第 14 卷第 1 期　　控制理论与应用　　Vol. 14, No. 1
1997 年 2 月　　CONTROL THEORY AND APPLICATIONS　　Feb., 1997

一种基于 UIO 观测器的故障检测方法

陈金水　孙优贤
(浙江大学工业控制技术研究所・杭州, 310027)

摘要：本文基于未知输入观测器，针对含有未知输入干扰的不确定动态系统，提出一种故障检测的新方法.本文提出的方法与其它方法如特征向量配置法相比，具有条件要求较低，设计简单的优点.

关键词：故障检测；鲁棒性；观测器

1　引　言

由于绝大多数实际控制系统中，总是存在或多或少诸如建模误差、噪声干扰等不确定性因素，因此基于模型的故障检测与诊断技术(FDI)对这些不确定性干扰的鲁棒性是一个至关重要的问题，并日益引起了广泛的重视.改善 FDI 鲁棒性的研究工作目前主要集中于基于观测器的 FDI 方法，其中 Patton and Chen[1]提出的基于特征向量配置的鲁棒 FDI 方法是具有代表性的研究成果.但这种方法只是获得鲁棒故障检测的充分条件而非必要条件，因而它的应用范围受到许多不必要的限制.另外，特征向量配置设计过程复杂，不易掌握.因此本文提出一种新的基于代数变换、条件要求较低的鲁棒 FDI 设计方法.

2　问题的描述及主要结果

考虑如下一线性时不变动态系统：

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + BU + Dd + f_a,\\ Y &= CX + f_s = [0 \quad I]X + f_s.\end{aligned} \tag{1}$$

其中 X,U,d,Y 分别为系统的 $n\times 1$ 状态向量、$q\times 1$ 已知输入向量、$m\times 1$ 未知输入干扰及 $p\times 1$ 系统输出向量，f_a 为执行器故障向量，f_s 为传感器故障向量.

在这里我们取系统的观测矩阵 C 为 $[0,I]$ 特殊形式，但这并不对一般系统形成限制，因为只要 C 为满秩矩阵，一定可以通过适当的空间变换，得到(1)式所表示的形式.可以证明[2]，存在极点可以任意配置的 UIO 观测器的必要条件为

$$\operatorname{rank}(CD) = m, \quad 且 \quad m < p. \tag{2}$$

因此在下文的推导过程中均假设(2)式前提条件成立.

下文我们首先讨论 $f_a = f_s = 0$ 时故障检测残差 r 的表达形式，并证明此时 $r(s) = 0$. 然后证明当 $f_a \neq 0$ 或 $f_s \neq 0$ 时，$r(s) \neq 0$.

2.1　$f_a = f_s = 0$

对(1)式进行矩阵分块：

$$\dot{X} = [A_1^{\mathrm T} \quad A_2^{\mathrm T} \quad A_3^{\mathrm T}]^{\mathrm T} X + [B_1^{\mathrm T} \quad B_2^{\mathrm T} \quad B_3^{\mathrm T}]^{\mathrm T} U + [D_1^{\mathrm T} \quad D_2^{\mathrm T} \quad D_3^{\mathrm T}]^{\mathrm T} d, \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_{(p-m)\times(p-m)} & 0 \\ 0 & 0 & I_{m\times m} \end{bmatrix} X, \tag{4}$$

本文于 1994 年 10 月 31 日收到. 1996 年 5 月 20 日收到修改稿.

$$X = [X_1^{\mathrm{T}} \quad X_2^{\mathrm{T}} \quad X_3^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} = [x_1^{\mathrm{T}} \quad y_1^{\mathrm{T}} \quad y_2^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}. \tag{5}$$

从(1)式和(2)式易得，rank $[D_2^{\mathrm{T}} \quad D_3^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} = m$，不失一般性，我们假定 D_3 为非奇异矩阵. 对(3)式左乘变换矩阵：

$$T = \begin{bmatrix} I & 0 & -D_1D_3^{-1} \\ 0 & I & -D_2D_3^{-1} \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}. \tag{6}$$

定义
$$\bar{A}_1 = A_1 - D_1D_3^{-1}A_3, \quad \bar{A}_2 = A_2 - D_2D_3^{-1}A_3,$$
$$\bar{B}_1 = B_1 - D_1D_3^{-1}B_3, \quad \bar{B}_2 = B_2 - D_2D_3^{-1}B_3,$$

可得

$$\dot{x}_1 - D_1D_3^{-1}\dot{y}_2 = \bar{A}_1X + \bar{B}_1U, \quad \dot{y}_1 - D_2D_3^{-1}\dot{y}_2 = \bar{A}_2X + \bar{B}_2U. \tag{7}$$

