

文章编号: 1001-0920(2008)04-0439-06

含控制时滞系统的实时故障诊断和最优容错控制

李娟^{1,2}, 叶若红², 唐功友¹

(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 青岛农业大学 机电工程学院, 山东 青岛 266109)

摘要: 研究含有控制时滞的线性系统的故障诊断方法和最优容错控制问题. 给出了最优容错控制律的存在唯一性条件, 提出了最优容错控制律的设计算法. 通过构造增广的降维状态观测器, 设计了在线诊断故障的故障诊断器并同时实现了系统状态的观测, 解决了最优容错控制的物理不可实现问题. 利用观测器的输出得到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律的有效性.

关键词: 控制时滞系统; 增广状态观测器; 实时故障诊断; 动态最优容错控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Real-time fault diagnosis and optimal fault-tolerant control for systems with control time-delay

LI Juan^{1,2}, YE Ruohong¹, TANG Gongyou²

(1. College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Nongye University, Qingdao 266109, China. Correspondent: LI Juan, E-mail: lijuan@ouc.edu.cn)

Abstract: The method of fault diagnosis and the optimal fault-tolerant control problem are studied for linear systems with control time-delay. The existence and uniqueness condition of optimal fault-tolerant control law is given, and the algorithm for solving the optimal fault-tolerant control problem is presented. The on-line fault diagnosis and the observation of system states are realized by constructing the augmented reduced-order state observer, and the physically unrealizable problem is solved. In addition, the physically realizable dynamic optimal fault-tolerant control law is obtained by utilizing the outputs of state observer. Simulation example shows the effectiveness of the fault diagnosis scheme and the dynamic optimal fault-tolerant control law.

Key words: Systems with control time-delay; Augmented state observer; Real-time fault diagnosis; Dynamic optimal fault-tolerant control

1 引言

在各类工业系统中,一方面由于测量的延时及传输延时等原因,时滞现象的存在是极其普遍的,如皮带传输或齿轮啮合等,时滞的存在使系统的分析和综合变得更复杂和困难;另一方面由于现代工业系统不断增加的复杂性,故障诊断变得越来越重要^[1],研究时滞系统的故障诊断和容错控制问题具有重要的理论意义和应用价值.

近年来,时滞系统故障诊断和容错控制的研究已有一定的成果,但与无时滞的研究成果相比还是比较少.文献[2,3]研究了存在未知输入或干扰情况下的故障检测和分离问题,[4]提出了基于降维观测

器的故障检测方法并对检测到的故障进行了容错控制,但是以上文献的系统模型都没有考虑时滞.[5]针对不确定线性时滞系统提出了一种基于观测器的鲁棒故障检测和辨识方法,分析了未知输入的鲁棒性和故障的敏感性.[6]针对带有未知输入的线性时滞系统,利用左特征结构配置方法和 H 优化方法提出了一种新的故障检测滤波器的设计方法.[7]研究了具有不确定输入的状态时滞系统的故障诊断问题,利用解析冗余的方法设计了故障检测观测器.[8]针对具有不确定输入的状态时滞系统借助线性矩阵不等式技术研究了时滞依赖鲁棒故障诊断系统的设计方法.[9]研究了不确定时滞系统的鲁棒容错

收稿日期: 2006-12-22; 修回日期: 2007-04-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574023); 山东省自然科学基金项目(Z2005 G01); 青岛市自然科学基金项目(05-1-JC-94).

作者简介: 李娟(1969—),女,山东海阳人,副教授,博士生,从事时滞系统、非线性系统等研究;唐功友(1953—),男,山东烟台人,教授,博士生导师,从事时滞系统、网络控制系统等研究.

控制问题,基于 Lyapunov 稳定性原理提出了一种带时滞的状态反馈控制律,并证明了这种控制律使闭环系统故障具有完整性和鲁棒性.[10]对不确定时滞系统,利用线性矩阵不等式提出了鲁棒 H_∞ 容错控制器的构造性设计方法.上面文献大都只是通过残差对故障信号的敏感性来检测或诊断故障,即通过残差来反映故障,而不是直接使故障在线重现.[11]用逐次逼近法讨论了前馈-反馈最优控制问题,但没有考虑发生故障的情况.对非完整性控制或故障导致的非完全失效情况下的时滞系统的最优容错控制目前还较少看到.

