

具有丢包、通讯约束的非线性时滞网络化控制系统 鲁棒故障检测

罗小元¹, 袁园¹, 张玉燕¹, 关新平^{1,2}

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对具有 Lipschitz 非线性时滞的网络化控制系统, 研究系统具有丢包和通讯约束的故障检测问题. 利用线性矩阵不等式设计故障检测滤波器, 提出一种新的阈值计算方法, 使得当系统在外部干扰情况下发生故障时残差评价函数能够迅速超出所设定的阈值, 从而检测出执行器故障并使残差误差最小. 最后通过仿真研究验证了所提出的方法能够更快速地检测出故障.

关键词: 非线性网络控制系统; 丢包; 通讯约束; 故障检测滤波器

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Fault-detection for nonlinear time-delays networked control systems with packet dropouts and access constraints

LUO Xiao-yuan¹, YUAN Yuan¹, ZHANG Yu-yan¹, GUAN Xin-ping^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China. Correspondent: LUO Xiao-yuan, E-mail: xylo@ysu.edu.cn)

Abstract: The problem of fault detection for the Lipschitz nonlinear time-delay networked control systems with packet dropouts and access constraints is concerned. By using the linear matrix inequality technique, a fault detection filter is designed. Then, a new threshold calculation method is proposed, so that the residual evaluation function can quickly exceed the designed threshold and the residual error can achieve minimum when actuators fault occur with disturbance. Finally, simulation results show that the proposed method can detect fault faster than some others.

Key words: nonlinear networked time-delay control system; packet dropout; access constraint; fault detection filter

0 引言

网络化控制系统具有可靠性强、造价低、易维护、易扩展等特点, 使其在工业控制等领域得到了广泛的应用. 但是, 网络的引入也产生了时延、丢包等问题, 导致系统性能降低, 甚至不稳定^[1-2]. 此外, 网络规模的不断扩大, 对其安全性和稳定性要求也不断增高, 因此故障检测已成为学者们研究的热点之一. 时延是系统不稳定和性能下降的主要原因, 由于通讯时延是随机和时变的, 使得系统的分析和设计方法变得十分复杂. 文献[3]将系统中的时延转化为模型误差, 并设计了鲁棒故障检测滤波器进行故障检测. 文献[4-5]利用 Markov 模型描述随机时延, 并设计了故障检测滤波器来检测故障. 文献[6]提出了一种生成残

差结构图的方法进行故障检测和分离. 文献[7]采用 Bernoulli 描述丢包过程, 设计了故障检测观测器来检测传感器饱和和故障, 使得所设计的观测器对故障敏感而对扰动不敏感. 文献[8]在满足网络服务质量约束的情况下, 采用 Markov 序列描述丢包过程, 利用 LMI 设计故障检测滤波器来检测故障, 使得系统对扰动满足 H_∞ 性能. 由于节点和带宽的限制, 并不是所有的数据都能顺利到达接收端, 而通讯约束是决定数据是否可以传输到接收端的约束. 在已有的文献中, 大多将通讯约束建立为 Markov 跳变系统, 但对随机切换模型和 Markov 周期切换模型系统进行故障检测时具有一定的困难. 同时, 大部分文献只考虑了时延、丢包和通讯约束中的一种情况, 而实际系统中它

收稿日期: 2013-06-20; 修回日期: 2014-07-14.

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, 从事网络化系统的控制与故障检测等研究; 袁园(1988-), 女, 硕士生, 从事故障检测、鲁棒控制的研究.

们却是同时存在的。

本文考虑具有丢包和通讯约束的非线性时滞网络化控制系统, 针对系统存在故障和外部干扰设计故障检测滤波器, 并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, 使得误差系统均方指数稳定并满足鲁棒性能。所设计的故障检测滤波器对故障敏感, 对外部扰动具有一定的鲁棒性。

1 问题描述

考虑如下离散非线性时滞网络控制系统模型:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + A_d \sum_{d=1}^t \mu_d x(k-d) + Bu(k) + B_h h(k, x(k)) + D_1 d_1(k) + Ef(k); \\ x(k) = \phi(k), k = d; \\ x(k) = 0, k < d. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in R^n$ 为状态向量; $\sum_{d=1}^t x(k-d)$ 为系统内部的分布时延, t 为时延的上界, 即当时延大于 t 时将其状态视为 0; $u(k) \in R^m$ 为控制输入; $d_1(k) \in l_2[0, \infty)$ 为扰动输入; $f(k) \in R^q$ 为故障信号; A, A_d, B, B_h, D_1, E 为具有适当维数的常数矩阵; $\phi(k)$ 为状态初始值; 常数 $\mu_d \geq 0 (d = 1, 2, \dots)$ 满足 $\bar{\mu} = \sum_{d=1}^t \mu_d \leq \sum_{d=1}^t d\mu_d < +\infty$; $h(k, x(k))$ 为已知的非线性函数, 具有如下 Lipschitz 特性:

