

文章编号: 1001-0920(2013)10-1596-05

## 具有随机丢包的非线性网络化控制系统鲁棒故障检测

罗小元, 李娜, 徐奎, 关新平

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 针对具有随机丢包的 Lipschitz 非线性网络化控制系统, 研究了系统存在外部干扰情况下的鲁棒故障检测问题. 由于带宽有限, 传感器-控制器和控制器-执行器的网络通道中存在随机数据包丢失, 鉴于此, 设计一种基于观测器的故障检测滤波器, 给出存在故障检测滤波器的充分条件, 使误差系统均方指数稳定并达到鲁棒  $H_\infty$  干扰抑制水平, 同时给出基于观测残差均方值的故障检测策略. 通过仿真算例验证了所提出方法的有效性.

**关键词:** 非线性网络控制系统; 随机丢包; 故障检测滤波器; 鲁棒  $H_\infty$  性能

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

## Robust fault detection for nonlinear networked control systems with random packets loss

LUO Xiao-yuan, LI Na, XU Kui, GUAN Xin-ping

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China. Correspondent: LUO Xiao-yuan, E-mail: xyluo@ysu.edu.cn)

**Abstract:** The problem of fault detection for Lipschitz nonlinear networked control systems with random packets loss when there exists external interference is concerned in the paper. Because of the limited bandwidth of the channels, such random packets loss can occur, simultaneously, in the communication channels from the sensor to the controller and from the controller to the actuator. An observer-based fault detection filter is then designed. A sufficient condition is also derived, which makes the error systems exponentially mean-square stable and achieve the prescribed  $H_\infty$  disturbance-rejection-attenuation level. In addition, the scheme of fault detection is obtained by using the mean squares of the residual. Simulation example illustrates the effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** nonlinear networked control system; random packets loss; fault detection filter; robust  $H_\infty$  performance

### 0 引言

相比于传统的控制系统, 网络化控制系统具有资源共享、低成本、灵活性高、良好的应用前景等优点, 已在工业自动化、机器人、航空等领域广泛应用, 但网络的引入会产生时延、丢包等问题, 引起系统性能降低甚至不稳定. 近年来, 针对网络控制系统的研究受到了广泛关注<sup>[1-3]</sup>, 对网络控制系统的控制和稳定性分析问题也获得了大量成果<sup>[4-5]</sup>. 另一方面, 系统的安全性和可靠性要求越来越高, 一旦系统发生故障就可能产生巨大的损失, 所以故障诊断越来越受到重视, 故障检测成为学者们研究的热点之一.

由于网络控制系统带宽有限, 产生丢包是不可避免的. 文献[6]将整个观测器系统等效为具有两个事件的异步动态系统进行故障检测. 文献[7]针对分

布式网络化控制系统, 引入基于包的传输机制, 设计中心故障诊断单元. 文献[8]考虑存在随机数据包丢失, 将网络控制系统建模为含有 4 个模态的马尔可夫跳变系统. 以上文献仅针对线性系统, 由于非线性系统较为复杂, 研究成果相对较少<sup>[9-10]</sup>. 许多研究仅考虑传感器-控制器通道丢包, 由于控制器-执行器通道中也有丢包, 对于使用基于观测器的故障检测滤波器, 观测器的控制输入和被控对象的控制输入是不同的<sup>[11]</sup>, 但多数文献假设它们相同<sup>[12]</sup>.

本文考虑的网络化控制系统存在随机丢包, 丢包满足 Bernoulli 分布. 针对系统存在故障和外部干扰, 研究网络化控制系统的故障检测问题, 采用线性矩阵不等式的方法, 给出存在故障检测滤波器的充分条件, 使误差系统均方指数稳定, 并达到鲁棒  $H_\infty$  干扰抑制

收稿日期: 2012-06-19; 修回日期: 2012-12-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61074065).

作者简介: 罗小元(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 从事网络化系统控制、故障检测等研究; 李娜(1986—), 女, 硕士生, 从事故障检测、鲁棒控制的研究.

水平. 所设计的故障检测滤波器不仅对故障敏感, 而且对外部扰动具有一定的鲁棒性.

