

文章编号: 1001-0920(2008)08-0894-06

测量丢失概率不确定的网络化系统的鲁棒故障检测

阮玉斌, 杨富文, 王 武

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福州 350002)

摘 要: 研究一类具有测量数据丢失概率不确定的网络化系统的鲁棒故障检测问题, 系统用概率属于一个区间的 Bernoulli 随机二进制切换序列来描述测量数据丢失. 设计一个基于观测器的鲁棒故障检测滤波器 (RFDF), 对于区间内的每一个概率, RFDF 残差误差输出对故障敏感且对具有 L_2 有界的未知干扰输入有一定的鲁棒性. 应用线性矩阵不等式方法, 给出并证明了此 RFDF 的存在条件. 最后通过例子说明了该方法的有效性.

关键词: 鲁棒故障检测; 网络化系统; 不确定系统; 测量数据丢失; 线性矩阵不等式; H 范数

中图分类号: TP13 文献标识码: A

Robust fault detection for networked systems with uncertain missing measurements probabilities

RUAN Yu-bin, YANG Fu-wen, WANG Wu

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China. Correspondent: RUAN Yu-bin, E-mail: RYB@fzu.edu.cn)

Abstract: A problem of robust fault detection for a class of networked systems with uncertain missing measurements probabilities is discussed. The packed-data loss is modeled as a Bernoulli random binary switching sequence with an unknown conditional probability distribution that is assumed to be in an interval. An observer-based fault detection filter under all missing measurements probabilities in the interval can be designed to guarantee residual output sensitive to fault and robust to L_2 -norm bounded unknown input. A sufficient condition is derived in terms of linear matrix inequality (LMI). A numerical example illustrates the effectiveness of the proposed approach.

Key words: Robust fault detection; Networked systems; Uncertain systems; Missing measurements; Linear matrix inequality; H -norm

1 引 言

网络化系统是对象和各部件间通过网络连接构成的复杂系统, 具有连接简单、易扩展、维护方便等优点, 近年来成为学者们研究的热点之一. 网络化系统的测量数据在以打包方式通过网络进行传输时, 由于网络拥塞等原因, 测量数据包丢失是不可避免的, 这会使基于传统方法设计的故障检测器的性能下降, 甚至失去作用. 目前, 具有测量信号丢失的网络化系统故障检测的研究在国内外已受到学者们的重视, 并取得了一定的研究成果^[1,2]. 这些成果是基于不同的数据丢失描述方法研究问题, 文献[1]采用 Markov 随机过程描述测量数据丢失, 文献[2]运用混合系统描述数据丢失. 此外, 系统的数据丢失还可

采用 Bernoulli 随机二进制切换序列来描述^[3,4]. 此方法也常用来描述网络化系统的随机时延^[5,6]. 利用 Bernoulli 随机二进制切换序列描述测量数据丢失, 方法不仅简单且物理意义明确. 目前, 用这种方法描述数据丢失的网络化系统故障检测的研究尚未见报道.

文献[1,3,4]在描述测量数据丢失时, 是将数据丢失概率当作一个可测量的固定值来处理, 这方便了对系统的分析设计. 但在实际应用中, 网络化系统的数据丢失概率不能精确测量, 是动态变化的, 系统在此情况下将会有很差的性能指标, 或者不能正常工作. 为了解决此问题, 本文采用一个数值区间描述满足 Bernoulli 随机二进制切换序列的网络化系统

收稿日期: 2007-06-07; 修回日期: 2007-10-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474049, 60604027); 福建省自然科学基金项目(A0510009).

作者简介: 阮玉斌(1970—), 男, 讲师, 从事网络化系统的控制与故障检测等研究; 杨富文(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事鲁棒控制、鲁棒滤波等研究.

