

基于自适应未知输入观测器的非线性动态系统故障诊断

胡正高^{1,2}, 赵国荣¹, 李飞¹, 周大旺¹

(1. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001; 2. 海军蚌埠士官学校, 安徽 蚌埠 233012)

摘要: 针对以往故障诊断研究中要求故障或故障导数及系统干扰的上界是已知的不足, 以及难以同时诊断执行器故障和传感器故障的问题, 提出一种自适应未知输入故障诊断观测器, 能够同时重构非线性动态系统的执行器故障和传感器故障. 首先, 利用 H_∞ 性能指标抑制未知输入对故障重构的影响, 采用 Lyapunov 泛函得到观测误差动态系统的稳定性; 然后, 通过线性矩阵不等式求解观测器增益阵, 并实现故障重构; 最后, 通过直流电机系统的仿真验证了所提出方法的有效性.

关键词: 故障诊断; 故障重构; 未知输入; 非线性动态系统; Lyapunov 泛函

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Fault diagnosis for nonlinear dynamical system based on adaptive unknown input observer

HU Zheng-gao^{1,2}, ZHAO Guo-rong¹, LI Fei¹, ZHOU Da-wang¹

(1. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. Naval Bengbu Petty Officer School, Bengbu 233012, China. Correspondent: HU Zheng-gao, E-mail: zghu001@163.com)

Abstract: For the shortcoming of previous fault diagnosis studies that the upper of faults or faults derivative and disturbance of system should be known, as well as the difficulty to diagnose the actuator faults and sensor faults simultaneously, an adaptive unknown input fault diagnosis observer is proposed, which can reconstruct the actuator faults and sensor faults in nonlinear dynamical system simultaneously. Firstly, an H_∞ performance index is employed to restrain the influence to fault reconstruction caused by the unknown input, and a Lyapunov function is employed to obtain the robust asymptotically stability of the observer error dynamical system. Then, the gain matrices of the observer are solved by using the linear matrix inequality, and fault reconstruction is fulfilled. Finally, results of the simulation on a DC motor system show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: fault diagnosis; fault reconstruction; unknown input; nonlinear dynamical systems; Lyapunov function

0 引言

由于日益庞大的系统结构和复杂的操作, 现代工业系统一旦发生故障, 如果不能尽快检测并处理, 可能会带来难以接受的严重后果. 正是由于现代工业系统对安全性和可靠性的迫切需求, 动态系统的故障检测与诊断(FDD)在过去的几十年中得到了迅猛发展^[1-4]. FDD的主要作用就是检测故障, 确定故障发生的位置和幅度, 然后采取合适的操作来排除或降低故障对系统总体性能的影响.

在基于解析冗余的故障检测技术中, 基于观测器的故障检测方法得到了大量应用^[5-8], 它的基本思想

是^[9]: 通过系统的测量输出来重构系统, 将观测器的输出与系统的输出之差作为残差来判断系统是否发生故障. 然而, 故障检测只是定性地判断系统是否发生故障, 却不能对故障有更深刻的认识; 而故障重构能够直接展示故障的变化过程, 可以诊断出更深层次的故障信息.

近年来, 基于观测器方法的故障重构问题已经取得了不少研究成果. 文献[10-13]采用滑模观测器来重构故障, 但该方法需要假设故障或系统干扰的上界已知. 文献[14-15]采用自适应观测器来重构故障, 该方法需要知道故障与故障导数的上界. 然而, 在工程

收稿日期: 2015-02-15; 修回日期: 2015-07-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61473306).

作者简介: 胡正高(1986-), 男, 讲师, 从事动态系统故障诊断的研究; 赵国荣(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 从事动态系统的故障诊断与容错控制等研究.

实际中,通常难以获取故障或故障导数以及系统干扰的上界,从而限制了此类方法的应用范围.此外,文献[10-15]并没有考虑系统同时发生执行器故障和传感器故障.文献[16]通过奇异值分解方法设计了降阶观测器来重构系统中的执行器故障和传感器故障,但并没有考虑系统干扰与建模不确定性等未知输入的影响.众所周知,实际系统不可避免地受到未知输入的影响,如果不能有效处理系统中的未知输入,将会造成对故障的误报.另外,文献[16]所提方法还要求测量输出的维数大于执行器故障与传感器故障的维数之和,这进一步限制了它的应用范围.文献[17-18]通过设计未知输入观测器来重构故障(未知输入),但研究的仅仅是线性系统,而实际系统均是非线性的.

