

随机时变时滞非线性马尔可夫跳跃系统故障检测问题研究

任伟建¹, 王春蕾^{1†}, 路 阳²

(1. 东北石油大学 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 黑龙江八一农垦大学 信息技术学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 本文研究一类具有随机时变时滞及随机发生非线性(RONs)的离散时间马尔可夫跳跃系统的故障检测问题. 针对多重时变时滞发生时所具有的随机特性, 使用相互独立的伯努利随机过程来刻画这一现象. 进一步地, 在故障检测研究中考虑一类由伯努利分布白序列描述的随机非线性干扰. 本文的目的是设计一个故障检测滤波器, 使得整个误差动态系统满足均方指数稳定及相应的 H_∞ 性能指标. 通过Lyapunov稳定性理论及随机分析技术, 建立满足均方指数稳定和 H_∞ 干扰抑制的充分条件, 进而使用半定程序方法求解一个凸优化问题, 获取所设计的故障检测滤波器增益特性. 最后, 通过仿真算例证实了该设计方法的实用性和有效性.

关键词: 故障检测; 马尔可夫跳跃系统; 随机时变时滞; 随机发生非线性

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Research on fault detection for Markovian jump systems with time-varying delays and randomly occurring nonlinearities

REN Wei-jian¹, WANG Chun-lei^{1†}, LU Yang²

(1. College of Electric and Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang 163318, China;
2. College of Information Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing Heilongjiang 163318, China)

Abstract: This paper is concerned with the fault detection problem for a class of discrete-time Markovian jump systems with multiple time-varying stochastic delays and randomly occurring nonlinearities. According to the stochastic characteristic of multiple time-varying delays, an individual Bernoulli distribution is used to describe this phenomenon. Furthermore, a kind of stochastic nonlinear disturbance is also considered in the fault detection research by means of a Bernoulli distributed white sequence. The main purpose of this paper is to design a fault detection filter such that the residual system is mean square exponential stable and the relevant H_∞ performance is satisfied. Through Lyapunov stability theory and stochastic analysis technology, sufficient conditions are set up for the desired exponential stability and H_∞ disturbance attenuation, a convex optimization problem is solved by the semidefinite programming technique, the gain characteristic of the fault detection filter is obtained. Finally, a simulation example is provided to illustrate the usefulness and effectiveness of the proposed design approach.

Key words: fault detection; Markovian jump system; stochastic time-varying delays; randomly occurring nonlinearities

1 引言(Introduction)

近年来,随着动态系统高性能、高安全性、高可靠性需求的日益增长,其故障检测问题获得了广泛的关注和研究.故障检测技术广泛地应用于航天、汽车和制造业等多个工程领域以减少停机时间和提高装置安全性.在各种故障检测方法中,基于模型的故障检测方法被广泛使用,它利用数学模型设计一个故障检测滤波器来检测故障信号,通过建立残差信号,将计算出的残差评估函数与事先设定的阈值进行比较.当残差大于阈值时则确定系统有故障发生,否则系统无

故障^[1].

马尔可夫跳跃系统(Markovian jump systems, MJSs)是一类具有有限动作模式的特殊随机系统,其系统模态受马尔可夫链的约束,具有连续和离散并存的特点^[2].MJSs可用于描述因突发性环境变化或元件损坏等导致结构发生突变的系统,广泛应用于电力系统、生产制造系统和通讯系统等.到目前为止,关于MJSs的成果已覆盖包括稳定性分析^[3-4]、滤波器设计^[5-11]和控制器设计^[12]等领域.然而,具有普遍性的MJSs时滞故障检测问题研究成果较少.时滞是引起

收稿日期: 2016-01-07; 录用日期: 2016-06-08.

[†]通信作者. E-mail: wangcl001@163.com; Tel.: +86 15845859180.

本文责任编辑: 周东华.

国家自然科学基金项目(61374127), 黑龙江省博士后科研启动资金项目(LBH-Q12143), 黑龙江省青年基金项目(QC2013C066)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61374127), Heilongjiang Postdoctoral Research Foundation (LBH-Q12143), Heilongjiang Youth Foundation (QC2013C066).

工程系统稳定性变差或发散的主要原因, 马尔可夫跳跃系统的时滞研究主要分为常时滞、变时滞和时滞依赖于模式3种类型^[13], 文献[14]给出了一类具有常数时滞的离散时间马尔可夫跳跃系统的鲁棒故障检测; 文献[15]给出了模态依赖时滞的离散时间马尔可夫跳跃系统的鲁棒故障检测问题. 在实际生活中, 由于信号的传输和转换需要一定时间, 使得通信系统和网络化控制系统中普遍存在时滞现象, 而网络引起的时滞本质上是随机和随时间变化的, 为此时变时滞以多样的概率方式进行建模^[16-17]. 在不同的时滞描述中, 二进制随机时滞由于描述的简单性和实用性, 受到很多学者的青睐^[18-20]. 为了更真实地反映网络诱导现象, 随机时变时滞已经开始受到一些初步的关注.

众所周知, 非线性广泛存在于实际系统中. 在网络控制系统中, 网络诱导现象的随机发生导致非线性干扰以一定的概率出现. 网络系统的早期研究表明这样的非线性干扰会随机发生, 并且强度和类型是随机变化的^[21-23]. 例如, 在某一特定时刻, 由于带宽的限制, 大量的数据包在传输通道中可能遇到严重的网络堵塞, 由此产生某些随机发生非线性, 其发生概率可借助统计测试来估计. 此外, 由于温度变化、元件老化等因素的影响, 几乎每一个动态系统都会经历一些参数和结构的变化. 在文献[24]及其参考文献中, 对于系统的随机发生非线性已经进行了一些初步的工作. 然而, 到目前为止, 涉及离散时间马尔可夫跳跃系统的故障检测问题, 包括多重时变时滞以及随机发生非线性仍然是一个需要深入研究的问题.

综上所述, 本文主要研究一类具有随机时变时滞和随机发生非线性的离散时间马尔可夫跳跃系统的故障检测问题, 主要工作强调如下: 1) 研究包括随机时变时滞、随机发生非线性在内的导致系统复杂性的因素. 2) 使用相互独立的伯努利随机过程刻画多重时变时滞的随机发生. 3) 随机发生非线性研究中, 使用伯努利随机二进制分布白序列和已知的条件概率来描述非线性干扰. 4) 采用Lyapunov稳定性理论, 结合随机分析技术, 使残差动态系统指数稳定并确保系统 H_∞ 性能要求.

论文的安排如下: 第2节描述具有随机时变时滞、随机发生非线性的离散时间马尔可夫跳跃系统的故障检测问题; 第3节基于Lyapunov稳定性理论, LMI和随机分析技术, 解决故障检测滤波器设计问题及其算法实现; 第4节给出一个数值仿真验证结果有效性; 第5节得出结论.

