

基于区间观测器的执行器故障检测

郭胜辉^{1,2}, 朱芳来¹

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 苏州科技学院 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 针对同时具有未知非线性函数(包括系统不确定性、外部干扰等)和执行器故障的非线性系统, 提出基于区间观测器的故障检测方法. 首先, 在假定执行器故障不出现的前提下, 基于未知非线性函数的上下界信息, 提出两种区间观测器设计方法; 然后, 利用这两种区间观测器的输出和系统的真实输出, 构造可以对执行器故障进行检测的残差, 以此实现基于区间观测器的执行器故障检测. 最后, 通过两个仿真例子验证了所提出方法的正确性和有效性.

关键词: 区间观测器; 离散系统; 故障检测

中图分类号: TP13

文献标志码: A

Actuator fault detection based on interval observers

GUO Sheng-hui^{1,2}, ZHU Fang-lai¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China. Correspondent: ZHU Fang-lai, E-mail: zhufanglai@tongji.edu.cn)

Abstract: For the problems of actuator fault detection based on interval observers for a class of nonlinear systems subjected to the unknown nonlinear function (including the system uncertainty, the external disturbance, etc). Firstly, for the system without actuator fault, based on the known boundary information of the unknown nonlinear term, two interval observers are developed. Then, the residual errors that can be used for detecting the actuator fault are constructed by using the outputs of interval observers and those of systems. Thus, the problems of actuator fault detection based on interval observers are resolved. Finally, two numerical simulation examples are given to illustrate the correctness and the effectiveness of the proposed methods.

Keywords: interval observers; discrete-time system; fault detection

0 引言

区间观测器是指基于原系统的可测信息, 构造一个可以估计原系统状态 $x(t)$ 的上界 $x^+(t)$ 和下界 $x^-(t)$ 的系统, 使得对于任何 $t \geq 0$, 都有 $x^-(t) \leq x(t) \leq x^+(t)$. 区间观测器最早提出是在本世纪初, 由于其对系统和干扰都只有区间有界的限制条件, 作为传统鲁棒状态观测器的补充, 逐渐成为观测器设计领域中新的研究热点, 并已经在诸如生物技术领域中取得了很好的应用^[1-3]. 目前, 关于区间观测器设计的研究还方兴未艾^[4-11]. 文献[4]和文献[5]分别针对含有有界干扰的连续和离散线性时不变系统, 基于约当标准型, 并借助于线性时变变换, 研究了区间观测器设计方法; 文献[6]和文献[7]分别针对连续和离散系统, 基于 Sylvester 方程, 并借助于线性时不变变换, 研究了区

间观测器设计方法, 同时基于可观测标准型, 给出了一种简单的变换形式; 文献[8]对基于区间观测器的系统控制策略进行了研究.

故障检测和隔离(FDI)技术作为提升系统可靠性、降低事故风险的有效的方法, 在过去的几十年中, 得到了国内外学者的广泛关注^[12-14]. 其中, 在各种基于模型的 FDI 中, 基于观测器的 FDI 技术逐渐成为最有实用性的方法之一^[15-22]. 但基于传统观测器的 FDI 具有一定的局限性, 如针对干扰, 具有较多的限制, 不仅要求有界, 有些方法还要求满足很严格的所谓的观测器匹配条件; 又如, 如果处理的是除线性参数变化(LPV)或(T-S)模糊模型以外描述的非线性系统, 通常假设非线性项满足 Lipschitz 条件, 有些设计还要求 Lipschitz 常数已知, 且不能太大. 事实上, 很多常见

收稿日期: 2015-05-22; 修回日期: 2015-08-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573256); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110072110015).

作者简介: 郭胜辉(1983-), 男, 博士生, 从事观测器、故障检测与重构的研究; 朱芳来(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 从事观测器、故障检测等研究.

的函数并不满足 Lipschitz 条件, 如 x^3 、 e^x 等. 因此, 现有的基于传统观测器的 FDI 研究成果还并不完善. 同时注意到, 借助于区间观测器进行故障检测的文献还鲜有报道.