### 1 问题描述

网络化控制系统被控对象模型为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B_h h(k, x(k)) + \\ \quad D_1 d_1(k) + Ef(k), \\ x(k) = \varphi(k), k = 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $x(k) \in R^n$  为状态向量;  $u(k) \in R^m$  为控制输入向量;  $d_1(k) \in l_2[0, \infty)$  为扰动输入;  $f(k) \in R^q$  为故障信号;  $A, B, B_h, D_1, E$  为具有适当维数的常数矩阵;  $\varphi(k)$  为状态初始值;  $h(k, x(k))$  为已知的非线性函数, 具有以下 Lipschitz 特性:

$$\|h(k, x(k))\| \leq \|g(x(k))\|, \quad (2)$$

$$\|h(k, x(k)) - h(k, y(k))\| \leq \|g(x(k) - y(k))\|, \quad (3)$$

$g$  为大于 0 的常数.

具有随机丢包的测量模型为

$$y(k) = \alpha(k)Cx(k) + D_2 d_2(k). \quad (4)$$

其中:  $y(k) \in R^p$  为测量输出向量;  $d_2(k) \in l_2[0, \infty)$  为测量噪声;  $C$  和  $D_2$  为具有适当维数的常数矩阵;  $\alpha(k)$  为传感器到控制器通道上的随机丢包情况, 当  $\alpha(k) = 1$  时, 无数据丢失, 当  $\alpha(k) = 0$  时, 数据全部丢失,  $\alpha(k) \in R$  为满足 Bernoulli 0-1 序列分布的随机变量, 有

$$\text{prob}\{\alpha(k) = 1\} = E\{\alpha(k)\} = \bar{\alpha}, \quad (5)$$

$$\text{prob}\{\alpha(k) = 0\} = 1 - E\{\alpha(k)\} = 1 - \bar{\alpha}, \quad (6)$$

$$\text{var}\{\alpha(k)\} = E\{(\alpha(k) - \bar{\alpha})^2\} = (1 - \bar{\alpha})\bar{\alpha}, \quad (7)$$

$\bar{\alpha}$  为一个已知的标量且  $0 \leq \bar{\alpha} \leq 1$ .

构造一种基于观测器的故障检测滤波器

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + B\bar{u}(k) + B_h h(k, \hat{x}(k)) + \\ \quad L(y(k) - \hat{y}(k)), \\ \bar{u}(k) = \bar{\beta}\hat{u}(k), \\ \hat{y}(k) = \bar{\alpha}C\hat{x}(k). \end{cases} \quad (8)$$

定义残差为

$$r(k) = V(y(k) - \hat{y}(k)). \quad (9)$$

考虑控制器-执行器通道存在丢包, 控制器为

$$\hat{u}(k) = -K\hat{x}(k), u(k) = \beta(k)\hat{u}(k). \quad (10)$$

其中:  $\hat{x}(k) \in R^n$  为系统 (1) 的状态估计;  $\hat{y}(k) \in R^p$  为观测器的输出;  $\bar{u}(k) \in R^m$  为观测器的控制输入;  $\hat{u}(k) \in R^m$  为没有随机丢包的控制输入;  $u(k) \in R^m$  为被控对象的控制输入;  $L \in R^{n \times p}$  为滤波器增益矩阵;  $r(k) \in R^q$  为残差信号;  $V \in R^{q \times p}$  和  $K \in R^{m \times n}$  分别为残差增益矩阵和控制器增益;  $\beta(k)$  为控制器到执行器通道上的随机丢包情况, 当  $\beta(k) = 1$  时, 无数据丢失, 当  $\beta(k) = 0$  时, 数据全部丢失,  $\beta(k) \in R$  为满足 Bernoulli 0-1 序列分布的随机变量, 有

$$\text{prob}\{\beta(k) = 1\} = E\{\beta(k)\} = \bar{\beta}, \quad (11)$$

$$\text{prob}\{\beta(k) = 0\} = 1 - E\{\beta(k)\} = 1 - \bar{\beta}, \quad (12)$$

$$\text{var}\{\beta(k)\} = E\{(\beta(k) - \bar{\beta})^2\} = (1 - \bar{\beta})\bar{\beta}. \quad (13)$$

