第 26 卷 第 5 期
Vol. 26 No. 5

控 制 与 决 策
Control and Decision

2011 年 5 月
May 2011

文章编号: 1001-0920 (2011) 05-0712-05

一类线性 Markov 跳跃区间时滞系统的鲁棒 H_∞ 故障检测滤波器设计

丁 强[1], 钟麦英[2]

(1. 山东大学 控制科学与工程学院，济南 250061；2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100191)

摘 要: 研究一类线性 Markov 跳跃区间时滞系统的鲁棒 H_∞ 故障检测滤波器设计问题. 采用基于自适应观测器的故障检测滤波器作为残差产生器, 将鲁棒 H_∞ 故障检测滤波器设计问题归结为随机 H_∞ 滤波问题. 应用 Lyapunov-Krasovskii 方法, 通过引入松弛矩阵推导证明了问题可解的时滞依赖充分条件, 并进一步通过求解线性矩阵不等式给出了故障检测滤波器参数矩阵的解. 仿真算例验证了所提出方法的有效性.

关键词: Markov 跳跃系统；故障检测滤波器；区间时变时滞；自适应观测器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Design of robust H_∞ fault detection filter for a class of linear Markovian jump systems with interval time-delay

DING Qiang[1], *ZHONG Mai-ying*[2]

(1. School of Control Science and Engineering，Shandong University，Ji'nan 250061，China；2. School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering，Beihang University，Beijing 100191，China. Correspondent：ZHONG Mai-ying，E-mail：myzhong@buaa.edu.cn)

Abstract: This paper deals with the problem of robust H_∞ fault detection filter(FDF) design for a class of linear Markovian jump systems with interval time-delay. By using an adaptive observer based FDF as a residual generator, the design of robust H_∞-FDF is formulated in the framework of stochastic H_∞ filtering. By applying Lyapunov-Krasovskii approach and introducing some slack matrices, a delay-dependent sufficient condition on the existence of H_∞-FDF is derived. The parameter matrices to the H_∞-FDF can be obtained by solving a set of linear matrix inequalities(LMI). A numerical example shows the effectiveness of the proposed method.

Key words: Markovian jump system；fault detection filter；interval time-varying delay；adaptive observer

1 引 言

基于解析模型鲁棒故障诊断问题的研究经过近40年的发展取得了大量成果, 并相继提出了许多方法, 如多目标优化方法、H_∞滤波方法、自适应观测器方法等[1-6]. Markov跳跃系统是一类可用来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, 如电力系统、生产制造系统、通讯系统等. 随着对系统安全可靠性要求的不断提高, Markov跳跃系统故障检测问题的研究引起了越来越多的重视. 文献 [7] 将故障检测滤波器 (FDF) 的设计问题归结为随机意义下的 H_∞/H_- 最小化问题; [8] 基于两目标优化方法研究了具有时变参数的连续时间 Markov 跳跃系统的FDF设计问题; [9] 和 [10] 基于 H_∞ 滤波方法分别研究了状态转移概率已知和部分状态转移概率未知的离散时间 Markov 跳跃系统的故障检测问题; [11] 和 [12] 利用几何方法分别研究了离散时间和连续时间 Markov 跳跃系统的故障检测与分离问题.

另一方面, 时滞是实际工程系统中普遍存在的现象, 而关于时滞 Markov 跳跃系统故障检测问题的研究成果还较少. 文献 [13] 将 [9] 中的方法推广应用到具有常数时滞的离散时间 Markov 跳跃系统; [14] 应用两目标优化方法研究了一类具有常数时滞的非线性 Markov 跳跃系统的故障检测问题. 但是 [13-14] 仅考虑了常数时滞的情况. [15] 将具有长随机时滞的网

收稿日期: 2010-01-28；**修回日期:** 2010-04-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60774071).

作者简介: 丁强(1978−), 男, 博士生, 从事Markov跳跃系统故障诊断问题的研究; 钟麦英(1965−), 女, 教授, 博士生导师, 从事故障诊断与容错控制等研究.