基于上述分析,本文提出一种自适应未知输入故障诊断观测器,能同时重构非线性动态系统中的执行器故障和传感器故障.与已有方法相比,本文所提方法不需要知道故障或故障导数以及系统干扰的上界,因此更易于工程实现.为了降低故障误报率并提高故障重构的鲁棒性,本文将 H_∞ 性能指标引入到观测器设计中,从而抑制未知输入对故障重构的影响.通过线性矩阵不等式求解所提故障诊断观测器的增益阵,从而方便地设计观测器.最后,将本文方法应用于在工业生产中有着广泛应用的直流电机系统的故障诊断中,表明了所提出方法的可行性和有效性.

1 问题描述

考虑下面的非线性动态系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + g(t, x(t)) + Bu(t) + \\ \quad F_a f_a(t) + D\xi(t), \\ y(t) = Cx(t) + F_s f_s(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in R^n, y \in R^p, u \in R^m$ 分别为系统的状态、测量输出和控制输入; $\xi \in R^l$ 为系统干扰和建模不确定性等未知输入; $f_a \in R^q, f_s \in R^r$ 分别为系统的执行器故障和传感器故障; g 为动态系统(1)中的非线性向量,且满足 Lipschitz 条件,即满足不等式 $\|g(t, x(t)) - g(t, \hat{x}(t))\| \leq \|L_g(x(t) - \hat{x}(t))\|$, 其中 $L_g \in R^{n \times n}$ 为 Lipschitz 常值矩阵,且有 $g(0, 0) = 0$; A, B, C, D, F_a, F_s 是已知的适维常值矩阵,假设矩阵 F_s 列满秩.

为了重构出传感器故障,下面将系统(1)改写成奇异系统形式.令

$$E = [I_n \ 0], M = [A \ 0], H = [C \ F_s].$$

由于 $\begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix}$ 是列满秩矩阵,逆阵 $\left(\begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix} \right)^{-1}$ 存在.令 $[S \ T] = \left(\begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix}^T$, 从而有

$$SE + TH = I_{n+r}. \quad (2)$$

定义 $\zeta = [x^T \ f_s^T]^T$. 为了简洁,后文省略所有向量的时间变量 t , 系统(1)可以写为

$$\begin{cases} E\dot{\zeta} = M\zeta + g(t, E\zeta) + Bu + F_a f_a + D\xi, \\ y = H\zeta. \end{cases} \quad (3)$$

后面将针对系统(3)设计自适应未知输入故障诊断观测器,然后通过所设计的观测器得到执行器故障 f_a 和传感器故障 f_s 的鲁棒渐近重构,从而完成对非线性系统(1)的故障诊断.

2 观测器设计

2.1 观测器的构建

针对系统(3),设计如下的自适应未知输入故障诊断观测器:

$$\begin{cases} \dot{z} = Nz + Ly + Sg(t, E\hat{\zeta}) + SBu + SF_a \hat{f}_a, \\ \hat{\zeta} = z + Ty, \\ \hat{y} = H\hat{\zeta}, \\ \dot{\hat{f}}_a = -Ge_y. \end{cases} \quad (4)$$

其中: z 为观测器状态, \hat{y} 为 y 的重构值, $e_y = \hat{y} - y$, $\hat{\zeta}$ 和 \hat{f}_a 分别为系统(3)的状态 ζ 和执行器故障 f_a 的重构值, N, L 和 G 为要设计的观测器增益阵.

令 $\varepsilon = \hat{\zeta} - \zeta$, 由式(2)~(4)可知 $\varepsilon = \hat{\zeta} - \zeta = z + TH\zeta - \zeta = z + (TH - I_{n+r})\zeta = z - SE\zeta$. 记 $e_{f_a} = \hat{f}_a - f_a$, 计算可知

$$\dot{e}_{f_a} = \dot{\hat{f}}_a - \dot{f}_a = -Ge_y - \dot{f}_a = -GH\varepsilon - \dot{f}_a. \quad (5)$$