定义如下的状态估计误差和残差误差信号:

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k), \quad (14)$$

$$\bar{r}(k) = r(k) - f(k). \quad (15)$$

将式 (4), (8)~(10) 代入 (11), (14) 和 (15), 得到闭环网络控制系统

$$\begin{aligned} x(k+1) &= (A - \bar{\beta}BK)x(k) + B_h h(k, x(k)) + \\ &\quad \bar{\beta}BKe(k) - (\beta(k) - \bar{\beta})BKx(k) + \\ &\quad (\beta(k) - \bar{\beta})BKe(k) + \bar{D}_1\omega(k), \\ e(k+1) &= (A - \bar{\alpha}LC)e(k) + B_h H(k) - \\ &\quad (\beta(k) - \bar{\beta})BKx(k) + (\beta(k) - \bar{\beta}) \times \\ &\quad BKe(k) - (\alpha(k) - \bar{\alpha})LCx(k) + \bar{D}_2\omega(k), \\ \bar{r}(k) &= (\alpha(k) - \bar{\alpha})VCx(k) + \bar{\alpha}Vce(k) + \bar{D}_3\omega(k). \end{aligned} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{D}_1 &= [D_1 \ E \ 0], \bar{D}_2 = [D_1 \ E \ -LD_2], \\ \bar{D}_3 &= [0 \ -I \ VD_2], \omega(k) = [d_1^T(k) \ f^T(k) \ d_2^T(k)]^T, \\ H(k) &= h(k, x(k)) - h(k, \hat{x}(k)). \end{aligned}$$

则由式 (16) 能得到增广系统

$$\begin{aligned} \eta(k+1) &= \bar{A}\eta(k) + (\alpha(k) - \bar{\alpha})\bar{A}_1\eta(k) + \\ &\quad (\beta(k) - \bar{\beta})\bar{A}_2\eta(k) + B_h \bar{H}(k) + \bar{D}\omega(k), \\ \bar{r}(k) &= \bar{C}\eta(k) + (\alpha(k) - \bar{\alpha})\bar{C}_1\eta(k) + \bar{D}_3\omega(k). \end{aligned} \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} \eta(k) &= \begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix}, \bar{A} = \begin{bmatrix} A - \bar{\beta}BK & \bar{\beta}BK \\ 0 & A - \bar{\alpha}LC \end{bmatrix}, \\ \bar{A}_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -LC & 0 \end{bmatrix}, \bar{A}_2 = \begin{bmatrix} -BK & BK \\ -BK & BK \end{bmatrix}, \bar{D} = \begin{bmatrix} \bar{D}_1 \\ \bar{D}_2 \end{bmatrix}, \\ \bar{H}(k) &= \begin{bmatrix} h(k, x(k)) \\ H(k) \end{bmatrix}, \bar{C} = [0 \ \bar{\alpha}VC], \bar{C}_1 = [VC \ 0]. \end{aligned}$$

**定义 1**<sup>[21]</sup> 对于系统 (17), 当  $\omega(k) = 0$  时, 存在  $\rho > 0$  和  $\tau \in (0, 1)$ , 使得

$$E\{\|\eta(k)\|^2\} \leq \rho\tau^k \sup_{i \in z^-} E\{\|\eta(i)\|^2\},$$

则称系统为均方意义下指数稳定.

本文的目的是设计如式 (8) 所示的基于观测器的故障检测滤波器, 使得系统满足:

1) 当  $\omega(k) = 0$  时, 系统 (17) 均方指数稳定;

2) 在零初始条件下, 给定标量  $\gamma > 0$ , 残差误差信号  $\bar{r}(k)$  满足如下的  $H_\infty$  性能指标:

$$E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \bar{r}^T(k)\bar{r}(k)\right\} \leq \gamma^2 E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \omega^T(k)\omega(k)\right\}. \quad (18)$$

选择残差评价函数  $J(k)$  和阈值  $J_{th}$  分别为

$$J(k) = E\left\{\left(\sum_{s=l_0}^{l_0+k} r^T(s)r(s)\right)^{1/2}\right\}, \quad (19)$$

$$J_{th} = \sup_{\omega(k) \in l_2, f(k)=0} E\left\{\left(\sum_{s=l_0}^{l_0+L_0} r^T(s)r(s)\right)^{1/2}\right\}. \quad (20)$$

