

切换系统 H_-/H_∞ 异步切换故障检测滤波器设计

王佳伟[†], 崔一鸣, 王振华, 沈毅

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 研究混合 H_-/H_∞ 框架下, 切换系统的异步故障检测滤波器的设计问题. 使用 H_- 性能指标和加权 H_∞ 性能指标表示残差对于故障的敏感性以及对于扰动的鲁棒性. 首先, 利用多 Lyapunov 函数方法和平均驻留时间技术, 得到初步的异步切换滤波器设计条件; 然后, 使用松弛变量的方法解除 Lyapunov 矩阵和系统矩阵的耦合, 得到进一步的设计结果, 并将其表示为线性矩阵不等式形式; 最后, 通过仿真例子验证了所提出方法的有效性.

关键词: 切换系统; 平均驻留时间; 混合 H_-/H_∞ ; 鲁棒故障检测滤波器; 异步切换

中图分类号: TP277

文献标志码: A

H_-/H_∞ asynchronous fault detection filter design for switched systems

WANG Jia-wei[†], CUI Yi-ming, WANG Zhen-hua, SHEN Yi

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The problem of asynchronous robust fault detection filter design for the switched systems is considered in the framework of mixed H_-/H_∞ . H_- performance represents the sensitivity index of residual to fault, and weighted H_∞ performance is the robustness indicator of residual to disturbance. First of all, multiple Lyapunov functions and average dwell time approach are used for deriving the preliminary conditions of asynchronous filter design. Then the couple between the Lyapunov matrix and the system matrix is removed by the the slack variables, and further results are obtained. All of results are in the form of the linear matrix inequality. Finally, a simulation example is given to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: switched systems; average dwell time; mixed H_-/H_∞ ; robust fault detection filter; asynchronous switching

0 引言

故障检测技术已广泛应用于工业和航天领域, 有效地提高了系统和装备的可靠性. 经过几十年的发展, 出现了大量的故障检测方法^[1-2]. 故障检测滤波器方法是其中最常用的方法之一, 其主要原理是利用系统解析表达式对系统输出进行估计, 然后将其与系统实际的输出相减得到残差, 再经过残差评价和阈值比较的过程, 作出故障是否发生的判断^[3]. 然而, 在实际的故障检测过程中, 残差会受到未知干扰以及模型不确定性的影响, 因此, 为了得到准确可信的检测结果, 需要设计鲁棒的故障检测滤波器.

切换系统是一种典型的混杂系统, 其结构由若干个描述连续动态的子系统和一个表示离散动态的切换信号组成. 许多实际的物理系统都具有切换特

征, 如: 多容水箱系统的水位控制、高机动性飞行器的纵向飞行控制、PWM 电力转换器的升压降压控制等^[4-6], 切换系统理论为这些系统的研究提供了一种新的途径. 经过近 20 年的时间, 切换系统的基础理论不断发展, 获得了很多有价值的成果^[7-13]. 另一方面, 切换系统的故障检测问题也得到了关注, 并取得一些研究进展. 文献 [14] 针对带范数有界模型不确定和状态时滞的连续时间切换系统, 将其故障检测问题转化为 H_∞ 滤波问题. 文献 [15] 使用 H_∞ 滤波器方法实现了具有区间时变时滞的离散时间切换系统的故障检测. 文献 [16] 针对离散时间切换系统, 研究了有限频率范围内的故障检测问题. 注意到, 上述文献所设计的故障观测器或者滤波器本身也是切换系统, 当其切换信号与原切换系统的信号相等时, 称为

收稿日期: 2016-01-07; 修回日期: 2016-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61021002, 61273162, 61403104); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (HIT.KLOF.2015.076).

作者简介: 王佳伟 (1982-), 男, 博士生, 从事故障诊断技术的研究; 沈毅 (1965-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能检测处理与控制、超声成像技术等研究.

[†]通讯作者. E-mail: wangjiawei1982@163.com

同步切换.如果两个切换信号不等,则为异步切换,考虑异步切换情况下的故障检测问题更符合实际,更具研究价值.文献[17]通过设计满足 H_∞ 指标的故障检测滤波器,研究了非线性切换系统在异步切换下的故障检测问题.文献[18]使用满足 H_-/H_∞ 指标的线性滤波器方法,实现了线性离散时间切换系统的异步切换故障检测.由于线性滤波器需要设计的参数较多,同时设计结果中的非线性项解耦比较困难,本文将设计满足 H_-/H_∞ 性能的基于观测器的故障检测滤波器以进行异步切换下的切换系统故障检测,并且针对在 H_-/H_∞ 研究中要求的Lyapunov矩阵相等的约束,通过引入松弛变量的方法实现Lyapunov矩阵和系统矩阵的解耦,解除了矩阵相等的约束.

本文首先给出切换系统模型和基于观测器的故障检测滤波器结构,表明了子系统与滤波器之间的异步切换现象;然后在异步切换情况下,利用平均驻留时间和多Lyapunov函数方法,推导了满足加权 H_∞ 性能指标和 H_- 性能的滤波器设计条件,使用松弛变量的方法,解除了Lyapunov矩阵和系统矩阵的耦合,得到了进一步的设计结果;最后使用一个实例进行仿真验证,结果表明了所提出方法的有效性.

1 切换系统模型

考虑离散时间切换系统,模型表示如下:

$$\begin{cases} x(k+1) = A_{\sigma(k)}x(k) + B_{\sigma(k)}d(k) + B_{\sigma(k)}f(k), \\ y(k) = C_{\sigma(k)}x(k) + D_{\sigma(k)}d(k) + D_{\sigma(k)}f(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in R^n$ 为系统的状态向量, $y(k) \in R^m$ 为系统的测量输出向量; $d(k) \in R^p$ 为未知干扰向量, $f(k) \in R^q$ 为故障向量,假设 $d(k)$ 和 $f(k)$ 都是 l_2 范数有界的信号; $\sigma(k)$ 为切换信号,取值范围是 $N = \{1, 2, \dots, n\}$; $(A_{\sigma(k)}, B_{\sigma(k)d}, B_{\sigma(k)f}, C_{\sigma(k)}, D_{\sigma(k)d}, D_{\sigma(k)f})$ 为子系统的系数矩阵,是数值已知且维数适当的常数矩阵.

2 鲁棒故障检测滤波器的设计

本节给出异步切换情况下,满足 H_-/H_∞ 性能约束的鲁棒故障检测滤波器设计的主要结果.