测量数据丢失概率,针对离散的网络化系统存在故障和未知干扰情况下,研究网络化系统的鲁棒故障检测滤波器(RFDF)设计问题,所设计的 RFDF 对数值区间中每一个概率都能对故障敏感,对外部扰动具有一定的鲁棒性。

2 问题描述

考虑如下的离散系统 P:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B_w w(k) + B_f f(k), \\ y(k) = Cx(k) + D_f f(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in R^n$ 为状态向量; $f(k) \in R^q$ 为被检测的故障向量; $w(k) \in R^l$ 为外部干扰输入向量; 设 $w(k), f(k)$ 均为 l_2 范数有界向量; $y(k) \in R^p$ 为系统测量输出向量; A, B_w, B_f, C 和 D_f 为已知的、有合适维数的实矩阵。

假设 1 离散系统 P 是稳定的。

假设 2 数据是以单包的方式在网络上传输。

测量信号 $y(k)$ 在网络上的传输可表示成

$$y_c(k) = (k) y(k). \quad (2)$$

其中: $(k) \in R$ 为满足 Bernoulli 二进制切换序列分布的随机变量,用来描述测量信号在网络上的传输状况:当 $(k) = 1$ 时表示网络通讯正常, $(k) = 0$ 时表示测量信号 $y(k)$ 丢失. (k) 的概率和均值为

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{r(k) = 1\} &= E\{r(k)\} := \bar{r}, \\ \text{Prob}\{r(k) = 0\} &= 1 - E\{r(k)\} := 1 - \bar{r}, \\ E\{(k)^2\} &:= \bar{r}, \end{aligned} \quad (3)$$

而 \bar{r} 是属于如下的数值区间:

$$\bar{r} \in [\min, \max]. \quad (4)$$

其中: \max 表示丢失概率数值区间的上限, \min 表示丢失概率的下限,且 $0 < \min < \max < 1$. 取

$$\alpha = \frac{\max + \min}{2}, \quad \beta = \frac{\max - \min}{2}, \quad (5)$$

则 $\bar{r} \in [\min, \max]$ 可由下式表示:

$$\bar{r} = \alpha + \beta \cdot \gamma, \quad \gamma \in [-1, 1]. \quad (6)$$

注 1 网络上数据丢失概率一般不能精确测量,是时变的,但可用式(4)所示的一个数值区间来估计,或用式(6)所示的不确定来表示,这都比文献 [1, 3, 4] 中用一个确定的数来表示数据丢失概率更符合实际. 用数值区间表示时,上界 $\max < 1$, 表示测量数据存在丢失; $\min = 0$, 表示网络完全堵塞,测量数据全部丢失,这种情况一般不存在。

注 2 在分析带有式(4)的区间系统时,一般是将式(4)用式(6)的形式规范表示,这样将由区间表示的系统转化为不确定系统。

设计如下的鲁棒故障检测滤波器(RFDF):

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = \hat{A}\hat{x}(k) + \hat{B}y_c(k), \\ r(k) = \hat{C}\hat{x}(k) + \hat{D}y_c(k). \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\hat{x}(k) \in R^n$ 为状态估计; $r(k) \in R^p$ 为 RFDF 残差输出; $\hat{A} \in R^{n \times n}, \hat{B} \in R^{n \times p}, \hat{C} \in R^{p \times n}$ 和 $\hat{D} \in R^{p \times p}$ 为被设计的参数矩阵。

定义下面几个向量: $\bar{x}^T(k) = [x^T(k) \quad \hat{x}^T(k)]$ 为增广状态向量, $r_c(k) = r(k) - f(k)$ 为残差误差信号, 并令 $\bar{w}^T(k) = [w^T(k) \quad f^T(k)]$. 由式(1), (2) 和(7), 整理得到如下增广系统:

$$\begin{cases} \bar{x}(k+1) = \bar{A}\bar{x}(k) + \bar{B}\bar{w}(k), \\ r_c(k) = \bar{C}\bar{x}(k) + \bar{D}\bar{w}(k). \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\bar{A} = A_1 + (k)A_2, \quad \bar{B} = B_1 + (k)B_2,$$

