

含有随机延迟的网络控制系统故障检测研究*

顾洲¹, 田恩刚², 彭晨², 吴薇¹

1. 南京师范大学 动力工程学院, 南京 210042

E-mail: gzh1808@163.com

2. 南京师范大学 电气与自动化学院, 南京 210042

E-mail: teg@njnu.edu.cn

摘要: 本文研究了考虑网络诱导时延、丢包和错序等非理想网络环境下的网络控制系统的故障诊断问题, 假设网络传输特性指标 η_k 服从齐次Markov链分布, 通过矩阵增广的方法, 建立一个统一的Markov跳变系统(MJSs)模型, 将基于状态观测器的故障诊断滤波器设计问题转化为 H_∞ 优化设计问题, 应用线性矩阵不等式(LMIs)技术, 给出该设计问题解存在条件。最后, 通过算例来验证本方法的有效性。

关键词: 网络控制系统, 故障诊断滤波器, Markov链

Study on Fault Detection for Networked Control Systems with Stochastic Time-Delay

GU Zhou¹, TIAN Engang², PENG Chen², WU Wei¹

1. School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, P. R. China

E-mail: gzh1808@163.com

2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, P. R. China

E-mail: teg@njnu.edu.cn

Abstract: The problem of fault detection scheme for networked control systems with non-ideal QoS (such as network-induced delay, data dropout, error sequence) is addressed in this paper. By assuming integrated index η_k obeys a homogeneous Markovian chain, we develop an augmented Markov Jump Systems (MJSs) model. The observer-based fault detection filter problem is formulated as an H_∞ optimization problem. Using linear matrix inequality (LMIs) techniques, the solvable condition of this optimization problem is derived. Finally, the effectiveness of the proposed method is illustrated by a numerical example.

Key Words: Networked Control System(NCS), Fault Detection Filter (FDF), Markov Chain, H_∞

1 引言 (Introduction)

随着自动化水平的不断提高, 工业规模和系统的复杂性也日益增加, 故障检测作为提高系统可靠性和安全性的一项重要技术, 对其进行理论研究具有重要的意义, 在近三十年得到了迅速的发展[1, 2]。

同时, 由于网络通讯技术的快速发展以及网络自身具有的突出优点, 如: 信息资源能够共享、连接线少、易于扩展维护, 成本低和灵活高效等, 网络控制系统(NCS)受到人们越来越多的关注, 但由于NCS的反馈通道(前向通道)的信息是通过网络进行传输的, 网络本身所固有的不确定性, 如网络时延、丢包、及错序不可避免, 已有的控制和故障检测方法已不能直接运用于NCS中, 因此越来越多的学者把目光转移到网络控制系统的稳定性[3-5, 18]和故障诊断与分离(FDI)上[6-15]。文献[6, 7]利用补偿和提升的方法设计了时延小于采样周期的NCS故障检测系统; 文献[8]提出了在等价空间框架下的解决方法; 文献[9]讨论了时延变化小于采样周期并且系统矩阵 A_p 可以对角化的一类特殊NCS的故障检测系统; 文献[10, 11, 20]等基于 H_∞ 滤波器的思想进行了观测器设计; 文献[12]在故障检测

滤波器的建模上类似文献[4]建模方法, 考虑了网络服务质量(QoS)如丢包, 时延, 错序等非理想网络特性, 但把数据经网络传输的行为看成是相互独立的。事实上, 以网络为媒介的数据传递是分批打包的, 且在传递过程中从一个模态切换到另一个模态具有相关性。如果假设数据网络传输服从一种Markov链分布, 将更有实际意义。文献[13]把网络的诱导时延建模为Markov跳变系统, 然后基于Riccati方程分析和设计了系统的稳定性和故障诊断滤波器; 文献[14]考虑了系统输出时产生的数据丢失现象, 并假设数据传递服从Markov分布, 把故障诊断滤波器设计问题转化为 H_∞ 滤波器设计问题, 但在建模过程中没有考虑由于网络造成的诱导时延; 文献[15]对网络控制系统故障诊断做了年度进展报告。值得注意的是, 相对于NCS稳定性分析取得的众多成果, 对网络控制系统的故障检测的研究还处在起步阶段。