2.1 问题形成

基于观测器的故障检测滤波器结构如下所示:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A_{\sigma'(k)}\hat{x}(k) + L_{\sigma'(k)}(y(k) - \hat{y}(k)), \\ \hat{y}(k) = C_{\sigma'(k)}\hat{x}(k), \\ r(k) = V_{\sigma'(k)}(y(k) - \hat{y}(k)). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\hat{x}(k) \in R^n$ 为系统状态的估计, $\hat{y}(k) \in R^m$ 为输出向量的估计, $r(k) \in R^m$ 为残差向量, $L_{\sigma'(k)} \in$

$R^{n \times m}$ 为滤波器的增益矩阵, $V_{\sigma'(k)} \in R^{m \times m}$ 为残差的权值矩阵, $L_{\sigma'(k)}$ 和 $V_{\sigma'(k)}$ 为需要设计的滤波器参数, $\sigma'(k)$ 为滤波器的切换信号,取值范围是 $N = \{1, 2, \dots, n\}$.当 $\sigma(k) = \sigma'(k)$ 时,称为同步切换;当 $\sigma(k) \neq \sigma'(k)$ 时,称为异步切换.在切换系统的研究中,切换信号的辨识需要经过一段时间,因此在该辨识时间区间内,不可避免地会出现滤波器与对应的子系统不匹配的情况,即所谓的异步切换.异步切换描述如图1所示.

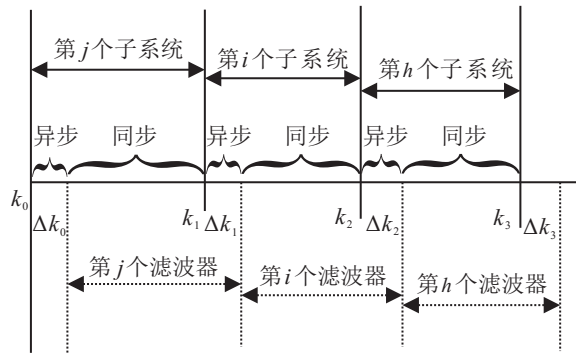


图1 子系统和滤波器之间的异步切换

图1中, $k_l (l = 0, 1, \dots, L \in \Lambda)$ 为子系统的切换时刻, Δk_l 为滤波器滞后于子系统的时延,即为切换信号的辨识时间.由图1可知,每个滤波器工作时,与子系统的对应关系包括同步和异步两段区间.

当 $\forall k \in [k_l + \Delta k_l, k_{l+1})$ 时,原系统与滤波器同步切换,切换信号为 $\sigma(k) = \sigma'(k) = j$,即第 j 个子系统和第 j 个滤波器工作.令 $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$,得到误差系统

$$\begin{cases} e(k+1) = (A_j - L_j C_j)e(k) + (B_{jd} - L_j D_{jd})d(k) + (B_{jf} - L_j D_{jf})f(k), \\ r(k) = V_j C_j e(k) + V_j D_{jd} d(k) + V_j D_{jf} f(k). \end{cases} \quad (3)$$

当 $\forall k \in [k_{l+1}, k_{l+1} + \Delta k_{l+1})$ 时,原系统与滤波器异步切换,切换信号为 $\sigma(k) = i, \sigma'(k) = j$,即子系统从第 j 个切换到第 i 个,而第 j 个滤波器工作.得到误差系统

$$\begin{cases} e(k+1) = (A_j - L_j C_j)e(k) + (A_i - A_j + L_j C_j - L_j C_i)x(k) + (B_{id} - L_j D_{id})d(k) + (B_{if} - L_j D_{if})f(k), \\ r(k) = V_j C_j e(k) + (V_j C_i - V_j C_j)x(k) + V_j D_{id} d(k) + V_j D_{if} f(k). \end{cases} \quad (4)$$

可见,在异步切换时,误差方程中除了状态估计

误差 $e(k)$ 之外,还含有状态变量 $x(k)$. 定义增广状态向量 $\zeta(k) = [e^T(k), x^T(k)]^T$, 合并上面两种切换情况, 得到增广系统

$$\begin{cases} \zeta(k+1) = \bar{A}_j \zeta(k) + \bar{B}_j d(k) + \bar{F}_j f(k), \\ r(k) = \bar{C}_j \zeta(k) + \bar{D}_j d(k) + \bar{G}_j f(k), \\ \zeta(k+1) = \bar{A}_{ij} \zeta(k) + \bar{B}_{ij} d(k) + \bar{F}_{ij} f(k), \\ r(k) = \bar{C}_{ij} \zeta(k) + \bar{D}_{ij} d(k) + \bar{G}_{ij} f(k). \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{A}_j &= \begin{bmatrix} A_j - L_j C_j & 0 \\ 0 & A_j \end{bmatrix}, \\ \bar{A}_{ij} &= \begin{bmatrix} A_j - L_j C_j & A_i - A_j + L_j C_j - L_j C_i \\ 0 & A_i \end{bmatrix}, \\ \bar{B}_j &= \begin{bmatrix} B_{jd} - L_j D_{jd} \\ B_{jd} \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_{ij} = \begin{bmatrix} B_{id} - L_j D_{id} \\ B_{id} \end{bmatrix}, \\ \bar{C}_j &= [V_j C_j \quad 0], \quad \bar{C}_{ij} = [V_j C_j \quad V_j C_i - V_j C_j], \\ \bar{D}_j &= V_j D_{jd}, \quad \bar{D}_{ij} = V_j D_{id}, \\ \bar{F}_j &= \begin{bmatrix} B_{jf} - L_j D_{jf} \\ B_{jf} \end{bmatrix}, \quad \bar{F}_{ij} = \begin{bmatrix} B_{if} - L_j D_{if} \\ B_{if} \end{bmatrix}, \\ \bar{G}_j &= V_j D_{jf}, \quad \bar{G}_{ij} = V_j D_{if}. \end{aligned}$$

可以看到, 残差信号 $r(k)$ 与干扰信号 $d(k)$ 和故障信号 $f(k)$ 有关, 为了设计鲁棒故障检测滤波器, 需要设计滤波器参数满足以下条件:

- 1) 误差系统(5)是全局指数稳定的;
- 2) 残差 $r(k)$ 对干扰 $d(k)$ 具有鲁棒性, 即满足加权 H_∞ 性能指标;
- 3) 残差 $r(k)$ 对故障 $f(k)$ 具有敏感性, 即满足 H_- 性能指标.

下面的定义将进一步描述上述3个条件.

定义1^[7] 如果存在常数 $K > 0$ 和 $0 < \rho < 1$, 使得误差系统(5)的解 $\zeta(k)$ 满足

$$\|\zeta(k)\| \leq K \rho^{k-k_0} \|\zeta(k_0)\|, \quad \forall k \geq k_0,$$

则在切换信号 $\sigma(k)$ 下, 误差系统(5)全局指数稳定.

定义2 给定常数 $0 < \alpha < 1$ 和 $\gamma > 0$, 当满足零初始条件和 $f(k) = 0$ 时, 对于所有的非零 $d(k) \in [0, \infty)$, 若不等式

$$\sum_{k=0}^{\infty} (1-\alpha)^k r^T(k)r(k) \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} d^T(k)d(k) \quad (6)$$

成立, 则称误差系统(5)具有加权的 H_∞ 性能指标, 其中 α 表示系统的衰减度.

定义3 给定常数 $\beta > 0$, 当满足零初始条件和 $d(k)=0$ 时, 对于所有的非零 $f(k) \in [0, \infty)$, 若不等式

$$\sum_{k=0}^{\infty} r^T(k)r(k) \geq \beta^2 \sum_{k=0}^{\infty} f^T(k)f(k) \quad (7)$$

成立, 则称误差系统(5)具有 H_- 性能指标.

