

双时滞系统的故障诊断和动态最优容错控制

李 娟, 叶若红

(青岛农业大学 机电工程学院, 山东 青岛 266109)

摘要: 对含有状态时滞和控制时滞的线性时滞系统, 研究系统发生不可直接测量的传感器故障和执行器故障时的故障诊断和最优容错控制问题. 首先基于时滞系统的线性变换, 利用Riccati矩阵方程和Sylvester方程设计了故障情况下的最优容错控制律, 并证明了最优容错控制律的存在唯一性. 然后通过构造一种新的含有故障的增广系统的降维状态观测器, 实现了故障的实时在线诊断和系统状态的观测, 解决了最优容错控制的物理不可实现问题. 最后利用故障诊断的结果给出了物理可实现的动态最优容错控制律. 仿真实例验证了故障诊断方法和动态最优容错控制方法的可行性和有效性.

关键词: 时滞系统; 故障诊断; 容错控制; 降维状态观测器; 线性变换; 最优控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Fault diagnosis and dynamic optimal fault-tolerant control for systems with double time-delays

LI Juan, YE Ruo-hong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao Shandong 266109, China)

Abstract: Fault diagnosis and optimal fault-tolerant control are studied for linear systems with time-delays in both control vector and state vector, when unmeasured actuator faults and sensor faults occur in the systems. Based on the linear transformation of time-delay systems, the optimal fault-tolerant control law for the faulty system is designed by utilizing Riccati matrix equation and Sylvester equation, and the existence and uniqueness of the optimal fault-tolerant control law is proved. The real-time and on-line fault diagnosis and the observation of system states are realized by constructing a new reduced-order state observer for the augmented system with faults, and the physically unrealizable problem is solved. Finally, the physically realizable dynamic optimal fault-tolerant control law is obtained by utilizing the results of fault diagnosis. Simulation example has demonstrated the feasibility and validity of the proposed fault diagnosis scheme and the dynamic optimal fault-tolerant control scheme.

Key words: time-delay systems; fault diagnosis; fault-tolerant control; reduced-order state observer; linear transformation; optimal control

1 引言(Introduction)

随着现代科技的迅速发展, 现代系统的规模越来越大、自动化程度越来越高, 系统的复杂性迅速提高, 这类系统一旦发生事故就有可能造成人员和财产的巨大损失. 因此提高控制系统的可靠性是人们研究的热点问题. 故障诊断(FD) 和容错控制(FTC)为提高复杂系统的可靠性开辟了一条新的途径, 并经过30多年的发展取得了丰富的研究成果, 如文[1~3]等. 另外, 在现实的生活和工业生产过程中, 具有时滞特性的对象是非常普遍的, 如化工过程、长距离通讯传输及经济模型等. 时滞的大量存在以及时滞系统的无限维的实质所导致的

分析和控制的困难性, 使得时滞系统的FD和FTC成为控制领域中研究的一个难点问题. 近几年来, 时滞系统FD和FTC的研究已有了一定的成果, 但与时滞系统的FD, 文[4,5]采用自适应观测器/更新规则的方法来检测和诊断故障, 文[6]基于 H_∞ 优化技术提出了故障检测和诊断的滤波器方法等. 对时滞系统的FTC, 文[7]利用鲁棒 H_∞ 控制方法研究了只含执行器故障时的鲁棒容错控制器的设计方法, 文[8]对非线性时滞系统发生的执行器故障提出了一种新的时滞依赖自适应重构控制器的设计方法, 文[9]利用估计器来估计非线性时滞系统的状态和扰动信号, 通过补偿

执行器和/或传感器信号来实现系统的容错控制等。以我们的知识,目前基于观测器的FD方法是利用残差来反映故障,且还没有见到含有状态时滞和控制时滞的系统在故障和系统状态不可测的情况下考虑物理上可实现的最优FTC方法。

不同于以上的方法,受文[10]所研究的最优控制的启发,本文针对含有状态时滞和控制时滞的线性系统,给出了系统在故障情况下满足二次型性能指标的最优容错控制律的设计方法;为解决故障和状态不可测情况下的最优容错控制律的物理不可实现问题,在不利用残差的情况下,根据系统输入和输出设计了实时在线重现系统中的传感器故障和执行器故障的故障诊断器,并同时实现了系统状态的观测。利用FD的结果给出了物理可实现的动态最优容错控制律。