本文的主要贡献在于建立了一种新的网络控制系统故障诊断滤波器模型。在建模过程中, 考虑了网络诱导时延、丢包、错序等非理想网络特性, 并假设网络传输综合指标服从某种齐次Markov链分布; 然后通过系统转换, 把网络控制系统的故障诊断滤波器设计问题转化为 H_∞ 优化问题, 引用文献[17]提出的有界实引理, 利用线性矩阵不等式(LMIs)技术, 设计了故障诊断

*此项工作得到国家自然科学基金资助, 项目批准号:60904013;江苏省高校自然基金,项目批准号:09KJB510004。

滤波器,使系统对扰动具有抑制性,并对故障有一定的敏感性。

2 问题描述 (Problem Formulation)

2.1 网络控制系统结构 (Networked Control Systems)

网络控制系统的结构如图1所示,被控对象为一线性连续系统,系统状态量经采样后由网络传递给控制器,控制器根据设定的控制律将控制量通过网络发送给采样保持器,最后到达执行器,形成闭环网络控制系统。

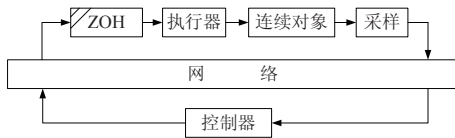


图1 网络控制系统框图

Fig. 1 General framework of networked control systems

不失一般性,对网络控制构件作如下假设:

假设1 传感器采样为时钟驱动,控制器和执行器为事件驱动且单包传输。

假设2 经网络传递的数据包中含有时间戳。

假设3 零阶保持器具有逻辑比较及保持功能。

注1 零阶保持器获取经网络传递的数据包后即根据时间戳对数据包进行比较,以决定数据包的取舍,如先发的数据后到达,则舍弃,反之锁存并保持该数据,如没有新的数据到来,则继续保持原有的数据。

2.2 控制器设计 (Controller Design)

考虑图1中的被控对象为线性连续系统,其模型为:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + E_1 f(t) + D_1 \omega(t) \\ y(t) &= Cx(t) + D_2 \omega(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^l$, $y(t) \in R^q$ 分别是系统的状态向量,控制输入和可测量输出向量; $f(t) \in R^p$, $\omega(t) \in R^r$ 分别为待诊断的故障信号和不确定扰动信号(包括建模误差信号、外部扰动信号和影响不大的小故障信号); $A, B, E_1, D_1, E_1, C, D_2$ 为适当维数的已知矩阵。

基于上述假设,图2给出了网络传递中的信号选择,丢包,错序等过程。在 $k-m-3$ 时刻的数据发送出现了丢包, $k-m-2$ 和 $k-m-1$ 发送的包出现了错序,经过ZOH比较后,丢弃 $k-m-2$ 时刻发送的数据包,所以控制输入 $u(t)$ 为分段连续函数。

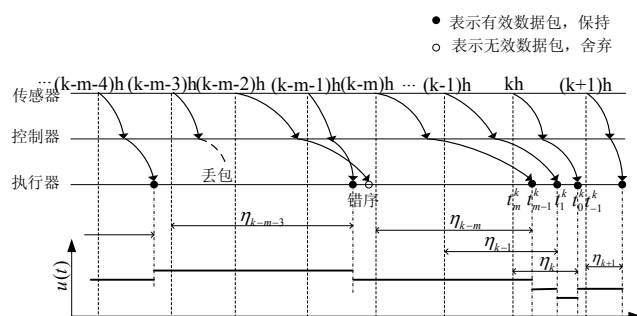


图2 非理想网络下的模型信号图

Fig. 2 Signals of model under non-ideal network

经过以上分析,式(1)中的 $u(t)$ 可以表示为:

$$u(t^+) = u(i_k h) \quad [i_k h + \eta_k, i_{k+1} h + \eta_{k+1}) \quad (2)$$

其中, $i_k \in Z^+$ 表示发送的有效数据包由 k 时刻点采样, h 为采样周期, η_k 表示第 i_k 个数据包从传感器到执行器所经历的时间。

由于 $i_k h = t - (t - i_k h)$, 定义 $\eta(t) = t - i_k h$, 于是网络闭环控制系统可以重写为:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t - \eta(t)) + E_1 f(t) + D_1 \omega(t) \\ y(t) &= Cx(t) + D_2 \omega(t) \quad [i_k h + \eta_k, i_{k+1} h + \eta_{k+1}) \end{aligned} \quad (3)$$

假设4 网络的不可靠性带来了网络时延、丢包及错序等现象,但实际的网络控制系统具有一定的网络性能保证,因此可以假设 $\eta(t)$ 为有界的,且 $\eta(t) \leq mh$, m 为非负整数。

