

# 具有参数跟踪自适应观测器的故障检测与诊断系统

谭民 疏松桂

(中国科学院自动化所,北京 100080)

## 摘 要

本文简单概括了故障检测与诊断的方法,介绍了具有参数自适应跟踪观测器的故障检测与诊断系统,分析了收敛性和渐近稳定性的条件,分别对参数匹配和不匹配两种情况的故障检测与诊断问题进行了讨论.

**关键词:** 自适应观测器,故障检测与诊断,参数跟踪,匹配与不匹配.

## 一、引 言

控制系统故障检测与诊断技术自产生以来,已经得到了很大的发展,各种方法不断出现,目前主要的有以下几种:

- 1) 基于测量信号进行判别的上下限检验方法,变化趋势检验法,测量信号分析法.
- 2) 对不可测量的参数向量进行系统辨识,参数估计的方法.
- 3) 基于对不可测量的状态向量进行状态观测及状态滤波,对所产生的新息序列进行处理的  $X^2$ —检验法,序贯概率比检验法 (SPRT), 广义似然比检验法 (GLR) 以及概率的多重假设法,故障灵敏滤波法等.
- 4) 对测量仪表进行检测与诊断的硬件冗余及功能冗余的方法.
- 5) 基于专家系统、神经网络的智能化检测与诊断方法.

除了这些方法外,还有一些针对具体问题而提出的检测与诊断方法,这里就不一一列举了.