络控制系统建模为 Markov 跳跃系统, 并应用两目标优化方法研究了该系统的故障检测问题, 但只能处理时滞参数变化为 Markov 跳跃的情况. 总之, 对于受时变状态时滞影响的线性 Markov 跳跃系统故障检测问题, 尚待进一步研究.

本文研究一类受区间时变状态时滞和 L_2 范数有界未知输入影响的线性 Markov 跳跃系统的鲁棒 H_∞-FDF 设计问题, 提出将基于自适应 Markov 观测器的 FDF 作为残差产生器, 通过引入随机 H_∞ 性能指标, 将鲁棒 H_∞-FDF 设计问题归结为随机意义下的 H_∞ 滤波问题, 应用 Lyapunov-Krasovskii 方法推导并证明了问题可解的条件, 给出了 H_∞-FDF 参数矩阵的解.

2　问题描述

考虑时滞 Markov 跳跃系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t)=A(\theta_t)x(t)+A_\tau(\theta_t)x(t-\tau(t))+\\ \qquad B_d(\theta_t)d(t)+B_f(\theta_t)f(t),\\ y(t)=C(\theta_t)x(t)+D_d(\theta_t)d(t)+D_f(\theta_t)f(t),\\ x(t)=\varphi(t),\ \forall t\in[-\tau_M,\ 0]. \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x(t)\in R^n$, $y(t)\in R^p$, $d(t)\in R^{n_d}$ 和 $f(t)\in R^{n_f}$ 分别为状态、测量输出、未知输入和故障向量. 假定 $d(t)$ 和 $f(t)$ 均为 L_2 范数有界信号, $f(t)$ 一阶导数 $\dot{f}(t)$ 存在且 L_2 范数有界. $\{\theta_t\}$ 为在有限状态集 $\Xi=\{1,2,\cdots,N\}$ 上取值的连续时间齐次 Markov过程, 状态转移概率为

$$\Pr\{\theta_{t+h}=j|\ \theta_t=i\}=\begin{cases}\lambda_{ij}h+o(h),\ i\neq j;\\ 1+\lambda_{ii}h+o(h),\ i=j.\end{cases}$$

其中: $h>0$, $\lim\limits_{h\to 0}\dfrac{o(h)}{h}=0$, $\lambda_{ij}(i\neq j)$ 为从模态 i 到模态 j 的转移速率, 满足 $\sum\limits_{j=1}^{N}\lambda_{ij}=0$. $\tau(t)$ 为区间时变时滞, 满足 $0\leqslant\tau_m\leqslant\tau(t)\leqslant\tau_M$, 其中 τ_m 和 τ_M 为已知常数. 对于任意的 $\theta_t=i\in\Xi$, $A(\theta_t)$, $A_\tau(\theta_t)$, $B_d(\theta_t)$, $B_f(\theta_t)$, $C(\theta_t)$, $D_d(\theta_t)$ 和 $D_f(\theta_t)$ 均为适当维数的实常数矩阵, 简记为

$$A(\theta_t)=A_i,\ A_\tau(\theta_t)=A_{\tau i},\ B_d(\theta_t)=B_{di},$$
$$B_f(\theta_t)=B_{fi},\ C(\theta_t)=C_i,\ D_d(\theta_t)=D_{di},$$
$$D_f(\theta_t)=D_{fi}.$$

本文中与模态 θ_t 有关的参数矩阵均采用该简记方法, 后面不再赘述, 并假定 $\{\theta_t\}$ 的状态在线可知.

定义 1[14]　当 $d(t)=0$ 和 $f(t)=0$ 时, 若对于任意的初始状态 $\varphi(t)$ 和初始模态 $i_0\in\Xi$, 系统 (1) 满足

$$\lim_{t\to\infty}\mathrm{E}\left[\int_0^t x^{\mathrm{T}}(s)x(s)\mathrm{d}s\right]<\infty,$$

则称系统 (1) 为随机稳定.