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

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

其中 $g \in R^+$ 。

假设 1 为简化故障检测滤波器的设计, 假设传感器到控制器和控制器到执行器之间不存在时延。

假设 2 为了避免连续丢包使得控制系统成为开环状态, 假设控制器到执行器之间的连续丢包上界为 M_1, M_1 为采样周期的有限正整数倍。

假设 3 传感器(控制器)的数据由于通讯约束的存在, 没能传到控制器(执行器)的数据按 0 处理。

在不考虑传感器到控制器丢包的情况下, 受带宽限制, 并不是所有传感器输出都能成功到达控制器。假设在 k 时刻, 网络带宽只允许 $w_a (w_a \leq p)$ 个传感器将数据传输到控制器端, 传感器 $i (i \in [1, p])$ 的输出 y_i 经过网络通讯约束到达控制器的信号为 $\bar{y}_i(k) = \lambda_{i,k} y_i(k)$ 。其中: $\lambda_{i,k} = 1$ 表示 k 时刻第 i 个传感器的输出成功到达控制器, $\lambda_{i,k} = 0$ 表示 k 时刻第 i 个传感器的输出没有成功到达控制器。则在 k 时刻控制器接收到的数据为

$$y(k) = M(k)Cx(k) + D_2 d_2(k).$$

其中

$$M(k) = \begin{bmatrix} \lambda_{1,k} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{2,k} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{p,k} \end{bmatrix},$$

$\lambda_{i,k} \in \{0, 1\}, \sum_{i=1}^p \lambda_{i,k} = w_a, y(k) \in R^q$ 为测量输出, $d_2(k) \in l_2[0, \infty)$ 为测量噪声, C 和 D_2 为常数矩阵。

考虑丢包的情况下控制器接收到的信号为

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

其中 $\alpha(k)$ 为传感器到控制器的丢包情况。当 $\alpha(k) = 1$ 时无数据包丢失, 当 $\alpha(k) = 0$ 时数据全部丢失; $\alpha(k)$ 为满足 Bernoulli 0-1 序列分布的随机变量, 即

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

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

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

$\bar{\alpha}$ 是一个已知的标量且 $0 < \bar{\alpha} < 1$ 。

同理, 在不考虑控制器到执行器丢包的情况下, 由于网络带宽的限制, 并不是所有控制器的输出都能成功到达执行器端。假设在 k 时刻网络带宽只允许 $v_a (v_a \leq q)$ 个控制器将数据传输到执行器端, 控制器 $j (j \in [1, q])$ 的数据经过通讯约束后到达系统执行器的信号为 $u_j(k) = \sigma_{j,k} \bar{u}_j(k)$ 。其中: $\sigma_{j,k} = 1$ 表示 k 时刻第 j 个控制器的数据成功到达执行器, $\sigma_{j,k} = 0$ 表示 k 时刻第 j 个控制器的数据没有成功到达执行器。则 k 时刻到达执行器的数据为

$$u(k) = N(k)\hat{u}(k).$$

其中: $\sigma_{j,k} \in \{0, 1\}, \sum_{j=1}^q \sigma_{j,k} = v_a$, 且

$$N(k) = \begin{bmatrix} \sigma_{1,k} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{2,k} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_{q,k} \end{bmatrix}.$$

考虑丢包的情况下执行器接收到的信号为

$$u(k) = \beta(k)N(k)\hat{u}(k). \quad (8)$$

其中: $u(k) \in R^m$ 为被控对象的控制输入, $\beta(k)$ 表示控制器到执行器通道上的随机丢包情况。当 $\beta(k) = 1$ 时无数据包丢失, 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, 即

$$\text{prob}\{\beta(k) = 1\} = E\{\beta(k)\} = \bar{\beta}, \quad (9)$$

$$\text{prob}\{\beta(k) = 0\} = E\{1 - \beta(k)\} = 1 - \bar{\beta}, \quad (10)$$

$$\text{var}\{\beta(k)\} = E\{(\beta(k) - \bar{\beta})^2\} = (1 - \bar{\beta})\bar{\beta}, \quad (11)$$

