传感器失效中立时滞系统的容错控制*

王岩青[1],赵中华[2]

(1. 解放军理工大学 理学院,江苏 南京　211101;2. 南京财经大学 应用数学系,江苏 南京　210003)

摘　要:基于 稳定性理论,研究了中立型时滞系统对传感器失效具有完整性的鲁棒容错控制律的设计方法,得到了通过线性矩阵不等式(LMI)表示的系统渐近稳定的充分条件。在该容错控制器作用下,可以保证系统对传感器故障不敏感,仍能在一定的性能指标下稳定运行。仿真结果表明了本文设计方法的有效性。

关键词:中立型时滞系统;容错控制;传感器;LMI

中图分类号:TP271　　文献标识码:A　　文章编号:1671 - 5322(2006)01 - 0004 - 04

在实际应用中,当系统的传感器、执行器或其它部件发生故障时,可能会导致系统无法达到满意的性能,甚至失去稳定性。完整性是指当系统中有传感器或执行器失效时,系统仍能保持渐近稳定的特性。随着工业生产过程自动化程度的提高,系统结构越来越复杂,检测仪表和执行机构的使用数量也越来越多,一个局部出现故障,常会产生链式反应,以致于导致整个自动控制系统崩溃,不仅造成巨大经济损失,而且会危及人身安全,因此容错控制技术愈来愈得到重视。然而在实际的控制过程中,某些控制对象又往往具有滞后特性,时滞现象又是导致系统不稳定的重要因素。有许多控制系统,不仅在状态中存在时滞,而且在状态导数中也存在时滞,这样的系统一般称中立型延迟系统[1]。目前有关这方面的研究成果越来越多,但大部分研究针对的都是一般线性系统[2,3]和一般的线性时滞系统[4-6]对中立型延迟系统的研究成果并不多见。因此,研究中立型延迟系统的容错问题具有重要的意义。

本文根据稳定性理论,给出了此类系统基于线性矩阵不等式(LMI)形式的渐近稳定的充分条件,最后,通过具体算例验证了,本文借助于 MATLAB 中的 LMI 工具箱得到的控制器对传感器失效具有完整性。

1　问题描述

考虑如下中立时滞系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_h x(t-h) + A_d \dot{x}(t-d) + Bu(t) \tag{1}$$

其中 $x(t) \in R^n$,为状态向量,$u(t) \in R^m$ 为控制输入,A, A_h, A_d, B 为具有适当维数的常值矩阵,h, d 为正的时滞常数。

假设(A,B)可控,采用如下的状态反馈控制律

$$u(t) = Kx(t) \tag{2}$$

考虑到传感器的可能失效,引入开关阵,并把它放在状态反馈增益阵和状态之间,其形式为

$$F = \mathrm{diag}(f_1, f_2, \cdots, f_n) \tag{3a}$$

其中,

* 收稿日期:2005 - 09 - 20
作者简介:王岩青(1971 -),男,山西晋中市人,解放军理工大学讲师,南京航空航天大学在读博士研究生。

$$
f_i = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 个传感器正常,} \\ \alpha(0 < \alpha < 1) & \text{第 } i \text{ 个传感器部分失效}, i = 1,2,\cdots,n \\ 0 & \text{第 } i \text{ 个传感器失效}. \end{cases} \tag{3b}
$$

用 Ω 表示所有可能的的集合,由此构成闭环系统为

$$
\dot{x}(t) = (A + BKF)x(t) + A_h x(t-h) + A_d \dot{x}(t-d) \tag{4}
$$

本文的目的是对所有可能的 $F \in \Omega$,设计控制器 K,使得闭环系统(4)渐近稳定.

2　主要结果

首先给出一个必要的引理。

引理 1[7,8] 任意两个适当维数的实矩阵 X 和 Y 和任意正标量 $\varepsilon > 0$,有

$$
XY + Y^T X^T \leqslant \varepsilon XX^T + \varepsilon^{-1} Y^T Y
$$

定理 1 对任意的传感器故障 $F \in \Omega$ 以及正的标量 ε_1,如果均存在相同的适当维数的正定对称矩阵 $P > 0$、$Q_1 > 0$、$Q_2 > 0$ 和正数 $\gamma > 0$,满足如下的线性矩阵不等式组(LMIs)式(5)和式(6)

$$
\begin{bmatrix}
PA + A^T P + Q_1 + Q_2 & PA_h & (PA + Q_1 + Q_2)A_d & \sqrt{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}PB & F^T PB & 0 \\
* & -Q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
* & * & A_d^T(Q_1 + Q_2)A_d - Q_2 & 0 & 0 & A_d^T F^T PB \\
* & * & * & -I & 0 & 0 \\
* & * & * & * & -\varepsilon_1\gamma^2 I & 0 \\
* & * & * & * & * & -\varepsilon_2\gamma^2 I
\end{bmatrix} < 0 \tag{5}
$$

$$
W = Q_2 - A_d^T(Q_1 + Q_2)A_d > 0 \tag{6}
$$

则当传感器失效时闭环系统(4)仍渐近稳定,且状态反馈增益阵为

$$
K = -\frac{1}{\gamma}B^T P
$$

其中,(*)部分由对称性可得。

证明 对任意的传感器故障矩阵 $F \in \Omega$,对于闭环系统(4),选取 Lyapunov 函数为

$$
V(x) = \mathscr{D}^{\mathrm{T}}(t)P\mathscr{D}(t) + \int_{t-h}^{t} x^T(s)Q_1 x(s)\,\mathrm{d}s + \int_{t-\mathrm{d}}^{t} x^T(s)Q_2 x(s)\,\mathrm{d}s \tag{7}
$$