文中考虑的切换信号满足平均驻留时间, 定义如下.

定义4^[7] 对于 $k_0 < k_s < k_v$ 之间的所有时刻, 令 $N_\sigma(k_s, k_v)$ 表示 $\sigma(k)$ 在时间区间 (k_s, k_v) 内的切换次数, 存在 $\tau_\alpha > 0, N_0 \geq 0$, 使得

$$N_\sigma(k_s, k_v) \leq N_0 + \frac{k_v - k_s}{\tau_\alpha} \quad (8)$$

成立. 其中: τ_α 为切换信号 $\sigma(k)$ 的平均驻留时间 (ADT); N_0 为抖振边界, 通常情况下令 $N_0 = 0$.

2.2 加权 H_∞ 性能

当 $f(k) = 0$ 时, 误差系统(5)转化为

$$\begin{cases} \zeta(k+1) = \bar{A}_j \zeta(k) + \bar{B}_j d(k), \\ r(k) = \bar{C}_j \zeta(k) + \bar{D}_j d(k), \\ \zeta(k+1) = \bar{A}_{ij} \zeta(k) + \bar{B}_{ij} d(k), \\ r(k) = \bar{C}_{ij} \zeta(k) + \bar{D}_{ij} d(k). \end{cases} \quad (9)$$

引理1^[18] 给定常数 $0 < \alpha < 1, \gamma_1 > 0, \beta > 0, \mu_1 \geq 1$ 和 $\mu_2 \geq 1$, 若存在多 Lyapunov-Like 函数

$$V(\zeta(k)) = \begin{cases} V_j(\zeta(k)), & k \in [k_l + \Delta k_l, k_{l+1}); \\ V_{ij}(\zeta(k)), & k \in [k_{l+1}, k_{l+1} + \Delta k_{l+1}). \end{cases} \quad (10)$$

其中: $i, j \in N, i \neq j$; 且满足

$$\Delta V(\zeta(k)) \leq \begin{cases} -\alpha V_j(\zeta(k)) - \Gamma, \\ \beta V_{ij}(\zeta(k)) - \Gamma; \end{cases} \quad (11)$$

$$V_j(\zeta(k)) - \mu_1 V_{ij}(\zeta(k)) \leq 0; \quad (12)$$

$$V_{ij}(\zeta(k)) - \mu_2 V_j(\zeta(k)) \leq 0; \quad (13)$$

$$\Delta V(\zeta(k)) = V(\zeta(k+1)) - V(\zeta(k)),$$

$$\Gamma = r^T(k)r(k) - \gamma_1 d^T(k)d(k);$$

切换信号 $\sigma(k)$ 的平均驻留时间需要满足条件

$$\tau_\alpha \geq \text{ceil} \left[-\frac{\Delta_m (\ln(1+\beta) - \ln(1-\alpha)) + \ln \mu_1 \mu_2}{\ln(1-\alpha)} \right], \quad (14)$$

ceil 表示取整运算符, $\Delta_m = \max_{l \in N} \{\Delta_l\} \geq 1$ 表示子系统与滤波器之间最大的异步时间. 则误差系统(9)全局指数稳定且满足增益为

$$\gamma_{s1} = \sqrt{\mu_1 \left(\frac{1+\beta}{1-\alpha} \right)^{\Delta_m-1} \gamma_1}$$

的加权 H_∞ 性能指标.

进一步, 根据引理1可以得到如下结果.

定理1 给定常数 $0 < \alpha < 1, \gamma_1 > 0, \beta > 0$,

$\mu_1 \geq 1, \mu_2 \geq 1$, 若存在矩阵 X_j, Y_j 和正定对称矩阵 $p_{aj1}, p_{aj2}, p_{aij1}, p_{aij2} (i, j \in N, i \neq j)$ 以及 M_j , 使得矩阵不等式

$$\begin{aligned} p_{aj1} &\leq \mu_1 p_{aij1}, p_{aj2} \leq \mu_1 p_{aij2}, \\ p_{aij1} &\leq \mu_2 p_{aj1}, p_{aij2} \leq \mu_2 p_{aj2}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} -p_{aj1} & 0 & \Theta_{a13} & 0 & \Theta_{a15} \\ * & -p_{aj2} & 0 & \Theta_{a24} & \Theta_{a25} \\ * & * & \Theta_{a33} & 0 & \Theta_{a35} \\ * & * & * & \Theta_{a44} & 0 \\ * & * & * & * & \Theta_{a55} \end{bmatrix} \leq 0, \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} -p_{aij1} & 0 & \Phi_{a13} & \Phi_{a14} & \Phi_{a15} \\ * & -p_{aij2} & 0 & \Phi_{a24} & \Phi_{a25} \\ * & * & \Phi_{a33} & \Phi_{a34} & \Phi_{a35} \\ * & * & * & \Phi_{a44} & \Phi_{a45} \\ * & * & * & * & \Phi_{a55} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (17)$$

成立. 其中

$$\begin{aligned} \Theta_{a13} &= p_{aj1}A_j - X_jC_j, \\ \Theta_{a15} &= p_{aj1}B_{jd} - X_jD_{jd}, \\ \Theta_{a24} &= p_{aj2}A_j, \Theta_{a25} = p_{aj2}B_{jd}, \\ \Theta_{a33} &= -(1 - \alpha)p_{aj1} + C_j^T M_j C_j, \\ \Theta_{a35} &= C_j^T M_j D_{jd}, \Theta_{a44} = -(1 - \alpha)p_{aj2}, \\ \Theta_{a55} &= -\gamma_1^2 I + D_{jd}^T M_j D_{jd}, \\ \Phi_{a13} &= p_{aij1}A_j - Y_jC_j, \\ \Phi_{a14} &= p_{aij1}A_i - p_{aij1}A_j + Y_jC_j - Y_jC_i, \\ \Phi_{a15} &= p_{aij1}B_{id} - Y_jD_{id}, \\ \Phi_{a24} &= p_{aij2}A_i, \Phi_{a25} = p_{aij2}B_{id}, \\ \Phi_{a33} &= -(1 + \beta)p_{aij1} + C_j^T M_j C_j, \\ \Phi_{a34} &= C_j^T M_j (C_i - C_j), \Phi_{a35} = C_j^T M_j D_{id}, \\ \Phi_{a44} &= -(1 + \beta)p_{aij2} + (C_i - C_j)^T M_j (C_i - C_j), \\ \Phi_{a45} &= (C_i - C_j)^T M_j D_{id}, \\ \Phi_{a55} &= -\gamma_1^2 I + D_{id}^T M_j D_{id}, \end{aligned}$$

切换信号满足平均驻留时间式(14). 则误差系统(9)全局指数稳定, 并且满足加权 H_∞ 性能.