其中:  $l_0$  为初始评价时刻,  $L_0$  为评价函数最大时间步长. 通过如下关系即可检测出是否发生故障:

$$\begin{cases} J(k) \leq J_{th} \Rightarrow \text{无故障,} \\ J(k) > J_{th} \Rightarrow \text{发生故障} \Rightarrow \text{报警.} \end{cases} \quad (21)$$

## 2 主要结果

**引理 1**<sup>[5]</sup> 若  $T_i \in R^{n \times n} (i = 0, 1, \dots, p)$  为对称矩阵, 存在  $\tau_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, p)$  使得  $T_0 - \sum_{i=1}^p \tau_i T_i > 0$ , 则有下式成立:

$$\varsigma^T T_0 \varsigma > 0, \forall \varsigma \neq 0; \text{ s.t. } \varsigma^T T_i \varsigma \geq 0, i = 0, 1, \dots, p.$$

**定理 1** 给定标量  $\gamma > 0$ , 控制器增益  $K$ , 残差权值  $V$ , 信号传输通道参数  $0 \leq \bar{\alpha} \leq 1$  和  $0 \leq \bar{\beta} \leq 1$ , 如果存在正定对称矩阵  $P$  和  $Q$ , 实数矩阵  $N$ , 非负实数  $\tau_1 \geq 0$  和  $\tau_2 \geq 0$  满足如下不等式:

$$\begin{bmatrix} \Pi_{11} & * \\ 0 & \Pi_{22} & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -\gamma^2 I & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & -\bar{\alpha}VC & 0 & I - \gamma^2 I & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & \bar{\alpha}D_2^T V^T VC & 0 & -D_2^T V^T & \Pi_{55} & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \Pi_{81} & \bar{\beta}PBK & PD_1 & PE & 0 & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & \Pi_{92} & QD_1 & QE & -ND_2 & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ -\beta_1 PBK & \beta_1 PBK & 0 & 0 & 0 & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ -\beta_1 QBK & \beta_1 PBK & 0 & 0 & 0 & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ -\alpha_1 NC & 0 & 0 & 0 & 0 & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ * & * \\ * & * \\ * & * \\ * & * \\ * & * \\ -\tau_1 I & * \\ 0 & -\tau_2 I & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ PB_h & 0 & -P & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & QB_h & 0 & -Q & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -P & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Q & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Q & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \end{bmatrix} < 0, \quad (22)$$

则系统 (17) 是均方指数稳定的, 且满足式 (18) 所示的

$H_\infty$  性能指标. 其中

$$\begin{aligned} \Pi_{11} &= -P + \alpha_1^2 C^T V^T VC + \tau_1 g^2 I, \\ \Pi_{22} &= -Q + \bar{\alpha}^2 C^T V^T VC + \tau_2 g^2 I, \\ \Pi_{55} &= D_2^T V^T VD_2 - \gamma^2 I, \\ \Pi_{81} &= PA - \bar{\beta}PBK, \Pi_{92} = QA - \bar{\alpha}NC, \\ \alpha_1 &= [(1 - \bar{\alpha})\bar{\alpha}]^{1/2}, \beta_1 = [(1 - \bar{\beta})\bar{\beta}]^{1/2}. \end{aligned}$$

**证明** 定义如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V(k) = x^T(k)Px(k) + e^T(k)Qe(k). \quad (23)$$

令式 (7) 中  $E\{(\alpha(k) - \bar{\alpha})^2\} = (1 - \bar{\alpha})\bar{\alpha} = \alpha_1^2$ , 式 (13) 中  $E\{(\beta(k) - \bar{\beta})^2\} = (1 - \bar{\beta})\bar{\beta} = \beta_1^2$ , 有