基于此, 本文借助于区间观测器, 讨论了非线性系统的故障检测问题. 本文的创新点体现在: 提出了基于区间观测器进行故障检测的思想; 相比于基于传统观测器的 FDI 方法, 所提出的方法不再对非线性项的类型、匹配条件等作限制.

1 系统描述

为了便于后面叙述, 先给出如下的说明和定义.

文中向量(矩阵)比较均指将对应元素进行比较. 即, 对于两个同维向量 $x_1 = [x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,n}]^T$ 和 $x_2 = [x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,n}]^T$, 符号 $x_1 \geq x_2$ ($x_1 > x_2$) 是指将向量 x_1 和向量 x_2 中所有对应元素作比较, 有 $x_{1,i} \geq x_{2,i}$ ($x_{1,i} > x_{2,i}$), $i = 1, 2, \dots, n$; 对于两个同维矩阵 $A, B \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 符号 $A \geq B$ ($A > B$) 是指将矩阵 A 和 B 所有对应元素作比较, 有 $a_{i,j} \geq b_{i,j}$ ($a_{i,j} > b_{i,j}$), $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n$.

定义 1 若矩阵 $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 的谱半径小于 1, 则称 A 为 Schur 矩阵; 若矩阵 $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 所有元素均为非负的, 则称 A 为非负矩阵.

考虑如下离散系统:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Dg(k) + Ef(k), \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: 系统状态 $x(k) \in \mathbf{R}^n$, 控制输入 $u(k) \in \mathbf{R}^m$, 可测输出 $y(k) \in \mathbf{R}^p$, 有界执行器故障(也可以是系统的过程故障) $f(k) \in \mathbf{R}^r$. 因为对非线性项和外部干扰均作有界假设, 故以 $g(k) \in \mathbf{R}^q$ 代表有界但形式未知的非线性项和外部干扰, 并统称之为非线性函数. 各系数矩阵均为适当维数的矩阵.

假设 1 对于初始状态 $x(0)$, 存在向量 $x^-(0)$, $x^+(0) \in \mathbf{R}^n$, 满足 $x^-(0) \leq x(0) \leq x^+(0)$; 对于非线性函数 $g(k)$, 存在向量 $g^-, g^+ \in \mathbf{R}^q$, 满足 $g^- \leq g(k) \leq g^+$.

假设 2 系统 (A, C) 可观测.

引理 1^[7] 对于离散系统

$$x(k+1) = Ax(k) + d(k),$$

若有 $x(0) \geq 0$, 则对于任意 $k \geq 0$, 必有 $x(k) \geq 0$. 其中: $x(k) \in \mathbf{R}^n, d: \mathbf{Z}_+ \rightarrow \mathbf{R}_+^n, A \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是非负矩阵.

2 执行器故障检测

本节设计对执行器故障敏感的全维区间观测器, 然后利用区间观测器的估计输出和系统的实际输出提出一种执行器故障检测方法.

2.1 区间观测器 1

若 A 是 Schur 常数矩阵, 且满足 $A \geq 0$ 或 $A \leq 0$, 则可以直接设计区间观测器为

$$\begin{cases} x^+(k+1) = A_1x^+(k) + A_2x^-(k) + Bu(k) + D^+g^+ - D^-g^-, \\ x^-(k+1) = A_1x^-(k) + A_2x^+(k) + Bu(k) + D^+g^- - D^-g^+. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $A_1 = \max\{0, A\}, A_2 = A - A_1, D^+ = \max\{0, D\}, D^- = D^+ - D$. 显然, $A_1 \geq 0, A_2 \leq 0, D^+ \geq 0, D^- \geq 0$.

定理 1 若 A 是 Schur 常数矩阵, 且满足 $A \geq 0$ 或 $A \leq 0$, 则系统(2)就是系统(1)不存在执行器故障时的区间观测器. 即当 $f(k) \equiv 0$ 时, 对于任意 $k \geq 0$, 有 $x^-(k) \leq x(k) \leq x^+(k)$.