基于以上情况,本文针对含有控制时滞的线性系统,研究了传感器和执行器发生非完全失效故障情况下的故障诊断方法以及系统在二次型性能指标意义下的最优容错控制问题.首先通过特殊的坐标变换将其转换为无时滞系统;然后给出了系统在故障情况下满足二次型性能指标最优容错控制律的存在唯一性条件和设计算法;为了使最优容错控制物理上可实现,设计了能够同时在线诊断出具体故障并观测出系统状态的增广的降维状态观测器,利用诊断出的故障状态和观测出的系统状态设计了动态最优容错控制律.

2 问题描述

2.1 系统描述和无时滞转换

考虑如下带有故障的线性时滞控制系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t - \tau) + D_1 f(t), \quad t > 0; \\ x(t) &= \varphi(t), \quad t \in [-\tau, 0]; \\ y(t) &= Cx(t) + D_2 f(t). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in R^n$ 为状态向量; $u(t) \in R^p$ 为控制向量; $f(t) \in R^m$ 为故障向量且可以是不可测量的; $y(t) \in R^q$ 为输出向量; A, B, C, D_1 和 D_2 为适当维数的常量矩阵; $\tau > 0$ 为已知的控制时滞.

假设1 假设 (A, B) 完全能控, (C, A) 完全能观测.

假定故障 $f(t)$ 的动态特性是已知的且可由下列外系统描述:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Gz(t), \quad t > t_0, \quad (z_0) = z_0; \\ z(t) &= 0, \quad t \in [0, t_0]; \\ f(t) &= Fz(t). \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} z(t) &= \begin{bmatrix} z_a(t) \\ z_s(t) \end{bmatrix}, \quad f(t) = \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_s(t) \end{bmatrix}, \\ G &= \begin{bmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} F_a & 0 \\ 0 & F_s \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$z \in R(m+r)$ 为外系统(2)的状态向量;故障的初

始时刻 t_0 和初始状态 z_0 是未知的; $G \in R^{r \times r}$ 和 $F \in R^{m \times r}$ 为常量矩阵, $\text{rank } F = m$, f_a 代表执行器故障,执行器故障的初始时刻为 t_a ; f_s 代表传感器故障,传感器故障的初始时刻为 t_s .当 $t < t_a$ 时有 $f_a(t) = 0$,当 $t < t_s$ 时有 $f_s(t) = 0$;定义 $t_0 = \min\{t_a, t_s\}$,则当 $t < t_0$ 时有 $f(t) = 0$; G_1, G_2, F_a 和 F_s 是适当维数的常量矩阵.

注1 外系统(2)是阶跃故障、正弦故障、衰减故障、指数故障等常见的连续变化故障的通用表达式.

为了进行最优容错控制,首先将时滞系统转换为无时滞系统.为此,作如下的线性变换:

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

其中 $B_1 = e^{-A} B$.式(3)两边对 t 微分得

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= \dot{x}(t) + A \int_{t-\tau}^t e^{A(t-h)} B_1 u(h) dh + \\ & B_1 u(t) - B u(t - \tau). \end{aligned}$$

将式(1)和(3)代入上式,则可将系统(1)转化为如下无时滞等价系统:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az(t) + B_1 u(t) + D_1 f(t), \quad t > 0, \\ z(0) &= z_0, \\ (t) &= Cz(t) + D_2 f(z). \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $z(t) \in R^n$ 为转化后无时滞系统的状态变量.故系统(1)和系统(4)的变量关系为

$$\begin{aligned} x(t) &= z(t) - \int_{t-\tau}^t e^{A(t-h)} B_1 u(h) dh, \\ y(t) &= (t) - C \int_{t-\tau}^t e^{A(t-h)} B_1 u(h) dh. \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 最优容错性能指标的选取

对于无限时域的最优控制问题,针对由外系统(2)描述的故障的不同情形,可以选取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:

$$J = \int_0^\infty [z^T(t) Qz(t) + u^T(t) Ru(t)] dt. \quad (6)$$

其中: $Q \in R^{n \times n}$ 为半正定矩阵, $R \in R^{m \times m}$ 为正定矩阵.