注2 由注1和图2可以看出,本文式(3)中的 $\eta(t)$ 与文献[18]中的 $\tau(t)$ 具有不同的物理意义,本文中的 $\eta(t)$ 不仅包含网络诱导时延,还包括丢包、错序等非理想网络服务质量(QoS),即式(3)中的 $\eta(t)$ 为一个综合性能指标。

类似文献[18]的方法,对连续系统状态方程(3)在区间 $[kh, (k+1)h)$ 进行离散化,可得:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + \sum_{i=0}^m B_i^k u_{k-i} + E_1 f_k + D_1 \omega_k \\ y_k = Cx_k + D_2 \omega_k \end{cases} \quad (4)$$

其中, $A = e^{Ah}$, $B_i^k = \int_{t_i^k}^{t_{i+1}^k} e^{A(h-s)} ds B$, $t_{-1}^k = h$, $t_h^k = 0$, $E_1 = \int_0^h e^{A(h-t)} E dt$, $D_1 = \int_0^h e^{A(h-t)} D dt$ 。

假设5 假定输出信号经网络传输后,在式(4)中, $i \in \mathcal{S}$, $\mathcal{S} := \{0, 1, 2, \dots, m\}$, i 在有限集 \mathcal{S} 上服从齐次Markov链分布,并且其静态转移矩阵为 $\Lambda = (p_{ij})$, $i, j \in \mathcal{S}$, 且 p_{ij} 满足 $0 \leq p_{ij} \leq 1$, $\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1$ 。

由假设4,对象的输出信号经网络传输,则在 k 时刻 i 模态时,系统方程变为:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + \sum_{i=0}^m B_i^k u_{k-i} + E_1 f_k + D_1 \omega_k \\ y_k^i = \sum_{i=0}^m \delta(j, i) Cx_{k-i} + D_2 \omega_k \end{cases} \quad (5)$$

其中, δ 为Kronecker积,用来描述Markov链的模态切换,即:

$$\delta(j, i) = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (6)$$

为分析方便,定义

$$z_k = [u_{k-1}^T, \dots, u_{k-m}^T, x_k^T, \dots, x_{k-m}^T]^T \quad (7)$$

则系统(5)可转化为如下Markov跳变系统(MJSs):

$$\begin{cases} z_{k+1} = \mathbb{A}_i z_k + \mathbb{B}_i u_k + \mathbb{E}_1 f_k + \mathbb{D}_1 \omega_k \\ y_k^i = \mathbb{C}_i z_k + D_2 \omega_k \end{cases} \quad (8)$$

其中,

$$\mathbb{A}_i = \left[\begin{array}{c|c} 0_{l \times (m-1)l} & 0_{l \times l} \\ \hline I_{(m-1)l \times (m-1)l} & 0_{(m-1)l \times l} \\ B_1^k & \cdots B_m^k \\ \hline 0_{mn \times m} & \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 0_{l \times (m+1)n} \\ 0_{(m-1)l \times (m+1)n} \\ A_{n \times n} & 0_{n \times mn} \\ I_{mn \times mn} & 0_{mn \times n} \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} \mathbb{B}_i &= \left[I_{l \times l} \quad 0_{(m-1)l \times l}^T \quad (B_0^k)^T \quad 0_{mn \times l}^T \right]^T; \\ \mathbb{C}_i &= [0_{q \times ml} \mid \delta(j, 0)C, \dots, \delta(j, i)C \cdots \delta(j, m)C]; \\ \mathbb{D}_1 &= [0_{ml \times r}^T \quad D_1^T \quad 0_{mn \times r}^T]^T; \\ \mathbb{E}_1 &= [0_{ml \times r}^T \quad E_1^T \quad 0_{mn \times p}^T]^T; \end{aligned}$$

注3 式(8)中的参数 $\mathbb{A}_i, \mathbb{B}_i, \mathbb{C}_i$ 在每个模态是已知的,但模态的变化是随机的,静态概率分布及网络时延特性可以通过网络特征信号提取得到。

2.3 故障诊断滤波器设计 (Detection Filter Design)

为了检测出系统(8)的故障,建立如下基于状态观测器的故障诊断滤波器(FDF):

$$\begin{cases} z_{k+1} = \mathbb{A}_i z_k + \mathbb{B}_i u_k + L_i(y_k^i - y_k) \\ y_k = \mathbb{C}_i z_k \\ r_k = G(y_k^i - y_k) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $z_k \in R^n, y_k \in R^q$ 分别为状态和输出的估计值, r_k 为残差信号, L_i, G 分别为待求的状态观测器增益矩阵和残差评价矩阵。