2 系统描述和时无滞转换(System formulation and delay-free transformation)

2.1 系统描述(System formulation)

考虑如下带有故障的线性时滞控制系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_1 x(t-d) + B_0 u(t) + \\ B_1 u(t-\tau) + D_1 f(t), t > 0, \\ x(t) = x_0(t), t \in [-d, 0], \\ u(t) = 0, t \in [-\tau, 0], \\ y(t) = Cx(t) + D_2 f(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^p$ 和 $y \in \mathbb{R}^q$ 分别为状态、控制输入和可测输出向量; $x_0(t)$ 为已知的连续初始状态向量; $f(t) \in \mathbb{R}^m$ 为故障信号向量且是不可直接测量的; $A_0, A_1, B_0, B_1, C, D_1$ 和 D_2 是适当维数的常量矩阵; $d > 0$ 和 $\tau > 0$ 分别为状态滞后和控制滞后时间常数。

故障的动态特性由下列外系统描述:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}(t) = G\varphi(t), t \geq t_0 = \min\{t_a, t_s\}, \\ \varphi(t_0) = \varphi_0, \\ \varphi(t) = 0, t \in [0, t_0], \\ f(t) = F\varphi(t). \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} \varphi_a(t) \\ \varphi_s(t) \end{bmatrix}, f(t) = \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_s(t) \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} G_a & 0 \\ 0 & G_s \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & F_s \end{bmatrix}.$$

$\varphi \in \mathbb{R}^r$ ($m \leq r$) 为外系统(2)的状态向量,故障的初始时刻 t_0 和初始状态 φ_0 是未知的。 $G \in \mathbb{R}^{r \times r}$ 和 $F \in \mathbb{R}^{m \times r}$ 为常量矩阵。 $\varphi_a \in \mathbb{R}^{r_1}$ 和 $f_a \in \mathbb{R}^{m_1}$ 分别代表执行器故障状态向量和执行器故障向量,执行器故障

发生的初始时刻为 t_a ; $\varphi_s \in \mathbb{R}^{r_2}$ 和 $f_s \in \mathbb{R}^{m_2}$ 分别代表传感器故障状态向量和传感器故障向量,传感器故障发生的初始时刻为 t_s 。当 $t < t_a$ 时有 $\varphi_a(t) = 0$, 当 $t < t_s$ 时有 $\varphi_s(t) = 0$ 。 G_a, G_s, F_a 和 F_s 是适当维数的常量矩阵。

2.2 时无滞转换(Delay-free transformation)

时滞项的存在使系统的FD和容错控制律的求解变得较为困难,为此,引入线性变换把时滞系统转化成时无滞系统^[11]。考虑依赖于矩阵 A 的线性变换

$$z(t) = x(t) + \int_{t-d}^t e^{A(t-d-\theta)} A_1 x(\theta) d\theta + \int_{t-\tau}^t e^{A(t-\tau-h)} B_1 u(h) dh. \quad (3)$$

A 是一个待定义矩阵,对式(3)微分并结合式(1)可得

$$\dot{z}(t) = Az(t) + (B_0 + e^{-\tau A} B_1)u(t) - (A - A_0 - e^{-dA} A_1)x(t) + D_1 f(t). \quad (4)$$

令

$$\begin{aligned} A &= A_0 + e^{-dA} A_1, \\ B &= B_0 + e^{-\tau A} B_1, \end{aligned} \quad (5)$$

则式(4)变为

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + D_1 f(t). \quad (6)$$

故可将时滞系统(1)转化为如下时无滞等价系统:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + D_1 f(t), t > 0, \\ z(0) = z_0, \\ \eta(t) = Cz(t) + D_2 f(t). \end{cases} \quad (7)$$