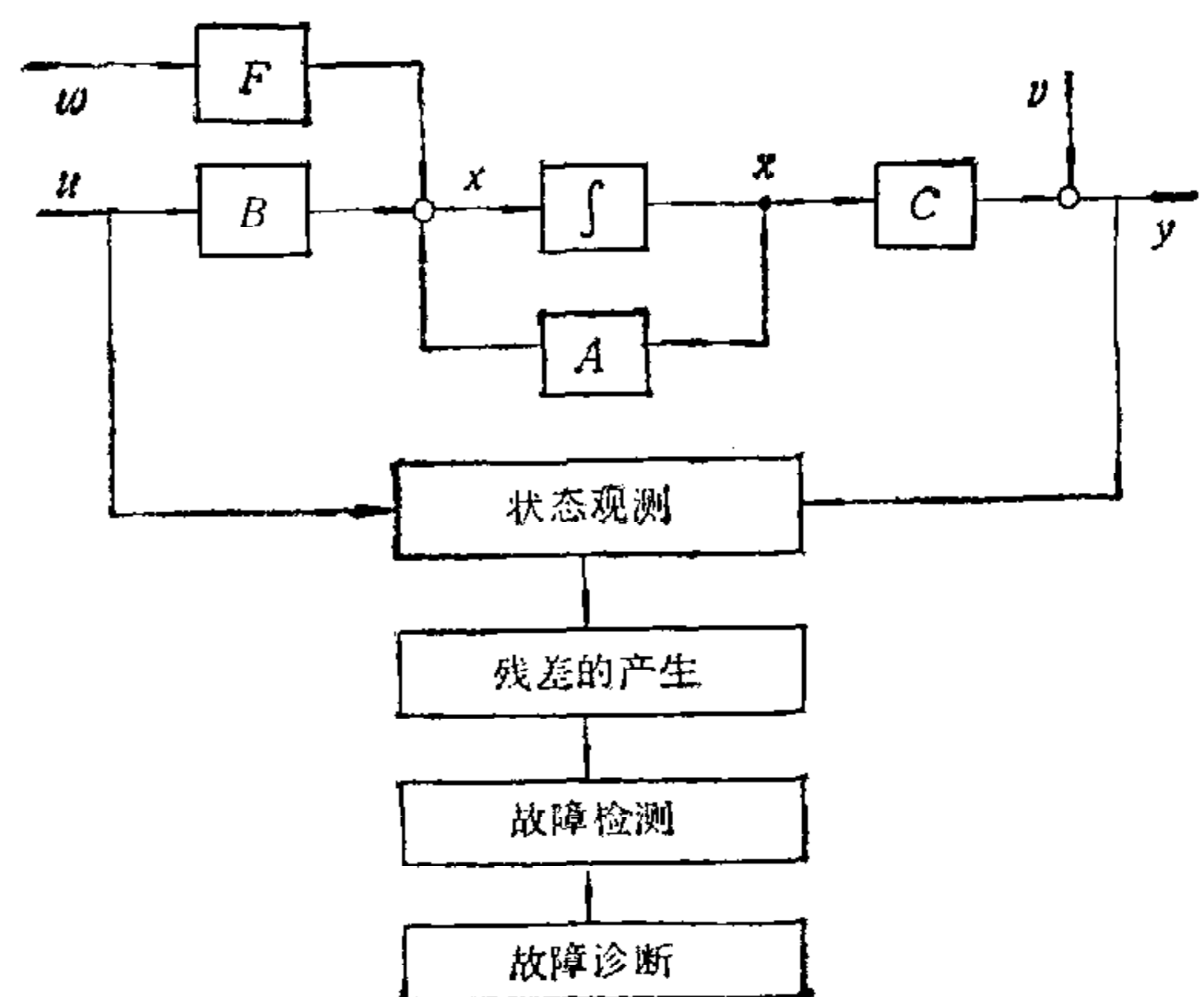


图1 基于状态变量观测的故障诊断结构

本文提出一种对不可测量的状态进行状态观测及滤波的检测方法,其结构如图 1 所示。

这种方法是设计一个状态观测器,把不可测量的状态变量观测出来,产生系统残差,然后对残差进行处理,以用来对故障进行检测与诊断。下面分两种情况: 1) 观测器参数与实际系统参数匹配, 2) 观测器参数与实际系统参数不匹配,进行讨论。

## 二、观测器参数匹配情况下的故障检测问题

考虑线性的动态系统

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t), \quad (2.1)$$

$$\mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t). \quad (2.2)$$

其中  $\mathbf{x}(t)$  是  $n$  维的状态向量,  $\mathbf{y}(t)$  是  $m$  维的观测向量,  $m \leq n$ ,  $A, B, C$  为相应维数的常数矩阵,假设系统是完全能控能观测的。对这一系统,设计一个状态观测器。

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = A\hat{\mathbf{x}}(t) + K[\mathbf{y}(t) - C\hat{\mathbf{x}}(t)] + B\mathbf{u}(t). \quad (2.3)$$

其中  $\hat{\mathbf{x}}(t)$  是  $n$  维状态估计向量,  $K$  是  $n \times m$  的增益矩阵。

令观测器的状态偏差和输出偏差分别为

$$\mathbf{e}(t) \triangleq \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t), \quad (2.4)$$

$$\boldsymbol{\epsilon}(t) \triangleq \mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t). \quad (2.5)$$

### 1. 系统无故障的情况

在这种情况下,状态偏差的方程为

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = (A - KC)\mathbf{e}(t), \quad (2.6)$$

增益矩阵  $K$  的选择是使  $A - KC$  具有负实部的特征根,那么当  $t \rightarrow \infty$  时,有  $\mathbf{e}(t) \rightarrow 0$ ,  $\boldsymbol{\epsilon}(t) \rightarrow 0$ 。

### 2. 系统发生故障的情况

在这种情况下,分几种故障分析。

1) 第  $i$  个调节器故障。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= A\mathbf{x}(t) + B(\mathbf{u}(t) + \Delta\mathbf{u}_i(t) \cdot \mathbf{I}_i) \\ &= A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t) + \mathbf{b}_i\Delta\mathbf{u}_i(t). \end{aligned}$$

这时可以得到状态偏差方程为

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = (A - KC)\mathbf{e}(t) + \mathbf{b}_i \cdot \Delta\mathbf{u}_i(t)$$

其中  $\mathbf{I}_i = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)^T$ ,  $\mathbf{b}_i$  是  $B$  的第  $i$  列,  $\Delta\mathbf{u}_i$  是第  $i$  个调节器故障。

2) 第  $i$  个传感器故障。

$$\mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t) + \Delta\mathbf{y}_i(t) \cdot \mathbf{I}_i.$$

可以得到状态偏差方程为

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = (A - KC)\mathbf{e}(t) - K \cdot \mathbf{I}_i \cdot \Delta\mathbf{y}_i(t).$$

3) 第  $i$  个状态故障。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= A(\mathbf{x}(t) + \Delta\mathbf{x}_i(t) \cdot \mathbf{I}_i) + B\mathbf{u}(t) \\ &= A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t) + \mathbf{a}_i\Delta\mathbf{x}_i(t), \end{aligned}$$

$$y(t) = C(x(t) + \Delta x_i(t) \cdot I_i) = Cx(t) + C_i \Delta x_i(t).$$

可以得到状态偏差方程为

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) + (a_i - Kc_i)\Delta x_i(t).$$

从上面几种情况看到, 状态偏差方程都是类似的. 假若出现的故障(调节器、传感器、状态)是阶跃故障, 那么状态偏差的变化曲线就由图 2 描述.