注1 本文的符号除另述的以外是标准的. M^T 是 M 的转置; \mathbb{R}^n 表示 n 维欧几里得空间, $\mathbb{R}^{n \times m}$ 是所有 $n \times m$ 阶的实矩阵集; \mathbb{Z}^- 表示所有非正整数集; I 和 0 分别表示单位矩阵和零矩阵; $l_2([0, \infty); \mathbb{R}^n)$ 是 n 维向量函数在 $[0, \infty)$ 上的平方和空间; $P > 0$ 表示 P 是实对称正定矩阵; $E\{x\}$ 表示随机变

量 x 的期望; $\|x\|$ 表示向量 x 的欧几里得范数; 在对称块矩阵中, $\text{diag}\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 表示对角块是矩阵 A_1, A_2, \dots, A_n 的块对角矩阵, 符号*表示对称项的省略.

2 问题阐述(Problem formulation)

考虑如下具有随机发生非线性和随机时变时滞的离散马尔可夫跳跃系统:

$$\begin{cases} x(k+1) = A(\theta_k)x(k) + \gamma(k)g(\theta_k, x(k)) + \\ \quad A_{d1}(\theta_k) \sum_{r=1}^q \alpha_r(k)x(k - \tau_r(k)) + \\ \quad D_1(\theta_k)\omega(k) + G(\theta_k)f(k), \\ y(k) = C(\theta_k)x(k) + D_2(\theta_k)\omega(k) + \\ \quad E(\theta_k)f(k), \\ x(k) = \psi(k), \forall k \in \mathbb{Z}^-, \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 为系统状态; $y(k) \in \mathbb{R}^m$ 为传输的测量信号; $\omega(k) \in \mathbb{R}^p$ 为 $l_2[0, \infty)$ 区间的外部干扰信号; $f(k) \in l_2([0, \infty); \mathbb{R}^l)$ 为要被检测的故障信号. 对于固定系统模式, 系统矩阵 $A(\theta_k)$, $A_{d1}(\theta_k)$, $G(\theta_k)$, $C(\theta_k)$, $D_1(\theta_k)$, $D_2(\theta_k)$ 和 $E(\theta_k)$ 为已知的具有适当维数的常矩阵. $\tau_r(k)$ ($r = 1, 2, \dots, q$)表示系统的时变时滞; $\psi(k)$ 是给定的一个初始序列; θ_k 是模态空间 $S = \{1, 2, \dots, N\}$ 的有限模态马尔可夫链, 其模态转移概率为

$$p_{ij} = P\{\theta_{k+1} = j | \theta_k = i\}, \text{ 且 } \sum_{j=1}^N \theta_{ij} = 1.$$

非线性函数 $g(\theta_k, x(k))$ 满足 $g(\theta_k, 0) = 0$, 且

$$\begin{aligned} \|g(\theta_k, x(k) + \delta(k)) - g(\theta_k, x(k))\| \leq \\ \|B_1(\theta_k)\delta(k)\|, \end{aligned} \quad (2)$$

其中: 对于固定系统模式, $B_1(\theta_k)$ 为已知矩阵, $\delta(k)$ 是一个向量.

随机变量 $\alpha_r(k)$ ($r = 1, 2, \dots, q$), $\gamma(k)$ 是取值为0或1的相互独立的伯努利分布白序列, 分别用来描述随机时变时滞和随机发生的非线性现象(RONs), 遵循以下概率:

$$\begin{cases} P\{\alpha_r(k) = 1\} = \bar{\alpha}_r, \\ P\{\alpha_r(k) = 0\} = 1 - \bar{\alpha}_r, \\ P\{\gamma(k) = 1\} = \bar{\gamma}, \\ P\{\gamma(k) = 0\} = 1 - \bar{\gamma}, \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\bar{\alpha}_r \in [0, 1]$, $\bar{\gamma} \in [0, 1]$ 为已知常量.

注2 由于网络诱导现象的随机发生导致非线性干扰以一定的概率出现, 用 $g(\theta_k, x(k))$ 描述的非线性发生概率可借助统计测试估计. 在本文中, 为了使随机非线性在网络环境中具有实际意义, 引入随机变量 $\gamma(k)$ 表示非线性函数 $g(\theta_k, x(k))$ 的随机发生性, 即随机发生非线性(RONs), 进而在故障检测问题中讨论RONs.

假定时滞 $\tau_r(k)$ ($r = 1, 2, \dots, q$)是时变的, 并且

满足 $d_m \leq \tau_r(k) \leq d_M$, 其中 d_m 和 d_M 为恒正标量, 分别表示时滞的下限和上限.

注3 时变时滞的描述具有以下两个特征: 1) 时变时滞具有离散、连续和分布3种形式; 2) 根据事先的统计检验, 可以为每个可能的时滞指定一个独立的概率分布. 当设计故障检测滤波器时, 需要使用伯努利过程推断统计, 使故障检测滤波器的性能依赖于随机发生现象的统计, 这将降低保守性.

简便起见, 记 $A(\theta_k) = A_i, A_{d1}(\theta_k) = A_{d1i}, g(\theta_k, x(k)) = g_i(x(k)), G(\theta_k) = G_i, C(\theta_k) = C_i, D_1(\theta_k) = D_{1i}, D_2(\theta_k) = D_{2i}, E(\theta_k) = E_i, B_1(\theta_k) = B_{1i}$.

考虑具有下述结构的故障检测滤波器:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A_F(\theta_k)\hat{x}(k) + B_F(\theta_k)y(k), \\ r(k) = C_F(\theta_k)\hat{x}(k) + D_F(\theta_k)y(k), \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\hat{x}_k \in \mathbb{R}^n$ 为滤波器的状态, $r(k) \in \mathbb{R}^l$ 为残差, 常数矩阵 $A_F(\theta_k), B_F(\theta_k), C_F(\theta_k), D_F(\theta_k)$ 为待定的具有适当维数的滤波器矩阵. 简便起见, 记 $A_F(\theta_k) = A_{Fi}, B_F(\theta_k) = B_{Fi}, C_F(\theta_k) = C_{Fi}, D_F(\theta_k) = D_{Fi}$.