此外,有

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) &= \dot{z} - SE\dot{\zeta} = \\ & Nz + Ly + Sg(t, E\hat{\zeta}) + SBu + SF_a \hat{f}_a - SE\dot{\zeta} = \\ & Nz + Ly + Sg(t, E\hat{\zeta}) + SBu + SF_a \hat{f}_a - \\ & S[M\zeta + g(t, E\zeta) + Bu + F_a f_a + D\xi] = \\ & Nz + Ly + [Sg(t, E\hat{\zeta}) - Sg(t, E\zeta)] + \\ & SF_a(\hat{f}_a - f_a) - SM\zeta - SD\xi = \\ & N[(\hat{\zeta} - \zeta) + \zeta - Ty] + Ly - SD\xi + \\ & [Sg(t, E\hat{\zeta}) - Sg(t, E\zeta)] + SF_a e_{f_a} - SM\zeta = \\ & N\varepsilon + (N - SM)\zeta + (L - NT)y + \\ & S[g(t, E\hat{\zeta}) - g(t, E\zeta)] + SF_a e_{f_a} - SD\xi = \\ & N\varepsilon + (N - SM)\zeta + (L - NT)H\zeta + \\ & S[g(t, E\hat{\zeta}) - g(t, E\zeta)] + SF_a e_{f_a} - SD\xi. \end{aligned}$$

令

$$F = L - NT, N = SM - FH. \quad (6)$$

有

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= N\varepsilon + (N - SM)\zeta + (L - NT)H\zeta + \\ & S[g(t, E\hat{\zeta}) - g(t, E\zeta)] + SF_a e_{f_a} - SD\xi = \\ & N\varepsilon + (N - SM + FH)\zeta + \\ & S[g(t, E\hat{\zeta}) - g(t, E\zeta)] + SF_a e_{f_a} - SD\xi = \\ & (SM - FH)\varepsilon + S[g(t, E\hat{\zeta}) - g(t, E\zeta)] + \end{aligned}$$

$$SF_a e_{f_a} - SD\xi. \tag{7}$$

定义 $\bar{\varepsilon} = [\varepsilon \ e_{f_a}]^T$, 并记 $d = [\xi^T \ f_a^T]^T$, 从而由式(5)和(7)可知

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \bar{A}\bar{\varepsilon} + \bar{g} + \bar{D}d. \tag{8}$$

其中

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} SM - FH & SF_a \\ -GH & 0 \end{bmatrix}, \bar{D} = \begin{bmatrix} -SD & 0 \\ 0 & -I_q \end{bmatrix},$$

$$\bar{g} = \begin{bmatrix} S[g(t, E\hat{\zeta}) - g(t, E\zeta)] \\ 0 \end{bmatrix}.$$

记 $\bar{A}_1 = \begin{bmatrix} SM & SF_a \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\bar{A}_2 = [H \ 0]$, $Q = [F^T \ G^T]^T$. 则有 $\bar{A} = \bar{A}_1 - Q\bar{A}_2$.

为了抑制未知输入 d 对故障重构的影响, 设计 H_∞ 性能指标 $\gamma > 0$ 使得

$$\|\bar{\varepsilon}\| \leq \gamma \|d\|. \tag{9}$$

因为 $\|\bar{\varepsilon}\| \geq \|\hat{f}_a - f_a\|$, 且 $\|\bar{\varepsilon}\| \geq \|\hat{f}_s - f_s\|$, 所以当式(9)成立时, 即可实现对执行器故障和传感器故障的鲁棒重构. 由式(9)可知, 较小的 γ 值表示未知输入对故障重构的影响较小. 下面将通过求解优化问题得到 γ 的最小值, 同时使得误差动态系统(8)是鲁棒渐近稳定的.

2.2 稳定性证明

定理1 考虑非线性动态系统(3)和观测系统(4), 若存在正定矩阵 P 和矩阵 Y 使得下面的线性矩阵不等式优化问题

$$\min \gamma,$$

$$\text{s.t. } \gamma > 0,$$

$$\bar{\Gamma} = \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{11} & P & P\bar{D} & I_{n+r+q} \\ * & -I_{n+r+q} & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma I_{l+q} & 0 \\ * & * & * & -\gamma I_{n+r+q} \end{bmatrix} < 0 \tag{10}$$

有解, 则误差动态系统(8)是鲁棒渐近稳定的. 其中:

* 表示对称矩阵的对称项, 且

$$\bar{\Gamma}_{11} = P\bar{A}_1 - Y\bar{A}_2 + \bar{A}_1^T P - \bar{A}_2^T Y^T + A_{\bar{g}},$$

$$A_{\bar{g}} = \begin{bmatrix} \|S\|(L_g E)^T L_g E & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