证明 定义上界误差为 $\tilde{x}^+(k) = x^+(k) - x(k)$, 下界误差 $\tilde{x}^-(k) = x(k) - x^-(k)$, 整理后得

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}^+(k+1) \\ \tilde{x}^-(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & -A_2 \\ -A_2 & A_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}^+(k) \\ \tilde{x}^-(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D^+(g^+ - g(k)) + D^-(g(k) - g^-) \\ D^+(g(k) - g^-) + D^-(g^+ - g(k)) \end{bmatrix}.$$

1) 若 A 是 Schur 常数矩阵, 且满足 $A \geq 0$, 则 $A_1 = A, A_2 = 0, \begin{bmatrix} A_1 & -A_2 \\ -A_2 & A_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix}$, 其谱半径与 A 相同, 因此是 Schur 且非负常数矩阵. 对于 A 是 Schur 常数矩阵, 且满足 $A \leq 0$, 证明过程类似.

2) 同时, $D^+ \geq 0, D^- \geq 0$, 且 $g^- \leq g(k) \leq g^+$, 显然有

$$\begin{bmatrix} D^+(g^+ - g(k)) + D^-(g(k) - g^-) \\ D^+(g(k) - g^-) + D^-(g^+ - g(k)) \end{bmatrix} \geq 0.$$

又 $x^-(0) \leq x(0) \leq x^+(0)$, 故 $\tilde{x}^+(0) = x^+(0) - x(0) \geq 0, \tilde{x}^-(0) = x(0) - x^-(0) \geq 0$. 由引理 1 可知, 对于任意 $k \geq 0$, 都有

$$\tilde{x}^+(k) = x^+(k) - x(k) \geq 0,$$

$$\tilde{x}^-(k) = x(k) - x^-(k) \geq 0,$$

也即 $x^-(k) \leq x(k) \leq x^+(k)$. \square

2.2 区间观测器 2

若 A 是 Schur 常数矩阵, 但不满足定理 1 中的条件, 对系统(1)进行变换 $\sigma(k) = Tx(k)$, 其中可逆矩阵 $T \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 则系统(1)可以变为

$$\begin{cases} \sigma(k+1) = \\ TAT^{-1}\sigma(k) + TBu(k) + TDg(k) + TEf(k), \\ y(k) = CT^{-1}\sigma(k). \end{cases} \quad (3)$$

设计区间观测器如下:

$$\begin{cases} \sigma^+(k+1) = TAT^{-1}\sigma^+(k) + TBu(k) + \\ \quad TL(y - CT^{-1}\sigma^+(k)) + \\ \quad (TD)^+g^+ - (TD)^-g^-, \\ \sigma^-(k+1) = TAT^{-1}\sigma^-(k) + TBu(k) + \\ \quad TL(y - CT^{-1}\sigma^-(k)) + \\ \quad (TD)^+g^- - (TD)^-g^+. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $(TD)^+ = \max\{0, TD\}$, $(TD)^- = (TD)^+ - TD$. 显然, $(TD)^+ \geq 0$, $(TD)^- \geq 0$.

定理 2 当取 $\sigma^-(0) = \min\{Tx^-(0), Tx^+(0)\}$, $\sigma^+(0) = \max\{Tx^-(0), Tx^+(0)\}$ 时, 系统 (4) 是系统 (3) 不存在执行器故障时的区间观测器, 即当 $f(k) \equiv 0$ 时, 对于任意 $k \geq 0$, 有 $\sigma^-(k) \leq \sigma(k) \leq \sigma^+(k)$.