其中 $\bar{\beta}$ 是一个已知的标量且 $0 \leq \bar{\beta} \leq 1$ 。构建如下一种基于观测器的故障检测滤波器:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = \\ A\hat{x}(k) + A_d \sum_{d=1}^t \mu_d \hat{x}(k-d) + \\ B\bar{u}(k) + B_h h(k, \hat{x}(k)) + L(y(k) - \hat{y}(k)), \\ \bar{u}(k) = \bar{\beta}N(k)\hat{u}(k), \\ \hat{y}(k) = \bar{\alpha}M(k)C\hat{x}(k), \\ \hat{u}(k) = -K\hat{x}(k). \end{cases} \quad (12)$$

分别定义残差、状态估计误差和残差误差为

$$r(k) = V(y(k) - \hat{y}(k)), \quad (13)$$

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

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

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, $\hat{u}(k) \in R^m$ 为没有随机丢包和通讯约束的控制输入, $L \in R^{n \times p}$ 为滤波器增益矩阵, $V \in R^{q \times p}$ 和 $K \in R^{m \times n}$ 分别为残差增益矩阵和控制器增益矩阵.

由以上公式可得到如下闭环网络控制系统:

$$\begin{cases} x(k+1) = \\ (A - \bar{\beta}BN(k)K)x(k) + \bar{D}_1w(k) + \\ A_d \sum_{d=1}^{\infty} \mu_d x(k-d) + B_h h(k, x(k)) + \\ (\beta(k) - \bar{\beta})BN(k)Ke(k) - (\beta(k) - \\ \bar{\beta})BN(k)Kx(k) + \bar{\beta}BN(k)Ke(k), \\ e(k+1) = \\ (A - \bar{\alpha})LCM(k)e(k) + B_h H(k) + \\ A_d \sum_{d=1}^t \mu_d e(k-d) + (\beta(k) - \\ \bar{\beta})BN(k)Kx(k) + (\beta(k) - \bar{\beta})BN(k)Ke(k) - \\ (\alpha(k) - \bar{\alpha})LCM(k)x(k) + \bar{D}_2w(k), \\ \bar{r}(k) = (\alpha(k) - \bar{\alpha})VCM(k)x(k) + \\ \bar{\alpha}VCM(k)e(k) + \bar{D}_3w(k). \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$w(k) = [d_1^T(k) \quad f^T(k) \quad d_2^T(k)]^T, \quad \bar{D}_1 = [D_1 \quad E \quad 0],$$

$$\bar{D}_2 = [D_1 \quad E \quad -LD_2], \quad \bar{D}_3 = [0 \quad -I \quad VD_2],$$

$$H(k) = h(k, x(k)) - h(k, \hat{x}(k)).$$

由上式可得如下增广矩阵:

$$\begin{cases} \eta(k+1) = \\ \bar{A}\eta(k) + \bar{A}_d \sum_{d=1}^t \mu_d \eta(k-d) + \\ (\alpha(k) - \bar{\alpha})\bar{A}_1\eta(k) + (\beta(k) - \bar{\beta})\bar{A}_2\eta(k) + \\ B_h \bar{H}(k) + \bar{D}w(k), \\ \bar{r}(k) = \bar{C}\eta(k) + (\alpha(k) - \bar{\alpha})\bar{C}_1\eta(k) + \bar{D}_3w(k). \end{cases} \quad (17)$$

其中

$$\bar{A}(k) = \begin{bmatrix} A - \bar{\beta}BN(k)K & \bar{\beta}BN(k)K \\ 0 & A - \bar{\alpha}LCM(k) \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_d(k) = \begin{bmatrix} A_d & 0 \\ 0 & A_d \end{bmatrix}, \quad \bar{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -LCM(k) & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_2 = \begin{bmatrix} -BN(k)K & BN(k)K \\ -BN(k)K & BN(k)K \end{bmatrix}, \quad \eta(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix},$$

$$\bar{H}(k) = \begin{bmatrix} h(k, x(k)) \\ H(k) \end{bmatrix}, \quad \bar{D}(k) = \begin{bmatrix} \bar{D}_1 \\ \bar{D}_2 \end{bmatrix},$$

$$\bar{C}(k) = [0 \quad \bar{\alpha}VCM(k)], \quad \bar{C}_1 = [VCM(k) \quad 0].$$

定义 1^[9] 对于网络化系统 (17), 在 $w(k) = 0$ 时存在 $\rho > 0$ 和 $\tau \in (0, 1)$, 使得

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

则称系统均方指数稳定.

