

一种基于鲁棒自适应观测器的故障区分方法

王曰英,周平方,段登平

(上海交通大学 航空航天学院,上海 200240)

摘要:设计了一种鲁棒自适应观测器,通过其输出残差对传感器故障信息敏感性很高,而对系统故障信息敏感性很低的特点,实现了故障区分。设计了一套故障区分控制系统和检测策略,用以区分两类故障,以免发生误判现象。举例说明了该策略的可行性和有效性。

关键词:故障区分;鲁棒自适应观测器;特征结构配置

中图分类号:TP273

文献标识码:A

A new approach to fault identification based on robust adaptive observer

WANG Yue Ying, ZHOU Ping Fang, DUAN Deng Ping

(College of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A robust adaptive observer is presented in this paper. The observer is sensitive to the sensor fault but robust to the system fault, so the fault identification is achieved. Then a method of fault identification and control system is advanced to identify the two kinds of fault to avoid judging falsely. The effectiveness of the method is shown by simulation results.

Key words: fault identification; robust adaptive observer; eigenstructure assignment

当系统异常时可能是系统内部状态故障,也可能是测量传感器发生故障,或者是系统遭受较强的外部扰动,也可能三者同时存在。故障诊断是通过对系统测量信息的分析计算实现的,仅从数据的角度很难分析是过程引起的故障还是由传感器本身引起的故障。现有的研究基本上都是在假定一方正常的条件下研究故障检测问题^[1-4],如果系统和传感器同时发生故障,则需进一步研究如何区分两类故障。有关这一问题在故障诊断领域仍是个难点。

本文针对系统故障及传感器故障的特点设计了一种鲁棒自适应观测器,使其输出残差仅对传感器故障敏感,并寻求一种系统故障区分与诊断策略,用以区分系统故障和传感器故障。

1 问题描述

考虑一个无故障状态下的线性定常系统,其数学描述可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ 是状态向量, $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^m$ 为已知输入量, $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^l$ 为观测向量(或输出向量), $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times m}$, $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{l \times n}$ 为相应维数的已知常数矩阵。

当系统和传感器发生故障时,系统的数学模型会产生《微型机与应用》2009年第22期

相应的变化。系统故障一般反映在系统状态故障和模型参数偏差等几个方面。传感器故障类型一般有卡死、增益变化、横偏差3种。对于动态系统式(1),系统及传感器故障的一般表示形式为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x}(t) + \mathbf{C}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_f\mathbf{f}(t) \end{cases} \quad (2)$$

$\Delta\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为系统故障, $\mathbf{D}_f \in \mathbf{R}^{l \times q}$ 为传感器故障分配矩阵, $\mathbf{f}(t) \in \mathbf{R}^q$ 为传感器故障向量。由于系统故障和传感器故障类型的不可预测性, $\Delta\mathbf{A}$ 和 \mathbf{D}_f 的具体表达式未知。

2 鲁棒自适应观测器设计

对带有系统及传感器故障的状态方程式(2),设计如下的观测器:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{z}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) + \mathbf{H}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{r}(t) = \mathbf{L}\mathbf{z}(t) \end{cases} \quad (3)$$

定义估计误差为 $\mathbf{e}(t) = \mathbf{z}(t) - \mathbf{T}\mathbf{x}(t)$, 则残差信号表示如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{e}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{z}(t) + \mathbf{F}\mathbf{T}\mathbf{x}(t) + \mathbf{H}\mathbf{u}(t) \\ \quad + \mathbf{K}\mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{K}\mathbf{D}_f\mathbf{f}(t) \\ \quad - \mathbf{T}\mathbf{A}\mathbf{x}(t) - \mathbf{T}\mathbf{B}\mathbf{u}(t) - \mathbf{T}\mathbf{A}\mathbf{x}(t) \\ \mathbf{r}(t) = \mathbf{L}(\mathbf{e}(t) + \mathbf{T}\mathbf{x}(t)) \end{cases} \quad (4)$$

令鲁棒观测器满足下面的矩阵方程:

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 57

$$\begin{cases} TA - FT = KC \\ H = TB \end{cases} \quad (5)$$

则残差向量 r 的传递函数阵为:

$$r(s) = L_1(SI - F)^{-1}KD_f(s) - L(SI - F)^{-1}T\Delta Ax(s) + LTx(s) \quad (6)$$