证明 对于系统(9), 定义形如式(10)的多 Lyapunov-Like 函数

$$V(\zeta(k)) = \begin{cases} V_{aj}(\zeta(k)) = \zeta(k)^T P_{aj} \zeta(k), \\ V_{aij}(\zeta(k)) = \zeta(k)^T P_{aij} \zeta(k), \end{cases} \quad (18)$$

其中 P_{aj} 和 P_{aij} 为正定的对称矩阵. 当 $k \in [k_l + \Delta k_l,$

$k_{l+1})$, 得到

$$\begin{aligned} \Delta V(\zeta(k)) + \alpha V_j(\zeta(k)) + \Gamma = \\ \eta(k)^T \begin{bmatrix} \Lambda_{a11} & \Lambda_{a12} \\ \Lambda_{a12}^T & \Lambda_{a22} \end{bmatrix} \eta(k). \end{aligned} \quad (19)$$

其中

$$\begin{aligned} \eta(k) &= \begin{bmatrix} \zeta(k) \\ d(k) \end{bmatrix}, \\ \Lambda_{a11} &= \bar{A}_j^T P_{aj} \bar{A}_j - (1 - \alpha)P_{aj} + \bar{C}_j^T \bar{C}_j, \\ \Lambda_{a12} &= \bar{A}_j^T P_{aj} \bar{B}_j + \bar{C}_j^T \bar{D}_j, \\ \Lambda_{a22} &= \bar{B}_j^T P_{aj} \bar{B}_j - \gamma_1^2 I + \bar{D}_j^T \bar{D}_j. \end{aligned}$$

当 $k \in [k_{l+1}, k_{l+1} + \Delta k_{l+1})$ 时, 得到

$$\begin{aligned} \Delta V(\zeta(k)) - \beta V_{ij}(\zeta(k)) + \Gamma = \\ \eta(k)^T \begin{bmatrix} \Omega_{a11} & \Omega_{a12} \\ \Omega_{a12}^T & \Omega_{a22} \end{bmatrix} \eta(k). \end{aligned} \quad (20)$$

其中

$$\begin{aligned} \Omega_{a11} &= \bar{A}_{ij}^T P_{aij} \bar{A}_{ij} - (1 + \beta)P_{aij} + \bar{C}_{ij}^T \bar{C}_{ij}, \\ \Omega_{a12} &= \bar{A}_{ij}^T P_{aij} \bar{B}_{ij} + \bar{C}_{ij}^T \bar{D}_{ij}, \\ \Omega_{a22} &= \bar{B}_{ij}^T P_{aij} \bar{B}_{ij} - \gamma_1^2 I + \bar{D}_{ij}^T \bar{D}_{ij}. \end{aligned}$$

另外, 可以得到

$$\begin{aligned} V_j(\zeta(k)) - \mu_1 V_{ij}(\zeta(k)) &= \zeta(k)^T (P_{aj} - \mu_1 P_{aij}) \zeta(k), \\ V_{ij}(\zeta(k)) - \mu_2 V_j(\zeta(k)) &= \zeta(k)^T (P_{aij} - \mu_2 P_{aj}) \zeta(k). \end{aligned} \quad (21)$$

如果矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{a11} & \Lambda_{a12} \\ \Lambda_{a12}^T & \Lambda_{a22} \end{bmatrix} \leq 0, \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_{a11} & \Omega_{a12} \\ \Omega_{a12}^T & \Omega_{a22} \end{bmatrix} \leq 0, \quad (23)$$

$$P_{aj} - \mu_1 P_{aij} \leq 0, P_{aij} - \mu_2 P_{aj} \leq 0 \quad (24)$$

成立, 则根据引理1可知, 误差系统(9)全局指数稳定且具有加权 H_∞ 性能.

根据 Schur 补引理, 式(22)和(23)等价于

$$\begin{bmatrix} -P_{aj} & P_{aj} \bar{A}_j & P_{aj} \bar{B}_j \\ * & -(1 - \alpha)P_{aj} + \bar{C}_j^T \bar{C}_j & \bar{C}_j^T \bar{D}_j \\ * & * & -\gamma_1^2 I + \bar{D}_j^T \bar{D}_j \end{bmatrix} \leq 0, \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} -P_{aij} & P_{aij} \bar{A}_{ij} & P_{aij} \bar{B}_{ij} \\ * & -(1 + \beta)P_{aij} + \bar{C}_{ij}^T \bar{C}_{ij} & \bar{C}_{ij}^T \bar{D}_{ij} \\ * & * & -\gamma_1^2 I + \bar{D}_{ij}^T \bar{D}_{ij} \end{bmatrix} \leq 0. \quad (26)$$

为了消除上述公式中存在的非线性项,定义

$$P_{aj} = \begin{bmatrix} p_{aj1} & 0 \\ 0 & p_{aj2} \end{bmatrix},$$

$$P_{aij} = \begin{bmatrix} p_{aij1} & 0 \\ 0 & p_{aij2} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

将式(27)代入(24),则式(15)成立.再将式(5)中定义的系统矩阵代入(25)和(26),并且定义

$$X_j = p_{aj1}L_j, Y_j = p_{aij1}L_j, \quad (28)$$

$$M_j = V_j^T V_j, \quad (29)$$

则式(16)和(17)成立. \square

2.3 H_- 性能

当 $d(k) = 0$ 时,误差系统(5)转化为

$$\begin{cases} \zeta(k+1) = \bar{A}_j \zeta(k) + \bar{F}_j f(k), \\ r(k) = \bar{C}_j \zeta(k) + \bar{G}_j f(k), \\ \zeta(k+1) = \bar{A}_{ij} \zeta(k) + \bar{F}_{ij} f(k), \\ r(k) = \bar{C}_{ij} \zeta(k) + \bar{G}_{ij} f(k). \end{cases} \quad (30)$$

引理2^[18] 给定常数 $0 < \alpha < 1, \gamma_2 > 0, \beta > 0, \mu_1 \geq 1, \mu_2 \geq 1$,若存在 Lyapunov-Like 函数满足不等式

$$\Delta V(\zeta(k)) \leq \begin{cases} -\alpha V_j(\zeta(k)) - \Upsilon, \\ \beta V_{ij}(\zeta(k)) - \Upsilon, \end{cases} \quad (31)$$

$$V_j(\zeta(k)) - \mu_1 V_{ij}(\zeta(k)) \leq 0, \quad (32)$$

$$V_{ij}(\zeta(k)) - \mu_2 V_j(\zeta(k)) \leq 0. \quad (33)$$

其中: $\Upsilon = \gamma_2 f^T(k)f(k) - r^T(k)r(k)$,切换信号 $\sigma(k)$ 的平均驻留时间需要满足条件(14).则误差系统(30)具有增益为

$$\gamma_{s2} = \gamma_2 / \sqrt{\mu_1 \left(\frac{1+\beta}{1-\alpha} \right)^{\Delta_m - 1}}$$

的 H_- 性能指标.

进一步,根据引理2可以得到如下结果.