$$\begin{aligned} &E\{V(k+1)\} - E\{V(k)\} + \\ &E\{\bar{r}^T(k)\bar{r}(k)\} - \gamma^2 E\{\omega^T(k)\omega(k)\} = \\ &[(A - \bar{\beta}BK)x(k) + B_h h(k, x(k)) + \bar{\beta}BKe(k) + \\ &\bar{D}_1 \omega(k)]^T P[(A - \bar{\beta}BK)x(k) + B_h h(k, x(k)) + \\ &\bar{\beta}BKe(k) + \bar{D}_1 \omega(k)] + [(A - \bar{\alpha}LC)e(k) + B_h H(k) + \\ &D_2 \omega(k)]^T Q[(A - \bar{\alpha}LC)e(k) + B_h H(k) + D_2 \omega(k)] + \\ &\beta_1^2 [-BKx(k) + BKe(k)]^T P[-BKx(k) + BKe(k)] + \\ &\beta_1^2 [-BKx(k) + BKe(k)]^T Q[-BKx(k) + BKe(k)] + \\ &\alpha_1^2 [-LCx(k)]^T Q[-LCx(k)] - x^T(k)Px(k) - \\ &e^T(k)Qe(k) + \alpha_1^2 [VCx(k)]^T [VCx(k)] + \\ &[\bar{\alpha}V Ce(k) + \bar{D}_3 \omega(k)]^T [\bar{\alpha}V Ce(k) + \bar{D}_3 \omega(k)] - \\ &\gamma^2 \omega^T(k)\omega(k) = \xi^T(k)\Omega\xi(k). \end{aligned}$$

其中

$$\Omega = \bar{A}^T \bar{P} \bar{A} + \bar{Q},$$

$$\xi(k) = [x^T(k) \ e^T(k) \ \omega^T(k) \ h^T(k, x(k)) \ H^T(k)]^T,$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A - \bar{\beta}BK & \bar{\beta}BK & \bar{D}_1 & B_h & 0 \\ 0 & A - \bar{\alpha}LC & \bar{D}_2 & 0 & B_h \\ -BK & BK & 0 & 0 & 0 \\ -BK & BK & 0 & 0 & 0 \\ -LC & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} P & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_1^2 P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_1^2 Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_1^2 Q \end{bmatrix},$$

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} -P + \alpha_1^2 C^T V^T VC & * \\ 0 & -Q + \bar{\alpha}^2 C^T V^T VC \\ 0 & \bar{\alpha} \bar{D}_3^T VC \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & * \\ \leftarrow \bar{D}_3^T \bar{D}_3 - \gamma^2 I & * & * \\ 0 & 0 & * \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

由式 (2) 和 (3) 可以得到

$$h^T(k, x(k))h(k, x(k)) - g^2 x^T(k)x(k) = \xi^T(k)\Omega_1\xi(k) \leq 0, \quad (24)$$

$$H^T(k)H(k) - g^2 e^T(k)e(k) = \xi^T(k)\Omega_2\xi(k) \leq 0. \quad (25)$$

其中

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} -g^2 I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Omega_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g^2 I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix}.$$

根据引理 1, 在满足式 (24) 和 (25) 的约束下, 如果存在对称正定矩阵  $P$  和  $Q$ 、实数矩阵  $L$ 、非负实数  $\tau_1 \geq 0$  和  $\tau_2 \geq 0$ , 使得

$$\Omega - \tau_1 \Omega_1 - \tau_2 \Omega_2 < 0 \quad (26)$$

成立, 则  $\xi^T(k)\Omega\xi(k) < 0$ , 即

$$E\{V(k+1)\} - E\{v(k)\} + E\{\bar{r}^T(k)\bar{r}(k)\} - \gamma^2 E\{\omega^T(k)\omega(k)\} < 0. \quad (27)$$

从 0 到  $\infty$  累加后, 即可得到

$$E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \bar{r}^T(k)\bar{r}(k)\right\} \leq \gamma^2 E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \omega^T(k)\omega(k)\right\}, \quad (28)$$

表明系统满足了指定的  $H_\infty$  性能指标.