本文的目的是在有随机丢包、时延和通讯约束下, 设计如式 (12) 所示的基于观测器的故障检测滤波器, 使得系统满足如下 H_∞ 条件, 且当故障发生时, 利用残差评价函数和阈值的关系快速检测出故障.

1) 在 $w(k) = 0$ 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 $r(k)$ 满足如下 H_∞ 性能指标:

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

2 主要结论

定理 1 给定标量 $\gamma > 0$, 控制器增益 K , 残差权值 V , 如果存在正定对称矩阵 P_1, P_2, Q_1, Q_2 以及给定的控制器增益矩阵 K (K 的给定需满足系统稳定) 和 T 使得式 (19) 成立, 则系统 (17) 是均方指数稳定且满足式 (18) 所示 H_∞ 性能. 此时, 故障检测滤波器参数为 $L = P_2^{-1}T$. 其中: $M' = VCM(k), \Lambda_{11} = \bar{\mu}Q_1 - P_1 - \rho_1^2 M'^T M' + \tau_1 g^2 I, \Lambda_{22} = \bar{\mu}Q_2 - P_2 - \bar{\alpha}^2 M'^T M' + \tau_2 g^2 I$.

证明 选取 Lyapunov 函数为

$$V(k) = \sum_{d=1}^t \mu_d \sum_{l=k-d}^{k-1} x^T(l)Q_1x(l) + x^T(k)P_1x(k) +$$

$$e^T(k)P_2e(k) + \sum_{d=1}^t \mu_d \sum_{l=k-d}^{k-1} e^T(l)Q_2e(l).$$

令式 (7) 中 $E(\alpha(k) - \bar{\alpha}) = \rho_1^2, E(\beta(k) - \bar{\beta}) = \rho_2^2$, 则有

$$E\{V(k+1)\} - E\{V(k)\} + E\{\bar{r}^T(k)\bar{r}(k)\} -$$

$$\gamma^2 E\{w^T(k)w(k)\} =$$

$$\left\{ [A - \bar{\beta}BN(k)K]x(k) + \bar{\beta}BN(k)Ke(k) + \right.$$

$$A_d \sum_{d=1}^t \mu_d x(k-d) + B_h h(k, x(k)) +$$

$$\left. \bar{D}_1w(k) \right\}^T P_1 \left\{ [A - \bar{\beta}BN(k)K]x(k) + \right.$$

$$\begin{aligned} & \bar{\beta}BN(k)Ke(k) + A_d \sum_{d=1}^{\infty} \mu_d x(k-d) + \\ & B_h h(k, x(k)) + \bar{D}_1 w(k) \} + \\ & \left\{ [A - \bar{\alpha}LM(k)C]e(k) + A_d \sum_{d=1}^t \mu_d e(k-d) + \right. \\ & B_h H(k) + \bar{D}_2 w(k) \}^T P_2 \left\{ [A - \bar{\alpha}LM(k)C]e(k) + \right. \\ & A_d \sum_{d=1}^t \mu_d e(k-d) + B_h H(k) + \\ & \bar{D}_2 w(k) \} + \rho_2^2 \{ [-BN(k)K]x(k) + \\ & [BN(k)K]e(k) \}^T P_1 \{ [-BN(k)K]x(k) + \\ & [BN(k)K]e(k) \} + \\ & \bar{\mu}x^T(k)Q_1 x(k) \rho_2^2 \{ [-BN(k)K]x(k) + \\ & [BN(k)K]e(k) \}^T P_2 \{ [-BN(k)K]x(k) + \\ & [BN(k)K]e(k) \} + \\ & \rho_1^2 [-LM(k)Cx(k)]^T P_2 [-LM(k)Cx(k)] - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{d=1}^t \mu_d x^T(k-d)Q_2 x(k-d) + \bar{\mu}e^T(k)Q_1 e(k) - \\ & \sum_{d=1}^t \mu_d e^T(k-d)Q_2 e(k-d) - x^T(k)P_1 x(k) - \\ & e^T(k)P_2 e(k) + \bar{\alpha}^2 [VM(k)Ce(k)]^T [VM(k)Ce(k)] + \\ & \rho_1^2 [VM(k)Cx(k)]^T [VM(k)Cx(k)] - \gamma^2 w^T(k)w(k). \end{aligned}$$