定理2 给定常数 $0 < \alpha < 1, \gamma_2 > 0, \beta > 0, \mu_1 \geq 1, \mu_2 \geq 1$,若存在矩阵 Q_j, S_j 和正定对称矩阵 $p_{bj1}, p_{bj2}, p_{bij1}, p_{bij2} (i, j \in N, i \neq j)$ 以及 M_j ,使得矩阵不等式

$$p_{bj1} \leq \mu_1 p_{bij1}, p_{bj2} \leq \mu_1 p_{bij2},$$

$$p_{bij1} \leq \mu_2 p_{bj1}, p_{bij2} \leq \mu_2 p_{bj2}, \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} -p_{bj1} & 0 & \Theta_{b13} & 0 & \Theta_{b15} \\ * & -p_{bj2} & 0 & \Theta_{b24} & \Theta_{b25} \\ * & * & \Theta_{b33} & 0 & \Theta_{b35} \\ * & * & * & \Theta_{b44} & 0 \\ * & * & * & * & \Theta_{b55} \end{bmatrix} \leq 0, \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} -p_{bij1} & 0 & \Phi_{b13} & \Phi_{b14} & \Phi_{b15} \\ * & -p_{bij2} & 0 & \Phi_{b24} & \Phi_{b25} \\ * & * & \Phi_{b33} & \Phi_{b34} & \Phi_{b35} \\ * & * & * & \Phi_{b44} & \Phi_{b45} \\ * & * & * & * & \Phi_{b55} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (36)$$

成立.其中

$$\begin{aligned} \Theta_{b13} &= p_{bj1}A_j - Q_j C_j, \\ \Theta_{b15} &= p_{bj1}B_{jf} - Q_j D_{jf}, \\ \Theta_{b24} &= p_{bj2}A_j, \Theta_{b25} = p_{bj2}B_{jf}, \\ \Theta_{b33} &= -(1-\alpha)p_{bij1} - C_j^T M_j C_j, \\ \Theta_{b35} &= -C_j^T M_j D_{jf}, \Theta_{b44} = -(1-\alpha)p_{bj2}, \\ \Theta_{b55} &= \gamma_2^2 I - D_{jf}^T M_j D_{jf}, \\ \Phi_{b13} &= p_{bij1}A_j - S_j C_j, \\ \Phi_{b14} &= p_{bij1}A_i - p_{bij1}A_j + S_j C_j - S_j C_i, \\ \Phi_{b15} &= p_{bij1}B_{if} - S_j D_{if}, \\ \Phi_{b24} &= p_{bij2}A_i, \Phi_{b25} = p_{aij2}B_{if}, \\ \Phi_{b33} &= -(1+\beta)p_{bij1} - C_j^T M_j C_j, \\ \Phi_{b34} &= -C_j^T M_j (C_i - C_j), \\ \Phi_{b35} &= -C_j^T M_j D_{if}, \\ \Phi_{b44} &= -(1+\beta)p_{bij2} - (C_i - C_j)^T M_j (C_i - C_j), \\ \Phi_{b45} &= -(C_i - C_j)^T M_j D_{if}, \\ \Phi_{b55} &= \gamma_2^2 I - D_{if}^T M_j D_{if}, \end{aligned}$$

切换信号满足平均驻留时间式(14).则误差系统(30)满足 H_- 性能.

证明 对于系统(30),定义形如式(10)的多 Lyapunov-Like 函数

$$V(\zeta(k)) = \begin{cases} V_{bj}(\zeta(k)) = \zeta(k)^T P_{bj} \zeta(k), \\ V_{bij}(\zeta(k)) = \zeta(k)^T P_{bij} \zeta(k), \end{cases} \quad (37)$$

其中 P_{bj} 和 P_{bij} 为正定的对称矩阵.

当 $k \in [k_l + \Delta k_l, k_{l+1})$ 时,得到

$$\Delta V(\zeta(k)) + \alpha V_j(\zeta(k)) + \Upsilon =$$

$$\omega(k)^T \begin{bmatrix} A_{b11} & A_{b12} \\ A_{b12}^T & A_{b22} \end{bmatrix} \omega(k). \quad (38)$$

其中

$$\omega(k) = \begin{bmatrix} \zeta(k) \\ f(k) \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} A_{b11} &= \bar{A}_j^T P_{bj} \bar{A}_j - (1-\alpha)P_{aj} - \bar{C}_j^T \bar{C}_j, \\ A_{b12} &= \bar{A}_j^T P_{bj} \bar{F}_j - \bar{C}_j^T \bar{G}_j, \\ A_{b22} &= \bar{F}_j^T P_{bj} \bar{F}_j + \gamma_2^2 I - \bar{G}_j^T \bar{G}_j. \end{aligned}$$

当 $k \in [k_{l+1}, k_{l+1} + \Delta k_{l+1})$ 时, 得到

$$\Delta V(\zeta(k)) - \beta V_{ij}(\zeta(k)) + \Upsilon = \omega(k)^T \begin{bmatrix} \Omega_{b11} & \Omega_{b12} \\ \Omega_{b12}^T & \Omega_{b22} \end{bmatrix} \omega(k). \quad (39)$$

其中

$$\begin{aligned} \Omega_{b11} &= \bar{A}_{ij}^T P_{bij} \bar{A}_{ij} - (1 + \beta) P_{bij} - \bar{C}_{ij}^T \bar{C}_{ij}, \\ \Omega_{b12} &= \bar{A}_{ij}^T P_{bij} \bar{F}_{ij} - \bar{C}_{ij}^T \bar{G}_{ij}, \\ \Omega_{b22} &= \bar{F}_{ij}^T P_{bij} \bar{F}_{ij} + \gamma_2^2 I - \bar{G}_{ij}^T \bar{G}_{ij}. \end{aligned}$$

另外, 可以得到

$$\begin{aligned} V_j(\zeta(k)) - \mu_1 V_{ij}(\zeta(k)) &= \zeta(k)^T (P_{bj} - \mu_1 P_{bij}) \zeta(k), \\ V_{ij}(\zeta(k)) - \mu_2 V_j(\zeta(k)) &= \zeta(k)^T (P_{bij} - \mu_2 P_{bj}) \zeta(k). \end{aligned} \quad (40)$$

如果矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{b11} & \Lambda_{b12} \\ \Lambda_{b12}^T & \Lambda_{b22} \end{bmatrix} \leq 0, \quad (41)$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_{b11} & \Omega_{b12} \\ \Omega_{b12}^T & \Omega_{b22} \end{bmatrix} \leq 0, \quad (42)$$

$$P_{bj} - \mu_1 P_{bij} \leq 0, P_{bij} - \mu_2 P_{bj} \leq 0 \quad (43)$$

成立, 则根据引理2可知, 误差系统(30)具有 H_- 性能.