由式(1)和(4)可得故障检测动态系统

$$\begin{cases} \bar{x}(k+1) = \bar{A}(\theta_k)\bar{x}(k) + \sum_{r=1}^q (\bar{A}_{dr}(\theta_k) + \tilde{A}_{dr}(\theta_k))\bar{x}(k - \tau_r(k)) + (\bar{\gamma} + \tilde{\gamma}(k))Zg(\theta_k, x(k)) + \bar{D}(\theta_k)v(k), \\ \bar{r}(k) = \bar{C}(\theta_k)\bar{x}(k) + \bar{D}_F(\theta_k)v(k), \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\bar{x}(k) = [x^T(k) \hat{x}^T(k)]^T, \bar{r}(k) = r(k) - f(k),$$

$$v(k) = [\omega^T(k) \ f^T(k)]^T, \bar{A}(\theta_k) = \begin{bmatrix} A_i & 0 \\ B_{Fi}C_i & A_{Fi} \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_{dr}(\theta_k) = \begin{bmatrix} \bar{\alpha}_r A_{d1i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{A}_{dr}(\theta_k) = \begin{bmatrix} \tilde{\alpha}_r(k) A_{d1i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{D}(\theta_k) = \begin{bmatrix} D_{1i} & G_i \\ B_{Fi}D_{2i} & B_{Fi}E_i \end{bmatrix}, Z = [I \ 0]^T,$$

$$\bar{C}(\theta_k) = [D_{Fi}C_i \ C_{Fi}],$$

$$\bar{D}_F(\theta_k) = [D_{Fi}D_{2i} \ D_{Fi}E_i - I],$$

且 $\tilde{\alpha}_r(k) = \alpha_r(k) - \bar{\alpha}_r, \tilde{\gamma}(k) = \gamma(k) - \bar{\gamma}$. 得

$$E\{\tilde{\alpha}_r(k)\} = 0, E\{\tilde{\alpha}_r^2(k)\} = \bar{\alpha}_r(1 - \bar{\alpha}_r),$$

$$E\{\tilde{\gamma}(k)\} = 0, E\{\tilde{\gamma}^2(k)\} = \bar{\gamma}(1 - \bar{\gamma}).$$

简便起见, 记 $\bar{A}(\theta_k) = \bar{A}_i, \bar{A}_{dr}(\theta_k) = \bar{A}_{dri}, \tilde{A}_{dr}(\theta_k) = \tilde{A}_{dri}, \bar{D}(\theta_k) = \bar{D}_i, \bar{C}(\theta_k) = \bar{C}_i, \bar{D}_F(\theta_k) = \bar{D}_{Fi}$.

定义1 如果对于任何初始条件在 $v(k) = 0$ 情况下, 存在常数 $\delta > 0$ 和 $0 < \kappa < 1$, 使得

$$E\{\|\bar{x}(k)\|^2\} \leq \delta_\kappa^k \sup_{i \in \mathbb{Z}^-} E\{\|\psi(i)\|^2\}, \forall k \geq 0,$$

则式(5)中的故障检测动态系统在均方意义下指数稳定.

本文的目的是考虑随机时变时滞和随机发生非线性情形下, 离散时间马尔可夫跳跃系统的故障检测滤波器设计问题. 具体地, 是找到由式(4)描述的滤波器参数 $A_{Fi}, B_{Fi}, C_{Fi}, D_{Fi}$, 使故障检测动态系统满足下列条件:

a) 故障检测系统(5)在均方意义下指数稳定.

b) 零初始条件下, 对于给定的干扰衰减水平 $\gamma > 0$ 和所有非零的 $v(k)$, 残差 $\bar{r}(k)$ 满足

$$\sum_{k=0}^{\infty} E\{\|\bar{r}(k)\|^2\} \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} E\{\|v(k)\|^2\}, \quad (6)$$

其中 $\gamma > 0$ 在式(6)的情形下取值尽量小, 以最小化外部扰动对残差的影响.

残差产生系统设计完成后, 需要对所产生的残差信号进行评价, 本文定义具有下述形式的残差评估函数 $J(k)$ 和一个阈值函数 J_{th} :

$$\begin{cases} J(k) = \left\{ \sum_{h=0}^L r^T(h)r(h) \right\}^{\frac{1}{2}}, \\ J_{th} = \sup_{\omega_k \in l_2, f_k=0} E\{J(k)\}, \end{cases} \quad (7)$$

其中 L 表示评估函数的最大时间步长. 基于式(7), 将残差评估函数的值与预先设定的阈值进行比较, 以检测是否发生故障. 如果残差评价函数的值大于阈值, 则发出报警信号, 可用下面的逻辑关系表示:

$$J(k) > J_{th} \Rightarrow \text{有故障} \Rightarrow \text{警告},$$

$$J(k) \leq J_{th} \Rightarrow \text{无故障}.$$

3 主要结论(Main results)

本章利用Lyapunov函数方法和随机分析技术, 研究系统(1)的故障检测滤波器的分析和设计问题. 首先, 引入下面的引理, 用于得到主要结果.

引理1 (矩阵Schur补^[25].) 给定常矩阵 S_1, S_2, S_3 , 其中 $S_1 = S_1^T$ 且 $0 < S_2 = S_2^T$, 则 $S_1 + S_3^T S_2^{-1} S_3 < 0$ 当且仅当

$$\begin{bmatrix} S_1 & S_3^T \\ S_3 & -S_2 \end{bmatrix} < 0 \text{ 或 } \begin{bmatrix} -S_2 & S_3 \\ S_3^T & S_1 \end{bmatrix} < 0. \quad (8)$$

引理2 令 $x \in \mathbb{R}^n, y \in \mathbb{R}^n$ 且矩阵 $Q > 0$, 那么有 $x^T Q y + y^T Q x \leq x^T Q x + y^T Q y$.

在下面的定理中, 对于残差动态系统, 在零初始条件下, 其均方指数稳定且满足式(6)的一个充分条件被给出.

定理1 考虑式(5)中给定滤波器参数和一个预先给定的 H_∞ 性能指标 $\gamma > 0$ 的系统, 如果存在正定矩阵 $P_i > 0 (i \in \mathbb{N}), Q_r > 0 (r = 1, 2, 3, \dots, q)$ 和正常标量 $\rho > 0$ 满足