$$\bar{C} = C_1 + (k)C_2, \quad \bar{D} = D_1 + (k)D_2,$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & \hat{A} \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \hat{B}C & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} B_w & B_f \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \hat{B}D_f \end{bmatrix},$$

$$C_1 = [0 \quad \hat{C}], \quad C_2 = [\hat{D}C \quad 0],$$

$$D_1 = [0 \quad -I], \quad D_2 = [0 \quad \hat{D}D_f].$$

定义 1 对于系统在 $\bar{w}(k) = 0$ 时,存在 $\gamma > 0$ 和 $\beta \in (0, 1)$, 使得

$$E\{\|\bar{x}(k)\|_2^2\} \leq \beta^k E\{\|\bar{x}(0)\|_2^2\}, \quad \forall \bar{x}(0) = 0,$$

称系统为均方意义下指数稳定。

本文的目的是设计如式(7)所示的 RFDF, 对所有满足式(6)的测量丢失概率不确定和所有系统干扰输入, 使得:

- 1) 在 $\bar{w}(k) = 0$ 的情况下, 系统均方指数稳定;
- 2) 在零初始条件下, 残差误差 $r_c(k)$ 满足如下的 H 性能指标:

$$E\|r_c(k)\|_2 < \gamma E\|\bar{w}(k)\|_2, \quad (9)$$

其中 $\gamma > 0$ 为一给定的标量。

为了便于故障检测, 本文选择评价函数 $J(r, k)$ 和阈值 J_{th} 分别如下:

$$J(r, k) = \left\{ \sum_{k=k_0}^{k_0+N} r^T(k) r(k) \right\}^{1/2},$$

$$J_{th} = \sup_{w(k)} \inf_{f(k)=0} E[J(r, k)]. \quad (10)$$

其中: k_0 表示评价初始时刻, N 表示选择的时间窗宽度. 用如下的比较决策就能检测出系统是否发生故障:

$$\begin{aligned} J(r, k) > J_{th} &\Rightarrow \text{故障发生}, \\ J(r, k) \leq J_{th} &\Rightarrow \text{没有故障}. \end{aligned} \quad (11)$$

3 主要结果

引理 1^[5] $V(k) = \bar{x}^T(k) P \bar{x}(k)$ 是 Lyapunov 函数, 如果存在 $\mu > 0, \beta > 0$ 和 $0 < \gamma < 1$, 使得

$$\mu \|\bar{x}(k)\|_2^2 \leq V(k) \leq \beta \|\bar{x}(k)\|_2^2,$$

$E\{V(k+1) | V(k)\} - V(k) = -V(k)$,
 则有

$$E\{\|\bar{x}(k)\|^2\} = \frac{1}{\mu}(1-\mu)^k E\{\|\bar{x}(0)\|^2\}.$$

引理 2^[7] 设 G, F 和 E 是适当维数的实矩阵, 其中 $E^T E = I$, 则对任意参数 $\mu > 0$, 满足

$$GEF + F^T E^T G^T = GG^T + \mu^{-1} F^T F.$$

定义下面几个矩阵:

$$\begin{aligned} A_0 &= A_1 + \mu_0 A_2, B_0 = B_1 + \mu_0 B_2, \\ C_0 &= C_1 + \mu_0 C_2, D_0 = D_1 + \mu_0 D_2, \\ A_{01} &= A_1 + 2^{-1} A_2, B_{01} = B_1 + 2^{-1} B_2, \\ C_{01} &= C_1 + 2^{-1} C_2, D_{01} = D_1 + 2^{-1} D_2, \\ a &= \mu_0(1 - \mu_0). \end{aligned}$$

定理 1 给定 RFDF 增益矩阵 $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$ 和 \hat{D} , 当 $w(k) = 0$, 对所有满足由式(6)所示的测量丢失概率不确定, 如果存在正定对称矩阵 $P \in R^{2n \times 2n}$ 和任意正数 μ , 满足

$$\begin{bmatrix} -P & * & * & * & * \\ PA_0 & -P & * & * & * \\ aPA_2 & 0 & -aP & * & * \\ {}_1PA_{01} & 0 & 0 & -P & * \\ PA_2 & 0 & 0 & 0 & -P \end{bmatrix} < 0, \quad (12)$$

则系统是均方指数稳定.