为使残差向量仅与传感器故障有关,可令残差向量 r 与状态 x 及 ΔAx 之间的传递函数为零,即满足如下条件:

$$\begin{cases} L(SI - F)^{-1}T = 0 \\ LT = 0 \end{cases} \quad (7)$$

3 观测器的特征结构配置

由前节分析可知,为使输出残差仅对传感器故障敏感,并且满足在系统和传感器正常工作时,残差趋近于零值的故障判断条件,必须使观测器的设计满足式(7)的条件。特征结构配置是一种有效的方法^[5-6],为了说明问题这里首先给出两个引理。

引理 1^[7]: $\beta_i (i=1,2,\dots,n)$ 为矩阵 A 的一个特征值, L_i^T 是 β_i 的左特征向量。则 L_i^T 总与 A 的其余 $(n-1)$ 个特征值 $\beta_j (i \neq j)$ 所对应的右特征向量 v_j 正交。

引理 2^[7]: A 的预解矩阵可以写成以下特征形式:

$$(sI - A)^{-1} = \frac{v_1 L_1^T}{s - \beta_1} + \dots + \frac{v_n L_n^T}{s - \beta_n}$$

其中 L_i^T 和 v_j 是矩阵 A 的特征值 β_i 的左、右特征向量。

利用上述引理,可以导出关于式(7)的一个结论,其证明过程可参考文献[7]。

结论 1: 如果 $LT=0$ 并且 L 的所有行向量均为 F 的所有特征值对应的左特征向量,则式(7)成立。

综上所述,利用特征结构配置法可使残差仅对传感器故障敏感,从而实现系统和传感器故障区分。现在的问题就是设计相应的参数矩阵,设计过程包括以下 3 个步骤:

(1) 设计 F 阵使其特征值满足稳定条件,不妨设 $F = \theta I$, $\theta < 0$;

(2) 根据特征结构配置方法求出 L 和 T ;

(3) 根据式(5)求出 K 和 H 。

通过以上方式设计的鲁棒自适应观测器,其残差输出仅对传感器敏感,从而初步实现了故障区分。

4 故障区分及检测策略

在鲁棒自适应观测器的基础上,本节设计了一种故障区分及检测策略。首先建立一个全状态普通观测器,称为主观测器,将其输出与系统的输出相比较,将获得的残差设为 r_1 ,该残差对系统和传感器故障均比较敏感,并利用常用的故障诊断方法实时监控其故障情况。此外,同时建立一个根据本文方法设计的鲁棒自适应观测器,获得的残差设为 r_2 。图 1 所示为所设计的故障区分及诊断策略结构图。

通过同时检测 r_1 与 r_2 ,可实现故障区分,其策略如下:

(1) 如果 r_1 与 r_2 均未检测出故障,可判断此时系统和传感器处于正常状态;

(2) 当 r_1 检测到故障,而 r_2 未检测到故障时,可判断传感器处于正常状态而系统发生了故障;

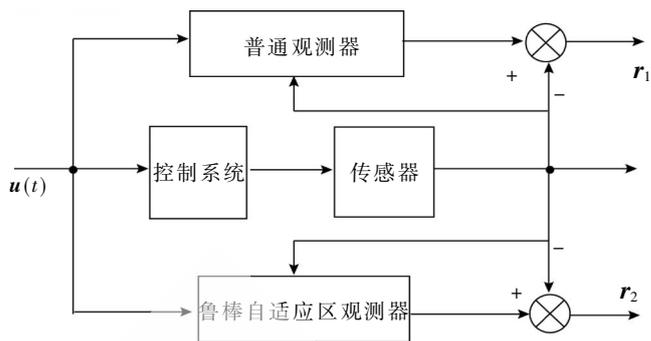


图 1 故障区分及检测策略

(3) 当 r_1 与 r_2 均检测到故障时,可判断传感器发生了故障,而系统是否同时发生故障需要进一步研究判断,实际上系统和传感器同时发生故障的可能性很小。

5 实例仿真

本文以某飞艇控制系统为研究对象,采用小扰动法得到一个对应于某工作点的纵向小扰动运动方程:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (8)$$