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} + \bar{C}_i^T \bar{C}_i & * & * \\ \hat{Z}_i^T \bar{P}_i \bar{A}_i & \Phi_{2i} & * \\ \bar{D}_i^T \bar{P}_i \bar{A}_i + \bar{D}_{Fi}^T \bar{C}_i & \bar{D}_i^T \bar{P}_i \hat{Z}_i & \Phi_{3i} \end{bmatrix} < 0, \tag{9}$$

$$Z^T \bar{P}_i Z \leq \rho I, \tag{10}$$

则故障检测动态系统在均方意义下指数稳定且满足式(6), 其中:

$$\bar{P}_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} P_j,$$

$$\Phi_{1i} = 2\bar{A}_i^T \bar{P}_i \bar{A}_i + \sum_{r=1}^q (d_M - d_m + 1) Q_r - P_i + \rho \bar{B}_i,$$

$$\Phi_{2i} = \text{diag}\{-Q_1 + \hat{A}_{1i}, -Q_2 + \hat{A}_{2i}, \dots, -Q_q + \hat{A}_{qi}\} + 2\hat{Z}_i^T \bar{P}_i \hat{Z}_i,$$

$$\Phi_{3i} = 2\bar{D}_i^T \bar{P}_i \bar{D}_i + \bar{D}_{Fi}^T \bar{D}_{Fi} - \gamma^2 I,$$

$$\hat{A}_{ri} = \bar{\alpha}_r (1 - \bar{\alpha}_r) \hat{A}_{d1i}^T \bar{P}_i \hat{A}_{d1i}, \quad r = 1, 2, \dots, q,$$

$$\hat{Z}_i = [\bar{A}_{d1i} \quad \bar{A}_{d2i} \quad \dots \quad \bar{A}_{dqi}],$$

$$\bar{B}_i = \text{diag}\{(3\bar{\gamma}^2 + \bar{\gamma}) B_i^T B_i, 0\},$$

$$\hat{A}_{d1i} = \text{diag}\{A_{d1i}, 0\}.$$

证 为了表示方便, 引入如下新变量:

$$\eta(k) := [\bar{x}^T(k) \quad \bar{x}^T(k - \tau_1(k)) \quad \dots \quad \bar{x}^T(k - \tau_q(k))]^T.$$

在零初始条件下, 假设系统的模态 $\theta_k = i \in \mathbb{N}$, 构建如下Lyapunov-Krasovskii函数:

$$V(\bar{x}(k), \theta_k) = V_1(\bar{x}(k), \theta_k) + V_2(\bar{x}(k), \theta_k) + V_3(\bar{x}(k), \theta_k), \tag{11}$$

其中:

$$V_1(\bar{x}(k), \theta_k) = \bar{x}^T(k) P(\theta_k) \bar{x}(k),$$

$$V_2(\bar{x}(k), \theta_k) = \sum_{r=1}^q \sum_{l=k-\tau_r(k)}^{k-1} \bar{x}^T(l) Q_r \bar{x}(l),$$

$$V_3(\bar{x}(k), \theta_k) = \sum_{r=1}^q \sum_{m=-d_M+1}^{-d_m} \sum_{l=k+m}^{k-1} \bar{x}^T(l) Q_r \bar{x}(l).$$

由此可知

$$\Delta V_1(\bar{x}(k), \theta_k) =$$

$$E\{V_1(\bar{x}(k+1), \theta_{k+1}) | \bar{x}(k), \theta_k = i\} -$$

$$V_1(\bar{x}(k), \theta_k) =$$

$$\sum_{j=1}^N p_{ij} \bar{x}^T(k+1) P_j \bar{x}(k+1) - \bar{x}^T(k) P_i \bar{x}(k) =$$

$$\bar{x}^T(k) (\bar{A}_i^T \bar{P}_i \bar{A}_i - P_i) \bar{x}(k) +$$

$$2\bar{x}^T(k) \bar{A}_i^T \bar{P}_i (\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k))) +$$

$$2\bar{x}^T(k) \bar{A}_i^T \bar{P}_i \bar{D}_i v(k) + 2\bar{\gamma} g_i^T(x(k)) Z^T \bar{P}_i \bar{D}_i v(k) +$$

$$(\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)))^T \bar{P}_i (\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k))) +$$

$$2\bar{\gamma} \bar{x}^T(k) \bar{A}_i^T \bar{P}_i Z g_i(x(k)) + \sum_{r=1}^q \bar{x}^T(k - \tau_r(k)) \tilde{A}_{dri}^T \bar{P}_i \tilde{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)) +$$

$$2(\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)))^T \bar{P}_i \bar{D}_i v(k) +$$

$$v^T(k) \bar{D}_i^T \bar{P}_i \bar{D}_i v(k) +$$

$$2\bar{\gamma} (\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}^T(k - \tau_r(k)))^T \bar{P}_i Z g_i(x(k)) +$$

$$\bar{\gamma} g_i^T(x(k)) Z^T \bar{P}_i Z g_i(x(k)), \tag{12}$$

其中

$$E\{\tilde{A}_{dri}^T \bar{P}_i \tilde{A}_{dri}\} =$$

$$E\left\{\begin{bmatrix} \tilde{\alpha}_r(k) A_{d1i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T \bar{P}_i \begin{bmatrix} \tilde{\alpha}_r(k) A_{d1i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\right\} =$$

$$\bar{\alpha}_r (1 - \bar{\alpha}_r) \begin{bmatrix} A_{d1i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T \bar{P}_i \begin{bmatrix} A_{d1i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$\bar{\alpha}_r (1 - \bar{\alpha}_r) \hat{A}_{d1i}^T \bar{P}_i \hat{A}_{d1i}. \tag{13}$$

根据引理2可知

$$2\bar{\gamma} \bar{x}^T(k) \bar{A}_i^T \bar{P}_i Z g_i(x(k)) \leq$$

$$\bar{x}^T(k) \bar{A}_i^T \bar{P}_i \bar{A}_i \bar{x}(k) + \bar{\gamma}^2 g_i^T(x(k)) Z^T \bar{P}_i Z g_i(x(k)), \tag{14}$$

$$2\bar{\gamma} g_i^T(x(k)) Z^T \bar{P}_i \bar{D}_i v(k) \leq$$

$$\bar{\gamma}^2 g_i^T(x(k)) Z^T \bar{P}_i Z g_i(x(k)) + v^T(k) \bar{D}_i^T \bar{P}_i \bar{D}_i v(k), \tag{15}$$

$$2\bar{\gamma} (\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)))^T \bar{P}_i Z g_i(x(k)) \leq$$

$$(\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)))^T \bar{P}_i (\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k))) + \bar{\gamma}^2 g_i^T(x(k)) Z^T \bar{P}_i Z g_i(x(k)). \tag{16}$$

根据式(2)可知

$$g_i^T(x(k)) (3\bar{\gamma}^2 + \bar{\gamma}) Z^T \bar{P}_i Z g_i(x(k)) \leq$$

$$x^T(k) (3\bar{\gamma}^2 + \bar{\gamma}) \rho B_i^T B_i x(k) = \bar{x}^T(k) \rho \bar{B}_i \bar{x}(k), \tag{17}$$