其中　$(t) = x(t) - A_d x(t-\mathrm{d})$

由式(6)容易得到

$$
A_d^T Q_2 A_d - Q_2 < 0
$$

所以,由文献[1]可知,算子 $\mathscr{D}(t)$ 是稳定的。

以下为了描述的简单,分别记 $x(t)$、$x(t-h)$、$x(t-\mathrm{d})$、$\mathscr{D}(t)$ 为 x、x_h、x_d、$\mathscr{D}$ 则式(6)沿闭环系统(4)对时间的导数为

$$
\begin{aligned}
\dot{V}(x) &= 2\mathscr{D}^T P(A + BKF)x + 2\mathscr{D}^T PA_h x_h \mathscr{D} + x^T Q_1 x - x_h^T Q_1 x_h + x^T Q_2 x - x_d^T Q_2 x_d \\
&= 2\mathscr{D}^T P(A + BKF)[\mathscr{D} + A_d x_d] + 2\mathscr{D}^T PA_h x_h + x^T Q_1 x - x_h^T Q_1 x_h + x^T Q_2 x - x_d^T Q_2 x_d \\
&= \mathscr{D}^T[P(A + BKF) + (A + BKF)^T P]\mathscr{D} + 2\mathscr{D}^T P(A + BKF)A_d x_d + 2\mathscr{D}^T PA_h x_h \\
&\quad + x^T Q_1 x - x_h^T Q_1 x_h + x^T Q_2 x - x_d^T Q_2 x_d
\end{aligned}
$$

因为

$$
\begin{aligned}
\mathscr{D}^T(PBKF + F^T K^T B^T P)\mathscr{D} &\leqslant \mathscr{D}^T(\varepsilon_1 PBB^T P + \varepsilon_1^{-1} F^T K^T KF) \\
2\mathscr{D}^T P(A + BKF)A_d x_d &= 2\mathscr{D}^T PAA_d x_d + 2\mathscr{D}^T PBKFA_d x_d \\
&\leqslant 2\mathscr{D}^T PAA_d x_d + \varepsilon_2 \mathscr{D}^T PBB^T P\mathscr{D} + \varepsilon_2^{-1} x_d^T A_d^T F^T K^T KFA_d x_d
\end{aligned}
$$

所以

$$
\dot{V}(x) \leqslant \mathscr{D}^T[PA +]A^T P + (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)PBB^T P + \varepsilon_1^{-1} F^T K^T KF)\mathscr{D}2\mathscr{D}^T PAA_d x_d + 2\mathscr{D}^T PA_h x_h
$$

$$+(\mathscr{D}+A_dx_d)^T[Q_1+Q_2](\mathscr{D}+A_dx_d)-x_h^TQ_1x_h-x_d^TQ_2x_d+\varepsilon_2^{-1}x_d^TA_d^TF^TK^TKFA_dx_d$$
$$=[\mathscr{D}^Tx_h^Tx_h^Tx_d^T]E[\mathscr{D}^Tx_h^Tx_h^Tx_d^T]^T$$

其中

$$E=\begin{bmatrix} PA+A^TP+(\varepsilon_1+\varepsilon_2)PBB^TP+\varepsilon_1^{-1}F^TK^TKF+Q_1+Q_2 & PA_h & (PA+Q_1+Q_2)A_d \\ A_h^TP & -Q_1 & 0 \\ A_d^T(A^TP+Q_1+Q_2) & 0 & A_d^T(\varepsilon_2^{-1}F^TK^TKF+Q_1+Q_2)A_d-Q_2 \end{bmatrix}$$

令 $K=-\frac{1}{\gamma}B^TP$,由 Schur 补定理,很容易得证 $E<0$ 与线性矩阵不等式组(5)和(6)式等价,定理得证。

3 算例仿真

考虑中立型时滞系统(1),其中

$$A=\begin{bmatrix}0&1\\-2&-3\end{bmatrix},B=\begin{bmatrix}0\\0.1\end{bmatrix},A_h=\begin{bmatrix}0&0.1\\-1&-0.3\end{bmatrix},A_d=\begin{bmatrix}-0.5&-0.27\\0&0\end{bmatrix}$$

考虑传感器故障,矩阵 F0 = diag(1,1)表示传感器正常情况,矩阵 F1 = diag(0,1)和 F2 = diag(1,0)分别表示传感器 x1,x2 发生故障,F3 = diag(1,0.5)表示传感器 x1 正常,传感器 x2 部分失效。