根据 Schur 补引理, 式(41)和(42)等价于

$$\begin{bmatrix} -P_{bj} & P_{bj} \bar{A}_j & P_{bj} \bar{F}_j \\ * & -(1 - \alpha) P_{bj} - \bar{C}_j^T \bar{C}_j & -\bar{C}_j^T \bar{G}_j \\ * & * & \gamma_2^2 I - \bar{G}_j^T \bar{G}_j \end{bmatrix} \leq 0, \quad (44)$$

$$\begin{bmatrix} -P_{bij} & P_{bij} \bar{A}_{ij} & P_{bij} \bar{F}_{ij} \\ * & -(1 + \beta) P_{bij} - \bar{C}_{ij}^T \bar{C}_{ij} & -\bar{C}_{ij}^T \bar{G}_{ij} \\ * & * & \gamma_2^2 I - \bar{G}_{ij}^T \bar{G}_{ij} \end{bmatrix} \leq 0. \quad (45)$$

上述公式中存在非线性项, 故定义

$$\begin{aligned} P_{bj} &= \begin{bmatrix} p_{bj1} & 0 \\ 0 & p_{bj2} \end{bmatrix}, \\ P_{bij} &= \begin{bmatrix} p_{bij1} & 0 \\ 0 & p_{bij2} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (46)$$

将式(46)代入(40), 则式(34)成立. 再将式(5)定义的系统矩阵代入(44)和(45), 并定义

$$Q_j = p_{bj1} L_j, S_j = p_{bij1} L_j, \quad (47)$$

考虑式(29), 则式(35)和(36)成立. \square

2.4 松弛变量解耦

为了使得设计的故障检测滤波器同时满足给定的 H_- 和 H_∞ 性能, 需要在满足式(14)的条件下, 同时

求解定理1和定理2的线性矩阵不等式(15)、(16)、(17)、(34)、(35)、(36), 基于求解得到的矩阵由下式计算鲁棒故障检测滤波器的参数:

$$\begin{aligned} L_j &= p_{aj1}^{-1} X_j, L_j = p_{aij1}^{-1} Y_j, \\ L_j &= p_{bj1}^{-1} Q_j, L_j = p_{bij1}^{-1} S_j, \\ V_j &= M_j^{1/2}. \end{aligned} \quad (48)$$

由式(48)和(49)可知, 滤波器增益矩阵 L_j 的数值可由4个式子计算, 为了保证得到的 L_j 数值都相等, 需要指定

$$p_{aj1} = p_{aij1} = p_{bj1} = p_{bij1}, \quad (50)$$

即要求 Lyapunov 矩阵的第1个分量是相等的. 该条件是在研究含有 H_-/H_∞ 性能指标的问题中常见的一种约束, 基于该条件得到的结果显然具有很大的保守性. 为此, 本节将通过松弛矩阵变量的方法, 解除 Lyapunov 矩阵与系统矩阵的耦合, 得到进一步的结果.

定理3 给定常数 $0 < \alpha < 1$, $\gamma_1 > 0$, $\beta > 0$, $\mu_1 \geq 1$, $\mu_2 \geq 1$, 若存在矩阵 Z_j 和正定对称矩阵 p_{aj1} 、 p_{aj2} 、 p_{aij1} 、 p_{aij2} ($i, j \in N, i \neq j$) 以及 T_j 、 M_j , 使得矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} p_{aj1} - T_j^T - T_j & 0 & \Theta'_{a13} & 0 & \Theta'_{a15} \\ * & -p_{aj2} & 0 & \Theta_{a24} & \Theta_{a25} \\ * & * & \Theta_{a33} & 0 & \Theta_{a35} \\ * & * & * & \Theta_{a44} & 0 \\ * & * & * & * & \Theta_{a55} \end{bmatrix} \leq 0, \quad (51)$$

$$\begin{bmatrix} p_{aij1} - T_j^T - T_j & 0 & \Phi'_{a13} & \Phi'_{a14} & \Phi'_{a15} \\ * & -p_{aij2} & 0 & \Phi_{a24} & \Phi_{a25} \\ * & * & \Phi_{a33} & \Phi_{a34} & \Phi_{a35} \\ * & * & * & \Phi_{a44} & \Phi_{a45} \\ * & * & * & * & \Phi_{a55} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (52)$$

成立. 其中

$$\begin{aligned} \Theta'_{a13} &= T_j^T A_j - Z_j C_j, \\ \Theta'_{a15} &= T_j^T B_{jd} - A_j D_{jd}, \\ \Phi'_{a13} &= T_j^T A_j - Z_j C_j, \\ \Phi'_{a14} &= T_j^T A_i - T_j^T A_j + Z_j C_j - Z_j C_i, \\ \Phi'_{a15} &= T_j^T B_{id} - Z_j D_{id}, \end{aligned}$$

切换信号满足平均驻留时间式(14), 不等式(15)成立. 则误差系统(9)全局指数稳定, 并且满足加权 H_∞ 性能, 同时鲁棒故障检测滤波器的参数可根据

$$\begin{aligned} L_j &= (T_j^{-1})^T Z_j, \\ V_j &= M_j^{1/2} \end{aligned} \quad (53)$$

计算得到.

证明 若式(51)和(52)成立,则有

$$p_{aj1} - T_j^T - T_j < 0, \quad (54)$$

$$p_{aij1} - T_j^T - T_j < 0 \quad (55)$$

成立,进一步可得到

$$T_j^T + T_j > p_{aj1} > 0, \quad (56)$$

$$T_j^T + T_j > p_{aij1} > 0. \quad (57)$$

这表明 T_j 可逆,因为 p_{aj1}, p_{aij1} 为正定对称矩阵,有

$$(p_{aj1} - T_j)^T p_{aj1}^{-1} (p_{aj1} - T_j) \geq 0, \quad (58)$$

$$(p_{aij1} - T_j)^T p_{aij1}^{-1} (p_{aij1} - T_j) \geq 0 \quad (59)$$

成立.将式(58)和(59)展开,并在左右两端同时乘以 $-I$,得到

$$-T_j^T p_{aj1}^{-1} T_j \leq p_{aj1} - T_j - T_j^T, \quad (60)$$

$$-T_j^T p_{aij1}^{-1} T_j \leq p_{aij1} - T_j - T_j^T, \quad (61)$$

可知如下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -T_j^T p_{aj1}^{-1} T_j & 0 & \Theta'_{a13} & 0 & \Theta'_{a15} \\ * & -p_{aj2} & 0 & \Theta_{a24} & \Theta_{a25} \\ * & * & \Theta_{a33} & 0 & \Theta_{a35} \\ * & * & * & \Theta_{a44} & 0 \\ * & * & * & * & \Theta_{a55} \end{bmatrix} \leq 0, \quad (62)$$

$$\begin{bmatrix} -T_j^T p_{aij1}^{-1} T_j & 0 & \Phi'_{a13} & \Phi'_{a14} & \Phi'_{a15} \\ * & -p_{aij2} & 0 & \Phi_{a24} & \Phi_{a25} \\ * & * & \Phi_{a33} & \Phi_{a34} & \Phi_{a35} \\ * & * & * & \Phi_{a44} & \Phi_{a45} \\ * & * & * & * & \Phi_{a55} \end{bmatrix} \leq 0. \quad (63)$$

在不等式(62)两端分别左乘 $U = \text{diag}\{p_{aj1}^T (T_j^{-1})^T, I, I, I, I\}$ 和右乘 U^T , 在不等式(63)两端分别左乘 $U' = \text{diag}\{p_{aij1}^T (T_j^{-1})^T, I, I, I, I\}$ 和右乘 U'^T , 根据 $Z_j = T_j^T L_j$, 得到式(16)和(17)成立. \square