证明 定义系统的 Lyapunov 函数

$$\begin{aligned} V(k) &= \bar{x}^T(k) P \bar{x}(k), \\ V := E\{V(k+1) | V(k)\} - V(k) &= \\ E\{((A_1 + (k)A_2)\bar{x}(k))^T P((A_1 + \\ (k)A_2)\bar{x}(k))\} - \bar{x}^T(k) P \bar{x}(k) &= \\ \bar{x}^T(k) (A_1^T P A_1 + \bar{A}_1^T P A_2 + \\ \bar{A}_2^T P A_1 + \bar{A}_2^T P A_2 - P) \bar{x}(k) &= \\ \bar{x}^T(k) (A_1^T P A_1 + (\mu_0 + \mu_1) A_1^T P A_2 + (\mu_0 + \\ \mu_1) A_2^T P A_1 + (\mu_0 + \mu_1) A_2^T P A_2 - P) \bar{x}(k) &= \\ \bar{x}^T(k) (A_0^T P A_0 + a A_2^T P A_2 - P + \\ {}_1A_{01}^T P^{-1} P^{-1} A_2 + A_2^T P^{-1} P^{-1} {}_1A_{01}) \bar{x}(k). \end{aligned}$$

利用引理 2, 有

$$\begin{aligned} V &= \bar{x}^T(k) (A_0^T P A_0 + a A_2^T P A_2 - P + \\ {}_1A_{01}^T P A_{01} + \mu^{-1} A_2^T P A_2) \bar{x}(k) &= \\ \bar{x}^T(k) \left(-P + [A_0^T P \quad a A_2^T P \quad {}_1A_{01}^T P \quad A_2^T P] \cdot \right. \\ \left. \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (aP)^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (P)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (P)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PA_0 \\ aPA_2 \\ {}_1PA_{01} \\ PA_2 \end{bmatrix} \right) \bar{x}(k) &= \\ \bar{x}^T(k) \bar{x}(k). \end{aligned}$$

利用 Schur 引理, 式(12) 式暗示 < 0 , 由

$$\begin{aligned} V &= \bar{x}^T(k) \bar{x}(k) \\ &= \min(\mu) \bar{x}^T(k) \bar{x}(k) = \bar{x}^T(k) \bar{x}(k), \end{aligned}$$

则存在 $0 < \mu < 1$, $\mu = \max(P)$, 有

$$\begin{aligned} E\{V(k+1) | V(k)\} - V(k) &= \\ -(\mu V(k)) / \mu &= -V(k), \end{aligned}$$

其中 $0 < \mu < \min(\mu)$.

由稳定性定义 1 和引理 1 可知系统是均方指数稳定.

定理 2 给定一标量 $\mu > 0$, 对所有满足式(6)的测量丢失概率不确定和所有 $w(k) = 0$ 干扰输入, 如果存在正定对称矩阵 $P \in R^{2n \times 2n}$ 和任意正数 μ , 满足

$$\begin{bmatrix} -P & * & * & * & * \\ 0 & -\mu^2 I & * & * & * \\ PA_0 & PB_0 & -P & * & * \\ aPA_2 & aPB_2 & 0 & -aP & * \\ C_0 & D_0 & 0 & 0 & -I \\ aC_2 & aD_2 & 0 & 0 & 0 \\ {}_1PA_{01} & {}_1PB_{01} & 0 & 0 & 0 \\ PA_2 & PB_2 & 0 & 0 & 0 \\ {}_1C_{01} & {}_1D_{01} & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & D_2 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ -aI & * & * & * & * \\ 0 & -P & * & * & * \\ 0 & 0 & -P & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -I & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (13)$$

则系统是均方指数稳定且满足式(9)所示的 H 性能指标.