把 $\bar{A}_1, \bar{A}_2$ 分块为 $\bar{A}_1 = [\bar{A}_{11} \quad \bar{A}_{12} \quad \bar{A}_{13}], \quad \bar{A}_2 = [\bar{A}_{21} \quad \bar{A}_{22} \quad \bar{A}_{23}]$,

可得
$$\dot{x}_1 = \bar{A}_{11}x_1 + \bar{A}_{12}y_1 + \bar{A}_{13}y_2 + D_1D_3^{-1}\dot{y}_2 + \bar{B}_1U, \tag{8}$$
$$\dot{y}_1 = \bar{A}_{21}x_1 + \bar{A}_{22}y_1 + \bar{A}_{23}y_2 + D_2D_3^{-1}\dot{y}_2 + \bar{B}_2U. \tag{9}$$

令
$$w_1 = x_1 - D_1D_3^{-1}y_2, \quad w_2 = y_1 - D_2D_3^{-1}y_2, \quad W = [w_1^{\mathrm{T}} \quad w_2^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}},$$

记
$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11}D_1D_3^{-1} + \bar{A}_{12}D_2D_3^{-1} + \bar{A}_{13} & \bar{B}_1 \\ \bar{A}_{21}D_1D_3^{-1} + \bar{A}_{22}D_2D_3^{-1} + \bar{A}_{23} & \bar{B}_2 \end{bmatrix}.$$

可得

$$\dot{W} = \hat{A}W + \hat{B}[y_2^{\mathrm{T}} \quad U^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}. \tag{10}$$

构造观测器

$$\dot{\hat{W}} = \hat{A}\hat{W} + \hat{B}[y_2^{\mathrm{T}} \quad U^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} + K(y_1 - D_2D_3^{-1}y_2 - \hat{w}_2). \tag{11}$$

定义故障检测残差：

$$r = w_2 - \hat{w}_2 = y_1 - D_2D_3^{-1}y_2 - \hat{w}_2. \tag{12}$$

容易证明，此时 $r(s) = 0, G_{rd}(s) = \dfrac{r(s)}{d(s)} = 0$. 根据线性系统的迭加原理可知，当 $f_a \neq 0$ 或 $f_s \neq 0$ 时，对于(11)、(12) 式所定义的 $r(t)$，同样有 $G_{rd}(s) = 0$.

此外，如果子系统 $(\hat{A}, [0_{(p-m)\times(n-p)} \quad I_{(p-m)\times(p-m)}])$ 可观，则可选择适当 K，使故障检测残差 $r(t) = (w_2 - \hat{w}_2) \to 0$.

综合上述推导，我们可得以下结论：

定理 1　对于(1)式所描述的控制系统，如果 rank $(CD) = m, m < p$ 成立，且子系统 $(\hat{A}, [0_{(p-m)\times(n-p)} \quad I_{(p-m)\times(p-m)}])$ 可观，定义故障检测残差式(11)、(12)，则当 $f_a = f_s = 0$ 时 $r(s) = 0$，且可选择适当 K，使得 $r(t) \to 0$.

2.2　$f_a \neq 0, f_s = 0$

定理 2　设(1)式所描述控制系统满足定理 1 中相应条件，对于定理 1 所定义故障检测残差 $r(t)$，如果 $f_a \neq 0, f_s = 0$，且 $f_a(t)$ 与 D 的列向量不恒定相关，即 rank$(D, f_a) \neq m$，则 $r(s) \neq 0$.

证　仿照前文推导，令 $Tf_a = [f_1^{\mathrm{T}} \quad f_2^{\mathrm{T}} \quad f_3^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$，可得

$$\dot{W} = \hat{A}W + \hat{B}[y_2^{\mathrm{T}} \quad U^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} + [f_1^{\mathrm{T}} \quad f_2^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}. \tag{13}$$

根据(11)、(12)式所定义故障检测残差，易得

$$\dot{W}-\dot{\hat{W}}=(\hat{A}-K[0\quad I])(W-\hat{W})+[\bar{f}_1^{\mathrm{T}}\quad \bar{f}_2^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}, \tag{14}$$

$$r(s)=[0\quad I][sI-(\hat{A}-K[0,I])]^{-1}[\bar{f}_1^{\mathrm{T}}\quad \bar{f}_2^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}. \tag{15}$$

显然,如果$[\bar{f}_1^{\mathrm{T}}\quad \bar{f}_2^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}\neq 0$,则$r(s)\neq 0$,$r(t)\neq 0$.另外,由于

$$\operatorname{rank}(D,f_a)=\operatorname{rank}[T(D,f_a)]=\operatorname{rank}\begin{bmatrix}0 & \bar{f}_1\\ 0 & \bar{f}_2\\ D_3 & \bar{f}_3\end{bmatrix}.$$

如果$\operatorname{rank}(D,f_a)\neq m$,则$[\bar{f}_1^{\mathrm{T}}\quad \bar{f}_2^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}\neq 0$.反之,如果$[\bar{f}_1^{\mathrm{T}}\quad \bar{f}_2^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}\neq 0$,则$\operatorname{rank}(D,f_a(t))\neq m$.