由文献[11]中的引理 2, 得

$$\begin{aligned} & E\{V(k+1)\} - E\{V(k)\} + \\ & E\{\bar{r}^T(k)\bar{r}(k)\} - \gamma^2 E\{w^T(k)w(k)\} \leq \\ & \xi^T(k)\Omega\xi(k). \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \xi(k) = & \left[x^T(k), e^T(k), \sum_{d=1}^t \mu_d x^T(k-d), h^T(k, x(k)), \right. \\ & \left. w^T(k), \sum_{d=1}^{\infty} \mu_d e^T(k-d), H^T(k) \right]^T, \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{cccccccc} A_{11} & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & A_{22} & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -(1/\bar{\mu})Q_1 & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -\tau_1 I & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I & * & * & * \\ 0 & -\bar{\alpha}M' & 0 & 0 & 0 & I - \gamma^2 I & * & * \\ 0 & \bar{\alpha}D_2^T V^T M' & 0 & 0 & 0 & -D_2^T V^T & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_1 A - \bar{\beta}P_1 BN(k)K & \bar{\beta}P_1 BN(k)K & P_1 A_d & P_1 B_h & P_1 D_1 & P_1 E & * & * \\ 0 & P_2 A - \bar{\alpha}TCM(k) & 0 & 0 & P_2 D_1 & P_2 E & * & * \\ -\rho_2 P_1 BN(k)K & \rho_2 P_1 BN(k)K & 0 & 0 & 0 & 0 & * & * \\ -\rho_2 P_2 BN(k)K & \rho_2 P_2 BN(k)K & 0 & 0 & 0 & 0 & * & * \\ -\rho_1 TCM(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & * & * \end{array} \right] \rightarrow \\ & \left[\begin{array}{cccccccc} * & * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * & * \\ D_2^T V^T V D_2 - \gamma^2 I & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & -(1/\bar{\mu})Q_2 & * & * & * & * & * & * \\ \leftarrow 0 & 0 & -\tau_2 I & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -P_1 & * & * & * & * \\ -TD_2 & P_2 A_d & P_2 B_h & 0 & -P_2 & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -P_1 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -P_2 & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -P_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \end{array} \right] < 0. \quad (19) \end{aligned}$$

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} \bar{\mu}Q_1 - P_1 + \rho_1^2 M'^T M' & * & * & * & * & * & * \\ 0 & \bar{\mu}Q_2 - P_2 + \bar{\alpha}^2 M'^T M' & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -(1/\bar{\mu})Q_1 & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & * & * \\ 0 & \bar{\alpha}\bar{D}_3^T M' & 0 & 0 & \bar{D}_3^T \bar{D}_3 - \gamma^2 I & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(1/\bar{\mu})Q_2 & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A - \tilde{H}_1 & \bar{\beta}BNK & A_d & B_h & \bar{D}_1 & 0 & 0 \\ 0 & A - \tilde{H}_2 & 0 & 0 & \bar{D}_2 & A_d & B_h \\ -BNK & BNK & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -BNK & BNK & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -LCM & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$\tilde{H}_1 = \bar{\beta}BN(k)K, \tilde{H}_2 = \bar{\alpha}LCM,$

$\bar{P} = \text{diag}[P_1, P_2, \rho_2^2 P_1, \rho_2^2 P_2, \rho_1^2 P_2, I, I].$

由式(2)和(3)可得到如下不等式:

$h^T(k, x(k))h(k, x(k)) - g^2 x^T(k)x(k) \leq 0, \tag{20}$

$H^T(k)H(k) - g^2 e^T(k)e(k) \leq 0. \tag{21}$

其中

$\tilde{H}_3 = -g^2 I,$

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} \tilde{H}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Omega_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{H}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix}.$$

根据文献[10]中的引理1,在满足式(20)和(21)的约束下,如果存在对称正定矩阵 P_1, P_2, Q_1, Q_2 和实数矩阵 L , 以及非负实数 $\tau_1 \geq 0, \tau_2 \geq 0$, 使得

$\Omega' = \Omega - \tau_1 \Omega_1 - \tau_2 \Omega_2 < 0 \tag{22}$

成立, 则 $\xi^T(k)\Omega\xi(k) < 0$, 即

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

从0到 ∞ 累加后, 即可得到

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

由文献[9]可知,系统是均方指数稳定并满足指定的 H_∞ 性能指标.