证明 实际上, 式(13) 包含式(12), 因此由式(12) 可知系统是均方指数稳定的.

$$\begin{aligned} V_1 &= \\ E\{V(k+1)\} - E\{V(k)\} &+ \\ E\{r_c^T(k) r_c(k)\} - \mu^2 E\{w^T(k) w(k)\} &= \\ E\{((A_1 + (k)A_2)\bar{x}(k) + (B_1 + (k)B_2)w(k))^T \cdot \\ P((A_1 + (k)A_2)\bar{x}(k) + (B_1 + (k)B_2)w(k))\} - \\ \bar{x}^T(k) P \bar{x}(k) + E\{((C_1 + (k)C_2)\bar{x}(k) + \\ (D_1 + (k)D_2)w(k))^T ((C_1 + (k)C_2)\bar{x}(k) + \\ (D_1 + (k)D_2)w(k))\} - \mu^2 w^T(k) w(k) &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \bar{x}^T(k) (A_1^T PA_1 + \bar{A}_1^T PA_2 + \bar{A}_2^T PA_1 + \\ & \bar{A}_2^T PA_2 - P) \bar{x}(k) + 2\bar{x}^T(k) (A_1^T PB_1 + \\ & \bar{A}_1^T PB_2 + \bar{A}_2^T PB_1 + \bar{A}_2^T PB_2) \bar{w}(k) + \\ & \bar{w}^T(k) (B_1^T PB_1 + \bar{B}_1^T PB_2 + \bar{B}_2^T PB_1 + \\ & \bar{B}_2^T PB_2) \bar{w}(k) + \bar{x}^T(k) (C_1^T C_1 + \bar{C}_1^T C_2 + \\ & C_2^T C_1 + \bar{C}_2^T C_2) \bar{x}(k) + 2\bar{x}^T(k) (C_1^T D_1 + \\ & \bar{C}_1^T D_2 + \bar{C}_2^T D_1 + \bar{C}_2^T D_2) \bar{w}(k) + \\ & \bar{w}^T(k) (D_1^T D_1 + \bar{D}_1^T D_2 + \bar{D}_2^T D_1 + \\ & \bar{D}_2^T D_2 - {}^2 I) \bar{w}(k) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \bar{w}(k) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A_0^T PA_0 + & A_0^T PB_0 + \\ aA_2^T PA_2 - P & aA_2^T PB_2 \\ B_0^T PA_0 + & B_0^T PB_0 + \\ aB_2^T PA_2 & aB_2^T PB_2 \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} C_0^T C_0 + aC_2^T C_2 & C_0^T D_0 + aC_2^T D_2 \\ D_0^T C_0 + aD_2^T C_2 & D_0^T D_0 + aD_2^T D_2 - {}^2 I \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} A_{01}^T P^{\frac{1}{2}} & C_{01}^T \\ B_{01}^T P^{\frac{1}{2}} & D_{01}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{\frac{1}{2}} A_2 & P^{\frac{1}{2}} B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} A_2^T P^{\frac{1}{2}} & C_2^T \\ B_2^T P^{\frac{1}{2}} & D_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{\frac{1}{2}} A_{01} & P^{\frac{1}{2}} B_{01} \\ C_{01} & D_{01} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \bar{w}(k) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

利用引理 2,有

$$V_1 = \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \bar{w}(k) \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} A_0^T PA_0 + aA_2^T PA_2 - P & A_0^T PB_0 + aA_2^T PB_2 \\ B_0^T PA_0 + aB_2^T PA_2 & B_0^T PB_0 + aB_2^T PB_2 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -W & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ -W & -Y & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -{}^2 I & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & -{}^2 I & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ WA & WA & WB_w & WB_f & -W & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 1 & 2 & YB_w & 3 & -W & -Y & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -aW & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ aZC & aZC & 0 & aZD_f & 0 & 0 & -aW & -aY & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 1 & \hat{D}C & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & * & * & * & * & * & * & * \\ \hat{D}C & \hat{D}C & 0 & \hat{D}D_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -aI & * & * & * & * & * & * \\ {}_1 WA & {}_1 WA & {}_1 WB_w & {}_1 WB_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -W & * & * & * & * & * \\ 4 & 5 & {}_1 YB_w & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -W & -Y & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -W & * & * & * \\ ZC & ZC & 0 & ZD_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -W & -Y & * & * \\ 3 & 4 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & * \\ \hat{D}C & \hat{D}C & 0 & \hat{D}D_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \tag{14}$$

