文章编号:1671-4598(2015)05-1499-04 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2015.05.018 中图分类号:TP273 文献标识码:A

存在通讯限制的网络控制系统鲁棒故障检测

丰敏佳，王玉龙
(江苏科技大学 电子信息学院，江苏 镇江 212003)

摘要： 对一类具有随机丢包和通讯限制的网络控制系统的鲁棒故障检测问题进行研究；考虑控制器到执行器间存在通讯限制以及传感器到控制器间存在数据丢包，并将丢包用 Bernoulli 随机二进制分布进行描述；在此基础上建立带有故障的离散时间模型，基于所建立的模型设计故障检测滤波器，使得残差系统随机稳定，同时滤波误差系统的 H_∞ 范数满足给定的衰减水平；所设计的故障检测滤波器不但保证了残差系统对故障的灵敏，同时对系统的外部扰动输入具有鲁棒性；数值算例验证了文章所提方法是可行的。

关键词： 网络控制系统；故障检测；丢包；通讯限制

Robust Fault Detection of Networked Control Systems with Communication Constraints

Feng Minjia, Wang Yulong
(School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: This paper is concerned with fault detection filter design for networked control systems (NCSs) under consideration of random packet dropout and communication constraints. By considering communication constraints exist in the channel from controllers to actuators and random packet dropout, which is modeled as Bernoulli distribution, exists in the channel from sensors to controllers, new model for discrete-time NCSs with faults is established. Based on the established model, fault detection filter design criteria are proposed to stochastically stabilize the residual systems and preserve the H_∞ norm bound to be within a guaranteed performance. The designed fault detection filters can ensure the sensitivity of the residual signal with respect to faults, and robustness of the considered systems with respect to disturbance. A numerical example is given to illustrate the effectiveness of the obtained results.

Keywords: networked control systems; fault detection; packet dropout; communication constraints

0 引言

网络控制系统（NCSs）是传感器、控制器和执行器及其他部件通过网络连接构成的控制系统[1-2]。对于 NCSs，故障时有发生，也是不可完全避免的。然而，故障的出现会降低系统的性能甚至使得系统不稳定，及时准确地检测出故障对于提高系统的安全性和稳定性是至关重要的。近年来，NCSs 的故障检测受到越来越多的关注[3-5]。

在许多实际情况下，网络的引入必然会使得数据传输过程中出现丢包，这会使基于传统方法设计的故障检测滤波器的性能下降，甚至失效。目前针对数据丢包的故障检测问题已经受到学者们的重视，文［6］将丢包建立为 Markov 模型，设计观测器检测故障；文［7］采用 Bernoulli 随机二进制分布描述丢包过程并设计滤波器检测故障。在现有的许多网络控制系统中，由于通信带宽的限制，只有部分的分布式执行器和传感器可以获得通讯权限[8-9]。在现有文献中大多采用了基于观测器的方法来产生残差，不同于基于观测器的方法，本文采用了全阶故障检测滤波器作为残差产生器来检测故障的发生。

本文研究具有随机数据丢包和通讯限制的网络控制系统故障检测问题。用 Bernoulli 随机二进制切换序列描述传感器到控制器的数据丢包，并考虑控制器到执行器的通讯限制，利用线性矩阵不等式设计故障检测滤波器，通过残差评价函数和阈值的比较来检测系统故障。

1 问题描述

考虑如下的离散时间被控对象：

$$\begin{cases} x(k+1)=\boldsymbol{A}x(k)+\boldsymbol{B}u_p(k)+\boldsymbol{E}_1 d(k)+\boldsymbol{E}_2 f(k) \\ y_p(k)=\boldsymbol{C}x(k) \end{cases} \tag{1}$$

其中：$x(k)\in\mathbf{R}^n$，$u_p(k)\in\mathbf{R}^r$，$y_p(k)\in\mathbf{R}^m$ 分别为系统的状态、控制输入和量测输出，$d(k)\in\mathbf{R}^p$ 为系统的扰动且 $d(k)\in L_2[0,\infty)$，$f(k)\in\mathbf{R}^s$ 为系统故障，$\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B}$，$\boldsymbol{C}$，$\boldsymbol{E}_1$，$\boldsymbol{E}_2$ 为已知合适维数实矩阵。