并且根据式(12)-(17)有

$$\Delta V_1(\bar{x}(k), \theta_k) =$$

$$E\{V_1(\bar{x}(k+1), \theta_{k+1}) | \bar{x}(k), \theta_k = i\} -$$

$$V_1(\bar{x}(k), \theta_k)$$

$$\leq \bar{x}^T(k) (2\bar{A}_i^T \bar{P}_i \bar{A}_i - P_i + \rho \bar{B}_i) \bar{x}(k) +$$

$$2\bar{x}^T(k) \bar{A}_i^T \bar{P}_i (\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k))) +$$

$$2\bar{x}^T(k) \bar{A}_i^T \bar{P}_i \bar{D}_i v(k) + 2(\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)))^T$$

$$\begin{aligned} & \bar{P}_i \left(\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)) \right) + \\ & \sum_{r=1}^q \bar{x}^T(k - \tau_r(k)) \bar{A}_{dri}^T \bar{P}_i \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)) + \\ & 2 \left(\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)) \right)^T \bar{P}_i \bar{D}_i v(k) + \\ & 2v^T(k) \bar{D}_i^T \bar{P}_i \bar{D}_i v(k), \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned} \Delta V_2(\bar{x}(k), \theta_k) = & \mathbb{E} \{ V_2(\bar{x}(k+1), \theta_{k+1}) | \bar{x}(k), \theta_k = i \} - \\ & V_2(\bar{x}(k), \theta_k) = \\ & \sum_{j=1}^N p_{ij} \left(\sum_{r=1}^q \sum_{l=k-\tau_r(k)+1}^k \bar{x}^T(l) Q_r \bar{x}(l) - \right. \\ & \left. \sum_{r=1}^q \sum_{l=k-\tau_r(k)}^{k-1} \bar{x}^T(l) Q_r \bar{x}(l) \right) \leq \\ & \sum_{r=1}^q (\bar{x}^T(k) Q_r \bar{x}(k) - \\ & \bar{x}^T(k - \tau_r(k)) Q_r \bar{x}(k - \tau_r(k)) + \\ & \sum_{l=k-d_M+1}^{k-d_m} \bar{x}^T(l) Q_r \bar{x}(l)), \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned} \Delta V_3(\bar{x}(k), \theta_k) = & \mathbb{E} \{ V_3(\bar{x}(k+1), \theta_{k+1}) | \bar{x}(k), \theta_k = i \} - \\ & V_3(\bar{x}(k), \theta_k) = \\ & \sum_{r=1}^q ((d_M - d_m) \bar{x}^T(k) Q_r \bar{x}(k) - \\ & \sum_{l=k-d_M+1}^{k-d_m} \bar{x}^T(l) Q_r \bar{x}(l)). \end{aligned} \tag{20}$$

由式(18)–(20)可得

$$\begin{aligned} \Delta V(\bar{x}(k), \theta_k) \leq & \bar{x}^T(k) (2\bar{A}_i^T \bar{P}_i \bar{A}_i - P_i + \rho \bar{B}_i) \bar{x}(k) + \\ & 2\bar{x}^T(k) \bar{A}_i^T \bar{P}_i \left(\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)) \right) + \\ & 2\bar{x}^T(k) \bar{A}_i^T \bar{P}_i \bar{D}_i v(k) + 2 \left(\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)) \right)^T \\ & \bar{P}_i \left(\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)) \right) + \\ & \sum_{r=1}^q \bar{x}^T(k - \tau_r(k)) \bar{A}_{dri}^T \bar{P}_i \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)) + \\ & 2 \left(\sum_{r=1}^q \bar{A}_{dri} \bar{x}(k - \tau_r(k)) \right)^T \bar{P}_i \bar{D}_i v(k) + \\ & 2v^T(k) \bar{D}_i^T \bar{P}_i \bar{D}_i v(k) + \sum_{r=1}^q (\bar{x}^T(k) Q_r \bar{x}(k) - \\ & \bar{x}^T(k - \tau_r(k)) Q_r \bar{x}(k - \tau_r(k)) + \\ & \sum_{l=k-d_M+1}^{k-d_m} \bar{x}^T(l) Q_r \bar{x}(l)) + \\ & \sum_{r=1}^q ((d_M - d_m) \bar{x}^T(k) Q_r \bar{x}(k) - \end{aligned}$$

$$\sum_{l=k-d_M+1}^{k-d_m} \bar{x}^T(l) Q_r \bar{x}(l)), \tag{21}$$

从而对于 $v(k) = 0$, 有

$$\mathbb{E} \{ \Delta V(\bar{x}(k), \theta_k) \} \leq \eta^T(k) \Phi_i \eta(k), \tag{22}$$

其中

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} & * \\ \hat{Z}_i^T \bar{P}_i \bar{A}_i & \Phi_{2i} \end{bmatrix}.$$

根据定理1可以得出 $\Phi_i < 0$. 因此, 系统(5)在均方意义下指数稳定.

下面证明系统(5)的 H_∞ 性能, 在初始条件为零时, 考虑以下指标:

$$\begin{aligned} J_N = & \mathbb{E} \sum_{k=0}^{\infty} [\bar{r}^T(k) \bar{r}(k) - \beta^2 v^T(k) v(k)] = \\ & \mathbb{E} \sum_{k=0}^{\infty} [\bar{r}^T(k) \bar{r}(k) + \Delta V(\bar{x}(k), \theta_k) - \\ & \beta^2 v^T(k) v(k)] - \mathbb{E} \{ V_{k+1}(\bar{x}(k+1), \theta_{k+1}) \} \leq \\ & \mathbb{E} \sum_{k=0}^{\infty} [\bar{r}^T(k) \bar{r}(k) - \beta^2 v^T(k) v(k) + \\ & \Delta V(\bar{x}(k), \theta_k)] \leq \\ & \sum_{k=0}^{\infty} \eta^T(k) \Phi_i \eta(k) < 0. \end{aligned}$$

由上述不等式得

$$\sum_{k=0}^{\infty} \mathbb{E} \{ \|\bar{r}(k)\|^2 \} \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \mathbb{E} \{ \|v(k)\|^2 \}.$$

证毕.

下面的定理给出故障检测滤波器设计结果.

定理 2 考虑一类具有随机发生非线性和随机时变时滞的离散马尔可夫跳跃系统. 给定 H_∞ 性能指标 $\gamma > 0$. 如果存在正定矩阵 $P_i > 0 (i \in \mathbb{N})$, $Q_r > 0 (r = 1, 2, 3, \dots, q)$, 正常标量 $\rho > 0$ 和矩阵 X_i, K_i , 使得下面的线性矩阵不等式成立:

$$Y = \begin{bmatrix} \hat{\Gamma}_{11} & * & * & * & * \\ 0 & -\gamma^2 I & * & * & * \\ \hat{\Gamma}_{31} & P_i \hat{D}_{0i} + X_i \hat{R}_{2i} & -P_i & * & * \\ \hat{\Gamma}_{41} & 0 & 0 & -\tilde{P}_i & * \\ \hat{\Gamma}_{51} & \hat{\Gamma}_{52} & 0 & 0 & -\hat{P}_i \end{bmatrix} < 0, \tag{23}$$