其中 \hat{A} 和 \hat{B} 由式(5) 确定,则系统 是均方指数稳定且满足式(9) 的性能指标.同时式(7) 的 RFDF 的参数由下式确定:

$$\begin{aligned} \hat{A} &= (W - Y)^{-1} M, \hat{B} = (W - Y)^{-1} Z, \\ \hat{C} &= N, \hat{D} = \hat{D}. \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} C_0^T C_0 + aC_2^T C_2 & C_0^T D_0 + aC_2^T D_2 \\ D_0^T C_0 + aD_2^T C_2 & D_0^T D_0 + aD_2^T D_2 - {}^2 I \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} A_{01}^T P^{\frac{1}{2}} & C_{01}^T \\ B_{01}^T P^{\frac{1}{2}} & D_{01}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{\frac{1}{2}} A_{01} & P^{\frac{1}{2}} B_{01} \\ C_{01} & D_{01} \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} A_2^T P^{\frac{1}{2}} & C_2^T \\ B_2^T P^{\frac{1}{2}} & D_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{\frac{1}{2}} A_2 & P^{\frac{1}{2}} B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \bar{w}(k) \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \bar{w}(k) \end{bmatrix}^T T \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \bar{w}(k) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

利用 Schur 引理,由式(13) 暗示 $T < 0$.再由

$$\begin{aligned} & V_1 = \\ & E\{V(k) - E\{V(0)\} + \\ & E\{r_e(k)^2\} - E\{\bar{w}(k)^2\} < 0, \\ & E\{r_k(e)^2\} < \\ & E\{\bar{w}(k)^2\} + E\{V(0) - E\{V(k)\}\}. \end{aligned}$$

由 $\bar{x}(0) = 0$ 和系统是均方指数稳定,则 $E\{r_e(k)^2\} < E\{\bar{w}(k)^2\}$ 成立.

下面给出 RFDF 设计方法.

定理 3 给定一标量 $\gamma > 0$,测量丢失概率由式(4) 所示的区间表示,如果存在正定对称矩阵 $W \in R^{n \times n}$ 和 $Y \in R^{n \times n}, M \in R^{n \times n}, N \in R^{p \times n}, Z \in R^{n \times p}, \hat{D} \in R^{p \times p}$ 和任意正数 α 满足

证明 采用文献[6] 的方法,取

$$P = \begin{bmatrix} Y & U \\ U^T & \hat{D} \end{bmatrix}, P^{-1} = \begin{bmatrix} X & V \\ V^T & \hat{D} \end{bmatrix}.$$

其中: X 和 Y 是 $R^{n \times n}$ 正定对称阵, U 和 V 是行满秩矩阵, \hat{D} 为任意矩阵,由 $P * P^{-1} = I$ 决定.

构造矩阵 \hat{A}_1, \hat{A}_2 分别为



$$\begin{bmatrix}
 * & * & * & * & * \\
 * & * & * & * & * \\
 * & * & * & * & * \\
 * & * & * & * & * \\
 * & * & * & * & * \\
 -Y & * & * & * & * \\
 0 & -aW & * & * & * \\
 0 & -aW & -aY & * & * \\
 0 & 0 & 0 & -I & * \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -aL
 \end{bmatrix} < 0. \quad (17)$$

则系统均方指数稳定且满足式(9)的性能指标,同时式(7)所示的 RFDF 参数由式(15)确定.