对系统建模做如下说明：

1）考虑到本文主要研究的是丢包和通讯限制的故障检测问题，为简化残差系统的模型，忽略传感器到控制器和控制器到执行器的时延，但本文提出的方法适用于带时延的系统。

2）同时考虑传感器到控制器和控制器到执行器这两段网络的丢包现象，以及传感器到控制器的通讯限制，残差产生系

收稿日期:2014-10-15； 修回日期:2015-03-19。
基金项目:国家自然科学基金(61374063,61403170)；江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2013066-01)；江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助计划；江苏省“333 工程”中青年科学技术带头人资助计划；江苏省高校优秀中青年教师境外研修计划；江苏科技大学研究生科技创新计划项目(YCX13S-14)。
作者简介:丰敏佳(1989-),男,江苏苏州人,硕士研究生,主要从事网络控制系统的故障检测方向的研究。
王玉龙(1977-),男,山东临沂人,博士后,副教授,主要从事网络控制系统、故障检测、船舶控制等方向的研究。

统的模型会变得相当复杂。因此，本文将考虑传感器到控制器间的数据丢包，以及控制器到执行器的通讯限制。对于同时考虑传感器到控制器和控制器到执行器这两段网络间的时延、丢包、通讯限制的网络控制系统故障检测问题，将会在以后的工作中进行深入研究。

针对上面假定的网络控制系统，构造如下形式的全阶故障检测滤波器：

$$\begin{cases}\hat{x}(k+1)=\hat{A}\hat{x}(k)+\hat{B}\hat{y}(k)\\ r(k)=\hat{C}\hat{x}(k)\end{cases}\tag{2}$$

其中：$\hat{x}(k)\in\mathbf{R}^{n}$，$r(k)\in\mathbf{R}^{s}$ 为残差信号；$\hat{y}(k)$ 为由网络传输到故障检测滤波器的系统输出信息。

当传感器到控制器间存在随机丢包时，在 k 时刻 $\hat{y}(k)=\alpha_k y_p(k)$，其中 $\alpha_k\in\{0,1\}$ 且满足

$$\begin{cases}\mathrm{Prob}\{\alpha_k=1\}=E\{\alpha_k\}=\alpha,\\ \mathrm{Prob}\{\alpha_k=0\}=1-E\{\alpha_k\}=1-\alpha,\\ D\{\alpha_k\}=E(\{\alpha_k-\alpha)^2\}=\alpha(1-\alpha)=\kappa.\end{cases}\tag{3}$$

α_k="1"表示 k 时刻 $y_p(k)$ 成功传输到故障检测滤波器，α_k="0"表示 k 时刻数据丢包。

当控制器到执行器间存在通讯限制时，假设共享的通信介质能同时提供 M_θ（$1\leqslant M_\theta\leqslant r$）个控制器到执行器通信信道。在任意时刻，$u(t)$ 中只有 M_θ 个控制量能够通过通信信道进行传输，其余没有获得通讯权限的分量就被丢弃。定义二值变量 θ_i（$i=1,2,\cdots,r$）为 $u(t)$ 中第 i 个元素的介质访问状态，即 $\theta_i\in\{0,1\}$，其中"1"表示成功传输，"0"表示未能传输。当 $\theta_i=0$ 时，执行器将忽略 $u(t)$ 中的第 i 个元素，并用"0"代替第 i 个元素的值。此时

$u_p(t)=M_\theta u(t)$，$M_\theta=diag(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_m)$，$\theta_j=0$ 或者 $\theta_j=1$（$j=1,2,\cdot\cdot\cdot,m$）。

定义：

$\boldsymbol{e}(k)=r(k)-f(k)$，$\xi(k)=\begin{bmatrix}x^T(k) & \hat{x}^T(k)\end{bmatrix}^T$，

$\boldsymbol{\omega}(k)=\begin{bmatrix}u_c^T(k) & d^T(k) & f^T(k)\end{bmatrix}^T$

得增广系统：

$$\begin{cases}\xi(k+1)=(\bar{\boldsymbol{A}}+(\alpha_k-\alpha)\bar{\boldsymbol{A}})\xi(k)+\tilde{\boldsymbol{B}}\omega(k)\\ \boldsymbol{e}(k)=\tilde{\boldsymbol{C}}\xi(k)+\tilde{\boldsymbol{D}}\omega(k)\end{cases}\tag{4}$$

