mathcal{T}_\uparrow(k_{n,l+1} - k_{n,l})$  分别代表区间  $\mathcal{T}_\downarrow(k_{n,l}, k_{n,l+1})$  和  $\mathcal{T}_\uparrow(k_{n,l}, k_{n,l+1})$  的长度.

考虑由滤波器切换指令  $\sigma(k)$  更新滞后引起的异步切换问题, 相应  $\mathcal{T}_\uparrow(k_{n,l}, k_{n,l+1})$  区间仅发生在子系统切换时刻后<sup>[9]</sup>. 假设  $\hat{k}_{n,1}, \hat{k}_{n,2}, \dots$  代表 LOSS  $n$  内各滤波器激活时刻, 切换时滞变量可以定义为

$$\mathcal{T}_\uparrow(k_{n,l}, k_{n,l+1}) \triangleq \hat{k}_{n,l} - k_{n,l} = \tau_{n,l}, \quad \forall l \in N, n \in \Gamma,$$

即  $\tau_{n,l}$  为切换时刻  $k_{n,l}$  对应的滤波器切换时滞.

由于滤波器参数  $\sigma(k)$  更新存在时滞  $\tau_{n,l}$ , 式 (7) 将转化为

$$\begin{aligned} x_\eta(k+1) &= A_{\eta,\sigma_n(\hat{k})} x_\eta(k) + B_{\eta,\sigma_n(\hat{k})} z(k), \\ r(k) &= C_{\eta,\sigma_n(\hat{k})} x_\eta(k) + D_{\eta,\sigma_n(\hat{k})} z(k), \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $\hat{k} = k - \tau_{n,l}$ .

定义增广向量

$$\begin{aligned} \xi(k) &= [x^\top(k) \quad z^\top(k-1) \quad x_\eta^\top(k)]^\top, \\ w(k) &= [\bar{u}^\top(k) \quad u_\tau^\top(k) \quad d^\top(k) \quad f^\top(k)]^\top, \end{aligned}$$

并令  $r_e(k) = r(k) - f(k)$ . 综合式 (2)、(6) 和 (8), 对于任意  $\forall \{\sigma_n(k_{n,l}) = i, \sigma_n(k_{n,l} - \tau_{n,l}) = j\} \in \mathcal{Y}_n \times \mathcal{Y}_n, i \neq j, n \in \Gamma$ , 可得局部交叠异步切换系统

$$\begin{aligned} \xi(k+1) &= (\hat{A}_{ij} + \bar{\theta}(k)\bar{A}_{ij})\xi(k) + (\hat{B}_{ij} + \bar{\theta}(k)\bar{B}_{ij})w(k), \\ r_e(k) &= (\hat{C}_{ij} + \bar{\theta}(k)\bar{C}_{ij})\xi(k) + (\hat{D}_{ij} + \bar{\theta}(k)\bar{D}_{ij})w(k), \\ \forall k &\in [k_{n,l}, k_{n,l} + \tau_{n,l}); \\ \xi(k+1) &= (\hat{A}_{ii} + \bar{\theta}(k)\bar{A}_{ii})\xi(k) + (\hat{B}_{ii} + \bar{\theta}(k)\bar{B}_{ii})w(k), \\ r_e(k) &= (\hat{C}_{ii} + \bar{\theta}(k)\bar{C}_{ii})\xi(k) + (\hat{D}_{ii} + \bar{\theta}(k)\bar{D}_{ii})w(k), \\ \forall k &\in [k_{n,l} + \tau_{n,l}, k_{n,l+1}). \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{\theta}(k) &= \theta(k) - \rho, \quad E\{\bar{\theta}(k)\} = 0, \\ E\{\bar{\theta}(k)\bar{\theta}(k)\} &= \rho(1 - \rho), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{A}_{pq} &= \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 \\ \rho C_p & 1 - \rho & 0 \\ \rho B_{\eta,q} C_p & (1 - \rho) B_{\eta,q} & A_{\eta,q} \end{bmatrix}, \\ \hat{B}_{pq} &= \begin{bmatrix} B_p & \rho B_{\tau,p} & B_{d,p} & B_{f,p} \\ 0 & 0 & \rho D_{d,p} & \rho D_{f,q} \\ 0 & 0 & \rho B_{\eta,q} D_{d,p} & \rho B_{\eta,q} D_{f,p} \end{bmatrix}, \\ \bar{A}_{pq} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ C_p & -I & 0 \\ B_{\eta,q} C_p & -B_{\eta,q} & 0 \end{bmatrix}, \\ \bar{B}_{pq} &= \begin{bmatrix} 0 & B_{\tau,p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{d,p} & D_{f,p} \\ 0 & 0 & B_{\eta,q} D_{d,p} & B_{\eta,q} D_{f,p} \end{bmatrix}, \\ \hat{C}_{pq} &= [\rho D_{\eta,q} C_p \quad (1 - \rho) D_{\eta,q} \quad C_{\eta,q}], \\ \hat{D}_{pq} &= [0 \quad 0 \quad \rho D_{\eta,q} D_{d,p} \quad \rho D_{\eta,q} D_{f,p} - I], \\ \bar{C}_{pq} &= [D_{\eta,q} C_p \quad -D_{\eta,q} \quad 0], \\ \bar{D}_{pq} &= [0 \quad 0 \quad D_{\eta,q} D_{d,p} \quad D_{\eta,q} D_{f,p}]. \end{aligned}$$