令 $\tau_{av}=(\tau_M+\tau_m)/2$, $\delta=(\tau_M-\tau_m)/2$, 根据 Newton-Leibniz 公式

$$x(t-\tau(t))-x(t-\tau_{av})=\int_{t-\tau_{av}}^{t-\tau(t)}\dot{x}(s)\mathrm{d}s,$$

可将系统 (1) 重写为

$$\begin{cases} \dot{x}(t)=A(\theta_t)x(t)+A_\tau(\theta_t)x(t-\tau_{av})+\\ \qquad A_\tau(\theta_t)\int_{t-\tau_{av}}^{t-\tau(t)}\dot{x}(s)\mathrm{d}s+\\ \qquad B_d(\theta_t)d(t)+B_f(\theta_t)f(t),\\ y(t)=C(\theta_t)x(t)+D_d(\theta_t)d(t)+D_f(\theta_t)f(t),\\ x(t)=\varphi(t),\ \forall t\in[-\tau_M,\ 0]. \end{cases} \tag{2}$$

本文的主要目的是设计鲁棒 H_∞-FDF 使产生的残差 $r(t)$ 与故障 $f(t)$ 之差尽可能小. 注意到, 在 $f(t)$ 一阶可导且 $f(t)$ 和 $\dot{f}(t)$ 均为 L_2 范数有界的假设条件下, 不失一般性, 可应用下述一阶系统近似描述 $f(t)$ 的动态行为:

$$\begin{cases} \dot{f}(t)=M(\theta_t)f(t)+v(t),\\ f(t)=0,\ \forall t\in[0,\ \tau_f). \end{cases} \tag{3}$$

其中: $v(t)\in R^{n_f}$ 为 L_2 范数有界未知向量; 未知常数 τ_f 表示故障发生的时间; 对于任意的 $\theta_t=i\in\Xi$, $M(\theta_t)=M_i$ 为未知常数矩阵. 综合考虑系统 (2) 和 (3), 本文把 $f(t)$ 看作新的状态变量, 提出应用如下基于观测器的 FDF 作为残差产生器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t)=A(\theta_t)\hat{x}(t)+A_\tau(\theta_t)\hat{x}(t-\tau_{av})+\\ \qquad B_f(\theta_t)r(t)+L(\theta_t)(\hat{y}(t)-y(t)),\\ \dot{r}(t)=M(\theta_t)r(t)+N(\theta_t)(\hat{y}(t)-y(t)),\\ \hat{y}(t)=C(\theta_t)\hat{x}(t)+D_f(\theta_t)r(t). \end{cases} \tag{4}$$

其中: $\hat{x}(t)$ 和 $\hat{y}(t)$ 表示 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的估计; 残差 $r(t)\in R^{n_f}$ 用于故障估计; $L(\theta_t)$, $M(\theta_t)$ 和 $N(\theta_t)$ 为待设计的参数矩阵.

令 $e(t)=\hat{x}(t)-x(t)$, $r_e(t)=r(t)-f(t)$, 由式 (2) 和 (4) 可得

$$\begin{cases} \dot{\eta}(t)=A_\eta(\theta_t)\eta(t)+E_1(\theta_t)\eta(t-\tau_{av})+\\ \qquad E_2(\theta_t)\int_{t-\tau_{av}}^{t-\tau(t)}\dot{\eta}(s)\mathrm{d}s+B_\eta(\theta_t)w(t),\\ r_e(t)=C_\eta\eta(t). \end{cases} \tag{5}$$

其中

$$\eta(t)=[\ x^{\mathrm{T}}(t)\ \ e^{\mathrm{T}}(t)\ \ r_e^{\mathrm{T}}(t)\ ]^{\mathrm{T}},$$
$$w(t)=[\ d^{\mathrm{T}}(t)\ \ f^{\mathrm{T}}(t)\ \ \dot{f}^{\mathrm{T}}(t)\ ]^{\mathrm{T}},$$
$$A_\eta(\theta_t)=A_{\eta i},\ E_1(\theta_t)=E_{1i},\ E_2(\theta_t)=E_{2i},$$
$$B_\eta(\theta_t)=B_{\eta i},\ C_\eta=[\ 0\ \ 0\ \ I\ ],$$