由式(22)得

$\Omega' = \Omega + \text{diag}\{\tau_1 g^2 I, \tau_2 g^2 I, 0, -\tau_1 I, 0, 0, -\tau_2 I, 0, 0, 0, 0, 0, 0\} < 0. \tag{23}$

而不等式(23)同时存在 $P_1, P_1^{-1}, P_2, P_2^{-1}$, 故式(23)不是线性矩阵不等式. 定义

$\Gamma = \text{diag}\{I, I, I, I, I, I, P_1, P_2, \rho_2 P_1, \rho_2 P_2, \rho_1 P_2, 0, 0\},$

对不等式(23)分别左乘 Γ^T 、右乘 Γ , 并令 $P_2 L = T$ 即可得到线性矩阵不等式(19).

当 $w(k) = 0$ 时, 由 Schur 补定理可得

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

从而可知系统均方指数稳定. □

利用 Matlab 工具箱使下式最小:

$\min_{\text{s.t. } P_1, P_2, Q_1, Q_2, \tau_1, \tau_2, L} g = \gamma^2, \tag{24}$

可进一步优化滤波器的设计.

3 故障检测

文献[12]和文献[13]选取的评价函数和阈值为

$$\begin{cases} J(r, k) = \left\{ \sum_{k=k_0}^{k_0+L_0} r^T(k)r(k) \right\}^{1/2}, \\ J_{th} = \sup_{w(k) \in l^2, f(k)=0} E \left\{ \sum_{k=k_0}^{k_0+L_0} r^T(k)r(k) \right\}^{1/2}. \end{cases} \tag{25}$$

其阈值的选取方法为选取采样时间段内残差评价函数的最大值, 这样做不能在故障发生时及时检测出故障, 增大了故障检测的保守性. 文献[14]选取残差评价函数和阈值计算方法为

$$\begin{cases} J(r, k) = \left\{ \sum_{k=k_0}^{k_0+L_{th}} r^T(k)r(k) \right\}^{1/2}, \\ J_{th} = \sup_{w(k)=0, B_f=0} E\{J(r, k)\} + \eta \sup_{w(k)=0, B_f=0} D\{J(r, k)\}. \end{cases} \tag{26}$$

其中: η 为减小误报率的正数; k_0 为仿真的初始时刻; L_{th} 为仿真的时间宽度; $E\{J(r, k)\}$ 和 $D\{J(r, k)\}$ 为残差信号的评估函数的期望和方差, 其表达式分别为

$E\{J(r, k)\} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N J_i(r, k),$

$$D(J(r, k)) = \sqrt{\sum_{i=1}^{\bar{N}} \{J_i(r, k) - E(J(r, k))\}^2},$$

这里 \bar{N} 为总的实验次数.

通过大量的实验计算出每时刻残差评价函数的均值和方差, 进而计算阈值, 这样便使每个时刻的阈值随残差评价函数实时变化, 缩短了故障检测的时间. 但是, 在计算阈值时将扰动按 0 处理, 这不符合实际情况. 为了合理计算阈值, 本文参考文献 [14] 并考虑到系统中的扰动, 选择残差评价函数 $J(k)$ 和阈值 J_{th} 分别如下:

$$\begin{cases} J(r, k) = \left\{ \sum_{k=k_0}^{k_0+L_{th}} r^T(k)r(k) \right\}^{1/2}, \\ J_{th} = \sup_{w(k) \in l^2, B_f=0} E(J(r, k)) + \eta \sup_{w(k) \in l^2, B_f=0} D(J(r, k)). \end{cases} \quad (27)$$

其中各式意义同文献 [14].

下面证明本文阈值计算方法比以往文献阈值计算方法能更快速地检测出故障.

假设任意 k 时刻发生故障, 使用文献 [12] 和文献 [13] 的阈值计算方法, 则每时刻的阈值为 $r_{\max}(k)$, 而使用本文阈值计算方法, 每时刻的阈值为

$$\begin{aligned} J_{th} &= \sup_{w(k) \in l^2, B_f=0} E(J(r, k)) + \eta \sup_{w(k) \in l^2, B_f=0} D(J(r, k)) = \\ &= \frac{1}{\bar{N}} \sum_{i=1}^{\bar{N}} J_i(r, k) + \sqrt{\sum_{i=1}^{\bar{N}} \{J_i(r, k) - E(J(r, k))\}^2} = \\ &= \frac{1}{\bar{N}} r_0(k) + \frac{1}{\bar{N}} w(k) + D(r_0(k)) + D(w(k)) \leq \\ &= r_{0 \max}(k) + w_{\max}(k) = r_{\max}(k). \end{aligned}$$

其中: r_0 为没有扰动的残差, $r(k) = r_0(k) + w(k)$. 由此可见, 使用本文阈值计算方法能较以往文献更快速地检测出故障.

