

文章编号: 1001-0920(2007)05-0510-05

不确定动态系统的执行器故障检测与重构

赵 瑾^{1,2}, 顾幸生¹, 申忠宇²

(1. 华东理工大学 信息科学与工程学院, 上海 200237; 2. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 南京 210042)

摘 要: 讨论不确定动态系统的执行器故障检测与重构问题. 以滑模观测器为基础, 利用状态和输出变换方法与奇异值分解方法相结合对系统进行降阶, 提出一种鲁棒故障重构观测器. 给出了优化滑模策略, 并作了严格论证, 保证对系统不确定性具有鲁棒性和跟踪系统状态的收敛性. 应用等价输出控制的概念和设计的鲁棒故障重构观测器, 获取故障信息并实现执行器故障的检测与重构. 最后通过数值仿真验证了该方法的有效性和可靠性.

关键词: 执行器故障; 鲁棒故障重构观测器; 等价输出控制

中图分类号: TP206.3

文献标识码: A

Actuator fault detection and reconstruction in the uncertain dynamical system

ZHAO Jin^{1,2}, GU Xing-sheng¹, SHEN Zhong-yu²

(1. School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China. Correspondent: GU Xing-sheng, E-mail: xsgu@ecust.edu.cn)

Abstract: The problems of actuator fault detection and reconstruction in the uncertain dynamical systems are considered. Based on the sliding-model observers, the state and output transformation is combined with singular value decomposition to decompose the dynamical system. A robust fault reconstructing observer is presented. An optimizing sliding-model strategy is given, and the strict verification is done to guarantee the robustness for uncertainties of systems and the convergence rate. Actuator fault is detected and reconstructed by applying the designed robust fault reconstructing observer and the equivalence output control concept. Numerical simulation results show the effectiveness and reliability of the proposed approach.

Key words: Actuator fault; Robust fault reconstructing observer; Equivalence output control

1 引言

故障检测与诊断(FDD)是控制领域的重要分支之一,受到广泛的关注.基于观测器的故障检测与诊断技术及其应用是当前活跃的研究课题之一,并已取得了一系列成果^[1-7].目前常见的方法包括:Luenberger 观测器^[1]、未知输入观测器^[2,4]、自适应观测器^[5]、滑模观测器^[6,7]等.滑模观测器是一种非线性观测器,利用其固有的鲁棒性克服系统模型的不确定性或非线性,通过引入等价输出控制方法维持滑模运动,从而获取故障信息,达到重构故障的目的.

本文首先以滑模观测器为基础,将状态和输出

变换方法与奇异值分解方法相结合,对动态系统进行降阶处理,提出一种鲁棒故障重构观测器;然后采用新的优化滑模策略,确保故障诊断系统对模型不确定性因素以及外界干扰等具有鲁棒性;再后应用等价输出控制来维持滑模运动,从而获取故障信息,实现执行器故障的检测与重构;最后通过数值仿真实例加以验证.

2 系统描述

在执行器故障情况下,不确定动态系统可描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + d(t, x, u) + Ff_u, \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2006-02-20; 修回日期: 2006-04-10.

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金项目(2004113TSJB142); 上海市科委重大科技攻关项目(04dz11008).

作者简介: 赵瑾(1961—),女,浙江诸暨人,副教授,博士生,从事故障诊断技术、智能化和网络化控制的研究;顾幸生(1960—),男,江苏海门人,教授,博士生导师,从事生产计划与调度、故障检测与诊断等研究.

其中： $x(t) \in R^n, u(t) \in R^m, y(t) \in R^p; d(x, u, t)$ 表示系统的不确定性或非线性； $f_u \in R^q$ 表示执行器故障，且有 $n > p > m \geq q$ ；矩阵 B, C, F 满秩。

本文讨论匹配不确定动态系统的执行器故障的检测与重构，因此系统须满足下列假设条件^[8,9]：

假设 1 以 $d(x, u, t)$ 表示系统的匹配不确定性，即 $d(x, u, t) = B\Delta(t)$ 。其中 $\Delta(t)$ 范数有界，即 $\Delta(t) \leq \kappa_1, \kappa_1$ 为一正数。

假设 2 (A, C) 可观测，且 Markov 参数 C 和 B 满秩。

假设 3 执行器故障 f_u 范数有界，则存在正数 κ_2 ，使得 $f_u \leq \kappa_2$ ，且 $\text{rank}(CF) = \text{rank}(F) = q$ 。