其中：

$$\bar{\boldsymbol{A}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A} & 0\\ \alpha\hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{C} & \hat{\boldsymbol{A}}\end{bmatrix},\bar{\boldsymbol{A}}=\begin{bmatrix}0 & 0\\ \hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{C} & 0\end{bmatrix},$$

$$\tilde{\boldsymbol{B}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}\boldsymbol{M}_k & \boldsymbol{E}_1 & \boldsymbol{E}_2\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix},$$

$$\tilde{\boldsymbol{C}}=\begin{bmatrix}0 & \hat{\boldsymbol{C}}\end{bmatrix},\tilde{\boldsymbol{D}}=\begin{bmatrix}0 & 0 & -\boldsymbol{I}\end{bmatrix}.$$

本文所要解决的鲁棒故障检测滤波器设计问题可转化为如下问题：在零初始条件下，设计形如式（2）的滤波器，给出残差评价函数和阈值，使增广系统（4）是随机稳定的，并且满足下面的 H_∞ 性能指标：

$$\|e(k)_2\|<\gamma\|\omega(k)_2\|\tag{5}$$

其中：

$$\|e(k)_2\|=\Big(\sum_{k=0}^{\infty}e^T(k)e(k)\Big)^{\frac{1}{2}},$$

$$\|\omega(k)_2=\Big(\sum_{k=0}^{\infty}\omega^T(k)\omega(k)\Big)^{\frac{1}{2}}.$$

基于所设计的残差产生系统，定义如下的残差评价函数：

$$J(r)=\|r\|_T=\frac{1}{T}\sqrt{\sum_{k=t_1}^{t_2}r^T(k)r(k)},T=t_2-t_1+1\tag{6}$$

选择如下的阈值函数[11]

$$J_{th}=\sup_{\omega(k)\in L_2,f(k)=0}\|r_T\|$$

故障检测逻辑：

$J(r)>J_{th}\rightarrow$有故障，

$J(r)\leqslant J_{th}\rightarrow$无故障。

2 主要内容

本节主要对设计的故障检测滤波器进行分析，基于线性矩阵不等式方法给出故障检测滤波器存在的条件，并进行求解。首先给出如下定义。

定义 1[9]：对于离散时间随机系统，$x(k+1)=g(x(k),u(k))$，$x(k)$，$u(k)$ 分别表示其状态和输入。当 $u(k)=0$ 时，对任意初始状态 $x(0)$，如果存在不依赖于 $x(0)$ 的 $W>0$，使得如下的不等式成立，则系统是随机稳定的。

$$E\Big\{\sum_{k=0}^{\infty}|x(k)|^2\mid x(0)\Big\}<x^T(0)Wx(0)\tag{7}$$

引理 1：考虑被控对象（1），假定故障检测滤波器参数 $\hat{A},\hat{B},\hat{C}$ 给定，对于给定的常数 $\gamma>0$，如果存在矩阵 $\boldsymbol{P}>0$ 使得矩阵不等式（8）成立，则增广系统（4）随机稳定并且在零初始条件下具有性能指标（5）。

$$\Pi=\Pi_1+\Pi_2^TP\Pi_2+\kappa\Pi_3^TP\Pi_3+\Pi_4^T\Pi_4<0\tag{8}$$

其中：

$$\kappa=(1-\alpha)\alpha,\Pi_1=diag\{-P,-\gamma^2I\},$$

$$\Pi_2=[\bar{A}\quad\tilde{B}],\Pi_3=[\bar{A}\quad 0],\Pi_4=[\tilde{C}\quad\tilde{D}].$$