本文目标归结为寻找故障检测滤波器 (8) 和可行切换律, 使得系统 (9) 全局一致渐近均方稳定 (GUAS-M), 且对于任意非零  $w(k) \in L_2[0, \infty)$ , 在零初始条件下, 满足

$$\begin{aligned} E \left\{ \sum_{s=k_{1,1}}^{\infty} (1 - \alpha)^{s-k_{1,1}} r_e^\top(s) r_e(s) \right\} &\leq \\ \sum_{s=k_{1,1}}^{\infty} \gamma^2 w^\top(s) w(s) &\quad (10) \end{aligned}$$

的加权  $l_2$  增益  $\gamma > 0$ , 其中  $0 < \alpha < 1$ . 同时, 残差评估函数和阈值定义为

$$\begin{aligned} J(k) &= \left( \frac{1}{L+1} \sum_{i=k-L}^k r^\top(i) r(i) \right)^{1/2}, \\ J_{th} &= \sup_{d \in L_2[0, \infty), f=0} J(k), \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $L$  为故障检测时间窗口,  $L$  越大对残差信号平滑效果越好, 但过大会影响检测速度, 应综合考虑检测效果和速度进行选取. 基于上述分析, 采用如下检测逻辑实现故障检测:

$$J(k) > J_{th} \Rightarrow \text{故障}, \quad J(k) \leq J_{th} \Rightarrow \text{正常}. \quad (12)$$

### 3 主要结论

**定义 2** 对于 LOSS  $n$  内子切换信号  $\sigma_n(k)$ ,  $n \in \Gamma$ , 令  $N_{\sigma_n}[\bar{k}_1, \bar{k}_2]$  表示  $\sigma_n(k)$  在  $[\bar{k}_1, \bar{k}_2]$  内工作点的切换次数. 若存在任意的  $\bar{N}_0 \geq 0$  和  $\tau_a^n > 0$  ( $n \in \Gamma$ ), 使得

$$N_{\sigma_n}[\bar{k}_1, \bar{k}_2] \leq \bar{N}_0 + \frac{\bar{k}_2 - \bar{k}_1}{\tau_a^n}, \quad (13)$$

则称  $\tau_a^n$  为 LOSS  $n$  内平均驻留时间, 本文取  $\bar{N}_0 = 0$ .

**定义 3** 给定全局切换序列  $\sigma(k)$ , 令  $N_\sigma[k_1, k_2]$

表示系统在  $[k_1, k_2]$  时间内 LOSS 间切换的次数, 若存在任意给定的  $N_0 \geq 0$  和  $\bar{h}_\sigma > 0$ , 使得

$$N_\sigma[k_1, k_2] \leq N_0 + \frac{k_2 - k_1}{\bar{h}_\sigma}, \quad (14)$$

则称  $\bar{h}_\sigma$  为 LOSS 间平均驻留时间. 不失一般性, 本文取  $N_0 = 0$ , 且简记  $N_\sigma[k_1, k_2]$  为  $N_\sigma$ .

**引理 1** 考虑系统 (9) 在 LOSS  $n$  内工作, 对于给定常数  $0 < \alpha < 1, \beta \geq -\alpha, \mu \geq 1$ , 若存在连续可微函数  $V_{\sigma_n(k)}$  和两个  $\kappa_\infty$  类函数  $\kappa_1, \kappa_2$ , 使得在  $w(k) = 0, \forall (m, p) \in \Upsilon_n \times \Upsilon_n, m \neq p, \forall n \in \Gamma$  时有

$$\kappa_1(\|\xi(k)\|) \leq V_m(\xi(k)) \leq \kappa_2(\|\xi(k)\|); \quad (15)$$

$$\begin{cases} E\{\Delta V_m(\xi(k))\} \leq \\ -\alpha V_m(\xi(k)), \forall k \in \mathcal{T}_\downarrow(k_{n,l}, k_{n,l+1}); \\ \beta V_m(\xi(k)), \forall k \in \mathcal{T}_\uparrow(k_{n,l}, k_{n,l+1}); \end{cases} \quad (16)$$

$$V_m(\xi(k_{n,l})) \leq \mu V_p(\xi(k_{n,l})) \quad (17)$$

成立, 则 LOSS  $n$  内, 系统在平均驻留时间  $\tau_a^n$  满足式 (18) 的切换信号下 GUAS-M, 即

$$\tau_a^n > \tau_a^{n*} = -\{\tau_M^n [\ln \tilde{\beta} - \ln \tilde{\alpha}] + \ln \mu\} / \ln \tilde{\alpha}. \quad (18)$$

其中:  $\tilde{\alpha} = 1 - \alpha, \tilde{\beta} = 1 + \beta, \tau_M^n = \max_{\forall l \in N} \tau_{n,l}, n \in \Gamma$ .