不等式 (26) 中同时存在  $P, P^{-1}, Q, Q^{-1}$ , 所以式 (26) 不是线性矩阵不等式. 定义

$$\Lambda = \text{diag}\{I, I, I, I, I, P, Q, \beta_1 P, \beta_1 Q, \alpha_1 Q\},$$

对不等式 (26) 分别左乘矩阵  $\Lambda^T$  和右乘矩阵  $\Lambda$ , 并令  $N = Q_1 L$ , 得到线性矩阵不等式 (22).

当  $\omega(k) = 0$  时, 由式 (22) 和 Schur 补定理可得

$$E\{\Delta V(k)\} = E\{V(k+1)\} - E\{V(k)\} < 0.$$

参考文献 [5] 定理 1 的方法, 得到系统 (17) 均方指数稳定.  $\square$

### 3 实例仿真

考虑网络化控制系统 (1) 具有如下参数:

$$A = \begin{bmatrix} 0.51 & -0.69 & -0.21 \\ 0.08 & 0 & -0.13 \\ 0 & -0.16 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B = E = [0.12 \ 0.21 \ 0.13]^T,$$

$$D_1 = [0.12 \ 0.21 \ 0.13]^T, \quad C = [0.6 \ 0.8 \ 0],$$

$$g = 0.1, \quad h(k, x(k)) = 0.1 \sin x(k).$$

假设网络化控制系统的初始状态为  $x(0) = \varphi(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$ , 采样周期  $T = 1 \text{ s}$ , 给定控制器增益  $K = [0.95 \ 0.73 \ -0.56]$ , 残差权值  $V = 1$ , 故障输入和外部扰动分别为

$$f(k) = \begin{cases} 3 \sin k, & k = 25, 26, \dots, 45; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$d_1(k) = \begin{cases} 19 \exp(-0.01)n(k), & k = 0, 1, \dots, 100; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

其中:  $n(k)$  为均匀分布在  $[-0.01, 0.01]$  之间的随机噪声, 测量噪声  $d_2(k)$  为能量是 0.0005 的白噪声信号.

给定信号传输通道参数  $\bar{\alpha} = 0.95, \bar{\beta} = 0.92$ , 对定理 1 中不等式 (22) 求解可得到  $\gamma_{\min} = 1.8069$ , 滤波器参数  $L = [-0.2568 \ -0.0640 \ -0.1351]^T$ . 闭环系统的状态  $x(k)$  和滤波误差  $e(k)$  如图 1 和图 2 所示, 可以看出, 在 25~45 s 时, 状态波动较大, 滤波器能有效滤波.

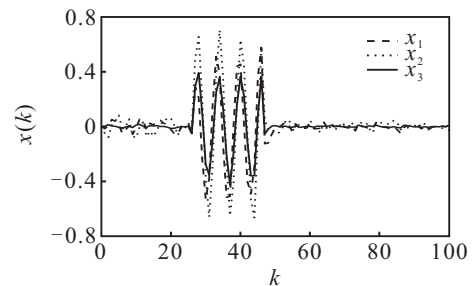


图 1 闭环系统的状态

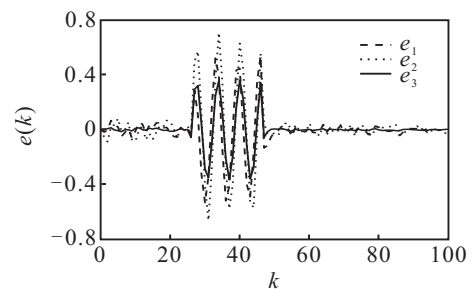


图 2 滤波误差

选择残差评价函数

$$J(k) = E\left\{\left(\sum_{s=0}^k r^T(s)r(s)\right)^{1/2}\right\},$$

求解得到阈值

$$J_{\text{th}} = \sup_{f(k)=0} E\left\{\left(\sum_{s=0}^{200} r^T(s)r(s)\right)^{1/2}\right\} = 0.4449.$$

有无故障时的残差信号  $r(k)$  如图 3 所示, 残差评价函数  $J(k)$  和阈值曲线如图 4 所示. 可以看出, 故障信号发生时, 残差信号和残差评价函数均有明显变化, 且  $0.2817 = J(25) < J_{\text{th}} < J(26) = 0.6582$ . 可见, 在故障发生后 3 个时间周期内, 故障检测滤波器便能检测出故障.