证明 定义上界误差为 $\tilde{\sigma}^+(k) = \sigma^+(k) - \sigma(k)$, 由式 (3) 和 (4) 易得

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}^+(k+1) &= \\ &TAT^{-1}\sigma^+(k) + TL(y - CT^{-1}\sigma^+(k)) + \\ &(TD)^+g^+ - (TD)^-g^- - TAT^{-1}\sigma(k) - TDg(k) = \\ &T(A - LC)T^{-1}\tilde{\sigma}^+(k) + (TD)^+g^+ - \\ &(TD)^-g^- - TDg(k) = \end{aligned}$$

$$\Im\tilde{\sigma}^+(k) + (TD)^+(g^+ - g(k)) + (TD)^-(g(k) - g^-),$$

其中 $\Im = T(A - LC)T^{-1}$ 是选取的 Schur 且非负矩阵. 类似地, 定义下界误差为 $\tilde{\sigma}^-(k) = \sigma(k) - \sigma^-(k)$, 有

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}^-(k+1) &= \\ &\Im\tilde{\sigma}^-(k) + (TD)^+(g(k) - g^-) + \\ &(TD)^-(g^+ - g(k)). \end{aligned}$$

由于 $(TD)^+ \geq 0$, $(TD)^- \geq 0$, 且 $g^- \leq g(k) \leq g^+$, 有

$$(TD)^+(g^+ - g(k)) + (TD)^-(g(k) - g^-) \geq 0,$$

$$(TD)^+(g(k) - g^-) + (TD)^-(g^+ - g(k)) \geq 0.$$

再取 $\sigma^-(0) = \min\{Tx^-(0), Tx^+(0)\}$, $\sigma^+(0) = \max\{Tx^-(0), Tx^+(0)\}$, 有 $\sigma^-(0) \leq \sigma(0) \leq \sigma^+(0)$. 由引理 1 可得, 对于任意 $k \geq 0$, $\tilde{\sigma}^+(k) = \sigma^+(k) - \sigma(k) \geq 0$ 和 $\tilde{\sigma}^-(k) = \sigma(k) - \sigma^-(k) \geq 0$, 即有 $\sigma^-(k) \leq \sigma(k) \leq \sigma^+(k)$. \square

由于 T 是可逆矩阵, 由 $\Im = T(A - LC)T^{-1}$ 可以建立 Sylvester 方程如下:

$$TA - \Im T = SC, \quad TL = S. \quad (5)$$

式 (5) 可以借助于 Matlab 工具简单地算出. \Im 通常可以简单地选为对角矩阵, 当矩阵 A 和所选矩阵 \Im 没有共同的特征值时, 则方程 (5) 对任意 S 有唯一解 T 和 L . 关于更多选取 T 和 L 的方法, 可参见文献 [6-7].

基于以上结论, 当系统不存在执行器故障时, 可以对系统 (1) 设计另一种区间观测器为

$$\begin{cases} x^+(k) = \max\{T^{-1}\sigma^+(k), T^{-1}\sigma^-(k)\}, \\ x^-(k) = \min\{T^{-1}\sigma^+(k), T^{-1}\sigma^-(k)\}. \end{cases} \quad (6)$$

注 1 对比两种区间观测器可以看出, 前一种, 即区间观测器 (2), 并不包含系统的输出信息, 说明第一种区间观测器对输出通道含有的噪声是鲁棒的. 同时, 由于区间观测器 (2) 并非反馈结构, 假设 2 在某些情况下也可以不存在.

综上, 当系统不存在执行器故障时, 可以定义区间观测器的输出区间为

$$\begin{cases} y^+(k) = \max\{Cx^+(k), Cx^-(k)\}, \\ y^-(k) = \min\{Cx^+(k), Cx^-(k)\}, \end{cases}$$

则系统的真实输出应满足 $y^-(k) \leq y(k) \leq y^+(k)$. 当系统出现执行器故障时, 这一关系将被破坏. 因而, 如果定义观测器输出误差 $e_y^+ = y(k) - y^+(k)$ 和 $e_y^- = y^-(k) - y(k)$, 经由如下的逻辑判断, 所提出的区间观测器 (2) 或 (6) 可以用作系统 (1) 的执行器故障检测器:

1) 若 $e_y^+ > 0$ 或 $e_y^- > 0$, 则系统 (1) 发生执行器故障;

2) 若 $e_y^+ \leq 0$ 且 $e_y^- \leq 0$, 则系统 (1) 无执行器故障.