状态变量为 $x = [q \ w \ \theta]^T$,其中 q 、 w 、 θ 分别为飞艇纵向速度、垂直速度及俯仰角,控制量输入 u 为升降舵偏角。

设飞艇在空中以 10m/s 的速度飞行,其线性化状态空间模型的对应矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} -1.558 & 1 & 0.692 & 5 & 0.397 & 4 \\ 0.261 & 9 & -2.222 & 8 & 0.223 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -10 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

仿真时间为 50 s,采样周期为 1 s,输入为 $u=1^\circ$ 的仿真实验分为如下 3 部分:

(1) 系统与传感器均正常,其残差输出 r_1 如图 2 所示, r_2 如图 3 所示。

由图 2 可以看出在系统与传感器均无故障发生时,残差 r_1 和 r_2 都趋于零(图上微小误差是由于 Matlab 计算误差所致)。

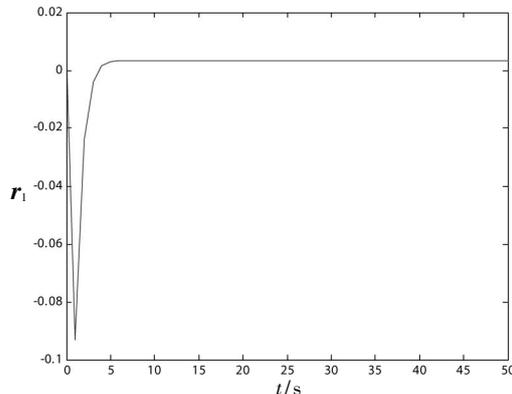
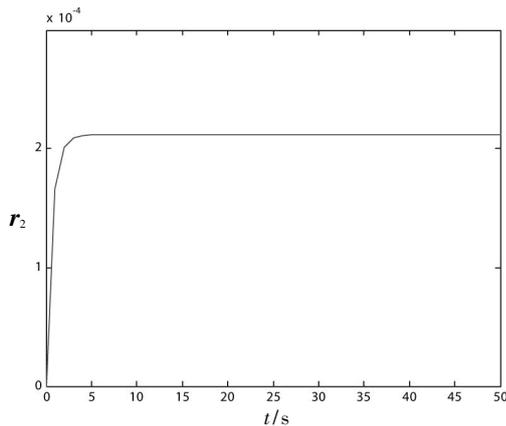
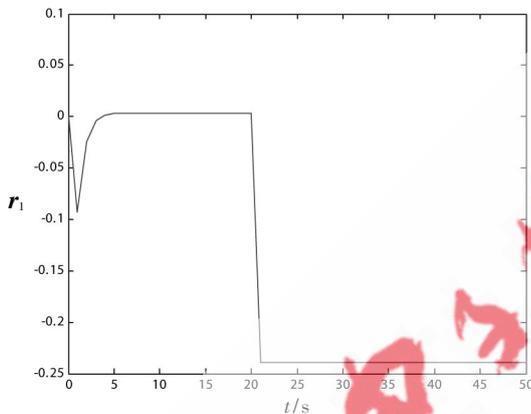
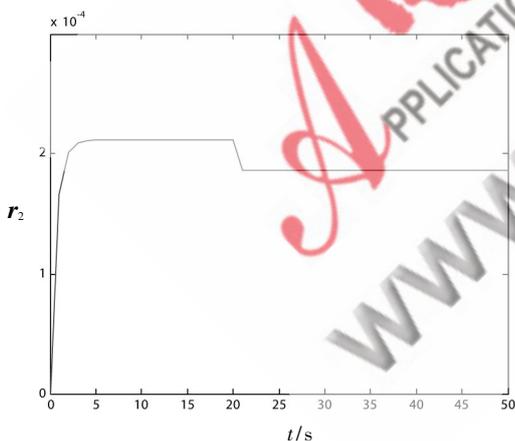