证明：假定存在矩阵 $\boldsymbol{P}>0$ 满足（8），我们首先证明增广系统（4）是随机稳定的。在条件（8）下可知

$$\Pi_1+\Pi_2^TP\Pi_2+\kappa\Pi_3^TP\Pi_3<0$$

其分块矩阵（1，1）满足

$$\Phi=\bar{A}^TP\bar{A}+\kappa\bar{A}^TP\bar{A}-P<0\tag{9}$$

选择如下 Lyapunov 函数

$$V(k)=E\{\xi^T(k)P\xi(k)\}$$

首先，在 $\omega(k)=0$ 的情况下，定义

$$\Delta V(k)=E\{\xi^T(k+1)P\xi(k+1)\mid\xi(k)\}-E\{\xi^T(k)P\xi(k)\}=$$
$$(\xi^T(k)(\bar{A}+(\alpha_k-\alpha)\bar{A})^T)P((\bar{A}+(\alpha_k-\alpha)\bar{A})\xi(k))-$$
$$\xi^T(k)P\xi(k)=\xi^T(k)\bar{A}^TP\bar{A}\xi(k)+\kappa\xi^T(k)\bar{A}^TP\bar{A}\xi(k)-$$
$$\xi^T(k)P\xi(k)=\xi^T(k)\Phi\xi(k)$$

其中：Φ 如上式(9)所定义。因此，在 $\Phi<0$ 时 $\Delta V(k)\leqslant-\lambda_{\min}(-\Phi)\xi^T(k)\xi(k)$，

$$E\{\xi^T(k+1)P\xi(k+1)\}-E\{\xi^T(k)P\xi(k)\}\leqslant$$
$$-\lambda_{\min}(-\Phi)E\{\xi^T(k)\xi(k)\}$$

对任意 $T\geqslant 1$，对上式中 k 从 0 到 T 进行相加，得

$$E\{\xi^T(T)P\xi(T)\}-E\{\xi^T(0)P\xi(0)\}\leqslant$$

$$-\lambda_{\min}(-\Phi)E\left\{\sum_{k=0}^{T}\xi^T(k)\xi(k)\right\}$$

即

$$E\left\{\sum_{k=0}^{T}\xi^T(k)\xi(k)\right\}\leqslant\frac{1}{\lambda_{\min}(-\Phi)}E\{\xi^T(0)P\xi(0)\}=\xi^T(0)W\xi(0)$$

其中：$W=\left(\frac{1}{\lambda_{\min}(-\Phi)}\right)P$，根据定义 1 可知，增广系统（4）是随机稳定的。

下面证明增广系统（4）在零初始条件下满足性能指标（5）。

定义：

$$J=E\{\xi^T(k+1)P\xi(k+1)\mid\xi(k)\}-E\{\xi^T(k)P\xi(k)\}+e^T(k)e(k)-\gamma^2\omega^T(k)\omega(k)$$

对于增广系统（4）有

$$\begin{aligned}J=&E\{[(\bar{A}\xi(k)+\tilde{B}\omega(k))+(\alpha_k-\alpha)\bar{A}\xi(k)]^T\times\\&P[(\bar{A}\xi(k)+\tilde{B}\omega(k))+(\alpha_k-\alpha)\bar{A}\xi(k)]\mid\xi(k)\}+\\&e^T(k)e(k)-E\{\xi^T(k)P\xi(k)\}-\gamma^2\omega^T(k)\omega(k)=\\&(\bar{A}\xi(k)+\tilde{B}\omega(k))^TP(\bar{A}\xi(k)+\tilde{B}\omega(k))+\\&\kappa(\bar{A}\xi(k))^TP(\bar{A}\xi(k))+(\tilde{C}\xi(k)+\tilde{D}\omega(k))^T\times\\&(\tilde{C}\xi(k)+\tilde{D}\omega(k))-\xi^T(k)P\xi(k)-\gamma^2\omega^T(k)\omega(k)=\\&\zeta^T(k)\Pi\zeta(k)\end{aligned}$$

其中：$\zeta(k)=[\xi^T(k)\quad\omega^T(k)\quad]^T$，$\Pi$ 如式（8）中所示，由式（8）可知 J<0，即

$$E\{\xi^T(k+1)P\xi(k+1)\}-E\{\xi^T(k)P\xi(k)\}+e^T(k)e(k)-\gamma^2\omega^T(k)\omega(k)<0\tag{10}$$

对上式中 k 从 0 到∞进行相加，得

$$E\{\xi^T(\infty)P\xi(\infty)\}-E\{\xi^T(0)P\xi(0)\}+\sum_{k=0}^{\infty}e^T(k)e(k)-\gamma^2\sum_{k=0}^{\infty}\omega^T(k)\omega(k)<0$$