证毕.

2.3 $f_a=0,f_s\neq 0$

定理 3 设(1)式所描述控制系统满足定理1中相应条件,对于定理1所定义故障检测残差$r(t)$,如果$f_a=0,f_s\neq 0$,则$r(s)\neq 0$.

证 $Y=CX+f_s=[0\quad I]X+f_s$,

令
$$f_s=\begin{bmatrix}f_1\\ f_2\end{bmatrix},\quad \begin{bmatrix}y_1^*\\ y_2^*\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}y_1\\ y_2\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}f_1\\ f_2\end{bmatrix}=[0,I]X. \tag{16}$$

仿照前文推导,令 $w_1=x_1-D_1D_3^{-1}y_2^*$, $w_2=y_1^*-D_2D_3^{-1}y_2^*$, (17)

可得
$$\dot{W}=\hat{A}W+\hat{B}\begin{bmatrix}y_2^*\\ U\end{bmatrix}. \tag{18}$$

根据定理1所定义故障检测残差:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{W}}&=\hat{A}\hat{W}+\hat{B}[y_2^{\mathrm{T}}\quad U^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}+K(y_1-D_2D_3^{-1}y_2-\hat{w}_2)\\ &=\hat{A}\hat{W}+\hat{B}\begin{bmatrix}y_2^*\\ U\end{bmatrix}+\hat{B}\begin{bmatrix}f_2\\ 0\end{bmatrix}+K(y_1^*-D_2D_3^{-1}y_2^*-\hat{w}_2)\\ &\quad +K(f_1-D_2D_3^{-1}f_2),\end{aligned} \tag{19}$$

$$\dot{W}-\dot{\hat{W}}=(\hat{A}-K[0\quad I])(W-\hat{W})-\hat{B}\begin{bmatrix}f_2\\ 0\end{bmatrix}-K(f_1-D_2D_3^{-1}f_2), \tag{20}$$

$$\begin{aligned}r&=y_1-D_2D_3^{-1}y_2-\hat{w}_2\\ &=y_1^*-D_2D_3^{-1}y_2^*-\hat{w}_2+f_1-D_2D_3^{-1}f_2\\ &=[0\quad I](W-\hat{W})+f_1-D_2D_3^{-1}f_2,\\ r(s)&=f_1(s)-D_2D_3^{-1}f_2(s)-[0\quad I][sI-(\hat{A}-K[0\quad I])]^{-1}\\ &\quad\cdot[\hat{B}[f_2^{\mathrm{T}}\quad 0]^{\mathrm{T}}+K(f_1-D_2D_3^{-1}f_2)].\end{aligned} \tag{21}$$

显然,如果$f_s(t)$与$\begin{bmatrix}D_2\\ D_3\end{bmatrix}$的列向量不恒定相关,即$\operatorname{rank}\begin{bmatrix}D_2 & f_1\\ D_3 & f_2\end{bmatrix}\neq m$,则$f_1(s)-D_2D_3^{-1}f_2(s)\neq 0$,$r(s)\neq 0$.而当$f_1(s)-D_2D_3^{-1}f_2(s)=0$时,由于$f_s=[f_1^{\mathrm{T}}\quad f_2^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}\neq 0$,必有$f_2(s)\neq 0$,根据式(31)同样可得$r(s)\neq 0$. 证毕.

3 示 例

考虑如下一个三阶动态系统

$$\dot{X}=\begin{bmatrix}-1 & 1 & 0\\ -1 & 0 & 0\\ 0 & -1 & -1\end{bmatrix}X+\begin{bmatrix}1\\0\\2\end{bmatrix}U+\begin{bmatrix}1\\0\\1\end{bmatrix}d+f_a,\quad Y=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}X+f_s.$$

其中 d 为未知输入干扰，f_a 代表系统执行器的故障向量，f_s 为传感器的故障向量.