3 仿 真

为了证明所提出方法的有效性, 本节举例进行仿真分析.

例 1 考虑系统 (1) 具有如下参数:

$$A = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.04 & 0.06 \\ 0.15 & 0.25 & 0.15 \\ 0.13 & 0.17 & 0.63 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ -0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ -0.5 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$g(k) = 0.5e^{\frac{k+1}{k+1}}.$$

假设控制输入和执行器故障分别为

$$u(k) = \begin{cases} 1.8 \sin(0.2k), & 0 \leq k < 30; \\ 0, & 30 \leq k < 60; \\ 1.2 \cos(0.2k), & 60 \leq k < 80; \\ 0, & 80 \leq k < 100; \end{cases}$$

$$f(k) = \begin{cases} 0, & 0 \leq k < 30; \\ 2.5, & 30 \leq k < 60; \\ 0, & 60 \leq k < 80; \\ 2.8 \sin(k), & 80 \leq k < 100. \end{cases}$$

注 2 显然, 非线性部分 $g(k)$ 不再满足 Lipschitz 条件, 且有 $\text{rank}(CD) \neq \text{rank}D$, 即未知输入观测器中

常见的匹配条件也不满足. 同时注意到, $g(k)$ 的范围为 $(0.5, 0.5e]$, 即存在上界 $0.5e$ 和下界 0.5 .

由于 A 是 Schur 常数矩阵, 且满足定理 1 的条件, 可以直接设计区间观测器 (2). 图 1 所示为不含执行器故障时, 系统状态区间估计.

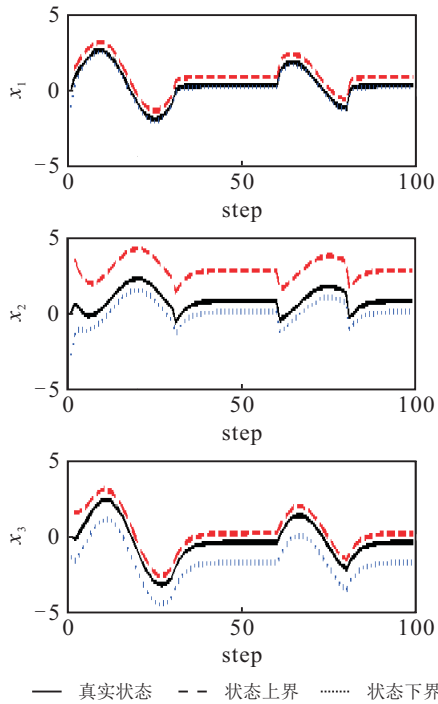


图 1 例 1 状态区间估计 (不含故障)

由图 1 可知, 任意时刻都有 $x_i^-(k) \leq x_i(k) \leq x_i^+(k)$, $i = 1, 2, 3$. 所提出的区间观测器 (2) 实现了系统状态的区间估计.

图 2 所示为有执行器故障时的观测器输出误差, 由假设条件可知, 常值故障出现在 $30 \leq k < 60$ 区间, 正弦故障出现在 $80 \leq k < 100$ 区间.

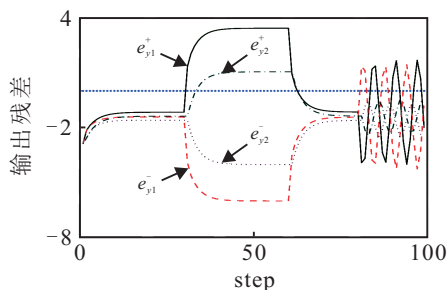


图 2 例 1 故障检测

由图 2 可知, 在这两个区间分别有 $e_y^+ > 0$ 或 $e_y^- > 0$, 并且正弦故障幅值变化的特点也能体现出来, 故障检测观测器达到了故障检测的目的.