其中 $z(t) \in \mathbb{R}^n$ 为转化后时无滞系统的状态变量。

系统(1)和系统(7)的变量关系为

$$\begin{aligned} x(t) &= z(t) - \int_{t-d}^t e^{A(t-d-\theta)} A_1 x(\theta) d\theta - \int_{t-\tau}^t e^{A(t-\tau-h)} B_1 u(h) dh, \\ y(t) &= \eta(t) - C \int_{t-d}^t e^{A(t-d-\theta)} A_1 x(\theta) d\theta - C \int_{t-\tau}^t e^{A(t-\tau-h)} B_1 u(h) dh. \end{aligned} \quad (8)$$

假设 1 (A, B) 完全能控, (C, A) 完全能观测, 且式(5)有解。

3 最优容错控制律的设计(Design of optimal fault-tolerant control law)

本节首先设计最优容错控制律,使系统在发生故障的情况下满足二次型性能指标最优。

3.1 性能指标的选取(Selection of performance index)

限于篇幅,此处仅讨论无限时域的最优FTC问

题. 针对由外系统(2)描述的故障的不同情形, 可以选择不同的二次型性能指标. 对外系统(2)渐近稳定的情形, 可以选择如下无限时域的二次型性能指标:

$$J = \int_0^{\infty} [z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t)] dt. \quad (9)$$

其中 Q 和 R 分别为半正定矩阵和正定矩阵.

对外系统(2)为稳定但非渐近稳定的情形, 可选取如下的平均二次型性能指标:

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t)] dt. \quad (10)$$

系统(1)关于性能指标(9)或(10)的最优容错控制问题, 就是要寻找最优容错控制律 $u^*(t)$, 使得故障情况下的二次型性能指标 J 取得极小值. 笔者知道, 对于由式(9)和(10)描述的性能指标来说, 其最优控制律以及它的推导过程是相同的. 为使无限时域的最优容错控制律存在, 作如下假设.

假设 2 矩阵 G 的所有特征值满足

$$\operatorname{Re}[\lambda_i(G)] \leq 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, r,$$

且具有零实部的特征值为 G 的最小多项式的单根.

3.2 最优容错控制律的设计(Design of optimal fault-tolerant control law)

在讨论最优FTC前, 先引入以下引理^[12].

引理 1 设 $\bar{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\bar{B} \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $\bar{C} \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $X \in \mathbb{R}^{n \times m}$, 则矩阵方程

$$\bar{A}X + X\bar{B} = -\bar{C}$$

的解 X 存在且唯一的充要条件是

$$\lambda_i(\bar{A}) + \lambda_j(\bar{B}) \neq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

其中 $\lambda_i(\bar{A})$ 和 $\lambda_j(\bar{B})$ 分别为矩阵 $\bar{A}$ 和 $\bar{B}$ 的特征值.

定理 1 由式(1)和(2)描述的带有故障的线性时滞系统, 在满足假设1和假设2的条件下, 其关于性能指标(9)或(10)的最优容错控制律存在且唯一, 并由下式描述:

$$\begin{aligned} u^*(t) = & -R^{-1}B^T[Px(t) + P \int_{t-d}^t e^{A(t-d-\theta)} A_1 x(\theta) d\theta + \\ & P \int_{t-\tau}^t e^{A(t-\tau-h)} B_1 u(h) dh + P_1 \varphi(t)]. \end{aligned} \quad (11)$$

其中 P 为Riccati矩阵方程

$$A^T P + PA - PSP + Q = 0 \quad (12)$$

的唯一正定解; P_1 为Sylvester方程

$$(A^T - PS)P_1 + P_1 G = -PD_1 F \quad (13)$$

的唯一解, $S = BR^{-1}B^T$.

证 根据最优控制理论可以导出, 系统(1)和(2)关于二次型性能指标(9)或(10)的最优容错控制律的设计, 导致求解如下两点边值问题:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) - S\lambda(t) + D_1 F \varphi(t), & z(0) = z_0, \\ -\dot{\lambda}(t) = Qz(t) + A^T \lambda(t), & \lambda(\infty) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

并且, 最优控制律为

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T \lambda(t). \quad (15)$$

由分析可令

$$\lambda(t) = Pz(t) + P_1 \varphi(t), \quad (16)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}(t) = & (PA - PSP)z(t) + (P_1 G + \\ & PD_1 F - PSP_1) \varphi(t). \end{aligned} \quad (17)$$

由式(14)和(17)得

$$\begin{aligned} & (A^T P + PA + Q - PSP)z(t) + \\ & [(A^T - PS)P_1 + PD_1 F + P_1 G] \varphi(t) = 0. \end{aligned}$$

考虑到上式对任意 $z(t)$, $\varphi(t)$ 均成立, 则可导出 P 满足Riccati方程(12), 且 P_1 满足Sylvester方程(13).