$$A_{\eta i}=\begin{bmatrix} A_i & 0 & 0\\ 0 & A_i+L_iC_i & B_{fi}+L_iD_{fi}\\ 0 & N_iC_i & M_i+N_iD_{fi} \end{bmatrix},$$

$$E_{1i}=\begin{bmatrix} A_{\tau i} & 0 & 0\\ 0 & A_{\tau i} & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix},\ E_{2i}=\begin{bmatrix} A_{\tau i} & 0 & 0\\ -A_{\tau i} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix},$$

$$B_{\eta i}=\begin{bmatrix} B_{di} & B_{fi} & 0\\ -B_{di}-L_iD_{di} & 0 & 0\\ -N_iD_{di} & M_i & -I\end{bmatrix}.$$

定义

$$\|r_e\|_{2,\ E}=\left\{\mathrm{E}\left[\int_0^\infty r_e^{\mathrm{T}}(t)r_e(t)\mathrm{d}t\right]\right\}^{1/2},$$

并用 $\|r_e\|_{2,\ E}$ 描述残差与故障误差的大小. 从而, 可将鲁棒 H_∞- FDF 设计问题归结为: 给定 $\gamma>0$, 求参数矩阵 L_i, M_i 和 N_i, 使得系统 (5) 随机稳定, 且在零初始条件下满足

$$\|r_e\|_{2,\ E}<\gamma\|w\|_2. \tag{6}$$

本文是在对未知故障分析的基础上提出的一种线性 Markov 跳跃系统鲁棒 H_∞-FDF 的随机 H_∞ 滤波描述, 其主要思想是通过调整参数矩阵 $L(\theta_t)$, $M(\theta_t)$ 和 $N(\theta_t)$ 使残差与故障误差在式 (6) 的意义下尽可能小. 受文献 [5-6] 的启发, 又可称式 (4) 为基于自适应 Markov 跳跃观测器的 H_∞- FDF.

3 主要结论

为证明本文的主要结论, 首先给出如下引理.

引理 1[16] 对于任意的常数矩阵 $M\in R^{n\times n}$, $M=M^{\mathrm{T}}>0$, 标量 $\tau>0$ 和向量函数 $\dot{x}:\ [-\tau,\ 0]\to R^n$, 如果下列积分存在, 则

$$-\tau\int_{-\tau}^0\dot{x}^{\mathrm{T}}(t+s)M\dot{x}(t+s)\mathrm{d}s\leqslant$$
$$\begin{bmatrix} x(t)\\ x(t-\tau)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix} -M & M\\ M & -M\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x(t)\\ x(t-\tau)\end{bmatrix},$$

下面应用引理 1 和 Lyapunov-Krasovskii 方法, 首先给出系统 (5) 随机稳定且满足 H_∞ 性能指标的条件, 然后在此基础上得到鲁棒 H_∞- FDF 存在的充分条件及其参数矩阵的求解方法.

定理 1 给定 $\gamma>0$, 如果存在矩阵 $P_i>0$, $Q>0$, $R>0$, $S>0$ 和矩阵 X_i, $Y_i(i=1,2,\cdots,N)$ 满足如下矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} \varOmega_{1i} & \varOmega_{2i} & R-Y_iE_{1i} & -Y_iE_{2i} & -Y_iB_{\eta i}\\ * & \varOmega_{3i} & -X_iE_{1i} & -X_iE_{2i} & -X_iB_{\eta i}\\ * & * & -Q-R & 0 & 0\\ * & * & * & -0.5S & 0\\ * & * & * & * & -\gamma^2I\end{bmatrix}<0, \tag{7}$$

则系统 (5) 随机稳定, 且在零初始条件下满足式 (6). 其中

$$\varOmega_{1i}=\sum_{j=1}^N\lambda_{ij}P_j+Q-R-Y_iA_{\eta i}-A_{\eta i}^{\mathrm{T}}Y_i^{\mathrm{T}}+C_\eta^{\mathrm{T}}C_\eta,$$

$$\varOmega_{2i}=P_i+Y_i-A_{\eta i}^{\mathrm{T}}X_i^{\mathrm{T}},$$

$$\varOmega_{3i}=\tau_{av}^2R+\delta^2S+X_i+X_i^{\mathrm{T}}.$$

“$*$”表示由矩阵的对称性确定的矩阵块.