对外系统(2)为稳定但非渐近稳定的情形,如果选择(6)作为系统的性能指标,因为系统中的故障不能趋近于零,所以无论如何选择控制律 $u(t)$,它必为不收敛的.在这种情况下,可以选取平均二次型性能指标

$$\begin{aligned} J &= \lim_T \frac{1}{T} \int_0^T [z^T(t) Qz(t) + \\ & u^T(t) Ru(t)] dt, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 Q 和 R 与式(6)相同.

系统(1)关于性能指标(6)或(7)的无限时域

的最优容错控制问题,就是要寻找最优容错控制 $u^*(t)$,使得故障情况下的二次型性能指标 J 取得极小值.

假设 2 (F, G) 是完全可观测的, $\text{rank } G = r$, 矩阵 G 的所有特征值满足

$$\text{Re}[i(G)] < 0, i = 1, 2, \dots, r,$$

且具有零实部的特征值为矩阵 G 的最小多项式的单根.

注 2 假设 2 表明,外系统 (2) 是稳定的但不一定是渐近稳定的.假设 2 是必要的,否则,故障分量中将至少有一个趋向于无穷大,其无限时域最优性能指标将趋向于无穷大.

3 最优容错控制律的设计

最优容错控制律的设计用到以下引理.

引理 1^[12] 设 $A \in R^{n \times n}, B \in R^{m \times m}, C \in R^{n \times m}, X \in R^{n \times m}$, 则矩阵方程 $AX + XB = -C$ 的解 X 存在且唯一的充要条件是

$$i(A) + j(B) < 0,$$

$$i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m,$$

其中 $i(A)$ 和 $j(B)$ 分别为矩阵 A 和 B 的特征值.

对于系统 (1) 关于性能指标 (6) 或 (7) 的最优容错控制问题,给出如下定理.

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 (6) 或 (7) 的最优容错控制律存在且唯一,并描述如下:

$$u^*(t) = -R^{-1}B_1^T [Px(t) + \int_t^T e^{A(T-h)} B_1 u(h) dh + P_1 f(t)]. \quad (8)$$

其中: P 为 Riccati 矩阵方程

$$A^T P + PA - PS P + Q = 0 \quad (9)$$

的唯一正定解; P_1 为 Sylvester 方程

$$(A^T - PS) P_1 + P_1 G = -PD_1 F \quad (10)$$

的唯一解, $S = B_1 R^{-1} B_1^T; B_1 = e^{-A} B$.

证明 系统 (4) 关于性能指标 (6) 或 (7) 的 Hamilton 函数为

$$H(\cdot) = z^T(t) Qz(t) + u^T(t) Ru(t) + \lambda^T(t) (Az(t) + Bu(t) + D_1 F(t)),$$

其中 $\lambda(t)$ 为引入的 Lagrange 乘子向量函数.

利用变分法和 J 取极小的必要条件,可知使性能指标泛函取极值的控制和轨线必须满足

$$\frac{\partial H}{\partial z} = \dot{z}, \frac{\partial H}{\partial z} = -\dot{\lambda}, \frac{\partial H}{\partial u} = 0.$$

即上述方程组导致求解如下两点边值问题:

$$\dot{z}(t) = Az(t) - S^{-1}(\lambda(t) + D_1 F(t)),$$

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}(t) &= Qz(t) + A^T \lambda(t), \\ z(0) &= z_0, \lambda(T) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

并且,最优控制律为

$$u^*(t) = -R^{-1}B_1^T \lambda(t). \quad (12)$$

由分析可令

$$\lambda(t) = Pz(t) + P_1 f(t), \quad (13)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}(t) &= PAz(t) - PS^{-1}(\lambda(t) + D_1 F(t)) + PD_1 F(t) + P_1 G f(t) = \\ &= (PA - PS P)z(t) + (P_1 G + PD_1 F - PS P_1) f(t). \end{aligned} \quad (14)$$

由式 (11) 和 (14) 可得

$$\begin{aligned} (A^T P + PA + Q - PS P)z(t) + \\ [(A^T - PS)P_1 + PD_1 F + P_1 G] f(t) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

考虑到式 (15) 对任意 $z(t), f(t)$ 均成立,则可导出 P 满足方程 (9), P_1 满足方程 (10).

下面证明最优控制律 (8) 的存在唯一性.显然,只要证明 P 和 P_1 存在唯一性即可.