下面证明最优控制律的唯一性. 显然, 要证最优控制律 $u^*(t)$ 的唯一性, 只需证明 P 和 P_1 的唯一性即可. 由假设1知系统(7)是完全可控的, 则由最优控制理论知, Riccati方程(12)有唯一正定解 P . 根据最优控制理论知 $(A - SP)$ 是Hurwitz矩阵, 则 $(A^T - PS)$ 是Hurwitz矩阵, 即

$$\operatorname{Re}[\lambda_i(A^T - PS)] < 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (18)$$

而外系统(2)是稳定的, 即 $\operatorname{Re} \lambda(G) \leq 0$, 故有

$$\begin{aligned} & \lambda_i(A^T - PS) + \lambda_j(G) \neq 0, \\ & i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, r. \end{aligned} \quad (19)$$

由引理1可知, Sylvester方程(13)有唯一解. 将式(16)代入式(15), 得到最优控制律

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T[Pz(t) + P_1 \varphi(t)]. \quad (20)$$

将式(3)代入式(20), 得到系统(1)的唯一最优容错控制律(11). 证毕.

由式(11)可看出, 最优容错控制律 $u^*(t)$ 包含了故障状态 $\varphi(t)$ 和系统状态 $x(t)$. 而 $\varphi(t)$ 一般不是物理量, 即使包含物理量 $f(t)$, 由于已假定故障是不可直接测量的, 所以用 $\varphi(t)$ 作为 $u^*(t)$ 中的变量是物理不可实现的. 另外对一般的系统来说, $x(t)$ 不一定是物理量, 或不一定都可测量, 此时用 $x(t)$ 作为 $u^*(t)$ 中的变量是物理不可实现的. 为了实现最优FTC, 必须解决 $\varphi(t)$ 和 $x(t)$ 的物理不可实现问题.

4 物理不可实现问题的解决(Solution of physically unrealizable problem)

令 $\psi(t) = [z(t)^T \varphi(t)^T]^T$, 结合式(2)和(7), 则有

$$\begin{aligned}\dot{\psi}(t) &= A_2\psi(t) + B_2u(t), \\ \eta(t) &= C_2\psi(t).\end{aligned}\quad (21)$$

其中

$$A_2 = \begin{bmatrix} A & D_1F \\ 0 & G \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C_2 = [C \ D_2F].$$

假设 3 $((C(\lambda I - A)^{-1}D_1F + D_2F), G)$ 和 (DF, G) 都是完全能观测的. 其中 $D = [D_1^T \ D_2^T]^T$, λ 为 $S(G) - S(A) \cap S(G)$ 的任意特征值, $S(*)$ 为 $*$ 的特征值集合.

由 (C, A) 完全可观测和假设3, 利用可观性的PBH特征向量判据, 可证明 (C_2, A_2) 是完全能观测的.

为方便故障诊断器的设计, 构造一个非奇异矩阵 $T = [T_1^T \ C_2^T]^T \in \mathbb{R}^{(n+r) \times (n+r)}$, 并令

$$T^{-1} = [H_1 \ H_2], H_1 = \begin{bmatrix} H_{11} \\ H_{21} \end{bmatrix}, H_2 = \begin{bmatrix} H_{12} \\ H_{22} \end{bmatrix},$$

其中 $H_1, H_2, H_{11}, H_{12}, H_{21}$ 和 H_{22} 都是适当维数的矩阵. 关于故障诊断器的设计, 给出如下定理.