例 2 将矩阵 A 改为

$$A = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.04 & 0.06 \\ 0.15 & 0.25 & 0.15 \\ 0.13 & -0.17 & -0.63 \end{bmatrix},$$

其他参数不变. 此时, 由于 A 不是非负矩阵, 对系统进行变换后, 设计区间观测器 (4), 选取 Schur 且非负矩阵和 S 分别为

$$\mathfrak{S} = \begin{bmatrix} 0.2670 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1146 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6116 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

代入式 (5) 并求解, 可得

$$T = 10^4 \times \begin{bmatrix} -0.5756 & -0.3623 & -0.0992 \\ -1.8325 & 0.4772 & -0.0517 \\ -0.0003 & -0.0002 & -0.0002 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 0.0486 & 0.0487 \\ 0.1119 & 0.1122 \\ -0.6918 & -0.6922 \end{bmatrix}.$$

图 3 所示为不含执行器故障时系统状态区间估计效果, 图 4 所示为执行器故障检测效果. 可以看出, 效果均是令人满意的.

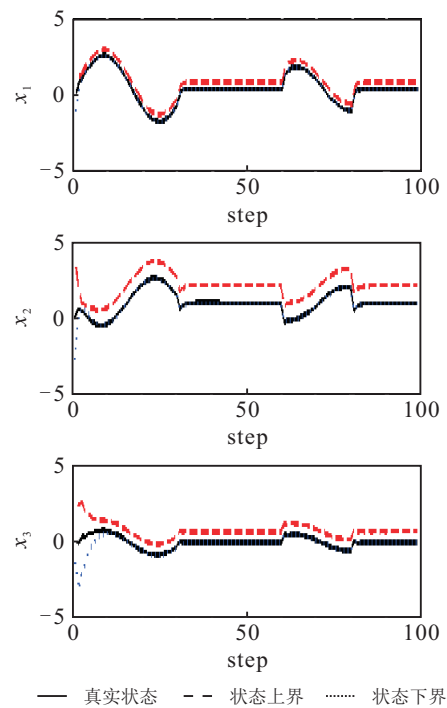


图 3 例 2 状态区间估计 (不含故障)

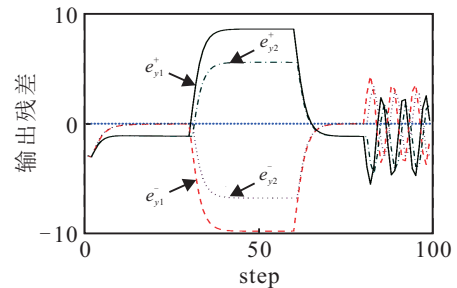


图 4 例 2 故障检测

4 结 论

本文针对未知非线性系统讨论了基于区间观测器的执行器故障检测问题. 分情况提出了两种对执行

器故障敏感、对未知非线性函数鲁棒的区间观测器作为执行器故障检测器,通过比较系统的真实输出和区间观测器的输出,完成对执行器故障的检测. 仿真实验验证了所提出方法的正确性和有效性. 区间观测器的设计需要知道非线性部分的上下限,体现了其应用的局限性. 同时,对于区间的大小目前还没有合理的解释和研究,这些都是值得进一步研究的课题.

参考文献(References)