从状态偏差的变化曲线就可以检测到故障是否发生, 通过对曲线的分析, 还可以知道故障发生的时间, 故障的类型以及故障的位置.

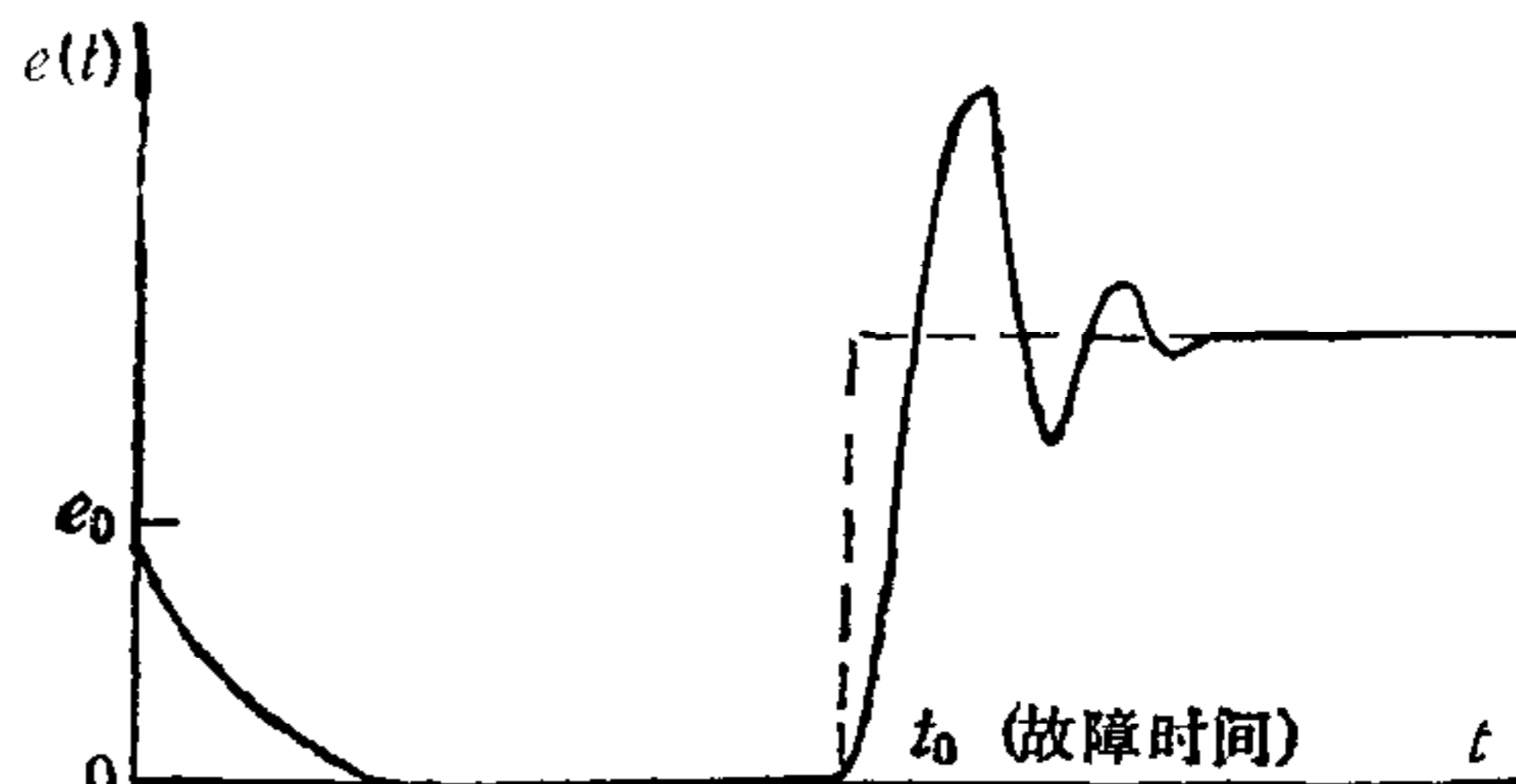


图 2 状态偏差的变化曲线

### 三、参数跟踪自适应观测器方法

上面讨论了观测器的参数与实际对象参数相匹配的情况, 当参数不匹配时, 设计的观测器就变为

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A + \Delta A)\hat{x}(t) + K[y(t) - C\hat{x}(t)] + (B + \Delta B)u(t),$$

其中  $\Delta A$ 、 $\Delta B$  是观测器与实际对象参数的偏差.