定理 2 考虑由式(1)和(2)描述的线性时滞系统, 在满足假设1和假设3的条件下, 其故障诊断器可由下式描述:

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = (T_1 - LC_2)[A_2H_1x_c(t) + B_2u(t) + \\ \quad A_2(H_1L + H_2)y(t) + \\ \quad A_2(H_1L + H_2)CM(t)], \\ \hat{x}(t) = H_{11}x_c(t) + (H_{11}L + H_{12})y(t) + \\ \quad (H_{11}LC + H_{12}C - I)M(t), \\ \hat{\varphi}(t) = H_{21}x_c(t) + (H_{21}L + H_{22})y(t) + \\ \quad (H_{21}L + H_{22})CM(t), \\ \hat{f}_a(t) = [I \ 0] F \hat{\varphi}(t), \\ \hat{f}_s(t) = [0 \ I] F \hat{\varphi}(t). \end{cases}\quad (22)$$

其中:

$$A_2 = \begin{bmatrix} A & D_1F \\ 0 & G \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C_2 = [C \ D_2F],$$

$$\begin{aligned}M(t) &= \int_{t-d}^t e^{A(t-d-\theta)} A_1 \hat{x}(\theta) d\theta + \\ &\quad \int_{t-\tau}^t e^{A(t-\tau-h)} B_1 u(h) dh.\end{aligned}$$

0和I为适当维数的零阵和单位阵. $\hat{\varphi}(t)$ 为诊断出的

故障状态, $\hat{x}(t)$ 为观测出的系统状态, $\hat{f}_a(t)$ 为诊断出的执行器故障, $\hat{f}_s(t)$ 为诊断出的传感器故障.

证 令 $w(t) = T_1\psi(t)$, 则有

$$T\psi(t) = \begin{bmatrix} T_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \psi(t) = \begin{bmatrix} w(t) \\ \eta(t) \end{bmatrix},$$

即

$$\psi(t) = T^{-1} \begin{bmatrix} w(t) \\ \eta(t) \end{bmatrix} = H_1w(t) + H_2\eta(t).$$

令 $\bar{\psi}(t) = T\psi(t)$, 则有

$$\bar{\psi}(t) = \begin{bmatrix} w(t) \\ \eta(t) \end{bmatrix}.$$

对 $\bar{\psi}(t)$ 求导得

$$\begin{cases} \dot{w}(t) = \\ \quad T_1A_2H_1w(t) + T_1A_2H_2\eta(t) + T_1B_2u(t), \\ \dot{\eta}(t) = \\ \quad C_2A_2H_1w(t) + C_2A_2H_2\eta(t) + C_2B_2u(t). \end{cases}\quad (23)$$

由 (C_2, A_2) 完全能观测, 且 $T = [T_1^T \ C_2^T]^T$ 为非奇异矩阵, 可知 $(C_2A_2H_1, T_1A_2H_1)$ 是完全能观测的. 对式(23)构造Luenberger观测器

$$\begin{aligned}\dot{\hat{w}}(t) &= (T_1 - LC_2)[A_2H_1\hat{w}(t) + A_2H_2\eta(t) + \\ &\quad B_2u(t)] + L\dot{\eta}(t).\end{aligned}$$

其中 $\hat{w}$ 是状态 w 的估计值, L 是观测器的反馈增益矩阵.

为了消除微分项 $\dot{\eta}$, 引入变量代换

$$x_c(t) = \hat{w}(t) - L\eta(t),$$

则有

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = (T_1 - LC_2)[A_2H_1x_c(t) + B_2u(t) + \\ \quad A_2(H_1L + H_2)\eta(t)], \\ \hat{\psi}(t) = H_1x_c(t) + (H_2 + H_1L)\eta(t). \end{cases}\quad (24)$$

由式(24)可得降维状态观测器

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = (T_1 - LC_2)[A_2H_1x_c(t) + B_2u(t) + \\ \quad A_2(H_1L + H_2)\eta(t)], \\ \hat{z}(t) = H_{11}x_c(t) + (H_{11}L + H_{12})\eta(t), \\ \hat{\varphi}(t) = H_{21}x_c(t) + (H_{21}L + H_{22})\eta(t). \end{cases}\quad (25)$$

利用式(8)和(25), 并将传感器故障和执行器故障分离可得到故障诊断器(22). 证毕.