假设 4 $\text{rank} \begin{bmatrix} A - \lambda I & F \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + \text{rank}(F)$ 。

在假设条件 1 ~ 3 下，将文献[9-11]提出的状态和输出变换方法与奇异值分解方法相结合，得到非奇异变换阵 T 并应用于系统(1)，使原系统 (A, B, C, F) 在 T 变换作用下，得到

$$\overline{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \overline{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \\ \overline{C} = [0 \quad I_p], \overline{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_2 \end{bmatrix}.$$

其中： $A_{11} \in R^{(n-p) \times (n-p)}, A_{22} \in R^{p \times p}, B_1 \in R^{(n-p) \times m}, B_2 \in R^{p \times m}, F_2 \in R^{p \times q}; A_{11}$ 具有稳定的极点。

此时系统(1) 可写成如下形式：

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}x_2(t) + B_1(u(t) + \Delta(t)), \\ \dot{x}_2(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}x_2(t) + B_2(u(t) + \Delta(t)) + F_2f_u(t), \\ y(t) = x_2(t). \end{cases} \tag{2}$$

其中： $x_1 \in R^{n-p}, x_2 = y \in R^p$ 。

3 故障检测与重构

3.1 鲁棒故障重构观测器设计与研究

滑模观测器的设计原理是将变结构理论引入状态观测器的设计，利用滑模本身固有的鲁棒性以及注入的非线性不连续项(即滑模策略)，使估计误差轨迹维持在误差空间等特点，确保估计误差系统对非线性 / 不确定性的鲁棒性，并使设计的滑模观测器能渐近估计系统的状态。

设定动态系统(1) 中的 $f_u = 0$ ，并且满足假设 1 和假设 2。设计的滑模观测器的形式为^[9]

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - L_1(\hat{y}(t) - y(t)) + L_n v_p, \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t). \end{cases} \tag{3}$$

其中： $L_1, L_n \in R^{n \times p}$ 为鲁棒滑模观测器的待定线性反馈矩阵和非线性反馈矩阵； v_p 是设计滑模观测器的滑模策略，以确保滑模运动。

设系统状态估计误差 $e = \hat{x}(t) - x(t)$ ，输出估计误差 $e_y = \hat{y}(t) - y(t)$ 。结合式(1) 和(3) 可得偏差系统

$$\dot{e}(t) = (A - L_1C)e(t) - B\Delta(t) + L_nv_p. \tag{4}$$

引理 1^[12] 对于动态不确定系统(1)，存在满足 Lyapunov 方程解的对称正定矩阵 $P \in R^{n \times n}$ ，以及矩阵 $L_1 \in R^{n \times p}, G \in R^{q \times p}$ ，使得

$$\begin{cases} P(A - L_1C) + (A - L_1C)^T P < 0, \\ F^T P = GC. \end{cases} \tag{5}$$

证明参见文献[12]。

以滑模观测器设计原理为基础，对经过非奇异变换的动态系统(2)，提出如下鲁棒故障重构观测器：

$$\begin{cases} \dot{z}_1(t) = A_{11}z_1(t) + A_{12}z_2(t) + B_1u(t) - A_{12}e_y(t) + v_p, \\ \dot{z}_2(t) = A_{21}z_1(t) + A_{22}z_2(t) + B_2u(t) - (A_{22} - A_{22}^s)e_y(t) + P_2^{-1}v_p. \end{cases} \tag{6}$$

其中： z_1 和 z_2 分别为状态 x_1 和 y 的估计值， $A_{22}^s \in R^{p \times p}$ 为适当维数的任意稳定矩阵。

相对于观测器(3)，鲁棒故障重构观测器的线性反馈矩阵和非线性反馈矩阵 L_1 和 L_n ，在原系统(1) 下的形式分别为

$$L_1 = T^{-1} \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} - A_{22}^s \end{bmatrix}, L_n = T^{-1} \begin{bmatrix} I_{(n-p) \times p} \\ P_2^{-1} \end{bmatrix}. \tag{7}$$