$$Z^T \bar{P}_i Z \leq \rho I, \tag{24}$$

则要求的如式(4)的全阶故障检测滤波器存在, 通过引入附加矩阵解决故障检测滤波器设计问题. 其中:

$$\begin{aligned} \hat{\Gamma}_{11} &= \text{diag} \{ \Gamma_{11}, \Gamma_{22} \}, \\ \hat{\Gamma}_{31} &= [\bar{P}_i \hat{A}_{0i} + X_i \hat{R}_{1i} \quad \bar{P}_i \hat{Z}_i], \\ \hat{\Gamma}_{41} &= \text{diag} \{ \bar{P}_i \hat{A}_{0i} + X_i \hat{R}_{1i}, \bar{P}_i \hat{Z}_i \}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= \rho \bar{B}_i + \sum_{r=1}^q (d_M - d_m + 1) Q_r - P_i, \\ \Gamma_{22} &= \text{diag}\{-Q_1 + \tilde{A}_{1i}, -Q_2 + \tilde{A}_{2i}, \dots, \\ &\quad -Q_q + \tilde{A}_{qi}\}, \\ \hat{\Gamma}_{51} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K_i \hat{R}_{1i} & 0 \end{bmatrix}, \\ \hat{\Gamma}_{52} &= \begin{bmatrix} \bar{P}_i \hat{D}_{0i} + X_i \hat{R}_{2i} \\ K_i \hat{R}_{2i} - \hat{E}_1^T \end{bmatrix}, \hat{E} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} \\ I_{n \times n} \end{bmatrix}, \\ \tilde{P}_i &= \text{diag}\{\bar{P}_i, \bar{P}_i\}, \hat{P}_i = \text{diag}\{\bar{P}_i, I\}, \\ \hat{E}_{1i} &= [0_{l \times p} \quad I_{l \times p}]^T, \hat{E}_{2i} = [0_{m \times n} \quad I_{m \times n}]^T, \\ \hat{A}_{0i} &= \begin{bmatrix} A_i & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \hat{D}_{0i} = \begin{bmatrix} D_{1i} & G_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \hat{R}_{1i} &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ C_i & 0 \end{bmatrix}, \hat{R}_{2i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ D_{2i} & E_i \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

进一步,如果\$(P_i, Q_r, X_i, K_i, \rho)\$为式(23)–(24)可行解,那么形如式(4)的故障检测滤波器的参数给定如下:

$$\begin{aligned} [A_{Fi} \quad B_{Fi}] &= [\hat{E}^T \bar{P}_i \hat{E}]^{-1} \hat{E}^T X_i, \\ [C_{Fi} \quad D_{Fi}] &= K_i. \end{aligned} \tag{25}$$

证 为了避免正定矩阵\$P_i, Q_r\$的分割,以下列形式重写定理1中的参数.

$$\begin{cases} \bar{A}_i = \hat{A}_{0i} + \hat{E} K_{1i} \hat{R}_{1i}, \\ \bar{D}_i = \hat{D}_{0i} + \hat{E} K_{1i} \hat{R}_{2i}, \\ \bar{C}_i = K_i \hat{R}_{1i}, \\ \bar{D}_{Fi} = K_i \hat{R}_{2i} - \hat{E}_1^T, \end{cases} \tag{26}$$

其中\$K_{1i} = [A_{Fi} \quad B_{Fi}]\$.

利用Shur补引理,式(9)可被重写为

$$\begin{bmatrix} \hat{\Gamma}_{11} & * & * & * & * \\ 0 & -\gamma^2 I & * & * & * \\ \hat{\Gamma}_{31} & \hat{D}_{0i} + \hat{E} K_{1i} \hat{R}_{2i} & -P_i^{-1} & * & * \\ \hat{\Gamma}_{41} & 0 & 0 & -\tilde{P}_i^{-1} & * \\ \hat{\Gamma}_{51} & \hat{\Gamma}_{52} & 0 & 0 & -\hat{P}_i^{-1} \end{bmatrix} < 0, \tag{27}$$

其中:

$$\begin{aligned} \hat{\Gamma}_{31} &= [\hat{A}_{0i} + \hat{E} K_{1i} \hat{R}_{1i} \quad \hat{Z}_i], \\ \hat{\Gamma}_{41} &= \text{diag}\{\hat{A}_{0i} + \hat{E} K_{1i} \hat{R}_{1i}, \hat{Z}_i\}, \\ \hat{\Gamma}_{52} &= \begin{bmatrix} \hat{D}_{0i} + \hat{E} K_{1i} \hat{R}_{2i} \\ K_i \hat{R}_{2i} - \hat{E}_1^T \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

通过引理1并令\$X_i = \bar{P}_i \hat{E} K_{1i}\$,可以得到式(23),从而证明完毕.

4 仿真(Numerical example)

在这一章中,利用一个数值仿真算例验证所提出

方法的有效性.对于具有随机时变时滞和随机发生非线性的离散时间马尔可夫跳跃系统,转移概率矩阵给定如下:

$$\hat{\Psi} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 \\ 0.3 & 0.7 \end{bmatrix}.$$

明显地,系统包括两种模式,其系统数据给定如下:

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 0.6 & 0.2 \\ 0 & 0.7 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, \\ A_{d11} &= \begin{bmatrix} 0.03 & 0 \\ 0.02 & 0.03 \end{bmatrix}, \\ A_{d12} &= \begin{bmatrix} 0.05 & 0 \\ 0.04 & 0.05 \end{bmatrix}, \\ D_{11} &= \begin{bmatrix} 0.8 & 0 \\ 0 & 0.3 \end{bmatrix}, D_{12} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0.4 \end{bmatrix}, \\ C_1 = C_2 &= [0.2 \quad -0.1], H_1 = H_2 = 0.9, \\ D_{21} &= [0.6 \quad -0.1], D_{22} = [0.5 \quad -0.1], \\ G_1 &= [-0.1 \quad 0.2]^T, G_2 = [-0.1 \quad -0.2]^T. \end{aligned}$$

假定时变时滞变量满足\$2 \le \tau_r(k) \le 6 (r = 1, 2)\$,并且

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_1 &= E\{\alpha_1(k)\} = 0.9, \\ \bar{\alpha}_2 &= E\{\alpha_2(k)\} = 0.7, \\ \bar{\gamma} &= E\{\gamma(k)\} = 0.8. \end{aligned}$$

同时,非线性向量值函数由下式给出

$$g_1(x(k)) = g_2(x(k)) = 0.5x_1(k) \sin(x_2(k)),$$

可以看出\$\varepsilon(k) = 1\$和\$B(k) = \text{diag}\{0.2, 0.15\}\$条件下满足约束(2).