通过下面的逻辑关系便能检测出系统是否发生故障:

$$\begin{cases} J(k) \leq J_{th} \Rightarrow \text{无故障}, \\ J(k) > J_{th} \Rightarrow \text{发生故障} \Rightarrow \text{报警}. \end{cases} \quad (28)$$

4 仿真实验

考虑非线性网络化系统 (1), 给定离散系统的数据如下:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0.51 & -0.69 & -0.21 \\ 0.08 & 0 & -0.13 \\ 0 & -0.16 & 0 \end{bmatrix}, A_d = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.1 & 0.15 \\ 0.13 & 0.22 & 0.41 \\ 0.19 & 0.3 & 0.17 \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 0.15 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}, B_h = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & -0.15 \\ 0.32 & 0.5 & 0.2 \\ 0.3 & 0.5 & 0.25 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0.12 \\ 0.21 \\ 0.13 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 0.02 \\ -0.05 \\ 0.03 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0.12 \\ -0.21 \\ 0.13 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.8 & 0.3 \\ 0.12 & 0.3 & -0.24 \\ 0.13 & 0.2 & -0.32 \end{bmatrix}, u_d = \frac{1}{36},$$

$$q = p = 3, w_a = v_a = 1, \bar{\alpha} = 0.95, \bar{\beta} = 0.92,$$

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

假设系统的初始状态为 $x(0) = \phi(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$, 采样周期为 $T_0 = 1$ s, 给定控制器增益和残差权值分别为

$$K = \begin{bmatrix} 0.55 & -0.53 & 0.56 \\ 0.32 & 0.15 & 0.6 \\ -0.2 & -0.13 & 0.34 \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

故障输入和外部扰动为

$$\begin{aligned} f(k) &= \begin{cases} 3 \sin k, & k = 25, 26, \dots, 45; \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \\ d_1(k) &= \begin{cases} 19 \exp(-0.01)n(k), & k = 0, 1, \dots, 100; \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \end{aligned}$$

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 $d_2(k)$ 是能量为 0.0005 的白噪声信号.

假设在任意时刻传感器 1 ~ 传感器 3 和执行器 1 ~ 执行器 3 是随机传输数据的, 则在每个时刻 M 、 N 、 L 共有 9 种选择方式, 即有 9 个不同的 L 值. 每一时刻随机选择 M 、 N 和对应的 L , 闭环系统的状态 $x(k)$ 和状态估计误差 $e(k)$ 如图 1 和图 2 所示. 由图 1 和图 2 可以看出, 在 $25T_0 \sim 45T_0$ 状态波动很大, 滤波器能有效滤波.

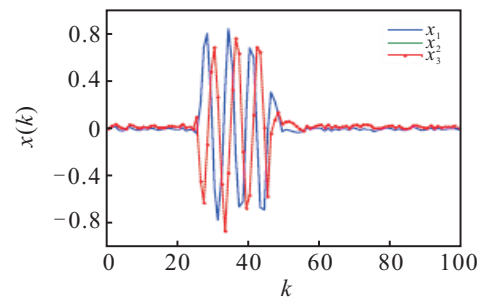


图 1 闭环系统的状态

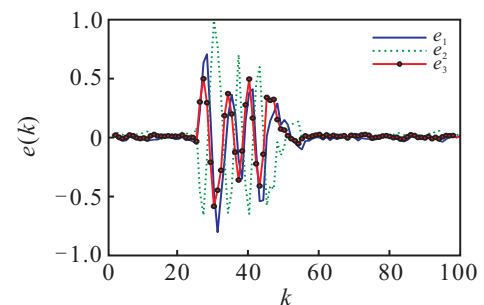


图 2 状态估计误差

有故障和无故障时的残差如图3所示. 由图3可以看出, 故障发生时, 残差信号 $r(k)$ 有明显的变化.