设计鲁棒故障重构观测器的滑模策略 v_p 为 $s = P_2 e_y$ ，其中 $P_2 \in R^{p \times p}$ 为 A_{22}^s 的 Lyapunov 方程的唯一对称正定解

$$P_2 A_{22}^s + (A_{22}^s)^T P_2 = -Q_2. \tag{8}$$

优化设计的滑模策略为

$$v_p = \begin{cases} -\rho P_2 \frac{P_2 C L_n e_y}{P_2 C L_n e_y} (B_2 \xi_1 - F_2 \xi_2), & P_2 e_y \neq 0; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{9}$$

其中： ρ 为修正系数，且 $0 < \rho \leq 1; \xi_1 \geq \kappa_1, \xi_2 \geq \kappa_2$ 为设计参数；定义状态估计误差 $e_1(t) = z_1(t) - x_1(t)$ ，输出估计误差 $e_y = z_2(t) - y(t)$ 。结合式(2) 和(6) 可得状态和输出的偏差方程

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t) - B_1\Delta(t) + v_p, \\ \dot{e}_y(t) = A_{21}e_1(t) + A_{22}^s e_y(t) + P_2^{-1}v_p - F_2 f_u(t) - B_2\Delta(t). \end{cases} \tag{10}$$

定理 1 对于具有执行器故障的动态系统(1)，

在满足假设条件1~条件3下,经过相应的非奇异变换后成为系统(2).若系统(2)设计的观测器(6)具有下列性质:

1) $\text{rank}(CF) = \text{rank}(F) = q$,

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A - \lambda I & F \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + \text{rank}(F);$$

2) 存在矩阵 $L, R^{n \times p}, G, R^{q \times p}$ 以及对称正定矩阵 $P, R^{n \times n}$, 满足式(5);

3) 存在满足 Lyapunov 方程 $P_2 A_{22}^s + (A_{22}^s)^T P_2 = -Q_2$ 解的对称正定矩阵 $P_2, R^{p \times p}$, 使不确定动态偏差系统 $(e_1, e_y) \rightarrow 0$ 指数渐近收敛, 设计的观测器(6)渐近稳定;

4) 采用优化滑模策略(9), 确保估计误差系统对非线性/不确定性的鲁棒性, 渐近估计动态不确定系统的状态.

则称观测器(6)为鲁棒故障重构观测器.

证明 应用文献[12]中引理, 可以证明 1) $\Leftrightarrow$ 2).

对于性质3)^[9], 定义 $Q = A_{21}^T P_2 Q_2^{-1} P_2 A_{21} + Q_1$, 令 $Q_1, R^{(n-p) \times (n-p)}, Q_2, R^{p \times p}$ 为对称正定设计矩阵, 且 $Q = Q^T$. 设定 $P_1, R^{(n-p) \times (n-p)}$ 为 A_{11} 的 Lyapunov 方程唯一对称正定解

$$P_1 A_{11} + A_{11}^T P_1 = -Q,$$

$P_2, R^{p \times p}$ 为 A_{22}^s 的 Lyapunov 方程唯一对称正定解

$$P_2 A_{22}^s + (A_{22}^s)^T P_2 = -Q_2.$$

取 Lyapunov 函数

$$V(e_1, e_y) = e_1^T P_1 e_1 + e_y^T P_2 e_y.$$

对 $V(e_1, e_y)$ 求导, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_1, e_y) = & -e_1^T Q e_1 + e_1^T A_{21}^T P_2 e_y + e_y^T P_2 A_{21} e_1 - e_y^T Q_2 e_y + \\ & 2e_y^T v_p - 2e_y^T P_2 B_2 \Delta - 2e_y^T P_2 F_2 f_u. \end{aligned} \quad (11)$$

设 $\tilde{e}_y = e_y - Q_2^{-1} P_2 A_{21} e_1$, 可以证明

$$\begin{aligned} (e_y - Q_2^{-1} P_2 A_{21} e_1)^T Q_2 (e_y - Q_2^{-1} P_2 A_{21} e_1) = & e_y^T Q_2 e_y - e_1^T A_{21}^T P_2 e_y - e_y^T P_2 A_{21} e_1 + \\ & e_1^T A_{21}^T P_2 Q_2^{-1} P_2 A_{21} e_1. \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)代入(11), 并且 $0 < \rho \leq 1, \xi_1 \geq K_1, \xi_2 \geq K_2$,

$$\Delta(t) \leq K_1, \quad f_u \leq K_2, \text{ 则}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_1, e_y) \leq & -e_1^T Q_1 e_1 - \tilde{e}_y^T Q_2 \tilde{e}_y - \\ & 4 \quad P_2 \quad F_2 \quad e_y \quad K_2 < 0. \end{aligned}$$

由于 $\dot{V}(e_1, e_y) < 0$, 到达滑模 $s = \{e: P_2 C e = 0\}$ 后, 不确定系统的动态偏差系统指数渐近收敛 $(e_1, e_y) \rightarrow 0$. 所以设计观测器(6)为系统(2)的鲁棒故障重构观测器并且渐近稳定.