根据定理2,故障检测滤波器通过式(25)计算得出如下:

$$\begin{aligned} A_{F1} &= \begin{bmatrix} 0.0025 & 0.0410 \\ 0.0237 & 0.0021 \end{bmatrix}, B_{F1} = \begin{bmatrix} 0.0005 \\ 0.0288 \end{bmatrix}, \\ C_{F1} &= [2.2550 \quad 0.1310], D_{F1} = 0.5039, \\ A_{F2} &= \begin{bmatrix} 0.0019 & -0.0162 \\ -0.0022 & -0.0106 \end{bmatrix}, B_{F2} = \begin{bmatrix} 0.0015 \\ 0.0065 \end{bmatrix}, \\ C_{F2} &= [-0.0013 \quad -0.0033], D_{F2} = 0.7791. \end{aligned}$$

为进一步验证所设计的故障检测滤波器的有效性,对于\$k = 0, 1, \dots, 150\$,令故障信号\$f(k)\$为

$$f(k) = \begin{cases} 1, & 40 \leq k \leq 80, \\ 0, & \text{其他}. \end{cases}$$

给定转移概率矩阵\$\hat{\Psi}\$并且令\$\theta(0) = 1, \theta(k)\$以一定的时间频率在两种模式间随机跳跃,如图1所示.

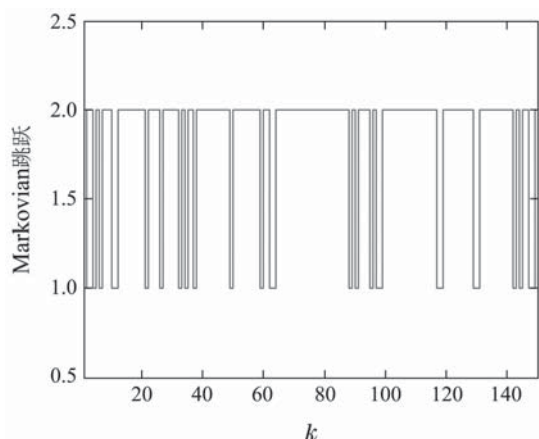


图1 模式跳变过程
Fig. 1 Modes evolution

在外部干扰 $\omega(k) = 0$ 的情况下, 残差响应 $r(k)$ 和残差评价函数 $J(k)$ 变化曲线分别如图2-3所示, 表明当故障发生时, 所设计的故障检测滤波器可以有效地检测出故障.

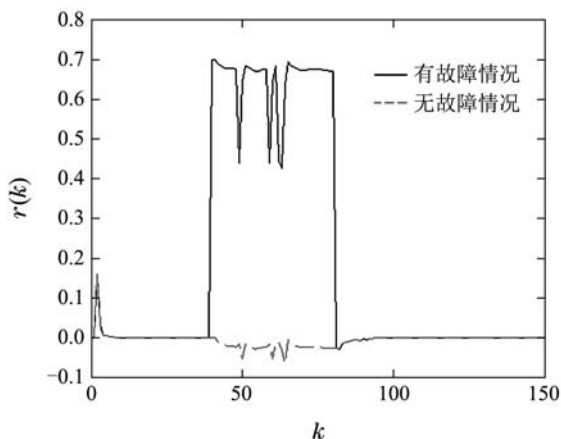


图2 无扰动情形下的残差信号
Fig. 2 Residual signal without disturbance

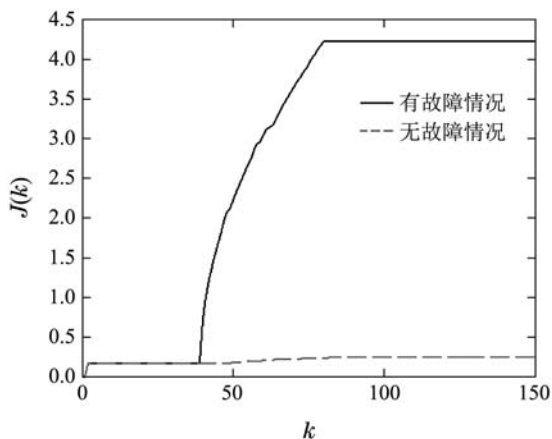


图3 无扰动情形下的残差评价函数
Fig. 3 Residual evaluation function without disturbance

假定干扰为

$$\omega(k) = \begin{cases} [\text{rand}[0, 1] \quad 1.2\text{rand}[0, 1]]^T, & 0 \leq k \leq 50, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases}$$

其中: rand 函数产生随机数数组, 其元素均匀分布在区间 $[0, 1]$. 残差响应 $r(k)$ 和残差评价函数 $J(k)$ 变化曲线分别如图4-5所示. 选定阈值

$$J_{th} = \sup_{f=0} E\left\{\sum_{s=0}^{150} r^T(s)r(s)\right\}^{1/2},$$

在仿真运行200次后, 得到 J_{th} 的平均值为1.1129. 从图5可看出, $0.9469 = J(40) < J_{th} < J(41) = 1.3016$, 故障可以在发生后的1个时间步长内被检测出来. 因此, 残差不仅能及时反映出故障, 而且能够在扰动发生情形下检测出故障.

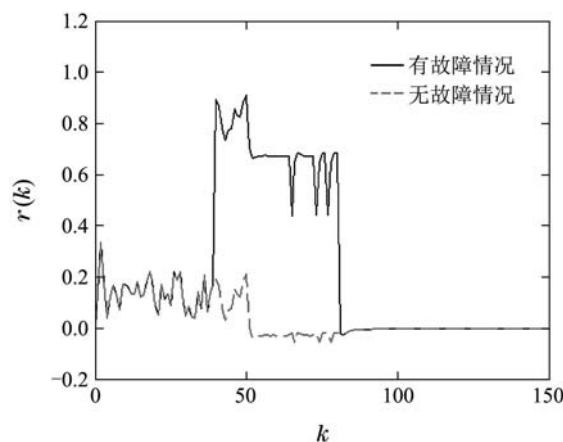


图4 扰动情形下的残差信号
Fig. 4 Residual signal with disturbance

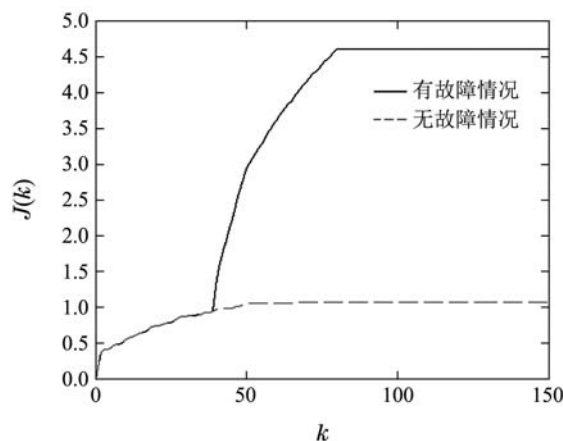


图5 扰动情形下的残差评价函数
Fig. 5 Residual evaluation function with disturbance

5 结论(Conclusions)