考虑到零初始条件和 $\boldsymbol{P}>0$，$E\{\xi^T(0)P\xi(0)\}=0$ 和 $E\{\xi^T(\infty)P\xi(\infty)\}\geqslant0$，得：

$$\sum_{k=0}^{\infty}e^T(k)e(k)-\gamma^2\sum_{k=0}^{\infty}\omega^T(k)\omega(k)\leqslant0$$

即得到式（5），引理得证。

下面我们将基于引理 1 的结果给出故障检测滤波器存在的充分条件。根据 schur 补性质，式（8）中 Π 可以等价地描述为：

$$\begin{bmatrix}-I&0&0&\tilde{C}&\tilde{D}\\0&-P&0&\sqrt{\kappa}P\bar{A}&0\\0&0&-P&P\bar{A}&P\tilde{B}\\\tilde{C}^T&\sqrt{\kappa}\bar{A}^TP&\bar{A}^TP&-P&0\\\tilde{D}^T&0&\tilde{B}^TP&0&-\gamma^2I\end{bmatrix}<0\tag{11}$$

定理 1 对于给定的常数 γ>0，如果存在对称正定矩阵 $\boldsymbol{R}\in\mathbf{R}^{n\times n}$，$\boldsymbol{X}\in\mathbf{R}^{n\times n}$，矩阵 $\boldsymbol{M}\in\mathbf{R}^{n\times n}$，$\boldsymbol{N}\in\mathbf{R}^{n\times r}$，

$T\in\mathbf{R}^{n\times n}$ 满足线性矩阵不等式（12）和（13），则在零初始条件下和对于任意非零的 ω（k）∈L_2［0，∞），增广系统（4）是随机稳定的且满足性能指标（5）。

$$\begin{bmatrix}-I&0&0&0&0&T&0&0&0&-I\\&-R&-R&0&0&0&0&0&0&0\\&&-X&0&0&\sqrt{\kappa}NC&\sqrt{\kappa}NC&0&0&0\\&&&-R&-R&RA&RA&RBM_k&RE_1&RE_2\\&&&&-X&XA+\alpha NC+M&XA+\alpha NC&XBM_k&XE_1&XE_2\\&&&&&-R&-R&0&0&0\\&&&&&&-X&0&0&0\\&&&&&&&-\gamma^2I&0&0\\&&&&&&&&-\gamma^2I&0\\&&&&&&&&&-\gamma^2I\end{bmatrix}<0\tag{12}$$

$$R-X<0\tag{13}$$

此时所设计的全阶故障检测滤波器参数矩阵可以构造如下

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{A}}&=(\boldsymbol{R}-\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{M}\\\hat{\boldsymbol{B}}&=(\boldsymbol{R}-\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{N}\\\hat{\boldsymbol{C}}&=\boldsymbol{T}\end{aligned}\tag{14}$$

证明 将 $\boldsymbol{P}$ 做分解[12]，并定义 $\boldsymbol{P}$ 的逆为 $\boldsymbol{S}$，即

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}P_{11}&P_{12}\\P_{12}^T&P_{22}\end{bmatrix};\ \boldsymbol{S}=\boldsymbol{P}^{-1}=\begin{bmatrix}S_{11}&S_{12}\\S_{12}^T&S_{22}\end{bmatrix}$$

式中 $\boldsymbol{P}_{11}\in\mathbf{R}^{n\times n}$，$\boldsymbol{P}_{22}\in\mathbf{R}^{n\times n}$，$\boldsymbol{S}_{11}\in\mathbf{R}^{n\times n}$，$\boldsymbol{S}_{22}\in\mathbf{R}^{n\times n}$ 为正定对称矩阵，定义可逆矩阵

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{11}&\boldsymbol{I}\\\boldsymbol{S}_{12}^T&0\end{bmatrix},\ \eta=diag(I,J,J,J,I)$$

对式（11）分别左乘矩阵 $\boldsymbol{\eta}^T$ 和右乘矩阵 $\boldsymbol{\eta}$，然后对所得的不等式分别左乘、右乘矩阵 $\boldsymbol{\zeta}=diag(\boldsymbol{I},\boldsymbol{S}_{11}^{-1},\boldsymbol{I},\boldsymbol{S}_{11}^{-1},\boldsymbol{I},\boldsymbol{S}_{11}^{-1},\boldsymbol{I},\boldsymbol{I},\boldsymbol{I},\boldsymbol{I})$，并定义变量