证明 定义 Lyapunov 泛函 $V = \bar{\varepsilon}^T P \gamma \bar{\varepsilon}$. 对 V 沿着系统(8)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \bar{\varepsilon}^T P \gamma \dot{\bar{\varepsilon}} + \dot{\bar{\varepsilon}}^T P \gamma \bar{\varepsilon} = \\ &\bar{\varepsilon}^T P \gamma (\bar{A}\bar{\varepsilon} + \bar{g} + \bar{D}d) + (\bar{A}\bar{\varepsilon} + \bar{g} + \bar{D}d)^T P \gamma \bar{\varepsilon} = \\ &\bar{\varepsilon}^T (P\gamma\bar{A} + \bar{A}^T P \gamma) \bar{\varepsilon} + \bar{\varepsilon}^T P \gamma \bar{g} + \bar{g}^T P \gamma \bar{\varepsilon} + \\ &\bar{\varepsilon}^T P \gamma \bar{D}d + d^T \bar{D}^T P \gamma \bar{\varepsilon}. \end{aligned} \tag{11}$$

此外, 计算可知

$$\bar{g}^T I_{n+r+q} \bar{g} = [[g(t, E\hat{\zeta}) - g(t, E\zeta)]^T S^T \ 0].$$

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} S[g(t, E\hat{\zeta}) - g(t, E\zeta)] \\ 0 \end{bmatrix} = \\ &\|S\| \|g(t, E\hat{\zeta}) - g(t, E\zeta)\| \leq \|S\| \|g(t, E\hat{\zeta}) - g(t, E\zeta)\| = \\ &\|S\| \|g(t, E\hat{\zeta}) - g(t, E\zeta)\|^T [g(t, E\hat{\zeta}) - g(t, E\zeta)] \leq \\ &\|S\| \|[\hat{\zeta} - \zeta]^T E^T L_g^T L_g E [\hat{\zeta} - \zeta]\| = \\ &\|S\| \| [L_g E [I_{n+r} \ 0] \bar{\varepsilon}]^T L_g E [I_{n+r} \ 0] \bar{\varepsilon} \| = \\ &\|S\| \bar{\varepsilon}^T [L_g E \ 0]^T [L_g E \ 0] \bar{\varepsilon} = \\ &\bar{\varepsilon}^T \begin{bmatrix} \|S\| (L_g E)^T L_g E & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}^T A_{\bar{g}} \bar{\varepsilon}. \end{aligned}$$

因此有

$$\bar{\varepsilon}^T A_{\bar{g}} \bar{\varepsilon} - \bar{g}^T I_{n+r+q} \bar{g} \geq 0. \tag{12}$$

$$\text{令 } J = \int_0^\infty \frac{\bar{\varepsilon}^T \bar{\varepsilon} - \gamma^2 d^T d}{\gamma} dt, \text{ 有}$$

$$J < \int_0^\infty \frac{\bar{\varepsilon}^T \bar{\varepsilon} - \gamma^2 d^T d + \dot{V}}{\gamma} dt. \tag{13}$$

记 $\tilde{J} = \frac{\bar{\varepsilon}^T \bar{\varepsilon} - \gamma^2 d^T d + \dot{V}}{\gamma}$, 由式(13)可知, 使得 $J < 0$ 的一个充分条件是

$$\tilde{J} = \frac{\bar{\varepsilon}^T \bar{\varepsilon} - \gamma^2 d^T d + \dot{V}}{\gamma} < 0.$$

由式(11)和(12)计算可知

$$\begin{aligned} \tilde{J} &= \frac{\bar{\varepsilon}^T \bar{\varepsilon} - \gamma^2 d^T d + \dot{V}}{\gamma} \leq \\ &\frac{1}{\gamma} [\bar{\varepsilon}^T \bar{\varepsilon} - \gamma^2 d^T d + \bar{\varepsilon}^T (P\gamma\bar{A} + \bar{A}^T P \gamma) \bar{\varepsilon} + \\ &\bar{\varepsilon}^T P \gamma \bar{g} + \bar{g}^T P \gamma \bar{\varepsilon} + \bar{\varepsilon}^T P \gamma \bar{D}d + d^T \bar{D}^T P \gamma \bar{\varepsilon}] + \\ &\bar{\varepsilon}^T A_{\bar{g}} \bar{\varepsilon} - \bar{g}^T I_{n+r+q} \bar{g} \leq \\ &\bar{\varepsilon}^T \left(P\bar{A} + \bar{A}^T P + A_{\bar{g}} + \frac{1}{\gamma} I_{n+r+q} \right) \bar{\varepsilon} + \\ &\bar{\varepsilon}^T P \gamma \bar{g} + \bar{g}^T P \gamma \bar{\varepsilon} + \bar{\varepsilon}^T P \gamma \bar{D}d + \\ &d^T \bar{D}^T P \gamma \bar{\varepsilon} - \gamma d^T d - \bar{g}^T I_{n+r+q} \bar{g}. \end{aligned}$$