对于性质4), 选取 Lyapunov 函数 $V(s) = s^T s$, 沿偏差系统(10)求 $V(s)$ 对时间的一阶导数, 有

$$\dot{V}(s) = s^T \dot{s} + \dot{s}^T s = s^T P_2 \dot{e}_y + (P_2 \dot{e}_y)^T s \leq$$

$$2(s^T P_2 A_{21} e_1 + s^T P_2 A_{22}^s e_y +$$

$$s^T v_p - s^T P_2 F_2 f_u - s^T P_2 B_2 \Delta).$$

因为动态偏差系统 $(e_1, e_y) \rightarrow 0$ 指数渐近收敛, 将滑模策略(9)代入上式, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(s) \leq & 2 \quad s \quad P_2 \quad B_2 \quad \xi_1 - \\ & 2 \quad s \quad P_2 \quad F_2 \quad \xi_2 - \\ & 2 \quad s \quad P_2 \quad B_2 \quad \Delta - \\ & 2 \quad s \quad P_2 \quad F_2 \quad f_u = \\ & -4 \quad s \quad P_2 \quad F_2 \quad K_2 < 0. \end{aligned} \quad (13)$$

所以 $\dot{V}(s) < 0, s \neq 0$. 根据 Lyapunov 全局稳定性定理, 系统偏差方程(4)在有限时间内到达滑模面 $s = \{e_y: P_2 e_y = 0\}$, 渐近估计动态不确定系统的状态. $\square$

3.2 执行器故障检测与重构

基于观测器的故障诊断系统通常利用设计的观测器产生残差, 然后通过合适的评价函数、决策函数或决策逻辑, 根据阈值确定故障发生的可能性以及可能的范围. 本文利用设计的鲁棒故障重构观测器, 通过等价输出控制方法维持滑模运动, 直接获取有关故障的信息, 重构执行器故障, 减少了通过残差检测故障存在的过程.

为了重构执行器的故障, 引入等价输出控制 $g_{p,eq}$. 等价输出控制代表滑模策略的平均特性以及维持滑模表面运动所必需的作用. 根据滑模运动的特点, 当滑模运动达到时, $e_y = \dot{e}_y = 0, A_{11}$ 稳定使 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0$. 则偏差方程(10)变为

$$\begin{cases} \dot{e}_y(t) = A_{21} e_1(t) + A_{22}^s e_y(t) + P_2^{-1} v_p - \\ \quad F_2 f_u(t) - B_2 \Delta(t) = 0, \\ P_2^{-1} v_p - F_2 f_u(t) - B_2 \Delta(t) = 0, \end{cases} \quad (14)$$

即

$$g_{p,eq} - P_2 F_2 f_u(t) - P_2 B_2 \Delta(t) = 0.$$

求解 $g_{p,eq}$ 有两种方法^[6]: 1) 低通滤波器恢复等价输出输入信号; 2) 对滑模策略用连续量近似. 本文对等价输出控制 $g_{p,eq}$ 采用连续函数逼近方法, 使

$$\begin{cases} g_{p,eq} \rightarrow P_2 F_2 f_u(t), \\ g_{p,eq} = \rho \quad P_2 \quad \frac{P_2 C L_n e_y}{P_2 C L_n e_y + \sigma} \times \\ \quad (B_2 \quad \xi_1 - F_2 \quad \xi_2). \end{cases} \quad (15)$$

其中 σ 表示近似精确程度较小的正标量. 等价输出控制 $g_{p,eq}$ 的第1项消除系统的不确定因素, 使重构故障系统具有鲁棒性.