定理4 给定常数 $0 < \alpha < 1, \gamma_2 > 0, \beta > 0, \mu_1 \geq 1, \mu_2 \geq 1$, 若存在矩阵 Z_j 和正定对称矩阵 $p_{bj1}, p_{bj2}, p_{bij1}, p_{bij2} (i, j \in N, i \neq j)$ 以及 T_j, M_j , 使得

$$\begin{bmatrix} p_{bj1} - T_j^T - T_j & 0 & \Theta'_{b13} & 0 & \Theta'_{b15} \\ * & -p_{bj2} & 0 & \Theta_{b24} & \Theta_{b25} \\ * & * & \Theta_{b33} & 0 & \Theta_{b35} \\ * & * & * & \Theta_{b44} & 0 \\ * & * & * & * & \Theta_{b55} \end{bmatrix} \leq 0, \quad (64)$$

$$\begin{bmatrix} p_{bij1} - T_j^T - T_j & 0 & \Phi'_{b13} & \Phi'_{b14} & \Phi'_{b15} \\ * & -p_{bij2} & 0 & \Phi_{b24} & \Phi_{b25} \\ * & * & \Phi_{b33} & \Phi_{b34} & \Phi_{b35} \\ * & * & * & \Phi_{b44} & \Phi_{b45} \\ * & * & * & * & \Phi_{b55} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (65)$$

成立.其中

$$\Theta'_{b13} = T_j^T A_j - Z_j C_j, \quad \Theta'_{b15} = T_j^T B_{jf} - Z_j D_{jf},$$

$$\Phi'_{b13} = T_j^T A_j - Z_j C_j,$$

$$\Phi'_{b14} = T_j^T A_i - T_j^T A_j + Z_j C_j - Z_j C_i,$$

$$\Phi'_{b15} = T_j^T B_{if} - Z_j D_{if}.$$

切换信号满足平均驻留时间(14),不等式(34)成立.则误差系统(30)满足加权 H_- 性能.

证明过程与定理3类似,此略.

注1 定理3和定理4实现了 Lyapunov 矩阵与系统矩阵的解耦,不再要求 Lyapunov 矩阵的第1个分量相等,降低了结果的保守性.当线性矩阵不等式(15)、(34)、(51)、(52)、(64)、(65)同时有解时,可求解故障检测滤波器矩阵 L_j 和 V_j .

3 残差评价和阈值设置

通过以上结果可以得到鲁棒残差生成器,在干扰信号的作用下,即使没有故障出现,残差也不等于零,因此需要经过以下的残差评价过程.

首先,选取残差的范数作为评价函数,有

$$J_L(r(k)) = \left(\sum_{k=0}^L r^T(k)r(k) \right)_{d(k) \neq 0, f(k) \neq 0}^{1/2}. \quad (66)$$

设置阈值为无故障时残差范数的最大值,有

$$J_{th}(r(k)) = (\sup \|r(k)\|)_{d(k) \neq 0, f(k) = 0}. \quad (67)$$

将残差评价函数的值和阈值进行比较, $J_L(r(k)) \geq J_{th}(r(k))$ 表明系统存在故障, $J_L(r(k)) < J_{th}(r(k))$ 表明系统没有故障.

4 仿真实例

使用切换 RLC 电路^[16]进行仿真研究.如图2所示,电路包括一个输入电源 $u(t)$, 一个电阻 R , 两个电感 L_1, L_2 , 两个电容 C_1, C_2 . 电路的动态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \frac{1}{L_i} x_1(t), \\ \dot{x}_2(t) = -\frac{1}{C_i} \dot{x}_1(t) - \frac{R}{L_i} x_2(t) + u(t), \\ y(t) = \frac{1}{L_i} x_2(t), \quad i = 1, 2. \end{cases}$$

其中: $x_1(t) = q_c(t)$ 为电容 C_i 的不可测量的电量, $x_2(t) = \phi_l(t)$ 为电感 L_i 的可测量的磁通量, $u(t)$ 为输

入电压, $y(t)$ 为测量输出. 电路参数选定为

$$R = 100 \Omega, L_1 = 3 \text{ H}, L_2 = 9 \text{ H},$$

$$C_1 = 0.03 \mu\text{F}, C_2 = 0.1 \mu\text{F}.$$

设置采样时间为 1s, 考虑干扰输入和故障, 则离散后的切换系统的参数矩阵为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.7238 & 0.0072 \\ -0.7238 & -0.0072 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.9131 & 0.0091 \\ -0.8210 & -0.0082 \end{bmatrix},$$

$$B_{1d} = [-0.8218 \ 0.7958]^T,$$

$$B_{2d} = [-0.2123 \ 0.1289]^T,$$

$$B_{1f} = [-0.9019 \ 0.5107]^T,$$

$$B_{2f} = [-0.8119 \ -0.1001]^T,$$

$$C_1 = [0 \ 0.3333], C_2 = [0 \ 0.1111],$$

$$D_{1d} = -0.5288, D_{2d} = -0.2912,$$

$$D_{1f} = 0.7896, D_{2f} = 0.7383.$$

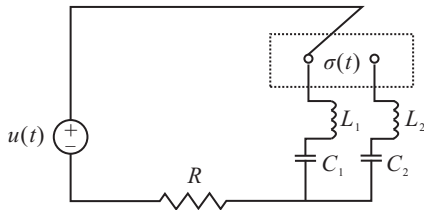


图2 切换RLC电路

给定

$$\alpha = 0.1, \beta = 1.2, \mu_1 = 1.01, \mu_2 = 1.02,$$

$$\gamma_1 = 0.4, \gamma_2 = 0.1,$$

异步的最大时间间隔 $\Delta_m = 2$, 计算切换信号需要满足的最小平均驻留时间为

$$\tau_\alpha \geq \text{ceil} \left[-\frac{\Delta_m (\ln(1+0.02) - \ln(1-0.02)) + \ln 0.273}{\ln(1-0.02)} \right] = 17.$$

仿真中选定平均驻留时间 $\tau_\alpha = 18$, 如图3所示. 实线表示原系统的切换信号, 虚线表示滤波器的切换信号, 可以看到两个切换之间是异步的.

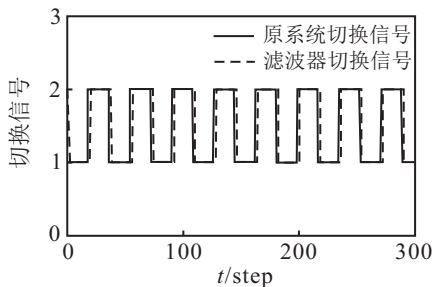


图3 切换信号

选择未知干扰信号 $d(k) = 0.1 \sin(0.1k)$, 故障信号为

$$f(k) = \begin{cases} 0, & k \in [1, 160] \cup [187, 300]; \\ 0.5, & k \in [161, 186]. \end{cases}$$

由定理1和定理2可计算故障检测滤波器的增益矩阵为

$$L_1 = [-1.0978 \ 0.4522]^T,$$

$$L_2 = [0.6139 \ 0.3220]^T,$$

$$V_1 = 0.3334, V_2 = 0.4810.$$

计算残差评价函数的数值和阈值为

$$J_L(r(k)) = \sqrt{\sum_{k=0}^{167} r^T(k)r(k)} = 1.5621,$$

$$J_{th}(r(k)) = \sqrt{\sum_{k=0}^{300} r^T(k)r(k)} = 1.5502.$$

可以看到, 当 $k = 167$ 时, $J_L(r(k)) > J_{th}(r(k))$, 即检测到了故障, 残差评价函数的变化曲线如图4所示.