定义 $X = [\bar{\varepsilon}^T \ \bar{g}^T \ d^T]^T$, 由上式可知 $\tilde{J} \leq X^T \Gamma X$. 因此, 由 $\Gamma < 0$ 可以得到 $\tilde{J} < 0$. 其中

$$\Gamma = \begin{bmatrix} P\bar{A} + \bar{A}^T P + A_{\bar{g}} + \frac{1}{\gamma} I_{n+r+q} & P & P\bar{D} \\ * & -I_{n+r+q} & 0 \\ * & * & -\gamma I_{l+q} \end{bmatrix}.$$

进一步, 利用 Schur 补定理可知 $\Gamma < 0$ 等价于

$$\bar{\Gamma} = \begin{bmatrix} P\bar{A} + \bar{A}^T P + A_{\bar{g}} & P & P\bar{D} & I_{n+r+q} \\ * & -I_{n+r+q} & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma I_{l+q} & 0 \\ * & * & * & -\gamma I_{n+r+q} \end{bmatrix} < 0.$$

令 $Y = PQ$, 计算可知 $P\bar{A} = P\bar{A}_1 - Y\bar{A}_2$, 从而 $\bar{\Gamma} < 0$ 变为

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{11} & P & P\bar{D} & I_{n+r+q} \\ * & -I_{n+r+q} & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma I_{l+q} & 0 \\ * & * & * & -\gamma I_{n+r+q} \end{bmatrix} < 0. \quad (14)$$

式(14)已经是线性矩阵不等式. 若存在最小的 γ 使得式(14)成立, 也就是使得式(10)成立, 则 $\bar{J} < 0$, 进而 $J < 0$, 从而可知 $\|\varepsilon\| \leq \gamma\|d\|$. \square

由定理1的证明过程可知, 矩阵 $[F^T \ G^T]^T = P^{-1}Y$, 从而得到矩阵 F 和 G . 然后, 由式(6)可计算出 $N = SM - FH$. 再由 $L = F + NT$ 得到 L , 从而完成观测器(4)的设计. 此外, 在求解线性矩阵不等式(10)时, 通过求解最小值问题得到的矩阵可能过于庞大, 此时可再设定比最小值 γ_{\min} 稍大的 γ , 通过求解线性矩阵不等式(14)的可行解来得到观测器(4)的增益阵.

3 故障重构

定理2 考虑非线性动态系统(3)和观测系统(4), 若存在正定矩阵 P 和矩阵 Y 使得线性矩阵不等式(10)有解, 则 $\hat{f}_s = [0 \ I_r]\hat{\zeta}$ 是传感器故障 f_s 的鲁棒渐近重构, $\hat{f}_a = \int_0^t -Ge_y d\tau$ 是执行器故障 f_a 的鲁棒渐近重构.

证明 由定理1可知, $\hat{\zeta}$ 是 ζ 的鲁棒渐近重构, 因此 $\hat{f}_s = [0 \ I_r]\hat{\zeta}$ 是传感器故障 f_s 的鲁棒渐近重构. 同理可知, $\hat{f}_a = \int_0^t -Ge_y d\tau$ 是执行器故障 f_a 的鲁棒渐近重构. \square

4 仿真分析

考虑如下的非线性直流电机系统^[19], 其状态空间方程为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.4751 & -0.0396 \\ 113.9706 & -0.00952 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} f_a(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xi(t) + \begin{bmatrix} 0.1277 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0.0075 \sin x_2(t) \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} f_s(t). \end{cases} \quad (15)$$

其中: 状态分量 x_1 和 x_2 分别为电枢电流(A)和电机角速度(rad/s), u 为输入电枢电压(V). 系统(15)中的干扰设为 $\xi(t) = 0.003 \sin 5t$. 考虑系统(15)发生如下的执行器故障和传感器故障:

$$f_a(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 5; \\ 2 \sin(2t) \cos t + 3, & 5 \leq t \leq 50; \end{cases}$$

$$f_s(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 4; \\ 5(1 - e^{4-t}) + \sin \pi t, & 4 \leq t \leq 50. \end{cases}$$

可以看出, 系统(15)的输出 y 的维数为2, 执行器故障 f_a 和传感器故障 f_s 维数之和为2, 从而文献[16]中要求测量输出的维数大于执行器故障维数和传感器故障维数之和的条件不成立, 因此文献[16]的方法无法重构系统(15)中的故障. 下面将利用本文所提方法重构系统(15)中的故障.