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) - \Delta Ax(t) - \Delta Bu(t).$$

从状态偏差方程中可以发现, 方程本身已有两项  $\Delta Ax(t)$  和  $\Delta Bu(t)$  使得当  $t \rightarrow \infty$  时, 有  $e(t) \rightarrow 0$ , 这样就会使误报警的概率加大.

下面对  $\Delta A$  和  $\Delta B$  进行处理, 使得观测器的参数自适应地跟踪对象的参数变化.

#### 1. 自适应参数跟踪的设计

参数自适应跟踪的方法是一个很好的控制方法, 很多人都进行了这方面的研究, 得到了有益的结果.

本文提出一种非常简单、有效的自适应方法, 用于故障检测系统的实时、在线控制. 观测器状态偏差

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) - \Delta Ax(t) - \Delta Bu(t),$$

观测器输出偏差

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t) = C(x(t) - \hat{x}(t)) = Ce(t).$$

为了补偿  $A$  和  $B$ , 设计自适应率

$$\Delta A = K_1(\hat{x}_{(t)}^T + u_{(t)}^T)e(t), \quad (3.1)$$

$$\Delta B = K_2(\hat{x}_{(t)}^T + u_{(t)}^T)e(t), \quad (3.2)$$

因为在设计观测器时, 用的是同一种测量方法,  $\Delta A$  和  $\Delta B$  的变化方向是一样的, 要么同时大, 要么同时小, 为了解决问题的方便, 令  $K_\Delta = K_1 = K_2$ , 采用同一个增益去调整  $\Delta A$  和  $\Delta B$ , 所以

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= (A - KC)e(t) - K_\Delta C \|x(t) + u(t)\|^2 e(t) \\ &= [A - KC - K_\Delta C \|x(t) + u(t)\|^2] e(t) \end{aligned}$$

$$\triangleq W(K_\Delta, K, t)e(t). \quad (3.3)$$

这样适当地选择  $K_\Delta$  值, 就可以达到参数自适应跟踪的目的,  $K_\Delta$  的选取是为了使  $\Delta A$  和  $\Delta B$  快速跟踪.

## 2. 稳定性及收敛性条件

对于象  $\dot{e}(t) = W(K_\Delta, K, t)e(t)$  所描述的时变、非线性方程, 很多人研究了它的大范围渐近稳定的条件<sup>[1]</sup>, 本文用 Lyapunov 定理就稳定条件简单推导一下.

选一个 Lyapunov 函数

$$V(e) = e^T Q e, \quad (3.4)$$

其中  $Q$  是任意的正的对角矩阵, 使得当  $e = 0$  时,  $V(e) = 0$ , 当  $e \neq 0$  时,  $V(e) > 0$ .

为了使  $e(t)$  是大范围渐近稳定的, 由 Lyapunov 定理, 还必须满足  $\forall e \neq 0$ , 有  $\dot{V}(e) < 0$ , 由(3.4)式可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(e) &= e^T [QW(K_\Delta, K, t) + W^T(K_\Delta, K, t)Q] e \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [q_{ii}W_{ii}e_i^2 + q_{jj}W_{jj}e_j^2 + (q_{ii}W_{ij} + q_{jj}W_{ji})e_i e_j]. \end{aligned} \quad (3.5)$$

**定理.** 由(3.3)式描述的时变系统, 关于奇异稳定点  $e = 0$  是大范围渐近稳定的条件是

- 1)  $V > 0, \forall e \neq 0, \forall t.$
- 2)  $q_{ii}W_{ii} \leq -D < 0, i = 1, 2, \dots, n.$
- 3)  $q_{jj}W_{jj} \leq -D < 0, j = 1, 2, \dots, n.$
- 4)  $\frac{1}{2}(q_{ii}W_{ij} + q_{jj}W_{ji}) \leq -D < 0.$

利用定理,(3.5)式可以写成

$$\dot{V}(e) \leq -2D \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (e_i^2 + e_j^2) < 0,$$

这样, 由(3.3)式描述的方程就是大范围渐近稳定的, 由(3.1), (3.2)式所设计的自适应率就可以使得观测器的参数很好地跟踪实际对象的参数.