定义 $e_k = z_k - z_k$,可得残差系统方程为:

$$\begin{cases} e_{k+1} = \mathcal{A}_i e_k + \mathcal{B}_i v_k \\ r_k = \mathcal{C}_i e_k + \mathcal{D}_i v_k \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\mathcal{A}_i = (\mathbb{A}_i - L_i \mathbb{C}_i), \mathcal{B}_i = [\mathbb{D}_1 - L_i D_2 \quad \mathbb{E}_1], \mathcal{C}_i = G \mathbb{C}_i, \mathcal{D}_i = [G D_2 \quad 0], v_k = [w_k^T \quad f_k^T]^T$ 。

为了保证残差对故障信号敏感的同时,降低外部干扰对残差信号的影响,引入如下性能指标[20]:

$$J = \|T_{r\omega}\|_\infty - \|T_{rf}\|_\infty \quad (11)$$

其中, $T_{r\omega}, T_{rf}$ 分别为扰动信号和故障信号到残差信号的传递函数。

本文的主要目标是在最小化指标 J 的约束下,求出状态观测器增益矩阵 L_i ,以及残差评价矩阵 G ,即

$$\min_{L_i, G} J \text{ s.t. } (10) \quad (12)$$

假设故障和扰动同维,定义 $T = T_{r\omega} - T_{rf}$,则有

$$T: \begin{cases} e_{k+1} = \mathcal{A}_i e_k + \mathcal{B}_i v_k \\ r_k = \mathcal{C}_i e_k + \mathcal{D}_i v_k \end{cases} \quad (13)$$

其中 $\mathcal{B}_i = \mathcal{B}_i N, \mathcal{D}_i = \mathcal{D}_i N, N = \text{diag}\{I_{p \times p}, -I_{p \times p}\}$ 。

$$\|T\|_\infty = \|T_{r\omega} - T_{rf}\|_\infty \geq \|T_{r\omega}\|_\infty - \|T_{rf}\|_\infty \quad (14)$$

则当 $J \rightarrow \min$ 时,有

$$\|T_{r\omega}\|_\infty \rightarrow \min, \|T_{rf}\|_\infty \rightarrow \max$$

对于给定的 $\gamma > 0$,如果 $\|T\|_\infty < \gamma$ 成立,则

$$\|T_{r\omega}\|_\infty - \|T_{rf}\|_\infty < \gamma \quad (15)$$

于是优化问题(12)又可表示为

$$\min_{L_i, G} \gamma \text{ s.t. } (13), (15) \quad (16)$$

注4 如果故障和扰动不同维,则可以通过乘以单位系数矩阵方法进行转换,本文从略。

注5 对于故障检测滤波器,首先要求系统是收敛的,还要求系统对扰动具有抑制性,而且对故障具有敏感性。本文运用传递函数转换的方法具有一定的保守性,但仍然具有改善信噪比的作用[20]。

经过上述处理,网络控制系统的故障诊断问题即可转化为 H_∞ 滤波器设计问题:设计 H_∞ 滤波器,使得MJSs (13) 是均方渐近稳定的,且具有 H_∞ 范数界 γ 。即满足

1) 当 $v_k \equiv 0$,系统(13)是均方渐近稳定的。即

$$\mathcal{E} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \|e_k\|^2 \right\} \rightarrow 0, \quad k \rightarrow \infty \quad (17)$$

(2) 任何非零 $v_k \in L_2[0, \infty], r_k$ 满足

$$\mathcal{E} \left\{ \sum_{k=0}^h r_k^T r_k \right\} \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^h v_k^T v_k \quad (18)$$

其中, $\mathcal{E}\{\cdot\}$ 为数学期望, $r_0 = 0$ 。

在FDF设计中,残差的评价问题也是必须关注的问题,目前广泛采用的方法是选择一个阈值评价函数

$$J_{th} = \sup_{\omega \in L_2, f=0} \mathcal{E} \left\{ \left(\sum_{k=0}^L r_k^T r_k \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (19)$$

L 为最大步长。

于是,可以通过如下逻辑关系来检测是否有故障的发生:

$$\begin{aligned} J_k > J_{th} &\Rightarrow \text{故障报警} \\ J_k < J_{th} &\Rightarrow \text{无故障发生} \end{aligned}$$