求解线性矩阵不等式(10)可以得到 $\gamma_{\min} = 0.5035$, 相应的矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 2.9974 \times 10^3 & -18.9596 \\ -18.9596 & 5.2886 \times 10^3 \\ 2.9657 \times 10^3 & 18.8877 \\ -1.0069 & 3.6859 \times 10^{-4} \\ 2.9657 \times 10^3 & -1.0069 \\ 18.8877 & 3.6859 \times 10^{-4} \\ 2.9974 \times 10^3 & 1.0069 \\ 1.0069 & 0.0670 \end{bmatrix},$$

$$Y = \begin{bmatrix} 2.6958 \times 10^7 & 4.9864 \times 10^4 \\ 9.9876 \times 10^4 & 5.5940 \times 10^7 \\ 2.6960 \times 10^7 & 5.0013 \times 10^4 \\ 0.4888 & 2.7396 \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} F \\ G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.3818 \times 10^3 & 1.5382 \times 10^5 \\ 17.9516 & 1.1678 \times 10^4 \\ 4.6600 \times 10^3 & -1.5381 \times 10^5 \\ -4.1739 \times 10^3 & 4.6233 \times 10^6 \end{bmatrix}.$$

可以看出 Q 中有的项太大, 为了避免取过大的观测器增益阵, 取 $\gamma = 0.7$. 通过求解线性矩阵不等式(14)的可行解得到

$$P = \begin{bmatrix} 4.8883 & -0.6432 & -1.3930 & -0.8323 \\ -0.6432 & 0.3505 & 0.1598 & -0.0194 \\ -1.3930 & 0.1598 & 2.0778 & 0.6550 \\ -0.8323 & -0.0194 & 0.6550 & 0.3498 \end{bmatrix},$$

$$Y = \begin{bmatrix} -0.3200 & 1.3780 \\ 0.6303 & 4.4935 \\ 5.7808 & -0.7478 \\ -0.3824 & 0.0282 \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} F \\ G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.0551 & 11.2463 \\ -12.6090 & 42.2635 \\ 11.3190 & -12.8543 \\ -32.6309 & 53.2459 \end{bmatrix}.$$

计算可得

$$N = \begin{bmatrix} 3.5800 & -11.2859 & 4.0551 \\ 69.5943 & -42.2683 & 12.6090 \\ -10.8439 & 12.8939 & -11.3190 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 5.6033 \\ 0 & 21.1293 \\ 0 & -6.4074 \end{bmatrix}.$$

系统(15)的初始状态设为 $x_1 = 0.8, x_2 = -12$, 观测器(4)的初始状态设为 $z = [0 \ 0 \ 0]^T$. 图1~图4为系统(15)的状态重构和重构误差曲线. 可以看出, 本文设计的观测器能够迅速跟踪上系统(15)的状态. 执行器和传感器的故障重构和重构误差结果如图5~图8所示. 可以看出, 本文所提出的自适应未知输入故障诊断观测器可以同时实现对非线性动态系统中执行器故障和传感器故障的鲁棒重构. 由于输入干扰的影响, 执行器故障重构比传感器故障重构的精度要低些.