- [1] Gouzé J L, Rapaport A, Hadj-Sadok M Z. Interval observers for uncertain biological systems[J]. *Ecological Modelling*, 2000, 133(1): 45-56.
- [2] Bernard O, Gouzé J L. Closed loop observers bundle for uncertain biotechnological models[J]. *J of Process Control*, 2004, 14(7): 765-774.
- [3] Moisan M, Bernard O, Gouzé J L. Near optimal interval observers bundle for uncertain bioreactors[J]. *Automatica*, 2009, 45(1): 291-295.
- [4] Mazenc F, Bernard O. Interval observers for linear time-invariant systems with disturbances[J]. *Automatica*, 2011, 47(1): 140-147.
- [5] Mazenc F, Dinh T N, Niculescu S I. Interval observers for discrete-time systems[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2014, 24(17): 2867-2890.
- [6] Raissi T, Efimov D, Zolghadri A. Interval state estimation for a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2012, 57(1): 260-265.
- [7] Efimov D, Perruquetti W, Raissi T, et al. Interval observers for time-varying discrete-time systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2013, 58(12): 3218-3224.
- [8] Efimov D, Raissi T, Zolghadri A. Control of nonlinear and LPV systems: Interval observer-based framework[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2013, 58(3): 773-778.
- [9] Efimov D, Fridman L, Raissi T, et al. Interval estimation for lpv systems applying high order sliding mode techniques[J]. *Automatica*, 2012, 48(9): 2365-2371.
- [10] Meseguer J, Puig V, Escobet T, et al. Observer gain effect in linear interval observer-based fault detection[J]. *J of Process Control*, 2010, 20(8): 944-956.
- [11] Moisan M, Bernard O. Robust interval observers for global Lipschitz uncertain chaotic systems[J]. *Systems & Control Letters*, 2010, 59(11): 687-694.
- [12] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术[J]. *自动化学报*, 2009, 35(6): 748-758.
(Zhou D H, Hu Y Y. Fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 748-758.)
- [13] Chen J, Patton R J. *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*[M]. New York: Springer Science Business, 2012: 1-7.
- [14] 贾庆贤, 张迎春, 管宇, 等. 基于解析模型的非线性系统故障诊断方法综述[J]. *信息与控制*, 2012, 41(3): 356-364.
(Jia Q X, Zhang Y C, Guan Y, et al. Fault diagnosis of nonlinear systems based on analytical models: A survey[J]. *Information and Control*, 2012, 41(3): 356-364.)
- [15] 胡志坤, 孙岩, 姜斌, 等. 一种基于最优未知输入观测器的故障诊断方法[J]. *自动化学报*, 2013, 39(8): 1225-1230.
(Hu Z K, Sun Y, Jiang B, et al. An optimal unknown input observer based fault diagnosis method[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(8): 1225-1230.)
- [16] Zhang Z, Jaimoukha I M. On-line fault detection and isolation for linear discrete-time uncertain systems[J]. *Automatica*, 2014, 50(2): 513-518.
- [17] 朱芳来, 岑峰, 董学平. 一种基于全维和降维观测器的故障检测和重构方法[J]. *控制与决策*, 2011, 26(2): 258-262.
(Zhu F L, Cen F, Dong X P. A kind of fault detection and fault reconstruction based on full-order and reduced-order observers[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(2): 258-262.)
- [18] 杨俊起, 朱芳来. 基于高增益鲁棒滑模观测器的故障检测和隔离[J]. *自动化学报*, 2012, 38(12): 2005-2013.
(Yang J Q, Zhu F L. FDI based on high-gain robust sliding mode observers[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(12): 2005-2013.)
- [19] Zhu F, Yang J. Fault detection and isolation design for uncertain nonlinear systems based on full-order, reduced-order and high-order high-gain sliding-mode observers[J]. *Int J of Control*, 2013, 86(10): 1800-1812.
- [20] Kulcsar B, Verhaegen M. Robust inversion based fault estimation for discrete-time LPV systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2012, 57(6): 1581-1586.
- [21] Zhang K, Jiang B, Shi P. Fault estimation observer design for discrete-time Takagi - Sugeno fuzzy systems based on piecewise Lyapunov functions[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2012, 20(1): 192-200.
- [22] Wang Z, Shen Y, Zhang X. Actuator fault estimation for a class of nonlinear descriptor systems[J]. *Int J of Systems Science*, 2014, 45(3): 487-496.
- [23] Floquet T, Barbot J P. State and unknown input estimation for linear discrete-time systems[J]. *Automatica*, 2006, 42(11): 1883-1889.

(责任编辑: 齐 霁)