**引理 2** 考虑系统 (9) 在 LOSS  $n$  内工作, 对于给定常数  $0 < \alpha < 1, \beta \geq -\alpha, \mu \geq 1, \gamma_m > 0, \sigma_n(k) = m \in \Upsilon_n$ , 若存在连续可微函数  $V_{\sigma_n(k)}$  ( $\forall n \in \Gamma$ ), 使得式 (17) 和 (19) 成立, 则 LOSS  $n$  内, 系统在满足式 (18) 的切换信号下 GUAS-M, 且具有形如式 (10) 的加权  $l_2$  增益  $\bar{\gamma}_n$ . 其中

$$\bar{\gamma}_n = \max_{\forall m \in \Upsilon_n} \{\sqrt{\mu^{\bar{N}_0} \theta^{\tau_M^n} \bar{N}_0} \gamma_m\};$$

$$\theta = (1 + \beta) / (1 - \alpha);$$

$$\phi(k) = E\{r_e^T(k) r_e(k)\} - \gamma_m w^T(k) w(k);$$

$$\begin{cases} E\{\Delta V_m(\xi(k))\} \leq \\ -\alpha V_m(\xi(k)) - \phi(k), \forall k \in \mathcal{T}_\downarrow(k_{n,l}, k_{n,l+1}); \\ \beta V_m(\xi(k)) - \phi(k), \forall k \in \mathcal{T}_\uparrow(k_{n,l}, k_{n,l+1}). \end{cases} \quad (19)$$

**注 2** 引理 1 和引理 2 的证明可参见文献 [14] 的定理 3.15, 通过使用  $E(V_m(x(k)))$  和  $E(\Delta V_m(x(k)))$  替换文献 [10] 引理 3 和引理 4 证明中的  $V_m(x(k))$  和  $\Delta V_m(x(k))$  直接得到, 限于篇幅, 此略.

### 3.1 局部稳定性和 $l_2$ 性能分析

**定理 1** 对于给定常数  $0 < \alpha < 1, \beta \geq -\alpha, \vartheta = \sqrt{\rho(1-\rho)}, \gamma_n > 0, \forall n \in \Gamma$ , 若存在  $P_n > 0, \forall n \in \Gamma$ , 使得 LMI s (20) 和 (21) 成立, 则 LOSS  $n$  内, 对于任意  $\tau_a^n$  满足式 (22) 约束的  $\sigma_n(k)$ , 系统 (9) GUAS-M, 且具有加权  $l_2$  增益  $\gamma_n$ . 其中

$$i, j \in \Upsilon_n, \forall n \in \Gamma, i \neq j, \Omega_n = P_n - G - G^T,$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_n & 0 & 0 & 0 & G^T \hat{A}_{ii} & G^T \hat{B}_{ii} \\ * & \Omega_n & 0 & 0 & \vartheta G^T \bar{A}_{ii} & \vartheta G^T \bar{B}_{ii} \\ * & * & -I & 0 & \hat{C}_{ii} & \hat{D}_{ii} \\ * & * & * & -I & \vartheta \bar{C}_{ii} & \vartheta \bar{D}_{ii} \\ * & * & * & * & -(1-\alpha)P_n & 0 \\ * & * & * & * & * & -\gamma_n^2 I \end{bmatrix} < 0, \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_n & 0 & 0 & 0 & G^T \hat{A}_{ij} & G^T \hat{B}_{ij} \\ * & \Omega_n & 0 & 0 & \vartheta G^T \bar{A}_{ij} & \vartheta G^T \bar{B}_{ij} \\ * & * & -I & 0 & \hat{C}_{ij} & \hat{D}_{ij} \\ * & * & * & -I & \vartheta \bar{C}_{ij} & \vartheta \bar{D}_{ij} \\ * & * & * & * & -(1+\beta)P_n & 0 \\ * & * & * & * & * & -\gamma_n^2 I \end{bmatrix} < 0, \quad (21)$$

$$\tau_a^n > \tau_a^{n*} = -\{\tau_M^n [\ln \tilde{\beta} - \ln \tilde{\alpha}]\} / \ln \tilde{\alpha}. \quad (22)$$