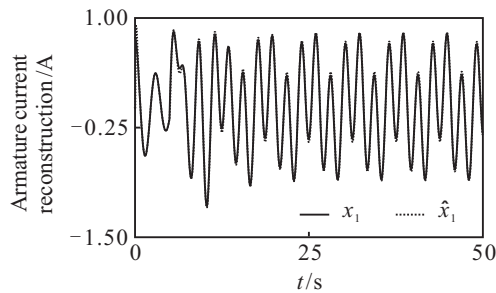


图1 电枢电流 x_1 与重构值 \hat{x}_1

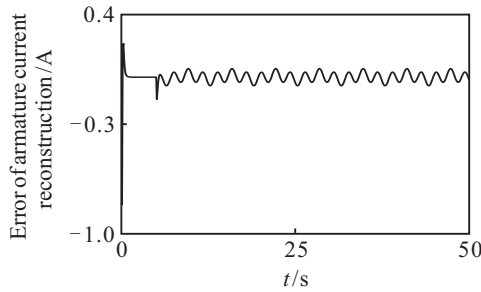


图2 电枢电流重构误差 $\hat{x}_1 - x_1$

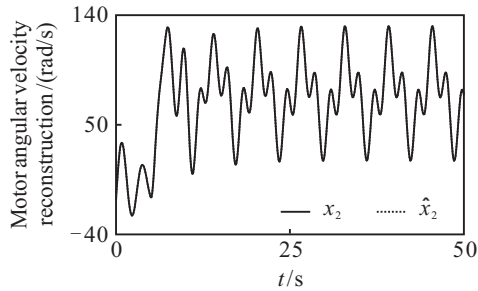


图3 电机角速度 x_2 与重构值 \hat{x}_2

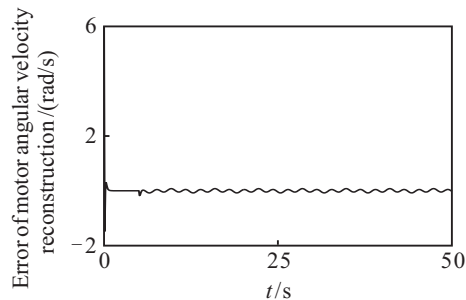


图4 电机角速度重构误差 $\hat{x}_2 - x_2$

为了说明本文方法的优越性, 采用文献[15]的方法进行故障重构, 仿真结果如图9和图10所示. 由图

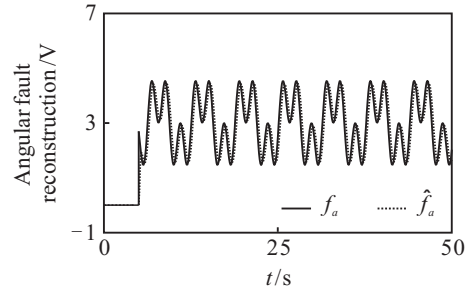


图5 执行器故障 f_a 与重构值 \hat{f}_a

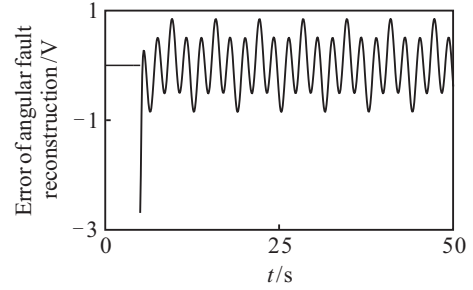


图6 执行器故障重构误差 $\hat{f}_a - f_a$

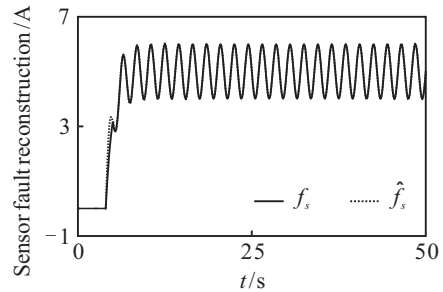


图7 传感器故障 f_s 与重构值 \hat{f}_s

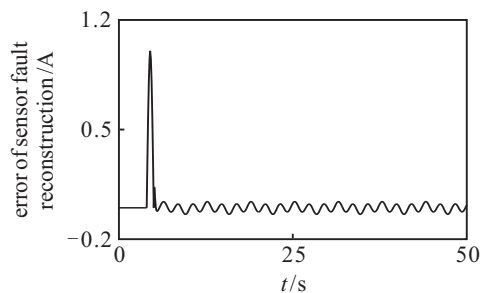


图8 传感器故障重构误差 $\hat{f}_s - f_s$

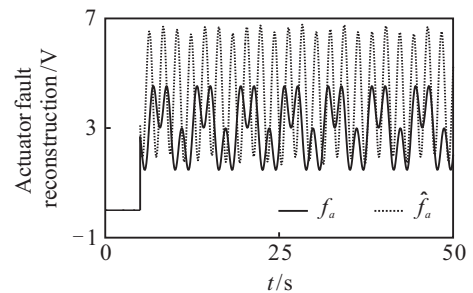


图9 执行器故障 f_a 与重构值 \hat{f}_a (文献[15])

5、图7、图9和图10的对比可以看出, 文献[15]的执行器故障重构精度比本文方法低, 且无法实现传感器故障重构.