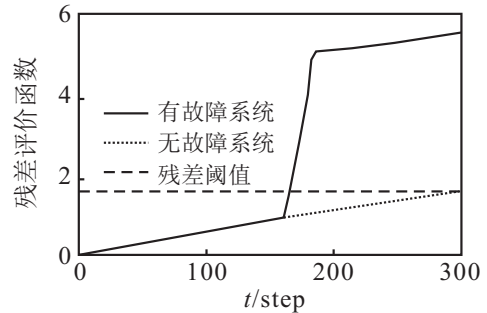


图4 残差评价函数变化曲线(基于定理1和定理2)

由定理3和定理4计算滤波器增益矩阵为

$$L_1 = [-0.1247 \ 0.0719]^T,$$

$$L_2 = [-0.2573 \ -0.3855]^T,$$

$$V_1 = 0.3868, V_2 = 0.4992.$$

计算残差评价函数的数值和阈值为

$$J_L(r(k)) = \sqrt{\sum_{k=0}^{164} r^T(k)r(k)} = 1.5521,$$

$$J_{th}(r(k)) = \sqrt{\sum_{k=0}^{300} r^T(k)r(k)} = 1.5451.$$

可以看到, 当 $k = 164$ 时, $J_L(r(k)) > J_{th}(r(k))$, 即检测到了故障, 残差评价函数的变化曲线如图5所示.

由图4和图5可见: 故障发生前, 两个残差评价函数变化曲线重合, 均小于阈值; 故障发生后, 有故障系统的残差曲线发生明显变化, 超出了无故障系统的曲

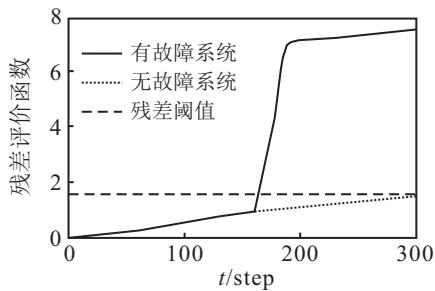


图5 残差评价函数的变化曲线(基于定理3和定理4)

线,且经过一段时间后超过阈值曲线,实现了故障检测.进一步可以发现,基于定理3和定理4得到的故障检测结果略优于定理1和定理2的结果,从而验证了设计结果的有效性.

5 结论

本文主要考虑了基于混合 H_-/H_∞ 性能下,线性切换系统的异步鲁棒故障检测滤波器设计问题.利用松弛变量的方法,解决了Lyapunov矩阵和系统矩阵的解耦问题,从而获得了滤波器的设计结果.需要指出的是,本文使用的基于观测器的 H_-/H_∞ 故障检测滤波器的设计方法,不仅对异步切换下的无时滞切换系统适用,对其他类型的切换系统也适用.因此,后续的研究方向将关注时滞切换系统在异步切换下的故障检测问题.

参考文献(References)

- [1] Isemann R. Supervision fault detection and fault diagnosis methods an introduction[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(5): 639-652.
- [2] Hwang I, Kim S, Kim Y. A survey of fault detection, isolation and reconfiguration methods[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2010, 18(4): 636-653.
- [3] Frank P M, Ding S X. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems[J]. J of Process Control, 1997, 7(6): 403-424.
- [4] 袁帅, 刘新芝. 切换系统故障估计方法在三水箱系统中的应用[J]. 山东大学学报: 工学版, 2011, 41(3): 52-58.
(Yuan S, Liu X Z. Fault estimator design for switched systems-application to the three-tank system[J]. J of Shandong University: Engineering Science, 2011, 41(3): 52-58.)
- [5] Hou Yan-ze, Dong Chao-yang, Wang Qing. Adaptive control scheme for linear uncertain switched systems[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf and Exhibit. Hawaii, 2008: 1-12.
- [6] Zhang Li-xian, Cui Nai-gang, Liu Ming, et al. Asynchronous filtering of discrete-time switched linear systems with average dwell Time[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems—I: Regular Paper, 2011, 58(5): 1109-1118.
- [7] Hespanha J P, Morse A S. Stability of switched systems with average dwell time[C]. Proc of 38th IEEE Conf on Decision & Control. Phoenix: IEEE, 1999: 2655-2660.
- [8] Zhang Li-xian, Boukas E K, Shi Peng. Exponential H_∞ filtering for uncertain discrete-time switched linear systems with average dwell time: A μ -dependent approach[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 2008, 18(11): 1188-1207.
- [9] Zhao Xu-dong, Yin Shen, Li Hong-yi, et al. Switching stabilization for a class of slowly switched systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2015, 60(1): 221-226.
- [10] Zhang Li-xian, Zhuang Song-lin, Shi Peng. Non-weighted quasi-time-dependent H_∞ filtering for switched linear systems with persistent dwell-time[J]. Automatica, 2015, 54(C): 201-209.
- [11] Long Li-jun, Wang Zhuo, Zhao Jun. Switched adaptive control of switched nonlinearly parameterized systems with unstable subsystems[J]. Automatica, 2015, 54(C): 217-228.
- [12] Wang Shun, Shi Tian-ge, Zhang Li-xian, et al. Extended finite time H_∞ control for uncertain switched linear neutral systems with time-varying delays[J]. Neurocomputing, 2015, 152: 377-387.
- [13] Liu Hao, Zhou Guo-peng. Finite-time sampled-data control for switching T-S fuzzy systems[J]. Neurocomputing, 2015, 166: 294-300.
- [14] Wang Dong, Shi Peng, Wang Wei. Robust fault detection for continuous time switched delay systems an linear matrix inequality approach[J]. IET Control Theory and Applications, 2010, 4(1): 100-108.
- [15] Du Dong-sheng, Jiang Bin, Shi Peng. Fault detection for discrete-time switched systems with interval time varying delays[J]. Int J of Control, Automation, and Systems, 2011, 9(2): 396-401.
- [16] Li Jian, Yang Guang-hong. Fault detection and isolation for discrete-time switched linear systems based on average dwell time[J]. Int J of Systems Science, 2013, 44(12): 2349-2364.
- [17] Xiang Wei-ming, Xiao Jian, Iqbal M N. Fault detection for switched nonlinear systems under asynchronous switching[J]. Int J of Control, 2011, 84(8): 1362-1376.
- [18] Li Jian, Yang Guang-hong. Asynchronous fault detection filter design approach for discrete-time switched linear systems[J]. Int J of Robust And Nonlinear Control, 2014, 24(1): 70-96.

(责任编辑: 郑晓蕾)