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{R}=\boldsymbol{S}_{11}^{-1},\boldsymbol{N}=\boldsymbol{P}_{12}\hat{\boldsymbol{B}},\boldsymbol{X}=\boldsymbol{P}_{11},\\&\boldsymbol{M}=\boldsymbol{P}_{12}\hat{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{S}_{12}^T\boldsymbol{S}_{11}^{-1},\boldsymbol{T}=\hat{\boldsymbol{C}}\boldsymbol{S}_{12}^T\boldsymbol{S}_{11}^{-1}.\end{aligned}\tag{15}$$

经整理即可得式（12）。另外由式（15）可推出故障检测滤波器的参数矩阵为

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{A}}&=\boldsymbol{P}_{12}^{-1}\boldsymbol{M}\boldsymbol{S}_{11}\boldsymbol{S}_{12}^{-T}\\\hat{\boldsymbol{B}}&=\boldsymbol{P}_{12}^{-1}\boldsymbol{N}\\\hat{\boldsymbol{C}}&=\boldsymbol{T}\boldsymbol{S}_{11}\boldsymbol{S}_{12}^{-T}\end{aligned}\tag{16}$$

由于式（12）并未包含构造滤波器参数矩阵所需的矩阵 $\boldsymbol{P}_{12}$，$\boldsymbol{S}_{12}$ 由此利用滤波器（2）的传递函数

$$\boldsymbol{T}_{ry}(z)=\hat{\boldsymbol{C}}(z\boldsymbol{I}-\hat{\boldsymbol{A}})^{-1}\hat{\boldsymbol{B}}$$

将式（16）带入，可推导得

$$\begin{aligned}\boldsymbol{T}_{ry}(z)&=\boldsymbol{T}(z(\boldsymbol{S}_{11}^{-1}-\boldsymbol{P}_{11})-\boldsymbol{M})^{-1}\boldsymbol{N}=\\&\boldsymbol{T}(z\boldsymbol{I}-(\boldsymbol{R}-\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{M})^{-1}(\boldsymbol{R}-\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{N}\end{aligned}$$

从而得到滤波器参数矩阵的一个构造式如式（14）所示。另外，由 $\boldsymbol{P}$ 为对称正定矩阵可知

$$\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{11}&\boldsymbol{I}\\\boldsymbol{I}&\boldsymbol{P}_{11}\end{bmatrix}>0$$

由 schur 补和式（15）可得式（13），即定理 1。

3 仿真分析

本节将通过仿真例子来说明所提出方法的有效性。考虑离散系统（1），其参数矩阵为：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0.3 & -0.5\\0 & -0.2\end{bmatrix},\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}0.5 & 0\\0.2 & -0.2\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}0.2\\0.1\end{bmatrix},\boldsymbol{E}_1=\begin{bmatrix}0.4\\0.2\end{bmatrix},\boldsymbol{E}_2=\begin{bmatrix}1\\0.5\end{bmatrix}.$$

考虑丢包概率 $\alpha=0.8$ 在控制器到执行器间，控制信号将基于周期通讯序列[10]交替地输入到执行器。即 $M_{2k}=\begin{bmatrix}1 & 0\\0 & 0\end{bmatrix},M_{2k+1}=\begin{bmatrix}0 & 0\\0 & 1\end{bmatrix}$，采用本文提出的方法设计鲁棒故障检测滤波器，得到的滤波器参数矩阵如下

$$\hat{\boldsymbol{A}}_{2k}=\begin{bmatrix}-2.9084 & 5.8107\\-1.4864 & 2.9701\end{bmatrix},\hat{\boldsymbol{B}}_{2k}=\begin{bmatrix}0.5451\\-0.3544\end{bmatrix},$$

$$\hat{C}_{2k}=\begin{bmatrix}0.0010 & -0.0019\end{bmatrix}$$

$$\hat{\boldsymbol{A}}_{2k+1}=\begin{bmatrix}-2.8067 & 5.5643\\-1.4367 & 2.8492\end{bmatrix},\hat{\boldsymbol{B}}_{2k+1}=\begin{bmatrix}0.5899\\-0.3317\end{bmatrix},$$

$$\hat{\boldsymbol{C}}_{2k+1}=\begin{bmatrix}0.0011 & -0.0022\end{bmatrix}$$

假设系统的初始状态 $\zeta(0)=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}^T$，在有限时间窗口［0，500］，其中在［0，100）和［202，500］时 $u(k),d(k),f(k)$ 为零。在［100,202）时 $u(k)=2,d(k)=6\sin(k),f(k)=6$。