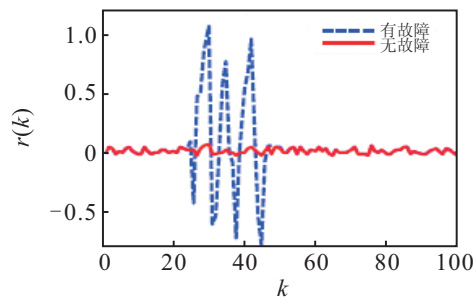


图3 残差信号

本文使用50次仿真求得的残差评价函数和阈值如图4所示. 由图4可看出, 故障发生时评价函数和阈值均有明显变化, 使用本文方法, 在故障发生1s ($J(r, 26) = 0.814 > 0.4926$) 后即可检测出故障, 而使用文献[12-13]的方法, 则在4s ($J(r, 29) = 2.392 > 2.017$) 后才检测出故障. 由此可见, 本方法比以往文献方法能更快地检测到故障.

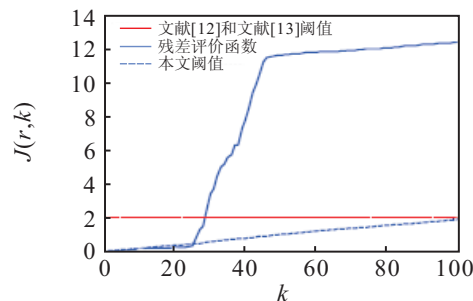


图4 $J(r, k)$ 变化规律

5 结 论

本文研究了具有时延、丢包、通讯约束的Lipchitz非线性网络化控制系统的故障检测问题. 使用LMI证明滤波器存在的条件并求解滤波器, 通过大量实验求均值建立了新的阈值求解方法, 使得系统均方指数稳定, 能够达到鲁棒 H_∞ 干扰抑制水平. 最后通过仿真实验验证了所提出方法的有效性和优越性.

参考文献(References)

[1] Rasool F, Huang D, Nguang S K. Robust H_∞ output feedback control of discrete-time networked systems with limited information[J]. Systems & Control Letters, 2011, 60(10): 845-853.
 [2] 黄鹤, 韩笑冬, 谢德晓, 等. 具有数据包丢失的网络控制系统主动容错控制[J]. 控制与决策, 2009, 24(8): 1126-1131.
 (Huang H, Han X D, Xie D X, et al. Active fault-tolerant control for networked control systems with packet dropout[J]. Control and Decision, 2009, 24(8): 1126-1131.)

[3] Qiang W Y, Hao Y, Steven D X. Fault detection of networked control systems based on optimal robust fault detection filter[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(12): 1534-1539.
 [4] He X, Wang Z D, Zhou D H. Robust fault detection for networked systems with communication delay and data missing[J]. Automatica, 2009, 45(11): 2634-2639.
 [5] Yin Y Y. Gain-scheduled robust fault detection on time-delay stochastic nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronic, 2011, 58(10): 4906-4916.
 [6] Meskin N, Khorasani K. Fault detection and isolation of distributed time-delay systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2009, 54(11): 2680-2685.
 [7] Zhe S, Peng S, Hong Y G. Fault detection of networked control systems with packet dropout subject to sensor saturation[C]. Chinese Control and Decision Conf. Mianyang, 2011: 2954-2959.
 [8] Peng C, Yue D, Tian E G, et al. Observer-based fault detection for networked control systems with networked quality of service[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(6): 1653-1661.
 [9] 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 with missing measurements[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(3): 291-295.)
 [10] Guo L J, Qi Y J, Guo L J. Observer-based H_∞ control for networked nonlinear systems with random packet losses[J]. ISA Trans, 2010, 49(1): 39-46.
 [11] Rong L Y, Dong W Z, Ling L J, et al. Synchronization and state estimation for discrete-time complex networks with distribute delays[J]. Automatica, 2008, 38(5): 1314-1325.
 [12] Gang Z X, Jian L, Dan Y. Fault detection and isolation for switched linear systems: A switched Lyapunov function approach[C]. The 10th World Congress on Intelligent Control and Automation. Beijing, 2012: 1812-1817.
 [13] Yong Z, Xing L Z, Jiang F H, et al. H_∞ fault detection for nonlinear networked systems with multiple channels data transmission pattern[J]. Information Sciences, 2013, 221(1): 534-543.
 [14] Qiang W Y, Hao Y, Steven D. Fault detection of networked control systems subject to access constraints and random packet dropout[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(9): 1230-1234.