实现了自适应观测器进行参数跟踪之后, 就可以得到(3.3)式的标准形式, 通过实时地监测观测器的状态偏差曲线, 就可以进行故障的检测、分析与诊断.

## 四、几点说明

1) 上述方法把系统参数  $A, B$  矩阵都假定为是定常的, 许多实际系统  $A$  和  $B$  是时变的, 这样  $\Delta A$  和  $\Delta B$  可能反映的是故障现象, 对于这一问题, 仍用状态偏差方程描述.

假设参数  $A$  阵中的元素  $a_{ij}$  发生突变, 变成  $a_{ij} + \Delta a_{ij}$ , 其它元素不变, 这时矩阵  $A$  变为  $A + \Delta a_{ij} \cdot I_i \cdot I_j^T$ , 状态方程为

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta a_{ij} \cdot I_i \cdot I_j^T)x(t) + Bu(t),$$

状态偏差方程为

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}}(t) &= (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{e}(t) + \Delta a_{ij} \cdot \mathbf{I}_i \cdot \mathbf{I}_j^T \mathbf{x}(t) \\ &= (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\mathbf{e}(t) + \Delta a_{ij} x_j \cdot \mathbf{I}_i.\end{aligned}$$

那么,通过对状态偏差曲线的测量就可以检测出故障的发生。

上面对参数  $A$  进行了讨论,对参数  $B$  也有类似的结果。

2) 前面的讨论没有考虑状态噪声、观测噪声以及各种干扰的影响,因此得到了很好的结论。当加入状态噪声、观测噪声及干扰之后,对分析有一定影响,这时在选择参数  $K$  和  $K_\Delta$  时,就要考虑到快速的参数跟踪与最小的噪声灵敏度之间的协调关系,尽可能做到让设计成的观测器对噪声不灵敏,而对实际对象的状态又能很好地估计,使得状态的偏差尽可能小。

另外,在设计状态观测器时,可以把干扰因素考虑进去,对干扰一并进行观测,这样就可以消除干扰的影响。

## 五、结 论

本文介绍了具有参数跟踪自适应观测器的故障检测与诊断系统,分析了收敛性及渐近稳定性的条件,给出了一种针对不可测量的状态变量进行观测、滤波用于故障检测的方法。

故障检测与诊断方法的研究是比较新的课题,目前大部分工作还只是停留在理论研究阶段,实际的应用比较少。

到目前为止,很多研究方法还是很有意义的<sup>[1]</sup>,专家系统用于故障诊断,已经取得了一些成果,神经网络用于故障诊断的研究最近几年也取得了很大进展,为故障诊断的智能化研究提供了一条途径,文献[3,4]和作者的博士论文<sup>[2]</sup>有过这方面的讨论。

控制系统故障诊断的研究,前景是广阔的,随着工业生产的迅猛发展,人们对控制系统可靠性的要求越来越高,因此必将会推动这一方向的发展。

## 参 考 文 献

- [1] Sidar, M., Implementation of Failure-detection System with Adaptive observers, The Proceedings of 1983 American Control Conference, 1205—1211.
- [2] Isermann, R., Process fault Detection Based on modeling and Estimation methods—A survey, Automatica, 20(1984), 4, 387—404.
- [3] 谭 民、疏松桂,神经网络在故障诊断中的双向联想记忆法,自动化学报, 17(1991),1,95—99.
- [4] 谭 民、疏松桂,基于神经网络的控制系统故障诊断,控制与决策, 5(1990),1,58—60.

1) 谭 民,控制系统故障检测与诊断技术及其可靠性问题的研究,中国科学院自动化研究所博士论文。

# FAULT DETECTION SYSTEM WITH PARAMETER-TRACKING ADAPTIVE OBSERVERS

TAN MIN SHU SONGGUI

(*Institute of Automation, Academia Sinica, Beijing 100080*)

## ABSTRACT

In this paper, the methods of fault detection and diagnosis are summarized briefly, the design problem of adaptive observers for fault detection applied to linear constant MIMO system is presented. The conditions for convergence and stability are analyzed.

**Key words:** Fault diagnosis; parameter tracking; adaptive observer; match and mismatch.



**谭 民** 1986年毕业于清华大学自动化系,获工学学士,1990年获中国科学院自动化所工学博士,博士论文获当年中国科学院院长奖学金优秀奖。目前从事控制系统故障诊断、控制系统可靠性、863高技术 CIMS 系统可靠性以及神经元网络等方面的研究。

**疏松桂** 简介见本刊第 17 卷第 5 期。