3 主要结果 (Main Result)

为便于给出故障诊断滤波器参数解条件,给出如下引理。

引理1[17] 给定 $\gamma > 0$,随机系统

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_i x_k + B_i \omega_k \\ z_{k+1} = C_i x_k + D_i \omega_k \end{cases} \quad (20)$$

其中,

$$\begin{aligned} A_i &= A(\nu_k)|_{\nu_k=i} & B_i &= B(\nu_k)|_{\nu_k=i} \\ C_i &= C(\nu_k)|_{\nu_k=i} & D_i &= D(\nu_k)|_{\nu_k=i} \end{aligned}$$

x_k 为状态向量, $\omega \in L_2[0, \infty]$ 为未知输入量, z_k 为输出向量, ν_k 服从齐次Markov链分布,在有限集 $\mathcal{S} := \{0, 1, 2, \dots, m\}$ 上其转移概率 $\lambda_{ij} = \text{Prob}\{\nu_{k+1} = j | \nu_k = i\}$,下列条件是等价的:

(I) 给定 $\gamma > 0$, MJSs (20) 是均方渐进稳定的, 且满足:

$$\sup_{\omega_k \neq 0} \frac{\mathcal{E}\{\|z\|_2\}}{\|\omega\|_2} < \gamma^2 \quad (21)$$

(II) 给定 $\gamma > 0$, 存在矩阵 $P_i, i = 1, \dots, m$ 满足如下矩阵不等式(LMIs):

$$\begin{bmatrix} -P_i & A_i^T P_i & 0 & C_i^T \\ * & -P_i & P_i B_i & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & D_i^T \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (22)$$

其中, $P_i = \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} P_j, j = 1, \dots, m$

MJSs(13)具有与引理1相同的随机系统结构, 则由引理1可求出NCS故障诊断残差发生器(9)参数解的存在条件。

定理1 给定 $\gamma > 0$, 在有限集 $i \in \mathcal{S}$ 内, 如果存在对称矩阵 $P_i > 0$ 和矩阵 L_i, G , 使得矩阵不等式(23)成立, 则MJSs (13) 具有 H_∞ 范数界 γ , 且FDF (9) 的增益 $L_i = P_i^{-1} L_i$ 。

$$\begin{bmatrix} -P_i & 12 & 0 & 0 & C_i^T G^T \\ * & -P_i & 23 & P_i E_1 & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & -D_2^T G^T \\ * & * & * & -\gamma^2 I & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

其中,

$$\begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} P_j, i, j = 0, 1, \dots, m \\ 12 &= A_i^T P_i - C_i^T L_i^T \\ 23 &= -P_i D_1 + L_i D_2 \end{aligned}$$

证明: 基于引理1, 把式(13) 中的 A_i, B_i, C_i, D_i , 代入引理1, 并定义 $L_i = P_i L_i$ 即可得证。 证毕。

4 算例仿真 (Example and Simulation)

考虑如系统(3)线性被控对象, 其中,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -4 & -5 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.05 \end{bmatrix}, C = [1 \ 1], D_2 = 0.1, E_1 = -B, h = 0.01s, \mathcal{S} \subseteq \{0, 1, 2\},$$

静态传输概率矩阵为[21]:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}$$

扰动信号为在区间 $t \in [0, 800]$ 内能量为0.01的白噪声, 故障信号为:

$$f_k = \begin{cases} 1 + 0.5 \cos(3k\pi) & k = 100, 101, \dots, 200 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

根据第二节的建模方法, 得出系统在不同模态时的参数

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0099 & -0.0098 & 0.9998 & 0.0098 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0105 & 0.0114 & -0.039 & 0.951 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_i = [0 \ 0 \ 0.01 \ 0.0096 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$D_1 = [0 \ 0 \ 0.002 \ 0.0004 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$E_1 = [0 \ 0 \ -0.01 \ -0.0096 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$C_0 = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$C_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0],$$

$$C_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]$$

由定理1, 可得滤波器(9)的残差评价矩阵 G 和观测器增益矩阵 $L_i, i = 0, 1, 2$ 分别为: $G = 0.6210$,

$$L_0 = \begin{bmatrix} 0.0031 \\ 0.0109 \\ 1.0307 \\ 0.9170 \\ 0.8314 \\ 0.7863 \\ 0.2628 \\ 0.2390 \end{bmatrix}, L_1 = \begin{bmatrix} 0.0008 \\ 0.0032 \\ 0.4209 \\ 0.3250 \\ 0.3818 \\ 0.3158 \\ 0.8489 \\ 0.8105 \end{bmatrix}, L_2 = \begin{bmatrix} 0.0000 \\ -0.0001 \\ 0.0361 \\ 0.0219 \\ 0.0344 \\ 0.0229 \\ 0.0497 \\ 0.0392 \end{bmatrix}$$