**证明** 首先证明在 LOSS  $n$  内的稳定性, 为 LOSS  $n$  选取式 (23) 所示的公共 Lyapunov 函数

$$V_n(k) = \xi^T(k) P_n \xi(k), \forall n \in \Gamma. \quad (23)$$

式 (23) 满足引理 1 中式 (15) 的约束, 故 LOSS  $n$  内各工作点有公共 Lyapunov 函数. 由引理 1 可知, 此时  $\mu = 1$ , 根据式 (18), 系统 (9) 在 LOSS  $n$  内,  $\tau_a^n$  需满足式 (22) 的约束. 当  $w(k) = 0$  时,  $\forall k \in [k_{n,l} + \tau_{n,l}, k_{n,l+1})$ , 对于任意非零  $\xi(k)$  和切换信号  $\forall \{\sigma_n(k) = i, \sigma_n(k - \tau_{n,l}) = i\} \in \Upsilon_n \times \Upsilon_n, \forall n \in \Gamma$ , 有

$$\begin{aligned} E\{V_n(k+1)\} - V_n(k) + \alpha V_n(k) = \\ E\{\xi^T(k+1) P_n \xi(k+1)\} - \xi^T(k) (1-\alpha) P_n \xi(k) = \\ \xi^T(k) \Lambda_{1,i} \xi(k), \end{aligned} \quad (24)$$

其中  $\Lambda_{1,i} = \hat{A}_{ii}^T P_n \hat{A}_{ii} + \vartheta^2 \bar{A}_{ii}^T P_n \bar{A}_{ii} - (1-\alpha) P_n$ .

由式 (20) 可知,  $P_n - G - G^T \geq -G^T P_n^{-1} G$ , 替换式 (20) 和 (21), 利用  $\text{diag}\{G^{-T}, G^{-T}, I, I, I, I\}$  进行全等变换, 由 Schur 补可知, 式 (20) 等价于

$$\begin{aligned} \Gamma_{1,i} = \\ \begin{bmatrix} \hat{A}_{ii} & \hat{B}_{ii} \\ \vartheta \bar{A}_{ii} & \vartheta \bar{B}_{ii} \\ \hat{C}_{ii} & \hat{D}_{ii} \\ \vartheta \bar{C}_{ii} & \vartheta \bar{D}_{ii} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{A}_{ii} & \hat{B}_{ii} \\ \vartheta \bar{A}_{ii} & \vartheta \bar{B}_{ii} \\ \hat{C}_{ii} & \hat{D}_{ii} \\ \vartheta \bar{C}_{ii} & \vartheta \bar{D}_{ii} \end{bmatrix} - \\ \begin{bmatrix} (1-\alpha)P_n & 0 \\ 0 & \gamma_n^2 I \end{bmatrix} < 0. \end{aligned} \quad (25)$$

由式 (25) 矩阵 (1,1) 分块可知  $\Lambda_{1,i} < 0$ , 则由式 (24) 可得到

$$\begin{aligned} E\{\Delta V_n(k)\} &\leq -\alpha V_n(k), \\ \forall k &\in [k_{n,l} + \tau_{n,l}, k_{n,l+1}), \forall n \in \Gamma. \end{aligned} \quad (26)$$

利用相同方法, 结合式 (21) 可证得, 当  $w(k) = 0$

时,  $\forall k \in [k_{n,l}, k_{n,l} + \tau_{n,l})$ , 有

$$\begin{aligned} E\{\Delta V_n(k)\} &\leq \beta V_n(k), \\ \forall k &\in [k_{n,l}, k_{n,l} + \tau_{n,l}), \forall n \in \Gamma. \end{aligned} \quad (27)$$

结合式(26)、(27)和引理1可知, 系统(9)在LOSS  $n$  内切换且  $\tau_a^n$  满足式(22)约束时 GUAS-M.

下面证明系统(9)在零初始条件下具有式(10)的加权  $l_2$  增益. 定义  $\zeta(k) = [\xi^T(k) \ w^T(k)]^T$ , 对于任意非零  $w(k) \in L_2[0, \infty)$ ,  $\forall k \in [k_{n,l} + \tau_{n,l}, k_{n,l+1})$ ,  $\forall n \in \Gamma$  时, 引理2各子系统  $l_2$  增益均为  $\gamma_n$ , 则有

$$\begin{aligned} &E\{V_n(k+1)\} - V_n(k) + \alpha V_n(k) + \\ &E\{r_e^T(k)r_e(k)\} - \gamma_n^2 w^T(k)w(k) = \\ &E\{\xi^T(k+1)P_n\xi(k+1)\} - \\ &\xi^T(k)(1-\alpha)P_n(a_k)\xi(k) - \gamma_n^2 w^T(k)w(k) + \\ &E\left\{ \begin{bmatrix} \xi(k) \\ w(k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{C}_{ii}^T + \bar{\theta}(k)\bar{C}_{ii}^T \\ \hat{D}_{ii}^T + \bar{\theta}(k)\bar{D}_{ii}^T \end{bmatrix} \times \right. \\ &\left. \begin{bmatrix} \hat{C}_{ii}^T + \bar{\theta}(k)\bar{C}_{ii}^T \\ \hat{D}_{ii}^T + \bar{\theta}(k)\bar{D}_{ii}^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \xi(k) \\ w(k) \end{bmatrix} \right\} = \\ &\zeta^T(k)\Gamma_{1,i}\zeta(k). \end{aligned} \quad (28)$$