由 (A, B) 完全可控和 $B_1 = e^{-A} B$, 可证明 $\text{rank}[sI - A \quad B_1] = n$, 即 (A, B_1) 也完全可控.由最优控制理论知,在满足假设 1 的条件下, Riccati 方程 (9) 有唯一正定解 P .

根据最优控制理论知 $(A - PS)$ 是 Hurwitz 矩阵, 则 $(A^T - PS)$ 是 Hurwitz 矩阵, 即

$$\text{Re}[i(A^T - PS)] < 0, i = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

而外系统 (2) 是稳定的, 即 $\text{Re}(G) < 0$, 故有

$$\begin{aligned} i(A^T - PS) + j(G) < 0, \\ i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, r. \end{aligned} \quad (17)$$

所以,由引理 1 可知, Sylvester 方程 (10) 有唯一解 P_1 . 将式 (13) 代入 (12), 得到最优控制律

$$u^*(t) = -R^{-1}B_1^T [Pz(t) + P_1 f(t)]. \quad (18)$$

当 P 和 P_1 唯一确定后, 将式 (3) 代入 (18), 得到系统 (1) 的唯一最优容错控制律 (8).

由式 (8) 描述的最优容错控制律 $u^*(t)$ 包含了故障的状态向量 $f(t)$ 和系统的状态向量 $x(t)$. 而 $f(t)$ 一般不是物理量, 即使 $x(t)$ 中包含物理量 $f(t)$, 因为已假定故障 $f(t)$ 可以是不可测量的, 所以用 $f(t)$ 作为 $u^*(t)$ 中的变量是物理不可实现的. 为了实现最优容错控制, 必须解决 $f(t)$ 的物理不可实现问题, 即构造一个故障状态诊断器. 另外对一般的系统而言, 状态 $x(t)$ 不一定是物理量, 或不一定都可测量, 或虽可测量但测量传感器的代价太高, 为了实现最优容错控制, 必须对系统进行状态估计.

4 故障诊断和物理不可实现问题的解决

为了既能解决 $f(t)$ 的物理不可实现问题又能观测出系统状态 $x(t)$, 集状态观测器和故障状态诊

断器于一体,在故障状态诊断的同时进行系统状态估计.为此,拟利用控制向量 $u(t)$ 和输出向量 $y(t)$ 来构造系统(1)和外系统(2)的增广的降维状态观测器来解决这一问题,从而实现动态最优容错控制.有关故障诊断和动态最优容错控制,给出如下定理.

定理 2 考虑由式(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,其故障诊断器为

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= (T_1 - LC_2)[A_2 H_1 x_c(t) + B_2 u(t) + \\ &A_2(H_1 L + H_2)y(t) + \\ &A_2(H_1 L + H_2)C \int_{t_0}^t e^{A(t-h)} B_1 u(h) dh], \\ \hat{x}(t) &= H_{11} x_c(t) + (H_{12} + H_{11} L)y(t) + \\ &(H_{12} C + H_{11} LC - I) \int_{t_0}^t e^{A(t-h)} B_1 u(h) dh, \\ \hat{u}(t) &= H_{21} x_c(t) + (H_{22} + H_{21} L)y(t) + \\ &(H_{22} + H_{21} L)C \int_{t_0}^t e^{A(t-h)} B_1 u(h) dh, \\ f(t) &= F^{\wedge}(t). \end{aligned} \tag{19}$$

其中: $\hat{x}(t)$ 是观测出的系统状态, $\hat{u}(t)$ 为诊断出的故障状态, $f(t)$ 为诊断出的故障.

满足性能指标(6)或(7)的物理可实现的动态最优容错控制律为

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= A x_c(t) + B u(t) + C y(t) + \\ &C C \int_{t_0}^t e^{A(t-h)} B u(h) dh, \\ u^*(t) &= D x_c(t) + G y(t) + \\ &G C \int_{t_0}^t e^{A(t-h)} B u(h) dh. \end{aligned} \tag{20}$$

其中

$$\begin{aligned} A &= (T_1 - LC_2)A_2 H_1, \\ B &= (T_1 - LC_2)B_2, \\ C &= (T_1 - LC_2)A_2(H_1 L + H_2), \\ D &= -R^{-1}(e^{-A} B)^T(PH_{11} + P_1 H_{21}), \\ G &= -R^{-1}(e^{-A} B)^T(PH_{12} + \\ &PH_{11} L + P_1 H_{22} + P_1 H_{21} L). \end{aligned}$$