本文研究了一种具有随机时变时滞和随机发生非线性的离散时间马尔可夫跳跃系统的故障检测问题. 考虑的时滞为多重随机时变时滞, 利用已知条件概率下的伯努利分布序列建模, 描述随机发生的非线性现象. 文中通过增广技术, 将故障检测问题转化为辅助

的 H_∞ 滤波问题. 基于Lyapunov稳定性理论和随机分析技术, 得到故障检测滤波器存在的充分条件, 通过确定线性矩阵不等式的可行解, 得到故障检测滤波器增益的直接形式, 使残差动态系统指数稳定并满足 H_∞ 性能指标. 最后, 由仿真算例验证所提出设计方法的有效性. 本文所提出的故障检测滤波器的性能分析条件是充分的, 存在一定的保守性. 在目前基础上, 如何建立起保守性更小的故障检测滤波器存在性的判别准则是未来值得深入研究的问题.

参考文献(References):

- [1] WANG Yongqiang, YE Hao, WANG Guizeng. Recent development of fault detection techniques for networked control systems [J]. *Control Theory and Applications*, 2009, 26(4): 400 – 409.
(王永强, 叶昊, 王桂增. 网络化控制系统故障检测技术的最新进展 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(4): 400 – 409.)
- [2] DONG H L, WANG Z D, HO D W C, et al. Robust H_∞ filtering for Markovian jump systems with randomly occurring nonlinearities and sensor saturation: the finite-horizon case [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(7): 3048 – 3057.
- [3] WANG G L, ZHANG Q L, YANG C Y. Stabilization of singular Markovian jump systems with time-varying switchings [J]. *Information Sciences*, 2015, 297(1): 254 – 270.
- [4] LIU X H, XI H S. Stochastic stability for uncertain neutral Markovian jump systems with nonlinear perturbations [J]. *Journal of Dynamical and Control Systems*, 2015, 21(2): 285 – 305.
- [5] ZHANG Y Q, LIU C X, SONG Y D. Finite-time H_∞ filtering for discrete-time Markovian jump systems [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2013, 350(6): 1579 – 1595.
- [6] ZHANG B Y, LI Y M. Exponential filtering for distributed delay systems with Markovian jumping parameters [J]. *Signal Processing*, 2013, 93(1): 206 – 216.
- [7] ZHUANG G M, SONG G F, XU S Y. H_∞ filtering for Markovian jump delay systems with parameter uncertainties and limited communication capacity [J]. *Control Theory and Applications*, 2014, 8(14): 1337 – 1353.
- [8] TERRA M H, ISHIHARA J Y, JUNIOR A P. Array algorithm for filtering of discrete-time Markovian jump linear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(7): 1293 – 1296.
- [9] LI Z C, YU Z D. Further result on H_∞ filter design for continuous-time Markovian jump systems with time-varying delay [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, 351(9): 4619 – 4635.
- [10] ZHUANG G M, LU J W, ZHANG M S. Robust H_∞ filter design for uncertain stochastic Markovian jump Hopfield neural networks with mode-dependent time-varying delays [J]. *Neurocomputing*, 2014, 127(1): 181 – 189.
- [11] LONG S H, ZHONG S M, LIU Z J. H_∞ filtering for a class of singular Markovian jump systems with time-varying delay [J]. *Signal Processing*, 2012, 92(11): 2759 – 2768.
- [12] LAM J. Robust H_∞ control of descriptor discrete-time Markovian jump systems [J]. *International Journal of Control*, 2007, 80(3): 374 – 385.
- [13] LIU M, HO D W C, NIU Y G. Robust Stabilization of Markovian jump linear system over networks with random communication delay [J]. *Automatica*, 2009, 45(2): 416 – 421.
- [14] WANG Hongru, WANG Changhong, GAO Huijun. Robust fault detection for discrete-time Markovian jump systems with time-delays [J]. *Control and Decision*, 2006, 21(7): 796 – 800.
(王洪茹, 王常虹, 高会军. 时滞离散马尔可夫跳跃系统的鲁棒故障检测 [J]. 控制与决策, 2006, 21(7): 796 – 800.)
- [15] WANG H R, WANG C H, MOU S S, et al. Robust fault detection for discrete time Markovian jump systems with mode-dependent time-delays [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2007, 5(2): 139 – 144.
- [16] OUALI A, MAKHLOUF A B, HAMMAMI M A, et al. State feedback control law for a class of nonlinear time-varying system under unknown time-varying delay [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 82(1/2): 349 – 355.
- [17] PHAT V N, NIAMSUP P. Global stabilization of linear time-varying delay systems with bounded controls [J]. *Applied Mathematics Letters*, 2015, 46(1): 11 – 16.
- [18] HU J, WANG Z D, GAO H J, et al. Extended Kalman filtering with stochastic nonlinearities and multiple missing measurements [J]. *Automatica*, 2012, 48(9): 2007 – 2015.
- [19] SHEN B, WANG Z D, HUNG Y S. Distributed consensus H_∞ filtering in sensor networks with multiple missing measurements: the finite-horizon case [J]. *Automatica*, 2010, 46(10): 1682 – 1688.
- [20] YANG F W, WANG Z D, HUNG Y S, et al. H_∞ control for networked systems with random communication delays [J]. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2006, 51(3): 511 – 518.
- [21] DING D R, WANG Z D, SHEN B, et al. Envelope-constrained H_∞ filtering with fading measurements and randomly occurring nonlinearities: the finite horizon case [J]. *Automatica*, 2015, 55(1): 37 – 45.
- [22] DONG H L, WANG Z D, DING S X, et al. Event-based H_∞ filter design for a class of nonlinear time-varying systems with fading channels and multiplicative noises [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(14): 3387 – 3395.
- [23] DONG H L, WANG Z D, GAO H J. On design of quantized fault detection filters with randomly occurring nonlinearities and mixed time-delays [J]. *Signal Processing*, 2015, 92(4): 1117 – 1125.
- [24] ZHANG J H, SHI P, QIU J Q. Non-fragile guaranteed cost control for uncertain stochastic nonlinear time-delay systems [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2009, 346(7): 676 – 690.
- [25] BOYD S, GHAOUI L E, FERON E, et al. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory* [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.

作者简介:

任伟建 (1963–), 女, 博士, 教授, 研究领域包括复杂系统的建模与控制等, E-mail: renwj@126.com;

王春蕾 (1991–), 女, 硕士研究生, 研究领域包括非线性系统及其控制, E-mail: wangcl001@163.com;

路阳 (1976–), 男, 博士, 研究领域包括神经网络、智能故障诊断, E-mail: luyanga@sina.com.