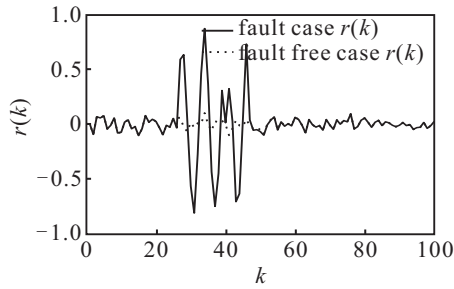


图3 残差信号

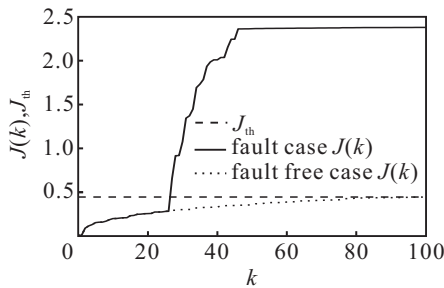


图4 残差评价函数和阈值

## 4 结论

本文研究了具有随机丢包的Lipchitz非线性网络化控制系统的故障检测问题. 设计出基于观测器的故障检测滤波器, 通过观测残差均方值的故障检测策略有效检测出故障, 并使系统均方指数稳定, 达到鲁棒 $H_\infty$ 干扰抑制水平. 仿真算例验证了所提出方法的有效性.

## 参考文献(References)

- [1] Rasool F, Nguang S K. Quantised robust  $H_\infty$  output feedback control of discrete-time systems with random communication delays[J]. IET Control Theory Applications, 2010, 4(11): 2252-2262.
- [2] 阮玉斌, 王武, 杨富文. 具有测量数据丢失的网络化系统的故障检测滤波[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(3): 291-295.  
(Ruan Y B, Wang W, Yang F W. Fault detection filter for networked systems missing measurements[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(3): 291-295.)
- [3] Luo X Y, Shang M J, Chen C L, et al. Guaranteed cost active fault-tolerant control of networked control system with packet dropout and transmission delay[J]. Int J of Automation and Computing, 2011, 8(2): 244-253.
- [4] Wang Z D, Yang F W, Daniel W C Ho, et al. Robust  $H_\infty$  control for networked systems with random packet losses[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2007, 37(4): 916-924.
- [5] Li J G, Yuan J Q, Lu J G. Observer-based  $H_\infty$  control for networked nonlinear systems with random packet losses[J]. ISA Trans, 2010, 49(1): 39-46.
- [6] 吕明, 吴晓蓓, 陈庆伟, 等. 基于异步动态系统的网络控制系统故障检测[J]. 控制与决策, 2008, 23(3): 325-332.  
(Lv M, Wu X P, Chen Q W, et al. Fault detection for networked control systems based on asynchronous dynamical systems[J]. Control and Decision, 2008, 23(3): 325-332.)
- [7] 宗群, 刘文静, 窦立谦, 等. 分布式网络化控制系统故障诊断方法的研究[J]. 控制与决策, 2008, 23(6): 672-680.  
(Zong Q, Liu W J, Dou L Q, et al. Fault diagnosis of distributed networked control system[J]. Control and Decision, 2008, 23(6): 672-680.)
- [8] 黄鹤, 谢德晓, 韩笑冬, 等. 具有随机丢包的一类网络控制系统的故障检测[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(1): 79-86.  
(Huang H, Xie D X, Han X D, et al. Fault detection for networked control system with random packet dropout[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(1): 79-86.)
- [9] Ai Q Y, Liu C S, Jiang B. Robust fault detection for a class of nonlinear network control system with communication delay[J]. J of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20(5): 1024-1030.
- [10] Zhang Y, Liu Z X, Wang B. Robust fault detection for nonlinear networked systems with stochastic interval delay characteristics[J]. ISA Trans, 2011, 50(4): 521-528.
- [11] Wang X B, Fang H J, Fu S. Observer-based fault detection for networked discrete-time in nite-distributed delay systems with packet dropouts[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(1): 270-278.
- [12] Peng C, Dong Y, Tian E G, et al. Observer-based fault detection for networked control systems with network quality of services[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(6): 1653-1661.