证明 首先,将故障状态看作系统的一个状态,将转换后的系统(4)和由外系统描述的故障(2)一起构成一个不显含故障状态的增广系统,则有

$$\begin{aligned} \dot{w}(t) &= A_2 w(t) + B_2 u(t), \\ \dot{z}(t) &= C_2 w(t). \end{aligned} \tag{21}$$

其中

$$\begin{aligned} w(t) &= \begin{bmatrix} z(t) \\ (t) \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} A & D_1 F \\ 0 & G \end{bmatrix}, \\ B_2 &= \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix}, C_2 = [C \quad D_2 F]. \end{aligned}$$

由于已假定 (C, A) 和 (F, G) 完全可观测,且 $\text{rank } G = r$, 故可证明 $\text{rank} \begin{bmatrix} sI - A_2 \\ C_2 \end{bmatrix} = n + r$, 即 (C_2, A_2) 是完全可观测的. 构造一个 $(n + r) \times (n + r)$ 阶非奇异矩阵 $T = [T_1^T \quad C_2^T]^T$, 并令

$$T^{-1} = [H_1 \quad H_2], w(t) = T_1^{-1} z(t), \tag{22}$$

其中: H_1 为 $(n + r) \times (n + r - q)$ 矩阵, H_2 为 $(n + r) \times q$ 矩阵. 则有

$$T^{-1} z(t) = \begin{bmatrix} T_1^{-1} z(t) \\ C_2^{-1} z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w(t) \\ (t) \end{bmatrix}, \tag{23}$$

即

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} w(t) \\ (t) \end{bmatrix} &= T^{-1} \begin{bmatrix} z(t) \\ C_2 z(t) \end{bmatrix} = H_1 w(t) + H_2 (t). \end{aligned} \tag{24}$$

令 $\hat{w}(t) = T^{-1} z(t)$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{\hat{w}}(t) &= \begin{bmatrix} T_1^{-1} \dot{z}(t) \\ C_2^{-1} \dot{C}_2 z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1^{-1} \\ C_2^{-1} \end{bmatrix} (A_2 w(t) + B_2 u(t)) = \\ &\begin{bmatrix} T_1 A_2 H_1 w(t) + T_1 A_2 H_2 (t) + T_1 B_2 u(t) \\ C_2 A_2 H_1 w(t) + C_2 A_2 H_2 (t) + C_2 B_2 u(t) \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{25}$$

即

$$\begin{aligned} \dot{\hat{w}}(t) &= T_1 A_2 H_1 w(t) + T_1 A_2 H_2 (t) + T_1 B_2 u(t), \\ \dot{(t)} &= C_2 A_2 H_1 w(t) + C_2 A_2 H_2 (t) + C_2 B_2 u(t). \end{aligned} \tag{26}$$

由 (C_2, A_2) 完全可观测, 且 $T = [T_1^T \quad C_2^T]^T$ 为非奇异矩阵, 则有 $\text{rank} \begin{bmatrix} sI - T_1 A_2 H_1 \\ C_2 A_2 H_1 \end{bmatrix} = n + r - q$, 即 $(C_2 A_2 H_1, T_1 A_2 H_1)$ 是完全可观测的. 在这种情况下, 通过把 $T_1 A_2 H_2 (t) + T_1 B_2 u(t)$ 和 $\dot{(t)} - C_2 A_2 H_2 (t) - C_2 B_2 u(t)$ 分别看作是等效输入和等效输出, 可以对式(26)构造 Luenberger 观测器如下:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{w}}(t) &= (T_1 - LC_2)[A_2 H_1 \hat{w}(t) + \\ &A_2 H_2 (t) + B_2 u(t)] + L \dot{(t)}. \end{aligned} \tag{27}$$

其中: \hat{w} 是状态 w 的估计值, L 是观测器增益矩阵.