由定理1,求解由矩阵 F0、F1、F2 和 F3 构成的线性矩阵不等式组(LMIs)式(5)和(6),取 $\varepsilon_1=\varepsilon_2=\gamma=1$,通过应用 MATLAB 中的 LMI 工具箱,可得

$$P=\begin{bmatrix}15.2602&4.0059\\4.0059&4.7744\end{bmatrix},Q_1=\begin{bmatrix}3.9085&1.9113\\1.9113&6.1053\end{bmatrix},Q_2=\begin{bmatrix}1.5918&0.6481\\0.6481&1.7114\end{bmatrix}$$

因此,状态反馈矩阵 $K=[-0.4006\quad -0.4477]$

图1和图2是初始条件为 $x(0)=[1\quad 1]^T$ 时的仿真结果。在图1和图2中,把传感器正常时系统的响应和传感器发生各种故障时系统的响应全部画了出来,每个图都有四个状态曲线,但从图上可以看出,它们基本上重合在了一起,并且,仿真结果表明系统在含有传感器故障时仍具有渐近稳定性,说明本文提出的方法是有效的。

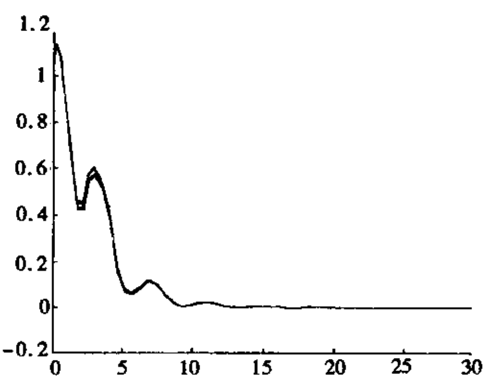

图1 状态 x_1 响应曲线

Fig. 1 Response curve of x_1

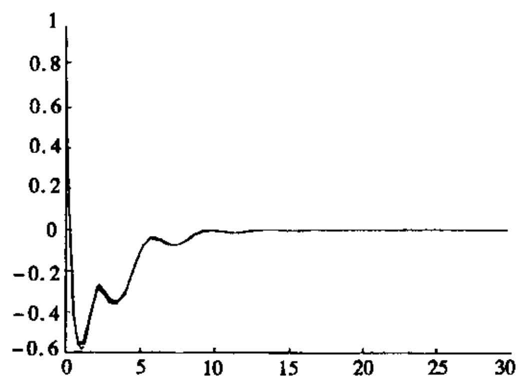

图2 状态 x_2 响应曲线

Fig. 2 Response curve of x_2

4 结论

本文考虑了传感器失效的中立时滞系统的镇定控制器设计方法,由于最后给出的控制器矩阵的设计依赖于线性矩阵不等式组(LMIs)是否有可行解,所以可借助于 MATLAB 中的 LMI 工具箱很容易的得到求解,避免了任何的参数调整,从最后的仿真结果图也表明了本方法的有效性,另外,本文结果也可类推到执行器故障的中立型时滞系统上去。另外,还可以考虑不确定性的情况。

参考文献：

[1] Xu S Y, Lam L, Yang C W. and positive - real control for linear neutral delay systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2001, 46(8) :1321 - 1326.

[2] 周东华,叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M] . 北京 :清华大学出版社,2000.

[3] 刘志东,刘丽华. 不确定线性系统鲁棒容错控制器的设计[J]. 电机与控制学报,2004,8(2) :116 - 118.

[4] 胡刚,孙继涛,刘永清. 不确定时滞系统的鲁棒容错控制[J]. 华南理工大学学报,2001,29(2) :39 - 41.

[5] 杨洁亮,杨新红,王绪雄. 传感器失效系统的鲁棒容错控制[J]. 河南科技大学学报,2004,25(5) :21 - 24.

[6] 杨虹. 时滞系统的鲁棒容错控制研究[D]. 南京 :南京理工大学,2004.

[7] 褚键,俞立,苏宏业. 鲁棒控制理论及应用[M]. 杭州 :浙江大学出版社,1990.

[8] Niu Y, Lam J, Wang X. Sliding - mode control for uncertain neutral delay systems[J]. IEE Proc - Control Theory Appl., 2004,151(1) :38 - 44.

Fault Tolerant Control for Sensor Failure Neutral Time - Delay Systems

WANG Yan - qing[1] ,ZHAO Zhong - hua[2]

(1. Institute of Sciences, PLA univ. of Sci. &Tech. Jiangsu Nanjing 211101, China ;
2. Department of Applied Maths ,Nanjing univ. of Economics 210003, China)

Abstract :The problem of fault - tolerance control against sensor failures in linear state feedback systems is studied. Based on the Lyapunov stability theory ,the design of state feedback control laws for neutral time delay systems with sensor failures is discussed. A sufficient condition for the system to be asymptotically stable is presented. The fault - tolerant controllers ensure that the system is not sensitive to sensor failures and that the system can run stably with certain satisfying performance. The simulation example is also provided to demonstrate the effectiveness of the proposed design method.

Keywords :neutral time delay systems ;fault - tolerant control ;sensor ;LMI