限于篇幅, 证明略.

定理 1 给出了系统 (5) 是否随机稳定且满足 H_∞ 性能指标 (6) 的判定条件, 本文主要任务是设计参数矩阵 L_i, M_i 和 N_i 使得系统 (5) 随机稳定且满足式 (6). 由于矩阵不等式 (7) 中含有非线性项 $Y_iA_{\eta i}$, $X_iA_{\eta i}$, $Y_iB_{\eta i}$ 和 $X_iB_{\eta i}$, 问题的求解较为困难. 另外, 矩阵 X_i 和 Y_i 是适当维数的任意松弛矩阵. 为了便于得到问题的解, 首先进行如下分解:

$$X_i=\begin{bmatrix} X_{1i} & \alpha_iX_{4i} & 0\\ X_{2i} & X_{4i} & 0\\ X_{3i} & 0 & X_{5i}\end{bmatrix},\ Y_i=\begin{bmatrix} Y_{1i} & \alpha_iX_{4i} & 0\\ Y_{2i} & X_{4i} & 0\\ Y_{3i} & 0 & X_{5i}\end{bmatrix}.$$

其中 α_i 为未知标量, 对不等式 (7) 进行矩阵运算, 并令 $X_{4i}L_i=U_i$, $X_{5i}N_i=V_i$, $X_{5i}M_i=W_i$, 可得如下矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} \varPi_{1i} & \varPi_{2i} & R-\varPhi_{3i} & -\varPhi_{4i} & -\varPhi_{5i}\\ * & \varPi_{3i} & -\varPhi_{7i} & -\varPhi_{8i} & -\varPhi_{9i}\\ * & * & -Q-R & 0 & 0\\ * & * & * & -0.5S & 0\\ * & * & * & * & -\gamma^2I\end{bmatrix}<0. \tag{8}$$

其中

$$\varPi_{1i}=\sum_{j=1}^N\lambda_{ij}P_j+Q-R-\varPhi_{1i}-\varPhi_{1i}^{\mathrm{T}}+C_\eta^{\mathrm{T}}C_\eta,$$

$$\varPi_{2i}=P_i+Y_i-\varPhi_{2i},\ \varPi_{3i}=\tau_{av}^2R+\delta^2S+\varPhi_{6i},$$

$$\varPhi_{1i}=\begin{bmatrix} Y_{1i}A_i & \alpha_i\varLambda_{1i} & \alpha_i\varLambda_{2i}\\ Y_{2i}A_i & \varLambda_{1i} & \varLambda_{2i}\\ Y_{3i}A_i & V_iC_i & V_iD_{fi}+W_i\end{bmatrix},$$

$$\varLambda_{1i}=X_{4i}A_i+U_iC_i,\ \varLambda_{2i}=X_{4i}B_{fi}+U_iD_{fi},$$

$$\varPhi_{2i}=\begin{bmatrix} A_i^{\mathrm{T}}X_{1i}^{\mathrm{T}} & A_i^{\mathrm{T}}X_{2i}^{\mathrm{T}} & A_i^{\mathrm{T}}X_{3i}^{\mathrm{T}}\\ \alpha_i\varLambda_{1i}^{\mathrm{T}} & \varLambda_{1i}^{\mathrm{T}} & C_i^{\mathrm{T}}V_i^{\mathrm{T}}\\ \alpha_i\varLambda_{2i}^{\mathrm{T}} & \varLambda_{2i}^{\mathrm{T}} & D_{fi}^{\mathrm{T}}V_i^{\mathrm{T}}+W_i^{\mathrm{T}}\end{bmatrix},$$

$$\varPhi_{3i}=\begin{bmatrix} Y_{1i}A_{\tau i} & \alpha_iX_{4i}A_{\tau i} & 0\\ Y_{2i}A_{\tau i} & X_{4i}A_{\tau i} & 0\\ Y_{3i}A_{\tau i} & 0 & 0\end{bmatrix},$$