4 仿真例子

考虑式(1)所示的离散系统具有如下的参数:

$$A = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.4 \end{bmatrix}, B_w = \begin{bmatrix} 0.8 \\ -1.1 \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} 0.9 \\ -0.6 \end{bmatrix}, \\
 C = [-1.7 \quad 1.1], D_f = -1.9.$$

4.1 RFDF 性能分析

为了说明所设计的 RFDF 的有效性,本文采用比较的方法,对丢失概率为确定和不确定两种情况下所设计的 FDF 的性能进行比较.概率为确定(不确定)的 FDF 用 $\alpha(\beta)$ 表示.假设在整个丢失概率区间,要设计的 RFDF 的性能指标满足 $\alpha < 1.1$.

当系统为确定性时,设 $\alpha = 0.7$,由式(17),利用 Matlab 的 LMI 工具可得

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 0.1013 & -0.0625 \\ 0.2442 & 0.4057 \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} -0.2340 \\ 0.1753 \end{bmatrix}, \\
 \hat{C} = [0.3054 \quad -0.1786], \hat{D} = -0.1555.$$

当系统为不确定性时,设 $\beta = [0.5, 0.9]$,利用式(5)可得 $\alpha = 0.7, \beta = 0.2$,由式(14)可得

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 1.2646 & 1.0577 \\ -0.5954 & -0.3784 \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} -0.0674 \\ 0.0491 \end{bmatrix}, \\
 \hat{C} = [-0.0060 \quad -0.0032], \hat{D} = -0.0723.$$

这两个 FDF 在不同的丢失概率下,可得到不同的性能指标,见表 1.

表 1 系统在不同丢失概率下的性能指标

β	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
α	2.6898	1.0186	0.9745	1.0099	1.1856
β	0.9944	0.9871	0.9848	0.9871	0.9942

可见,系统为确定性时所设计的 FDF,在丢失概率 $\beta = 0.5$ 和 $\beta = 0.9$ 时的性能不能满足要求;而利用不确定的方法设计的 RFDF 在整个丢失概率区间都能满足性能要求.

4.2 RFDF 故障检测分析

设初始时间 $k_0 = 0$,时间宽度 $N = 100, w(k)$ 为一幅值不超过 0.2,能量为 0.01 的白噪声信号,故障

信号 $f(k)$ 设定为

$$f(k) = \begin{cases} 1, & k = 40, \dots, 60; \\ 0, & \text{others.} \end{cases}$$

当 $\beta = 0.9$ 时的随机参数 $\alpha(k)$,残差输出 $r(k)$ 和 $J(r, k)$ 的变化规律分别由图 1 ~ 图 3 表示,根据式(10),求得 $J_{th} = 0.4403, J(r, 43) = 0.5304 > J_{th}$.可见,当 t 在故障发生之后 3 个时间周期,RFDF 便能检测出故障.

当 $\beta = 0.5$ 时的随机参数 $\alpha(k)$,残差输出 $r(k)$ 和 $J(r)$ 的变化规律同图 1 ~ 图 3,因篇幅所限省略,求得 $J_{th} = 0.2973, J(r, 44) = 0.4034 > J_{th}$.可见,当 t 在故障发生之后 4 个时间周期,RFDF 便能检测出故障.