通过Matlab仿真, 可得如图(3)-(6)曲线。从图3中可以看出本文提出的具有Markov网络传输特性的系统采用定理1设计的故障诊断滤波器是随机均方稳定的; 从图4可以看出, 第100步到第200步发生故障期间, 残差信号发生显著变化, 故障消除后, 系统能迅速恢复到无故障状态; 图5给出了模态变化的曲线; 在图6中的实线和虚线分别表示有故障和无故障时的评价函数。

阈值的大小可根据(19)计算, 取其平均值可得

$$J_{th} = \sup_{f=0, \omega \in L_2} E \left(\sum_{k=0}^{800} r_k^T r_k \right)^{1/2} = 0.0524$$

通过计算, 并从图4可得 $J_{104} = 0.04784 < J_{th} < J_{105} = 0.06831$, 所以故障在发生后第5步被检测。

5 结论 (Conclusion)

本文主要考虑了线性被控对象在非理想网络环境下的网络控制系统的故障诊断方法。假定网络传输特性服从某一Markov链的分布, 把网络控制系统的FDF模型构建为一个综合的MJSs, 基于Lyapunov稳定性理论、 H_∞ 控制理论和LMI方法, 设计了NCS的故障诊断滤波器, 算例证明了所提出方法的有效性。另外, 文中考虑的是线性被控对象和单包网络传输情况, 在后续研究中将考虑非线性和多包传输的故障诊断问题以及本设计方法在故障灵敏度问题上的保守性问题。

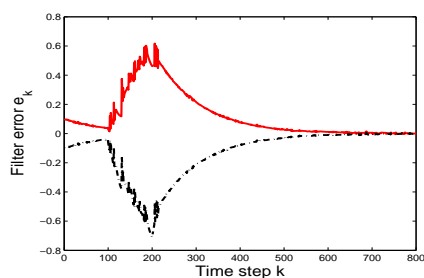


图3 滤波器误差信号

Fig. 3 Filter error signal

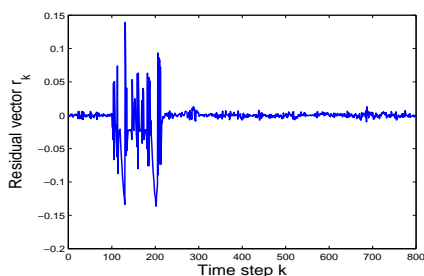


图4 滤波器残差信号

Fig. 4 Residual signal of filter

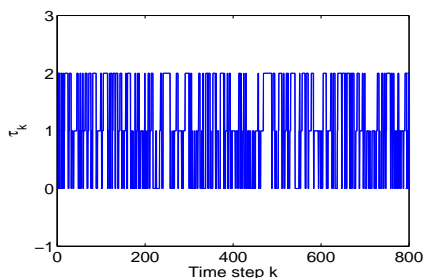


图5 系统的模式

Fig. 5 system mode over network

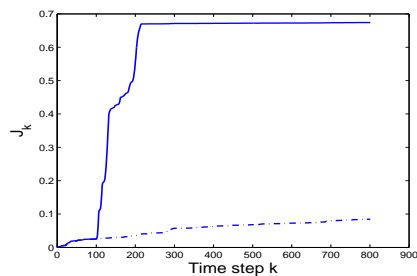


图6 残差评价函数

Fig. 6 Evolution function of residual

参考文献 (References)

[1] FRANK P M, DING S X. Current developments in the theory of FDI[C]. //the 4th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Budapest, Hungary, 2000, 16–27.

[2] WANG H R, WANG C H, MOU S S, GAO H J. 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.

[3] 彭晨,岳东.网络环境下基于网络QoS 的网络控制器优化设计[J]. *自动化学报*, 2007,2(33):214-217.

(PENG Chen YUE Dong. Network-Based Optimal Controller Design Based on QoS[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007,2(33):214-217.)