由式(25),  $\forall k \in [k_{n,l} + \tau_{n,l}, k_{n,l+1})$ ,  $\forall n \in \Gamma$ , 有

$$\begin{aligned} E\{\Delta V_n(k)\} &\leq \\ &-\alpha V_n(k) + E\{r_e^T(k)r_e(k)\} - \gamma_n^2 w^T(k)w(k). \end{aligned} \quad (29)$$

利用相同方法, 结合式(21)得到对于任意非零  $w(k) \in L_2[0, \infty)$ ,  $\forall k \in [k_{n,l}, k_{n,l} + \tau_{n,l})$ ,  $\forall n \in \Gamma$ , 有

$$\begin{aligned} E\{\Delta V_n(k)\} &\leq \\ &\beta V_n(k) + E\{r_e^T(k)r_e(k)\} - \gamma_n^2 w^T(k)w(k). \end{aligned} \quad (30)$$

结合式(29)、(30)和引理2可得, 在LOSS  $n$  内系统(9)在  $\tau_a^n$  满足式(22)约束的异步切换下 GUAS-M, 由于  $\bar{N}_0 = 0$ , 加权  $l_2$  增益退化为  $\gamma_n$ .  $\square$

### 3.2 全局稳定性和 $l_2$ 性能分析

**定理2** 给定常数  $\mu \geq 1$ , 若存在正定阵  $P_n$ ,  $n \in \Gamma$ ,  $P_m \leq \mu P_n$ ,  $\forall m, n \in \Gamma$ ,  $m \neq n$ , 使得定理1成立, 同时全局切换信号  $\sigma(k)$  满足

$$\bar{h}_a > \bar{h}_a^* = -\ln \mu / \ln \varsigma, \quad (31)$$

则系统(9)GUAS-M, 且在零初始条件下具有式(10)的加权  $l_2$  增益. 其中

$$\begin{aligned} \gamma &= \max\{\gamma_n\}, \forall n \in \Gamma; \\ \varsigma &= \tilde{\alpha}\theta^{\tau_M/\tau_a^{\min}}, \tau_a^{\min} = \min_{n \in \Gamma}(\tau_a^n), \tau_M = \max_{n \in \Gamma} \tau_M^n. \end{aligned}$$

**证明** 定理1可以保证系统在LOSS内切换时 GUAS-M. 当在LOSS间切换时, 假设系统从LOSS  $1 \sim r$  按顺序激活, 由定义3可知  $N_\sigma = r - 1$ . 令LOSS  $r$  内  $k \in [k_{r,l}, k_{r,l+1})$ , 则由式(26)和(27)得到

$$\begin{aligned} E\{V_r(k)\} &\leq \\ &\tilde{\alpha}^{\mathcal{T}_\downarrow(k-k_{r,l})} \tilde{\beta}^{\mathcal{T}_\uparrow(k-k_{r,l})} E\{V_r(k_{r,l})\} \leq \\ &\tilde{\alpha}^{(k-k_{r,l})} \theta^{\tau_M} E\{V_r(k_{r,l})\} \leq \\ &\tilde{\alpha}^{(k-k_r)} (\theta^{\tau_M})^{N_{\sigma_r}(k,k_r)} E\{V_r(k_r)\} \leq \\ &(\tilde{\alpha}\theta^{\tau_M/\tau_a^r})^{(k-k_r)} E\{V_r(k_r)\}. \end{aligned} \quad (32)$$

由于  $\tau_a^n$  满足式(22)的约束, 有

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}\theta^{\tau_M/\tau_a^r} &< \\ \tilde{\alpha}\theta^{\frac{-\tau_M^r \ln \tilde{\alpha}}{\tau_M \ln \theta}} &= \tilde{\alpha}(e^{\ln \theta})^{\frac{-\ln \tilde{\alpha}}{\ln \theta}} = \tilde{\alpha}/\tilde{\alpha} = 1. \end{aligned} \quad (33)$$

令  $\varsigma = \tilde{\alpha}\theta^{\tau_M/\tau_a^{\min}} < 1$ . 其中:  $\tau_a^{\min} = \min_{n \in \Gamma}(\tau_a^n)$ ,  $\tau_M = \max_{n \in \Gamma} \tau_M^n$ . 由式(32)和(33)得到

$$E\{V_s(k)\} \leq \varsigma^{(k-k_s)} E\{V_s(k_s)\}, \forall s \in \Gamma. \quad (34)$$