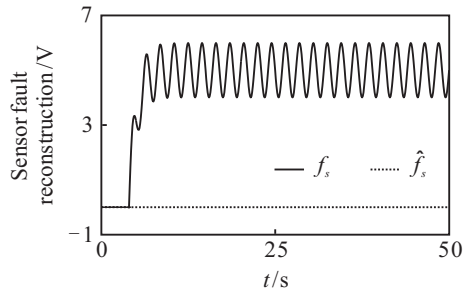


图 10 传感器故障 f_s 与重构值 \hat{f}_s (文献 [15])

5 结 论

本文提出了一种自适应未知输入故障诊断观测器, 利用 H_∞ 技术抑制了未知输入对故障重构的影响, 实现了 Lipschitz 非线性动态系统中执行器故障和传感器故障的同时鲁棒渐近重构. 与已有方法相比, 本文所提故障诊断方法不需要故障或故障导数与系统干扰的上界, 适用范围更广. 最后, 将本文设计的故障诊断观测器应用到直流电机系统的故障重构中, 仿真结果表明了本文所提方法的可行性和有效性.

参考文献(References)

- [1] Marzat J, Piet-Lahanier H, Damongeot F, et al. Model-based fault diagnosis for aerospace systems: A survey[J]. Proc of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2012, 226(10): 1329-1360.
- [2] 黄俊杰, 蒋蓁, 徐特立, 等. 一种非线性系统被控对象故障诊断方法[J]. 控制与决策. 2014, 29(5): 925-928. (Huang J J, Jiang Z, Xu T L, et al. Method on component fault diagnosis for nonlinear systems[J]. Control and Decision, 2014, 29(5): 925-928.)
- [3] Witczak M. Fault diagnosis and fault-tolerant control strategies for non-linear systems[M]. Berlin: Springer, 2014: 1-7.
- [4] Alavi S M M, Saif M. Fault detection in nonlinear stable systems over lossy networks[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2013, 21(6): 2129-2142.
- [5] Arrichiello F, Marino A, Pierri F. Observer-based decentralized fault detection and isolation strategy for networked multirobot systems[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2015, 23(4): 1465-1476.
- [6] Keliris C, Polycarpou M M, Parisini T. A robust nonlinear observer-based approach for distributed fault detection of input-output interconnected systems[J]. Automatica, 2015, 53: 408-415.
- [7] Yang Y, Ding S X, Li L. On observer-based fault detection for nonlinear systems[J]. Systems & Control Letters, 2015, 82: 18-25.
- [8] Chen J, Cao Y Y, Zhang W. A fault detection observer design for LPV systems in finite frequency domain[J]. Int J of Control, 2015, 88(3): 571-584.
- [9] Hwang I, Kim S, Kim Y, et al. A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2010, 18(3): 636-653.
- [10] Raoufi R, Marquez H J, Zinober A S I. Sliding mode observers for uncertain nonlinear Lipschitz systems with fault estimation synthesis[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 2010, 20(16): 1785-1801.
- [11] Lee Dong-Jae, Park Young-jin, Park Youn-sik. Robust H_∞ sliding mode descriptor observer for fault and output disturbance estimation of uncertain systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2012, 57(11): 2928-2934.
- [12] Veluvolu K C, Defoort M, Soh Y C. High-gain observer with sliding mode for nonlinear state estimation and fault reconstruction[J]. J of the Franklin Institute, 2014, 351(4): 1995-2014.
- [13] Han X, Fridman E, Spurgeon S K. Sampled-data sliding mode observer for robust fault reconstruction: A time-delay approach[J]. J of the Franklin Institute, 2014, 351(4): 2125-2142.
- [14] Ichalal D, Marx B, Ragot J, et al. New fault tolerant control strategies for nonlinear Takagi-Sugeno systems[J]. Int J of Applied Mathematics and Computer Science, 2012, 22(1): 197-210.
- [15] Qiu J, Ren M, Niu Y, et al. Fault estimation for nonlinear dynamic systems[J]. Circuits, Systems & Signal Processing, 2012, 31(2): 555-564.
- [16] Aldeen M, Sharma R. Estimation of states, faults and unknown disturbances in non-linear systems[J]. Int J of Control, 2008, 81(8): 1195-1201.
- [17] Lee K S, Park T G. New results on fault reconstruction using a finite-time converging unknown input observer[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 6(9): 1258-1265.
- [18] Lungu M, Lungu R. Reduced order observer for linear time-invariant multivariable systems with unknown inputs[J]. Circuits, Systems & Signal Processing, 2013, 32(6): 2883-2898.
- [19] Krishnan R. Electric motor drives: Modeling, analysis, and control[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001: 18-23.