为了消除微分项, 引入变量代换 $x_c(t) = \hat{w}(t) - L (t)$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= \dot{\hat{w}}(t) - L^T(t) = \\ &(T_1 - LC_2)[A_2 H_1 x_c(t) + B_2 u(t) + \\ &A_2(H_1 L + H_2)(t)], \\ \hat{x}(t) &= T^{-1} \begin{bmatrix} \hat{w}(t) \\ (t) \end{bmatrix} = H_1 \hat{w}(t) + H_2(t) = \\ &H_1 x_c(t) + (H_2 + H_1 L)(t). \end{aligned} \quad (28)$$

令 $H_1 = [H_{11}^T \ H_{21}^T]^T$, $H_2 = [H_{12}^T \ H_{22}^T]^T$, 其中 H_{11} , H_{12} , H_{21} 和 H_{22} 是适当维数的矩阵, 则可得降维状态观测器

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= (T_1 - LC_2)[A_2 H_1 x_c(t) + B_2 u(t) + \\ &A_2(H_1 L + H_2)(t)], \\ \hat{x}(t) &= H_{11} x_c(t) + (H_{12} + H_{11} L)(t), \\ \hat{z}(t) &= H_{21} x_c(t) + (H_{22} + H_{21} L)(t). \end{aligned} \quad (29)$$

由式(5) 求出 $z(t)$ 和 (t) , 将其代入式(29), 并把故障状态转化为故障, 则得式(19).

为了得到物理可实现的容错控制律, 将最优容错控制律(8) 中的 $x(t)$ 和 (t) 分别用观测值 $\hat{x}(t)$ 和 $\hat{z}(t)$ 替代, 得到

$$\begin{aligned} u^*(t) &= \\ &-R^{-1}(e^{-A} B)^T [P \hat{x}(t) + \\ &P \int_{t_0}^t e^{A(t-h)} B_1 u(h) dh + P_1 \hat{z}(t)]. \end{aligned} \quad (30)$$

将式(19) 中的 $\hat{x}(t)$ 和 $\hat{z}(t)$ 代入式(30), 则可以得到动态最优容错控制(20).

5 仿真示例

考虑如下线性时滞系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3 & 2 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u(t-1) + \\ &\begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} f(t), \quad t > 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x(t) &= [0.3 \ 0.2]^T, \quad t \in [-1, 0], \\ y(t) &= [1 \ 0]x(t) + [0 \ 1]f(t). \end{aligned} \quad (31)$$

假设故障 $f(t)$ 的动态特性由下列外系统描述:

$$\begin{aligned} \dot{f}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -4 & 0 \end{bmatrix} f(t), \quad t > t_0, \\ f(t) &= 0, \quad t \in [0, t_0], \\ (t_0) &= [1 \ 0 \ 0 \ 1]^T, \\ f(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (t). \end{aligned} \quad (32)$$

其中: 传感器故障发生在 $t_s = 20$ s, 执行器故障发生在 $t_a = 50$ s. 所以 $t_0 = 20$ s, 当 $t < 20$ s 时有 $f(t) = 0$.

将降维观测器的极点配置到 $-3, -2 \pm j1, -1$

$\pm j1$. 依照 Ackermann 公式, 可得到观测器的增益矩阵 L 如下:

$$L = [-1.0392 \ 23.1478 \ -1.2308 \ 3.4872 \ 2.4216]^T.$$

取非奇异矩阵 T 为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

用 Matlab 进行仿真. 图 1 为故障诊断器诊断出的执行器故障和传感器故障. 图 2(a) 和(b) 分别为最优容错控制和经典最优控制中的状态变量 x_1 和 x_2 , 图 3 为最优容错控制和经典最优控制中的控制输入变量 u .

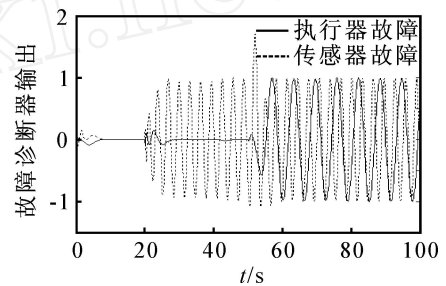
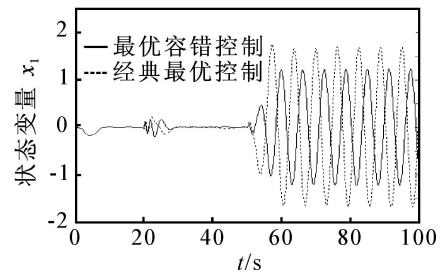
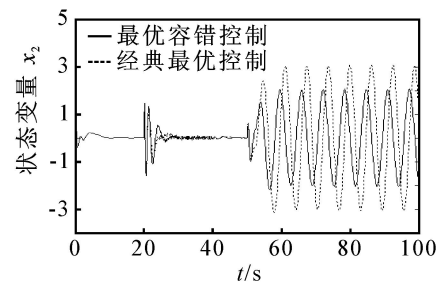