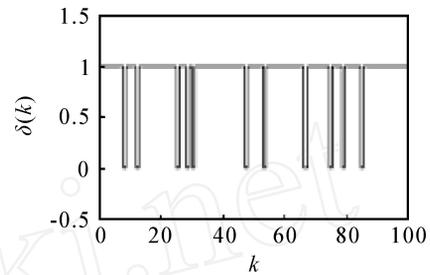


图 1 $\delta(k)$ 变化规律

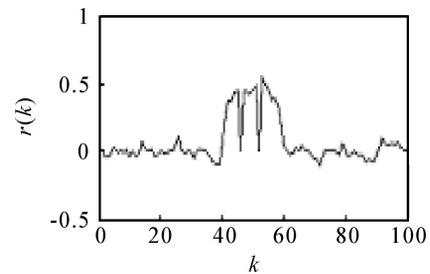


图 2 $r(k)$ 信号

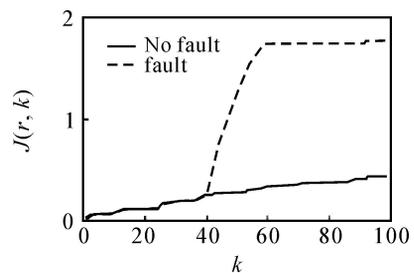


图 3 $J(r, k)$ 信号

5 结 论

本文研究了一类测量信号丢失概率属于一个数值区间的网络化系统的故障检测问题.通过规范化,此问题可归结为一个不确定系统的鲁棒 H_∞ 滤波器设计问题,用一个线性矩阵不等式(LMI)反映出此 RFDF 的稳定性和满足一定 H_∞ 性能指标.仿真例子说明了方法的有效性.

(下转第 904 页)

粗糙集的理论研究具有重要意义.在此基础上,推导了直觉模糊粗糙集模型,证明了模糊 T 粗糙集、粗糙模糊集和 Pawlak 粗糙集都是直觉模糊粗糙集的特殊情形,因此直觉模糊粗糙集能处理更加一般的数据,应用的范围更广,具有广阔的应用前景.最后证明了直觉模糊粗糙集的性质.

参考文献(References)

- [1] Pawlak Z. Rough sets [J]. Int J of Information Computer Science, 1982, 11(5): 341-356.
- [2] Dubois D, Prade H. Rough sets and fuzzy rough sets [J]. Int J of General Systems, 1990, 17(2/3): 191-209.
- [3] Nanda S, Majumdar S. Fuzzy rough sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 45(2): 157-160.
- [4] Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.
- [5] Atanassov K. More on intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1989, 33(1): 37-44.
- [6] 雷英杰, 王宝树. 直觉模糊关系及其合成运算[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(2): 113-118.
- (Lei YJ, Wang B S. On the intuitionistic fuzzy relations with compositional operations[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2005, 25(2): 113-118.)
- [7] Chris Cornelis, Martine De Cock, Etienne Ekerre. Intuitionistic fuzzy rough sets: At the crossroads of imperfect knowledge[J] Expert Systems, 2003, 20(5): 260-270.
- [8] 张文修, 吴伟志, 梁吉业, 等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
(Zhang W X, Wu W Z, Liang J Y. Rough sets theory and methods [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2006.)
- [9] Glad Deschrijver, Etienne E Kerre. Implicators based on binary aggregation operators in interval-valued fuzzy set theory[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 49(9): 229-248.
- [10] Salvatore Greco, Masahiro Inuiguchi, Roman Slowinski. Fuzzy rough sets and multiple-premise gradual decision rules [J]. Int J of Approximate Reasoning, 2006, 41(2): 179-211.

(上接第 899 页)

参考文献(References)

- [1] Zhang P, Ding S X, Frank P M. Fault detection of networked control systems with missing measurements [C]. Proc of the 5th Asian Control Conf. New York: IEEE Press, 2004: 1258-1263.
- [2] Zhong M, Han Q. Fault detection filter design for a class of networked control systems[C]. Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. New York: IEEE Press, 2006: 215-219.
- [3] Wang Z, Yang F, Ho D W C, et al. Robust filtering-horizon for stochastic systems with missing measurements[J]. IEEE Signal Process Lett, 2005, 12(6): 437-440.
- [4] Wang W, Yang F. H filter design for discrete-time systems with missing measurements [J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(1): 107-111.
- [5] Yang F, Wang Z, Hung Y S, et al. H control for networked systems with random communication delays [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(3): 511-518.
- [6] 王武, 杨富文. 具有随机通讯时延的离散网络化系统的 H 滤波器设计[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(1): 1-6.
(Wang W, Yang F W. H filter designing for discrete-time networked systems with random communication delays[J]. Control Theory and Applications, 2007, 24(1): 1-6.)
- [7] Xie L. Output feedback H control of systems with parameter uncertainty [J]. Int J of Control, 1996, 63(4): 741-750.