同时, 由式  $P_m \leq \mu P_n$ ,  $\forall m, n \in \Gamma$ ,  $m \neq n$ , 可得

$$V_m(k) \leq \mu V_n(k). \quad (35)$$

基于式(34)和(35), 有

$$\begin{aligned} E\{V_r(k)\} &\leq \varsigma^{(k-k_r)} E\{V_r(k_r)\} \leq \\ &\mu \varsigma^{(k-k_r)} E\{V_{r-1}(k_r)\} \leq \\ &\mu \varsigma^{(k-k_r)} \varsigma^{(k_r-k_{r-1})} E\{V_{r-1}(k_{r-1})\} \leq \\ &\vdots \\ &\mu^{N_\sigma} \varsigma^{(k-k_r)} \varsigma^{(k_r-k_{r-1})} \dots \varsigma^{(k_2-k_1)} V_1(k_1) = \\ &\mu^{N_\sigma} \varsigma^{(k-k_1)} V_1(k_1) \leq \\ &\mu^{N_0+(k-k_1)/\bar{h}_\sigma} \varsigma^{(k-k_1)} V_1(k_1) \leq \\ &\mu^{N_0} (\mu^{1/\bar{h}_\sigma} \varsigma)^{(k-k_1)} V_1(k_1). \end{aligned} \quad (36)$$

由于LOSS间  $\bar{h}_\sigma$  满足式(31)的约束, 有

$$\mu^{1/\bar{h}_\sigma} \varsigma < \mu^{-\ln \varsigma / \ln \mu} \varsigma = e^{-\ln \varsigma} \varsigma = \varsigma / \varsigma = 1.$$

可见, 当  $k \rightarrow \infty$  时,  $E\{V_r(k)\} \rightarrow 0$ , 结合式(15)易证得系统GUAS-M. 由定理1可知, 在LOSS  $n$  内, 零初始条件下具有加权  $l_2$  增益  $\gamma_n$ , 可得系统全局切换过程中, 具有加权  $l_2$  增益  $\gamma = \max\{\gamma_n\}$ ,  $n \in \Gamma$ .  $\square$

**注3** 由式(22)和(31)可知,  $\tau_a^{n*}$  由异步切换引起,  $\bar{h}_a^*$  主要由参数  $\mu$  引起, 故  $\tau_a^{n*}$  比  $\bar{h}_a^*$  小得多. 若将所有子系统划为一个LOSS, 则退化为公共Lyapunov函数情况; 若将各子系统视为一个LOSS, 则退化为平均驻留时间方法情况. 由于全局公共Lyapunov函数难以选取, 而平均驻留时间方法需满足较大的  $\bar{h}_a^*$  约束, 本文通过适当划分LOSS, 使得LOSS内切换满足较小的  $\tau_a^{n*}$  约束, LOSS间切换满足  $\bar{h}_a^*$  约束, 进而使算法具有较大的灵活性和较低的保守性.

### 3.3 滤波器设计

**定理3** 对于给定常数  $0 < \alpha < 1$ ,  $\beta \geq -\alpha$ ,  $\mu \geq 1$ ,  $\vartheta = \sqrt{\rho(1-\rho)}$ ,  $\gamma_n > 0$ , 如果存在  $\bar{A}_{\eta,i}, \bar{B}_{\eta,i}, \bar{C}_{\eta,i}$ ,



数. 在均能满足的情况下再保证系统性能最优, 将  $\mathcal{Y}$  划分为  $\mathcal{Y}_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 、 $\mathcal{Y}_2 = \{5, 6, 7, 8, 9\}$  和  $\mathcal{Y}_3 = \{7, 8, 9, 10\}$ , 其中工作点 5、6、7、8 和 9 为公共子系统. 考虑工作点变化轨迹 2-4-5-7-10, 对应的马赫数  $M_a$ 、高度  $H$  变化情况和工作点间切换过程如图 2 所示.

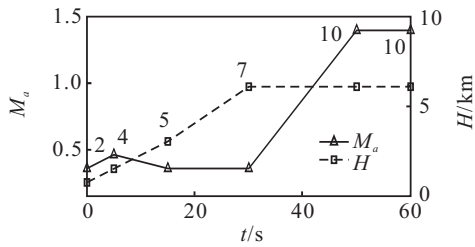


图 2 切换过程及马赫数和高度变化

给定  $\tau_M^1 = \tau_M^2 = \tau_M^3 = 5$ , 由式 (22) 可计算出  $\tau_a^{1*} = \tau_a^{2*} = \tau_a^{3*} = 0.2500$  s. 由图 2 可知, 在公共子系统 5 和 7 处发生了 LOSS 间切换, 可计算出 LOSS 内平均驻留时间分别为  $\tau_a^1 = 10$  s,  $\tau_a^2 = 20$  s,  $\tau_a^3 = 10$  s, 满足式 (22) 约束. 同时, 由式 (31) 计算得到  $h_a^* = 2.3500$  s, LOSS 间平均驻留时间  $h_a = 20$  s, 满足式 (31) 约束. 可见,  $\tau_a^{n*}$  比  $h_a^*$  小得多.