$$\varPhi_{4i}=\begin{bmatrix} Y_{1i}A_{\tau i}-\alpha_iX_{4i}A_{\tau i} & 0 & 0\\ Y_{2i}A_{\tau i}-X_{4i}A_{\tau i} & 0 & 0\\ Y_{3i}A_{\tau i} & 0 & 0\end{bmatrix},$$

$$\varPhi_{5i}=\begin{bmatrix} Y_{1i}B_{di}-\alpha_i\varLambda_{3i} & Y_{1i}B_{fi} & 0\\ Y_{2i}B_{di}-\varLambda_{3i} & Y_{2i}B_{fi} & 0\\ Y_{3i}B_{di}-V_{3i}D_{di} & Y_{3i}B_{fi}+W_i & -X_{5i}\end{bmatrix},$$

$$\varLambda_{3i}=X_{4i}B_{di}+U_iD_{di},$$

$$\Phi_{6i}=\begin{bmatrix} X_{1i}+X_{1i}^{\mathrm{T}} & X_{2i}^{\mathrm{T}}+\alpha_i X_{4i} & X_{3i}^{\mathrm{T}} \\ X_{2i}+\alpha_i X_{4i}^{\mathrm{T}} & X_{4i}+X_{4i}^{\mathrm{T}} & 0 \\ X_{3i} & 0 & X_{5i}+X_{5i}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix},$$

$$\Phi_{7i}=\begin{bmatrix} X_{1i}A_{\tau i} & \alpha_i X_{4i}A_{\tau i} & 0 \\ X_{2i}A_{\tau i} & X_{4i}A_{\tau i} & 0 \\ X_{3i}A_{\tau i} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Phi_{8i}=\begin{bmatrix} X_{1i}A_{\tau i}-\alpha_i X_{4i}A_{\tau i} & 0 & 0 \\ X_{2i}A_{\tau i}-X_{4i}A_{\tau i} & 0 & 0 \\ X_{3i}A_{\tau i} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Phi_{9i}=\begin{bmatrix} X_{1i}B_{di}-\alpha_i \Lambda_{3i} & X_{1i}B_{fi} & 0 \\ X_{2i}B_{di}-\Lambda_{3i} & X_{2i}B_{fi} & 0 \\ X_{3i}B_{di}-V_iD_{di} & X_{3i}B_{fi}+W_i & -X_{5i} \end{bmatrix}.$$

至此, 已将矩阵不等式 (7) 转换成 (8). 因此, 如果得到矩阵不等式 (8) 的解 $X_{4i}, X_{5i}, U_i, V_i, W_i$, 则参数矩阵 L_i, M_i 和 N_i 可由下式获得:

$$L_i=X_{4i}^{-1}U_i,\ M_i=X_{5i}^{-1}V_i,\ N_i=X_{5i}^{-1}W_i. \tag{9}$$

根据上述分析可得如下定理.

定理 2　给定 $\gamma>0$, 如果存在矩阵 $P_i>0, Q>0, R>0, S>0$, 矩阵 $X_{ki}, Y_{ji}, U_i, V_i, W_i$ 和标量 $\alpha_i(i=1,2,\cdots,N,\ j=1,2,3,\ k=1,2,3,4,5)$ 满足矩阵不等式 (8), 则系统 (1) 的鲁棒 H_∞-FDF 设计问题可解, 且其参数矩阵可由式 (9) 给出.

注意到, 不等式 (8) 中仍含有非线性项 α_iU_i 和 α_iX_{4i}, 对于给定的适当 α_i 值, 则矩阵不等式 (8) 成为 LMI, 从而可直接应用 LMI 工具箱求解. 当然, 这样可能会给问题的求解带来一定的保守性. 为降低保守性, 可通过一般寻优方法优化 α_i 值, 在此不再赘述.