为了得到物理上可实现的最优容错控制律 $u^*(t)$, 将式(11)中的 $x(t)$ 和 $\varphi(t)$ 分别用式(22)中的观测值 $\hat{x}(t)$ 和 $\hat{\varphi}(t)$ 替代, 则可得到物理上可实现的动态最优

容错控制律为

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = A'x_c(t) + B'u(t) + C'y(t) + C'CM(t), \\ u^*(t) = D'x_c(t) + G'y(t) + G'CM(t). \end{cases} \quad (26)$$

其中:

$$\begin{aligned} A' &= (T_1 - LC_2)A_2H_1, \quad B' = (T_1 - LC_2)B_2, \\ C' &= (T_1 - LC_2)A_2(H_1L + H_2), \\ D' &= -R^{-1}B^T(PH_{11} + P_1H_{21}), \\ G' &= -R^{-1}B^T[P(H_{11}L + H_{12}) + P_1(H_{21}L + H_{22})]. \end{aligned}$$

5 仿真实例(Simulation example)

考虑由式(1)描述的系统, 其中:

$$\begin{aligned} A_0 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.3 \\ 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ B_1 &= \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.8 \end{bmatrix}, \quad D_1 = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad x(0) = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.1 \end{bmatrix}, \\ D_2 &= [0 \ 1], \quad C = [1 \ 0], \quad d = 10, \quad \tau = 2. \end{aligned}$$

考虑由式(2)描述的故障, 其中:

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -9 & 0 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\varphi(t_0) = [1 \ 0 \ 0 \ 1]^T, \quad t_a = 40 \text{ s}, \quad t_s = 20 \text{ s}.$$

取性能指标(10)中的 $Q = I_2, R = 1$, 故障诊断器的极点为 $-5 \pm j1, -4, -1 \pm j1$. 用MATLAB进行仿真. 图1和图2分别为故障诊断器输出的执行器故障和传感器故障的诊断值和真实值的对比曲线图. 图3和图4分别为最优FTC和经典最优控制下的状态变量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$. 利用式(10)计算得最优容错控制性能指标为 $J = 2.7696$, 而经典最优控制性能指标为 $J = 6.9082$.

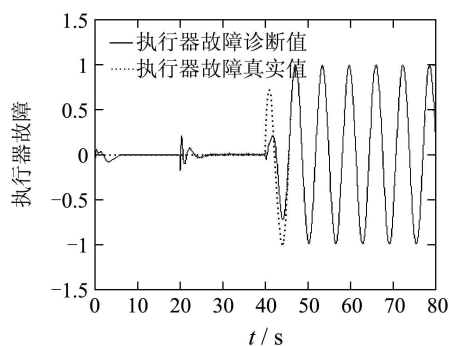


图1 执行器故障诊断值 $\hat{f}_a$

Fig. 1 Diagnosed actuator fault $\hat{f}_a$

由图1和图2可看出: 该故障诊断器诊断出的执行

器故障值和传感器故障值渐近趋向于其真实值, 说明本文提出的FD方法是有效的和可靠的. 由图3和图4可看出: 当系统发生故障时, 在衰减故障对系统内部状态变量的影响方面, 本文的最优FTC明显优于经典的最优控制. 由最优FTC的性能指标明显小于经典最优控制的性能指标, 同样说明本文的最优FTC优于经典的最优控制.