图 1 给出了有故障信号时，残差产生系统即故障检测滤波器的输出，图 2 为有故障和无故障时残差评价函数的变化曲线。从图中可以看出，故障检测滤波器能快速检测到故障信号，并对系统扰动输入信号具有鲁棒性。

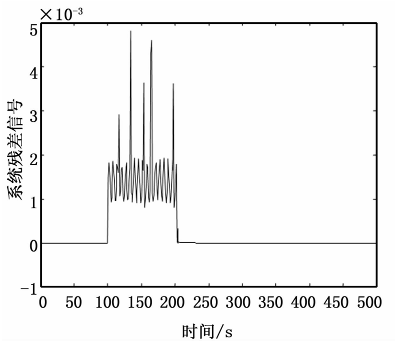

图 1 残差信号

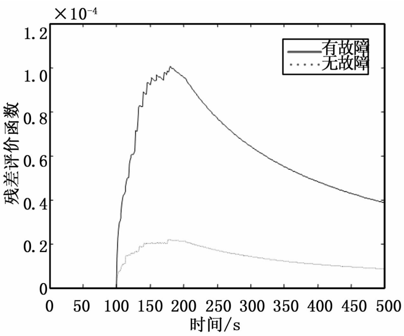

图 2 残差评价函数曲线

4 结语

本文研究了传感器到控制器的随机数据丢包和控制器到执行器的通讯限制的网络控制系统鲁棒故障检测问题，在此基础上建立了带有故障的离散时间模型，基于建立的模型设计的全阶故障检测滤波器不但保证了闭环系统的随机稳定，同时使残差系统的 H_∞ 范数达到较优的扰动衰减水平。设计得到的滤波器所构成的故障检测系统能够保证对故障信号的敏感性，并对系统的扰动输入具有鲁棒性。数值算例验证了本文所提出的故障检测方法是有效的。

参考文献：

［1］Wan X B, Fang H J, Fu S. Observer－based fault detection for networked discrete － time infinite － distributed delay systems with packet droups ［J］. Applied Mathematical modeling, 2012, 36 (1): 270 - 278.

［2］Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems ［J］. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21 (2): 84 - 99.

［3］He X, Wang Z D, Ji Y D, et al. Robust fault detection for networked systems with distributed sensors ［J］. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47 (1): 66 - 177.

［4］Wang Y Q, Ye H, Ding S X, et al. Residual generation and evaluation of networked control systems subject to random packet dropout ［J］. Automatica, 2009, 45 (10): 2427 - 2434.

［5］Zhong M Y, Ding S X, Lam J, et al. An LMI approach to design robust fault detection filter for uncertain LTI systems ［J］. Automatica, 2003, 39 (1): 543 - 550, 2003.

［6］Peng C, Yue Dong, Tian E G, et al. Observer - based fault detection for networked control systems with network Quality of Service ［J］. Applied Mathematical modeling, 2010, 34 (6): 1653 - 1661.

［7］Wan X B, Fang H J, Fu S. Observer－based fault detection for networked discrete － time infinite － distributed delay systems with packet droups ［J］ Applied Mathematical modeling, 2012, 36 (1): 270 - 278.

［8］Zhang L, Hristu－Varsakelis D. Communication and control co－design for networked control systems ［J］ Automatica, 2006, 42 (6): 953? 958.

［9］Gao H, Chen T, Wang L. Robust fault detection with missing measurements ［J］ International Journal of Control, 2008, 81 (5): 804 - 819.

［10］Wang Y Q, Ye H, Ding S, et al. Fault Detection of Networked Control Systems Subject to Access Constrains and Random Packet Dropout ［J］ Acta Automatica Sinica, 2009, 35 (9): 1230 - 1234.

［11］Yoshimura M, Frank P M, Ding X. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer－based fault detection systems ［J］, Journal of Process Control, 1997, 7 (6): 403 - 424.

［12］王红茹，王常虹，高会军. 时滞离散不确定系统的鲁棒故障检测［J］. 电机与控制学报，2006，10 (5)：503 - 507.