图 2 系统与传感器均未发生故障时的残差 r_1

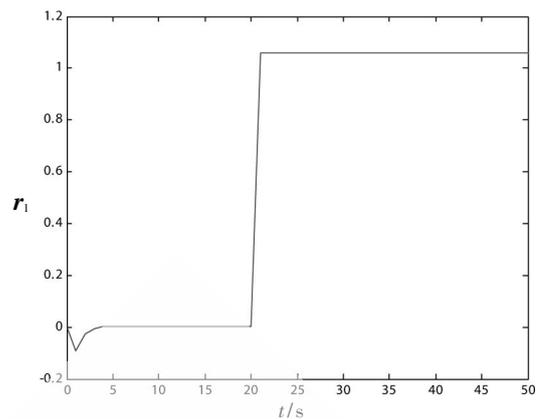
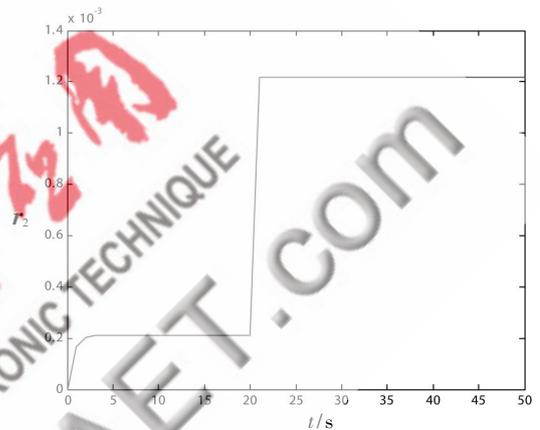
图3 系统与传感器均未发生故障时的残差 r_2

(2)传感器正常而系统在 20 s 发生故障,残差 r_1 与 r_2 输出如图 4、图 5 所示。

图4 系统 20s 发生故障时的残差 r_1 图5 系统 20s 发生故障时的残差 r_2

由上图可见,当传感器正常而传感器发生故障时残差 r_2 值基本保持于零,体现了鲁棒自适应观测器对系统故障很好的鲁棒性。而 r_1 在 20 s 时刻发生突变,通过设置门限值可以迅速判断发生了故障,综合 r_1 和 r_2 就可以迅速判断系统发生故障而传感器处于正常状态。

(3)系统正常而传感器在 20s 发生故障,则残差 r_1 与 r_2 输出如图 6、图 7 所示。

图6 传感器 20s 故障时的残差 r_1 图7 传感器 20s 故障时的残差 r_2

由图 6 和图 7 可见,当系统正常传感器发生故障时, r_1 和 r_2 均发生明显变化,在系统和传感器不同时发生故障的前提下,综合 r_1 和 r_2 可判断传感器 20s 发生了故障而系统处于正常状态。

设计了一种鲁棒自适应观测器,使其仅对传感器故障敏感,并提出了一种故障区分及检测策略。通过飞艇模型实例仿真表明该策略对于区分和检测系统和传感器两类故障的有效性。

参考文献

- [1] SUN Ji Tao, LIU Yong Qing. Observer-based robust fault-tolerant control of uncertain system[C]. Proceedings of The 3th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2002:737-740.
- [2] 刘小雄,章卫国,武燕,等.基于鲁棒自适应观测器的飞控系统传感器故障隔离与重构[J].传感技术学报,2006,19(6): 2 437-2 440.
- [3] 汪海,张玉杰.双线性系统 BDFD 故障诊断[J].微计算机信息,2006,5(1):226-228.
- [4] CHEN J,ZHANG H Y. Robust detection of faulty actuators via unknown input[J]. Observers International Journal of System Science, 1991, 22:1829-1839.
- [5] 缙林峰,王镛根,庞大海.模型不确定性的故障检测滤波器[J].计算机仿真,2004,21(3):45-47.

(下转第 65 页)

(上接第 59 页)

- [6] J PARK,G RIZZONI. An eigenstructure assignment algorithm for the design of fault detection filters[J].IEEE Trans. Automation Control,1994, 39(7): 1521-1524.

- [7] DOHYEON K,OOKPYO C,YOUDAN K.On the robust fault

detection and control reconfiguration via multipurpose observer
《电子技术应用》 www.ChinaAET.com
[M].AIAA,1997:755-761.

(收稿日期:2009-04-26)

(上接第 62 页)

- [8] OZAKTAS H M, ARIKAN O, KUTAY A, et al. Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1996, 44:2141-2150.

- [9] 王开军,姜宇柏. 面向 CPLD/FPGA 的 VHDL 设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.

- [10] 刘凌,胡永生. 数字信号处理的 FPGA 实现[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.

- [11] 姜雪松,吴钰淳. VHDL 设计实例与仿真[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.

(收稿日期:2009-04-22)

《微型机与应用》2009 年第 22 期

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 65