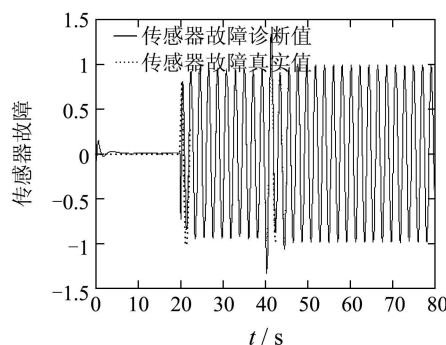


图2 传感器故障诊断值 $\hat{f}_s$

Fig. 2 Diagnosed sensor fault $\hat{f}_s$

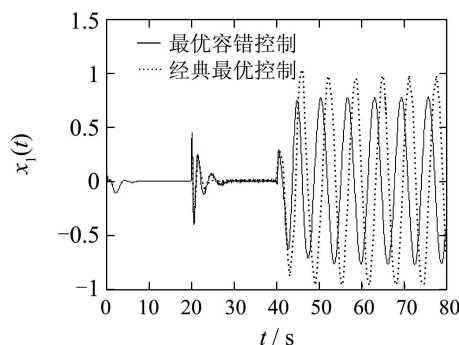


图3 状态变量 x_1

Fig. 3 State variable x_1

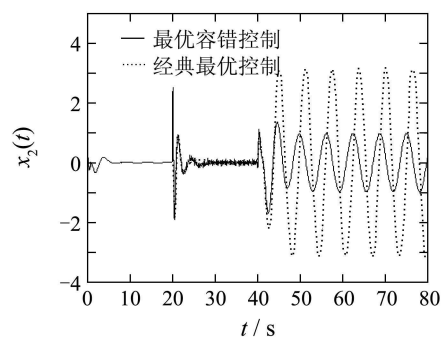


图4 状态变量 x_2

Fig. 4 State variable x_2

6 结论(Conclusions)

本文研究了线性时滞系统的FD方法和动态最优容错控制律的设计问题. 通过引入线性变换简化了设计过程中的计算. 通过把故障化为增广系统的

状态, 设计了使故障实时重现的降维故障诊断器. 通过最优控制理论和FD结果, 并利用Riccati矩阵方程和Sylvester方程给出了物理可实现的动态最优容错控制律的设计方法. 仿真结果证实了本文提出的FD方法和动态最优容错控制律的可行性和有效性.

参考文献(References):

- [1] NIKOUKHAH R, CAMPBELL S L. Auxiliary single design for active failure detection in uncertain linear systems with a priori information[J]. *Automatica*, 2006, 42(2): 219 – 228.
- [2] LI J, TANG G Y. Sensor fault detection and isolation based on reduced order observer and fault-tolerant control[J]. *Dynamics Continuous Discrete and Impulsive Systems-Series A-Mathematical Analysis*, 2006, 13(2s): 728 – 732.
- [3] JIANG J, ZHANG Y M. Accepting performance degradation in fault-tolerant control system design[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(2): 284 – 292.
- [4] WANG H, DALEY S. Actuator fault diagnosis: an adaptive observer-based technique[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41(7): 1073 – 1078.
- [5] WANG H, HUANG Z J, DELAY S. On the use of adaptive updating rules for actuator and sensor fault diagnosis[J]. *Automatica*, 1997, 33(2): 217–227.
- [6] ZHONG M Y, DING S X, LAM J, et al. Fault detection filter design for LTI system with time delays[C]//*Proceedings of the 42th IEEE conference on Decision and Control*. Maui: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003,10: 1467 – 1472.
- [7] 杨建军, 吴方向, 史忠科. 参数不确定性时滞系统的鲁棒 H_∞ 容错控制器设计[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(3): 442 – 444.
(YANG Jianjun, WU Fangxiang, SHI Zhongke. Robust fault-tolerant controller design for linear delay systems with uncertainty[J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(3): 442 – 444.)
- [8] YE D, YANG G H. Adaptive fault-tolerant control for a class of nonlinear systems with time delay[J]. *International Journal of Systems Science*, 2008, 39(1): 43 – 56.
- [9] GAO Z W, DING S X. State and disturbance estimator for time-delay systems with application to fault estimation and signal compensation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(12): 5541 – 5551.
- [10] TANG G Y. Feedforward and feedback optimal control for linear systems with sinusoidal disturbances[J]. *High Technology Letters*, 2001, 7(4): 16 – 19.
- [11] FIAGBEDZI Y A, PEARSON A E. Feedback stabilization of linear autonomous time lag systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1986, 31(9): 847 – 855.
- [12] LANCASTER P, LERER L, TISMENETSKY M. Factored forms for solutions of $AX - XB = C$ and $X - AXB = C$ in companion matrices[J]. *Linear Algebra and Its Applications*, 1984, 62: 19 – 49.

作者简介:

李娟 (1969—), 女, 青岛农业大学副教授, 博士, 硕士生导师, 目前研究方向为时滞系统、非线性系统、计算机智能控制系统的分析和设计、故障诊断和容错控制等, E-mail: lijuan291@sina.com;

叶若红 (1980—), 女, 硕士研究生, 目前主要研究方向为动态系统的故障诊断和容错控制, E-mail: hongruoye@163.com.