由于 $\text{rank}(F_2) = q$, 则由式(15)定义重构执行器故障

$$\hat{f}_u := - [N_1 \quad (F_2^T F_2)^{-1}] P_2^{-1} F_2 F_2^T \times \\ P_2 \quad F_2 \quad \frac{\beta \xi_2 P_2 C L_n e_y}{P_2 C L_n e_y + \sigma} \quad (16)$$

于是

$$\hat{f}_u \approx \\ - N P_2^{-1} F_2 F_2^T \quad P_2 \quad F_2 \quad \frac{\beta \xi_2 P_2 C L_n e_y}{P_2 C L_n e_y + \sigma} \quad (17)$$

其中： $N_1 \in R^{q \times (p-q)}$ 为可选的加权矩阵， $N := [N_1 \quad (F_2^T F_2)^{-1}] \in R^{q \times p}$ 。

用式(17) 重构故障 $\hat{f}_u$ 的关键在于：通过输出估计误差在线重构执行器故障。

4 数值仿真研究

以实际系统为例来验证上述方法的有效性^[9]。系统参数矩阵如下：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.154 & -0.004\ 2 & 1.54 & 0 \\ 0 & 0.249 & -1.0 & -5.2 & 0 \\ 0.386 & -0.996 & -0.000\ 3 & -0.117 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & -0.5 \end{bmatrix}, \\ B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.744 & -0.032 \\ 0.337 & -1.12 \\ 0.02 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ F = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.744 & -0.032 \\ 0.337 & -1.12 \\ 0.02 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

设不确定因素 $\delta(t) = [5\sin(6\pi t) \quad 0]^T$ ，系统和观测器的初值分别为 $x_0 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ， $\hat{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。根据文献[9-11] 对系统进行降阶处理，得到新系统参数矩阵

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 4.740\ 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ A_{11} = -5, \ B_1 = [0 \ 0], \\ A_{12} = [-5.088\ 9 \ 0.968\ 6 \ 28.074\ 5 \ 4.5], \\ A_{21} = [-0.154 \ 0.249 \ -0.957\ 4 \ 0.5]^T,$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} -0.149\ 9 & -1.004\ 3 & 2.424 & 0.154 \\ 0.242\ 4 & -0.999\ 8 & -6.629\ 3 & -0.249 \\ -0.970\ 6 & -0.001 & 5.378\ 7 & 0.957\ 4 \\ 0.486\ 7 & 0.000\ 4 & -2.870\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \\ B_2 = F_2 = \begin{bmatrix} -0.744 & -0.032 \\ 0.337 & -1.12 \\ 0.02 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

经过状态和输出的非奇异变换后，系统可表示为式(2)。根据 A_{11} 取

$$A_{22}^s = \begin{bmatrix} -5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4.5 \end{bmatrix}.$$

通过式(7) 和(8) 计算对称正定矩阵 P_2 ，以及鲁棒故障重构观测器的线性反馈矩阵 L_l 和非线性反馈矩阵 L_n 。

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.098 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.098 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.090\ 9 \end{bmatrix}, \\ L_l = \begin{bmatrix} -0.014\ 5 & 0.136\ 9 & -3.444\ 9 & -0.682 \\ 0.525\ 1 & -0.137 & 0.330\ 6 & 0.021 \\ 0.033\ 1 & 0.463\ 8 & -0.904\ 2 & -0.034 \\ -0.132\ 4 & -0.000\ 1 & 1.333\ 8 & 0.130\ 6 \\ 0.066\ 4 & 0.000\ 1 & -0.391\ 5 & 0.545\ 6 \end{bmatrix}, \\ L_n = \begin{bmatrix} -0.018 & 0.000\ 5 & -3.914\ 5 & -0.682 \\ 0.682 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.682 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.682 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.682 \end{bmatrix}.$$

执行器故障分为突变故障和缓变故障两种形式。其中突变故障为

$$f_1 = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq 3; \\ \cos(2\pi t), & 3 < t \leq 10. \end{cases}$$

缓变故障为

$$f_2 = \begin{cases} 4, & 0 \leq t \leq 2; \\ 8, & 2 < t \leq 6. \end{cases}$$

在存在不确定因素的条件下，通过设计的鲁棒滑模观测器实现执行器故障重构，达到故障检测与估计的目的。在观测器(6) 中，滑模控制策略为式(9)。设参数 $\rho = 0.5$ ， $\xi_1 = 25$ ， $\xi_2 = 10$ ， $\sigma = 0.015$ ，选择加权矩阵 $N_1 = 0.75 I_2$ 。