另外, 应用式 (9) 求解参数矩阵 L_i, M_i 和 N_i 的前提条件是 X_{4i} 和 X_{5i} 均为可逆. 由定理 2 可知, 若矩阵不等式 (8) 成立, 则必须满足 $\Pi_{3i}<0$, 即

$$\tau_{av}^2R+\delta^2S+X_i+X_i^{\mathrm{T}}<0,$$

其中 R 和 S 均为正定矩阵. 因此, $X_i+X_i^{\mathrm{T}}<0$ 且 X_i 为非奇异矩阵, 从而 X_{4i} 和 X_{5i} 可逆的条件得到满足. 当不等式 (8) 有解时, 可利用式 (9) 求解 L_i, M_i 和 N_i.

4　仿真算例

考虑系统(1)具有两个模态, 其参数矩阵如下:

$$A_1=\begin{bmatrix} -5 & 0 \\ 1 & -3 \end{bmatrix},\ A_{\tau 1}=\begin{bmatrix} -0.1 & 0 \\ 0.3 & -0.4 \end{bmatrix},$$

$$B_{d1}=\begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.6 \end{bmatrix},\ B_{f1}=\begin{bmatrix} 0.7 \\ 1 \end{bmatrix},\ C_1=[\,1\ \ -1\,],$$

$$A_2=\begin{bmatrix} -4 & 1 \\ 2 & -4 \end{bmatrix},\ A_{\tau 2}=\begin{bmatrix} -0.3 & 0.1 \\ 0 & -0.2 \end{bmatrix},$$

$$B_{d2}=\begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.5 \end{bmatrix},\ B_{f2}=\begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.8 \end{bmatrix},\ C_2=[\,1\ \ 0\,],$$

$$D_{d1}=0.4,\ D_{f1}=0.9,\ D_{d2}=-0.7,\ D_{f2}=-1.$$

状态转移速率为 $\lambda_{11}=-3, \lambda_{12}=3, \lambda_{21}=2, \lambda_{22}=-2$; 时滞 $\tau(t)=0.8|\sin(\pi t/20)|+0.2$. 取 $\alpha_1=\alpha_2=1$, $\gamma=0.85$, 由定理 2 计算可得

$$M_1=-0.3123, N_1=-1.9618,$$

$$L_1=[\,-0.4249\ \ -0.8632\,]^{\mathrm{T}},\ M_2=-0.5915,$$

$$N_2=1.5898,\ L_2=[\,0.3788\ \ 0.5080\,]^{\mathrm{T}}.$$

在 $[0, 80]$ s 时间段内, 系统模态 θ_t 的跳变如图 1 所示, 未知输入 $d(t)$ 如图 2 所示, 图 3 和图 4 分别给出了方波故障和正弦故障及其对应的残差信号. 从图中可看出, 利用该方法产生的残差信号很接近故障信号.