图 1 故障诊断器的输出



(a) 状态变量 x_1



(b) 状态变量 x_2

图 2 状态变量

由图 1 故障诊断器的输出曲线可知, 本文设计的降维故障诊断器诊断出的故障与实际发生的故障一致, 表明该故障诊断器是有效的. 由图 2 和图 3 的

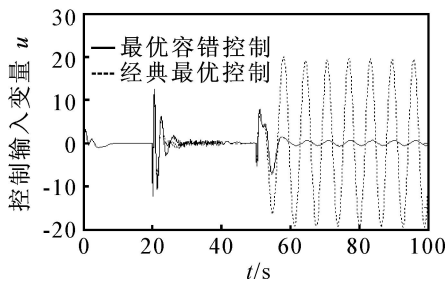


图3 状态变量 x_2

仿真结果可知,当时滞系统发生故障时,在二次型性能指标最小意义下,在衰减故障对系统状态变量和控制输入变量的影响方面,本文的最优容错控制明显优于经典的最优控制,表明本文所设计的动态最优容错控制是有效的。

6 结 论

本文研究了含有执行器故障和传感器故障的含控制时滞的线性系统的故障诊断和容错控制问题,设计了能实时在线诊断出具体故障的降维故障诊断器,利用 Riccati 矩阵方程和 Sylvester 方程给出了动态最优容错控制律的存在唯一性条件和设计算法。仿真结果表明,本文提出的故障诊断方法和动态最优容错控制律是可行且有效的。

参考文献(References)

- [1] Xu A P, Zhang Q H. Nonlinear system fault diagnosis based on adaptive estimation[J]. Automatica, 2004, 40(7): 1181-1193.
- [2] Commault C, Dion J M, Sename O, et al. Observer-based fault detection and isolation for structured systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(12): 2074-2079.
- [3] Ding X, Guo L, Jeansch T. A characterization of parity space and its application to robust fault detection[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(2): 337-343.
- [4] Li J, Tang G Y. Sensor fault detection and isolation based on reduced order observer and fault-tolerant control[J]. Dynamics Continuous Discrete and Inputse System — Series A, 2006, 13(2S): 728-732.
- [5] Jiang C H, Zhou D H. Fault detection and identification for uncertain linear time-delay systems [J]. Computers and Chemical Engineering, 2005, 30(2): 228-242.
- [6] Zhong M Y, Ding S X, Lam J, et al. Fault detection filter design for LTI system with time delays[C]. Proc of the 42nd IEEE Conf on Decision and Control. Hawaii: IEEE Press, 2003: 1467-1472.
- [7] You F Q, Tian Z H, Shi S J. Robust fault diagnosis for linear time-delay systems with uncertainty [C]. American Control Conf. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2005: 1666-1671.
- [8] 白雷石, 田作华, 施颂椒. 基于时滞依赖 H 滤波器的时滞系统故障诊断[J]. 控制与决策, 2005, 20(9): 1012-1016.
(Bai Lei-shi, Tian Zuo-hua, Shi Song-jiao. Fault diagnosis for time-delay systems based on delay-dependent H filter [J]. Control and Decision, 2005, 20(9): 1012-1016.)
- [9] 刘鹏, 周东华. 不确定时滞线性系统的鲁棒容错控制研究[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(1): 78-80.
(Liu Peng, Zhou Dong-hua. Study on robust tolerant control of uncertain linear time-delay systems [J]. Control Theory and Applications, 2003, 20(1): 78-80.)
- [10] 张刚, 王执钫. 不确定时滞系统相容指标下的鲁棒容错控制器设计[J]. 控制与决策, 2006, 21(6): 666-670.
(Zhang Gang, Wang Zhi-guan. Robust fault-tolerant controller design for nonlinear uncertain time-delay systems with constrains of consistent indices [J]. Control and Decision, 2006, 21(6): 666-670.)
- [11] Tang G Y. Feedforward and feedback optimal control for linear systems with sinusoidal disturbances [J]. High Technology Letters, 2001, 7(4): 16-19.
- [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.