设故障检测时间窗口  $L = 10$ , 未知扰动信号  $d(k)$  是均值为 0、幅值小于 0.5 的均匀分布信号. 考虑如下分段故障信号:

$$f(t) = \begin{cases} 0.45, & 15 \leq t \leq 25; \\ 0.2, & 30 \leq t \leq 45; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

给定  $\alpha = 0.01$ ,  $\beta = 0.01$ ,  $\mu = 2.5$ , 借助 Matlab Yalmip 工具箱, 将定理 3 中指标  $\gamma_n$  也作为优化变量进行凸优化求解, 得到  $\gamma_1^* = 1.5267$ ,  $\gamma_2^* = 1.5405$ ,  $\gamma_3^* = 1.4896$ , 即  $\gamma^* = 1.5405$ . 滤波器参数如下:

$$A_{\eta,2} = \begin{bmatrix} -0.3083 & 0.0218 & -0.1568 \\ -18.0507 & 0.8614 & -3.8183 \\ 0.1506 & 0.0002 & -0.0584 \end{bmatrix},$$

$$B_{\eta,2} = \begin{bmatrix} -1.4520 \\ -23.0672 \\ -0.9087 \end{bmatrix}, D_{\eta,2} = 2.0654,$$

$$C_{\eta,2} = [10.0300 \quad -0.2700 \quad -7.6500],$$

$$A_{\eta,4} = \begin{bmatrix} -0.3055 & 0.0217 & -0.1569 \\ -18.0544 & 0.8616 & -3.8488 \\ 0.1501 & 0.0002 & -0.0590 \end{bmatrix},$$

$$B_{\eta,4} = \begin{bmatrix} -1.4497 \\ -23.1095 \\ -0.9099 \end{bmatrix}, D_{\eta,4} = 1.7634,$$

$$C_{\eta,4} = [9.8080 \quad -0.2640 \quad -7.7190],$$

$$A_{\eta,5} = \begin{bmatrix} -0.2668 & 0.0210 & -0.1905 \\ -20.1246 & 0.9329 & -0.1107 \\ 0.1934 & -0.0006 & -0.0860 \end{bmatrix},$$

$$B_{\eta,5} = \begin{bmatrix} -1.4470 \\ -21.3103 \\ -0.8958 \end{bmatrix}, D_{\eta,5} = 6.0607,$$

$$C_{\eta,5} = [-0.2472 \quad 0.0923 \quad 6.9142],$$

$$A_{\eta,7} = \begin{bmatrix} -0.1876 & 0.0226 & -0.4306 \\ -17.8922 & 0.9336 & -10.2501 \\ 0.2417 & -0.0003 & -0.1179 \end{bmatrix},$$

$$B_{\eta,7} = \begin{bmatrix} -1.5970 \\ -28.5791 \\ -0.8789 \end{bmatrix}, D_{\eta,7} = 2.1137,$$

$$C_{\eta,7} = [-3.2160 \quad -0.1530 \quad 7.0760],$$

$$A_{\eta,10} = \begin{bmatrix} -0.1118 & 0.0191 & -0.4453 \\ -13.5594 & 0.7821 & -12.5857 \\ 0.2471 & -0.0007 & -0.1318 \end{bmatrix},$$

$$B_{\eta,10} = \begin{bmatrix} -1.5228 \\ -26.2532 \\ -0.8847 \end{bmatrix}, D_{\eta,10} = -2.4424,$$

$$C_{\eta,10} = [-5.1790 \quad 0.1630 \quad 2.7770].$$

图 3 为残差评估函数  $J(k)$ . 根据式 (11) 进行多次仿真可得到阈值  $J_{th} = 0.2669$ . 当  $t = 15.450$  ( $t = 30.300$ ) 时,  $J(k) = 0.2692$  ( $0.2730 > J_{th}$ ), 检测出故障所用时间  $T_d$  分别为 0.450 和 0.300. 同时, 参考 Corollary 1 方法<sup>[10]</sup>, 忽略异步切换影响, 采用同步切换求解方法, 得到仿真结果如图 4 所示. 对比图 3 和图 4 可知, Corollary 1 方法异步切换时无法有效检测出故障, 表明了本文方法的有效性.

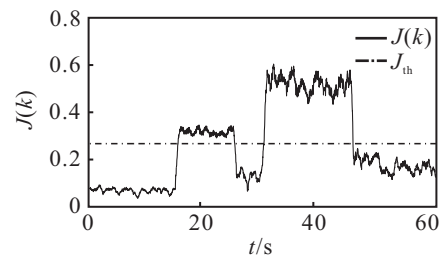


图 3 检测结果

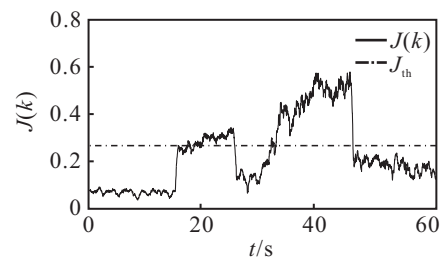


图 4 文献 [10] 方法检测结果

进一步对公共 Lyapunov 函数方法(每个点划为 1 个 LOSS)、本文方法、平均驻留时间方法(每个点划为 1 个 LOSS, 退化为文献[9]处理方法)3 种情况分别进行仿真, 结果如表 1 所示. 10 个工作点不存在公共 Lyapunov 函数, 而本文方法和文献[9]方法存在可行解, 但文献[9]方法  $\gamma^* = 2.7564$ ,  $\bar{h}_a^* = 2.55$  s, 增大了任意工作点间切换的约束条件, 不利于工程应用, 表明了本文方法的优越性和灵活性.