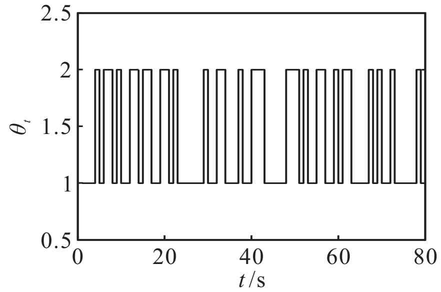

图 1　系统模态 θ_t

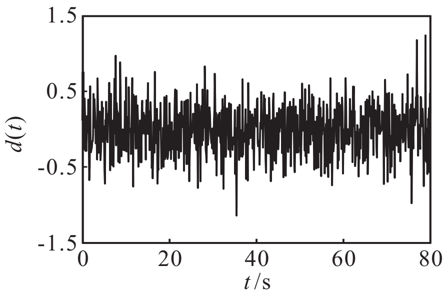

图 2　未知输入 $d(t)$

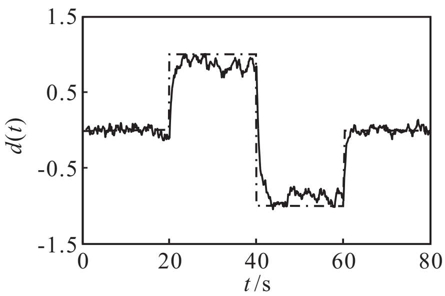

图 3　方波故障 $f(t)$ 和残差信号 $r(t)$

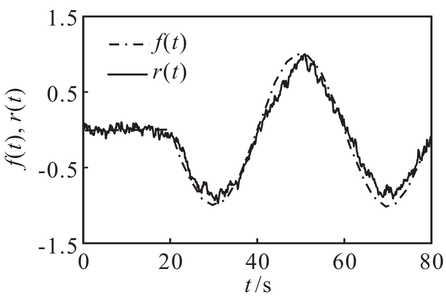

图 4　正弦故障 $f(t)$ 和残差信号 $r(t)$

5 结 论

本文基于自适应观测器方法研究了一类线性Markov跳跃区间时滞系统的鲁棒 H_∞-FDF设计问题. 通过构造依赖模态的自适应Markov跳跃观测器作为残差产生器, 将鲁棒 H_∞-FDF设计问题归结为随机 H_∞ 滤波问题, 使残差与故障之差在均方意义下 L_2 范数诱导增益最小. 给出了问题可解的时滞依赖充分条件, 并通过求解LMI得到了鲁棒 H_∞-FDF参数矩阵的解. 最后的仿真算例验证了本文方法的有效性.

参考文献(References)

[1] Chen J, Patton R J. Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems[M]. Boston: Kluwer Academic Publisher, 1999.

[2] Zhong M, Ding S X, Lam J, et al. An LMI approach to design robust fault detection filter for uncertain LTI systems[J]. Automatica, 2003, 39(3): 543-550.

[3] Ding S X. Model-based fault diagnosis techniques[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

[4] Li X B, Zhou K M. A time domain approach to robust fault detection for linear time-varying systems[J]. Automatica, 2009, 45(1): 94-102.

[5] Jiang B, Staroswiecki M, Cocquempot V. Fault accommodation for nonlinear dynamic systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(9): 1578-1583.

[6] Zhang K, Jiang B, Shumsky A. A new criterion of fault estimation for neutral delay systems using adaptive observer[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(1): 85-91.

[7] Zhong M, Lam J, Ding S X, et al. Robust fault detection of Markovian jump systems[J]. Circuits Systems Signal Processing, 2004, 23(5): 387-407.

[8] Gagliardi G, Casavola A, Famularo D. A fault detection filter design method for Markov jump linear parameter varying systems[C]. Proc of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes. Barcelona, Spain, 2009: 426-431.

[9] Zhong M, Ye H, Shi P, et al. Fault detection for Markovian jump systems[J]. IEE Proc of Control Theory Application, 2005, 152(4): 397-402.

[10] Zhang L, Boukas E, Baron L. Fault detection for discrete-time Markov jump linear systems with partially known transition probabilities[C]. Proc of the 47th Conf on Decision and Control. Cancun, 2008: 1054-1059.

[11] Meskin N, Khorasani K. Fault detection and isolation of discrete-time Markovian jump linear systems with application to a network of multi-agent systems having imperfect communication channels[J]. Automatica, 2009, 45(9): 2032-2040.

[12] Meskin N, Khorasani K. Unobservability subspaces for continuous-time Markovian jump systems with application to fault diagnosis[C]. Proc of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes. Barcelona, Spain, 2009: 953-958.

[13] 王红茹, 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.
(Wang H R, Wang C H, Gao H J. Robust fault detection for discrete-time Markovian jump systems withtime-delays[J]. Control and Decision, 2006, 21(7): 796-800.)

[14] Luan X, He S, Liu F. Neural network-based robust fault detection for nonlinear jump systems[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 42(2): 760-766.

[15] Mao Z, Jiang B, Shi P. H_∞ fault detection filter design for networked control systems modeled by discrete Markovian jump systems[J]. IET Control Theory Application, 2007, 1(5): 1336-1343.

[16] Han Q L. A new delay-dependent stability criterion for linear neutral systems with norm-bounded uncertainties in all systems matrices[J]. Int J of Systems Science, 2005, 36(8): 469-475.

下 期 要 目