根据前文的讨论可知，在设计 UIO 观测器时，可令 $f_a=f_s=0$，经过简单变换，可得

$$\dot{x}_1=-x_1+2y_1+y_2+\dot{y}_2-u,\quad \dot{y}_1=-x_1.$$

令
$$x_1=w_1+y_2,\quad y_1=w_2,\quad \dot{w}_1=-w_1+2w_2-u,\quad \dot{w}_2=-w_1-y_2.$$

由于子系统的输出为 $y_1=w_2$，易证子系统$\left(\begin{bmatrix}-1 & 2\\ -1 & 0\end{bmatrix},[0\quad 1]\right)$是可观测的，因此可构造观测器

$$\dot{\hat{W}}=\begin{bmatrix}-1 & 2\\ -1 & 0\end{bmatrix}\hat{W}+\begin{bmatrix}0 & -1\\ -1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}y_2\\ u\end{bmatrix}+K(y_1-[0\quad 1]\hat{W}).$$

设
$$K=[k_1\quad k_2]^{\mathrm{T}},$$

得
$$\dot{\hat{W}}=\begin{bmatrix}-1 & 2-k_1\\ -1 & -k_2\end{bmatrix}\hat{W}+\begin{bmatrix}k_1 & 0 & -1\\ k_2 & -1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}y_1\\ y_2\\ u\end{bmatrix}$$

定义故障检测残差
$$r=y_1-\hat{w}_2.$$

取观测器的闭环特征值为 $\lambda_1=-4,\lambda_2=-5$，可得 $K=[k_1\quad k_2]^{\mathrm{T}}=[-10\quad 8]^{\mathrm{T}}$.

如图 1 所示为系统无故障，未知输入为一方波干扰时，残差 r 的收敛曲线(观测器存在状态初值误差情况). 图 2 所示为当 $t=7\mathrm{s}$ 时，系统执行器发生故障 $f_a=[1\quad 0\quad 0]^{\mathrm{T}}$，残差 r 的响应曲线.

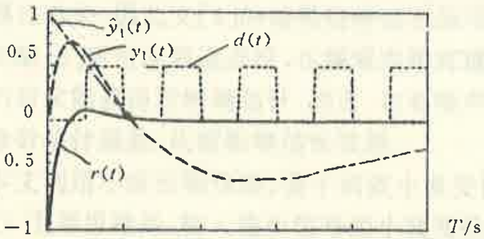

图 1　无故障时 $r(t)$ 的收敛曲线

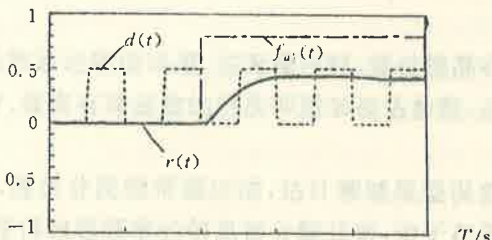

图 2　执行器故障时 $r(t)$ 的响应曲线

4　结　论

针对控制系统存在未知输入干扰情况下，本文提出了动态系统故障检测的一种设计方法. 通过简单的代数变换，把系统划分为两个相互耦合的子系统，其中一个子系统直接受到未知输入干扰的驱动，而另一子系统不与未知输入干扰直接相连接. 据此，本文设计出一个不受未知输入干扰影响的降阶观测器，该观测器的残差与系统的未知输入干扰无关，可作为 FDI 的检测信号. 本文最后给出的仿真实例进一步说明了该方法的可行性.

参 考 文 献

1　Patton, R. and Chen, J.. Robust fault detection using eigenstructure assignment: a tutorial consideration and some new results. Proceedings of the 30th Conference on Decision and Control, 1991, 2242−2247

2　Kudva, P., Viswanadham. N. and Ramakrishna, A.. Observer for linear systems with unknown inputs. IEEE Trans. Automat. Contr. ,1980,AC-25(1):113—115

3 Patton,R. ,Frank,P. M. and Clark,R. N. . Fault diagnosis in dynamic systems:theory and application. Englewood Cliffs, NJ:Prentice Hall,1989

4 Wang,H. and Daley,S. . A fault detection method for unknown systems with unknown input and its application to hydraulic turbine monitering. International Journal of Control,1993,57(2):247—260

A Novel Fault Detection Approach Based on Unknown Input Observer

CHEN Jinshui and SUN Youxian

(Institute for Industrial Control Research of Zhejiang University · Hangzhou,310027,PRC)

Abstract: Based on a recently developed approach to the design of unknown input observers,the paper presents a fault detection method for systems with unknown inputs. Compared to the conventional method using eigenstructure assignment,the approach discussed in this paper has the advantage of simplicity and requires less conditions.

Key words: fault detection; robustness; observer

本文作者简介

陈金水 1967年生. 讲师. 1987年毕业于浙江大学电机系工业自动化专业,1995年获工业自动化博士学位. 从事计算机过程控制方面的研究工作.

孙优贤 见本刊1997年第1期第41页.