执行器 f_{u1} 受突变故障 f_1 的影响，执行器 f_{u2} 受缓变故障 f_2 的影响。图 1(a) 示出了执行器 f_{u1} 的情况，图 1(b) 示出了执行器 f_{u2} 的情况。其中实线表示实际故障，虚线表示用式(17) 重构的执行器故障。

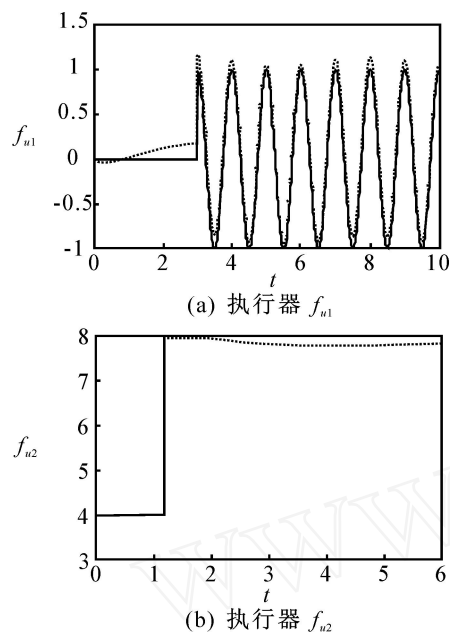


图1 执行器实际故障和重构故障仿真曲线

仿真结果表明,通过滑模观测器直接重构执行器故障,避免了产生和评价残差信号的复杂性。

5 结 论

本文讨论不确定动态系统的执行器故障检测与重构问题.以滑模观测器为基础,将状态和输出变换方法与奇异值分解技术相结合,对系统进行降阶处理,提出一种鲁棒故障重构观测器;给出了优化滑模策略,并作了严格论证,保证对系统不确定性具有鲁棒性以及跟踪系统状态的收敛性;应用等价输出控制来获取故障信息,实现执行器故障的检测与重构.最后通过数值仿真验证了该方法的有效性和可靠性.

参考文献(References)

- [1] Frank P M. Enhancement of robustness in observer-based fault detection[J]. Int J of Control, 1994, 59(4): 955-981.
- [2] Patton R J, Chen J. Observer-based fault detection and isolation: Robustness and applications [J]. Control

Engineering and Practice, 1997, 5(5): 671-682.

- [3] 赵瑾, 顾幸生. 故障检测与诊断领域的智能控制[J]. 信息与控制, 2003, 32(7): 657-661.
(Zhao J, Gu X S. Intelligent control in fault detection and diagnosis field[J]. Information and Control, 2003, 23(7): 657-661.)
- [4] 赵瑾, 顾幸生, 申忠宇. 基于观测器的故障诊断技术的鲁棒性[J]. 控制与决策, 2005, 20(8): 939-942.
(Zhao J, Gu X S, Shen Z Y. Robustness of observer-based fault diagnosis technology [J]. Control and Decision, 2005, 20(8): 939-942.)
- [5] Wang H, Delay S. Actuator fault diagnosis: An adaptive observer-based technique [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 41(7): 1073-1078.
- [6] Edwards C, Spurgeon S K, Patton R J. Sliding mode observers for fault detection and isolation [J]. Automatica, 2000, 36(4): 541-553.
- [7] Chen W, Saif M, Soh Y C. A variable structure adaptive observer approach for actuator fault, detection and diagnosis in uncertain nonlinear systems [C]. Proc of the American Control Conf. Chicago, 2000: 2674-2678.
- [8] Walcott B L, Zak S H. State observation of nonlinear uncertain dynamical systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1987, 32(2): 166-170.
- [9] Edwards C, Spurgeon S K. On the development of discontinuous observers [J]. Int J of Control, 1994, 59(5): 1211-1229.
- [10] Edwards C, Spurgeon S K. Sliding mode stabilization of uncertain systems using only output information [J]. Int J of Control, 1995, 62(5): 1129-1144.
- [11] Fairman F W, Mahl S S, Luk L. Disturbance decoupled observer design via singular value decomposition [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1984, 29(1): 84-86.
- [12] Corless M, Tu J. State and input estimation for a class of uncertain systems [J]. Automatica, 1998, 34(6): 757-764.