表 1 不同方法仿真结果对比

	公共	本文方法	文献[9]方法
指标 $\gamma^*$	-	1.5405	2.7564
$\tau_a^{n*}$	-	$\tau_a^{n*} = 0.25$	$\tau_a^{n*} = -$
$\bar{h}_a^*$	-	$\bar{h}_a^* = 2.35$	$\bar{h}_a^* = 2.55$

## 5 结 论

本文研究了一类非线性 NCS 的故障检测问题. 采用切换建模方法, 考虑切换律的局部交叠特性和网络因素引起的异步切换问题, 将系统建模为局部交叠异步切换系统. 提出新的稳定性和  $l_2$  性能分析方法, 并给出了相应的检测滤波器设计方法. 以网络化全包线飞行器为例进行仿真, 结果表明, 所提出的方法能及时检测出故障, 且对外部干扰、网络时延和丢包具有鲁棒性, 能够有效降低异步切换对检测性能的影响.

### 参考文献(References)

- [1] Hespaaha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y. A survey of recent results in networked control systems[J]. Proc of the IEEE, 2007, 95(1): 138-162.
- [2] Zhang L, Gao H, Kaynak O. Network-induced constraints in networked control systems: A survey[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 403-416.
- [3] Zhang L, Gao H, Kaynak O, et al. Observer-based fault detection for networked discrete-time infinite-distributed delay systems with packet dropouts[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36: 270-278.
- [4] Liu J, Yue D. Event-based fault detection for networked systems with communication delay and nonlinear perturbation[J]. J of the Franklin Institute, 2013, 350: 2791-2807.
- [5] 罗小元, 李娜, 徐奎, 等. 具有随机丢包的非线性网络化控制系统鲁棒故障检测[J]. 控制与决策, 2013, 28(10): 1596-1600.  
(Luo X Y, Li N, Xu K, et al. Robust fault detection for

nonlinear networked control systems with random packets loss[J]. Control and Decision, 2013, 28(10): 1596-1600.)

- [6] Zhang Y, Liu Z X, Fang H J, et al.  $H_\infty$  fault detection for nonlinear networked systems with multiple channels data transmission pattern[J]. Information Sciences, 2013, 221: 534-543.
- [7] Lin H, Aataskls P J. Stability and stabilizability of switched linear systems: A survey of recent results[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2009, 54(2): 308-322.
- [8] 李娇, 赵军. 具有状态时滞的离散时间切换系统的  $H_\infty$  滤波器设计: 依赖状态的切换方法[J]. 控制与决策, 2012, 27(11): 1607-1615.  
(Li J, Zhao J.  $H_\infty$  filtering for discrete-time switched systems with state delays: A state-dependent switching method[J]. Control and Decision, 2012, 27(11): 1607-1615.)
- [9] Zhang L, Gao H. Asynchronously switched control of switched linear systems with average dwell time[J]. Automatica, 2010, 46(5): 953-958.
- [10] Zhang L, Cui N, Liu M, et al. Asynchronous filtering of discrete-time switched linear systems with average dwell time[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2011, 58(5): 1109-1118.
- [11] Du D S, Jiang B, Shi P. Fault detection for discrete-time switched systems with intermittent measurements[J]. Int J of Control, 2012, 85(1): 78-87.
- [12] Xing W, Xiao J, Iqbal M N. Fault detection for switched nonlinear systems under asynchronous switching[J]. Int J of Control, 2011, 84(8): 1362-1376.
- [13] Xu L, Wang Q, Li W, et al. Stability analysis and stabilisation of full-envelope networked flight control systems: switched system approach[J]. IET Control Theory and Applications, 2012, 6(2): 286-296.
- [14] Chatterjee D, Liberzon D. Stability analysis of deterministic and stochastic switched systems via a comparison principle and multiple Lyapunov functions[J]. SIAM J on Control and Optimization, 2006, 45(1): 174-206.
- [15] Gao H, Chen T, Wang L. Robust fault detection with missing measurements[J]. Int J of Control, 2008, 81(5): 804-819.
- [16] Hartmann G L, Barrett M F, Greene C S. Control design for an unstable vehicle[R]. NASA CR-170393, 1979.

(责任编辑: 郑晓蕾)