[4] YUE D, HAN Q L, LAM J. Network-based robust H_{∞} control of systems with uncertainty[J], *Automatica*, 2005, 41(6):999–1007.

[5] PENG C. TIAN Y C. Delay-dependent robust stability criteria for uncertain systems with interval time-varying delay[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2008,2(214): 480–494.

[6] 马力伟, 田作华, 施颂椒.基于时滞补偿观测器的网络化控制系统故障检测[J], *上海交通大学学报*, 2008, 42(2):231-235.
(Ma Liwei, TIAN Zuohua, Shi Songjiao. Fault detection for networked control systems based on time compensation observer[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(2):231-235.)

[7] ZHENG Y, FANG H J, XIE L B, WANG H O. An observer-based fault detection approach for networked control system[J]. *Dynamics of Continuous Discrete and Impulsive Systems-Series B: Applications & Algorithms*, 2003, Suppl.(SI):416–421.

[8] WANG Y, DING S X, ZHANG P, W L I, YE H, Wang G. Fault Detection of Networked Control Systems with Packet Dropout[C]. // *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea*, 2008, 7:6–12.

[9] 吕明, 吴晓蓓, 徐志良, 胡维礼. 具有异步时钟的长时延网络控制系统故障检测[J] *信息与控制*, 2007, 36(3):386–391.
(LV Ming, WU Xiaobai, XU Zhiliang, HU Weili. Fault detection for networked control systems with long time delays of asynchronous clock[J]. *Information and Control* 2007, 36(3):386–391.)

[10] BAO Y, DAI Q Q, CUI Y L. Fault detection based on robust H_{∞} states observer on networked control systems [C] // *Proc. 2005 ICCA, Budapest, Hungary*, 2005:1237–1241.

[11] XIA H W, MA G C, WANG C H, WEN Q Y. Robust Fault Detection of Networked Control Systems: An Improved LMJ Approach[C]. *Industrial Electronics and Applications*, 2007. *ICIEA 2007. the 2nd IEEE Conference on*. 2007: 1448–1452.

[12] ZHONG M Y, HAN Q L. Fault Detection Filter Design for a Class of Networked Control Systems[C]. *Intelligent Control and Automation*, 2006. *WCICA2006*, 1:215–219.

[13] JIANG B, MAO Z H. Fault Estimation and Accommodation for Networked Control Systems with Transfer Delay[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 7(33): 738–743.

[14] ZHANG P, DING S X, FRANK P M, SADER M. Fault detection of networked control systems with

- missing measurements[C] *Proceedings of the 5th Asian Control Conference. IEEE*, 2004, 1263.
- [15] CHEN J, KHER S, SOMANI A. Distributed fault detection of wireless sensor networks[C] *Proceedings of the 2006 workshop on Dependability issues in wireless ad hoc networks and sensor networks*, 2006: 65–72.
- [16] FANG H J, YE H, ZHONG M Y. Fault diagnosis of networked control systems[J], *Annual Reviews in Control*, 2007, 31(1):55–68.
- [17] COSTA O L V, MARQUES R P. Mixed H_2/H_∞ control of discrete-time Markovian jump linear systems[J], *Automatic Control, IEEE Trans. on Automatic Control*, 1998, 43(1): 95–100.
- [18] HU S S, ZHU Q X. Stochastic optimal control and analysis of stability of networked control systems with long delay[J], *Automatica*, 2003, 39(11): 1877–1884.
- [19] 郑英, 方华京, 王华. 带有输出传输时延的网络化控制系统基于观测器的FDI设计[J]. *控制理论与应用*. 2003, 5(20): 653–656.
- (ZHENG Ying, FANG Huajing, WANG Hua. Observer-based FDI design of networked control system with output transfer delay[J]. *Control Theory & Applications*. 2003, 5(20): 653–656.)
- [20] 白雷石, 田作华, 施颂椒. 一种新的时滞系统鲁棒故障诊断滤波器设计方法[J]. *自动化学报*, 2006, 4(32), 624–629.
- (BAI Leishi, TIAN Zuohua, SHI Songjiao. A New Approach to Design of Robust Fault Detection Filter for Time-delay Systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 4(32): 624–629.)
- [21] HE X, WANG Z D, JI Y D, ZHOU D H. Network-based fault detection for discrete-time state-delay systems: A new measurement model[J]. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADAPTIVE CONTROL AND SIGNAL PROCESSING*, 2008, 5(22): 510–528.