第21卷 第4期 1995年7月
自动化学报 ACTA AUTOMATICA SINICA
Vol. 21, No. 4 July, 1995

短文

故障检测与定位

隋家贤
(青岛化工学院自动化系 266042)
黄苏南
(上海交通大学自控系 200030)
夏圈世
(青岛化工学院自动化系 266042)

摘 要

综合运用空间几何方法和参数辨识方法,在系统分解的基础上,提出了一种故障检测与定位的新方法. 此方法简化了系统故障诊断所需的计算工作,可满足一般情况下系统对故障诊断的实时性要求.

关键词: 故障模式,故障特征,不变子空间,参数辨识.

1 引言

目前,系统故障诊断的方法主要有: 参数辨识方法[1],空间几何方法[2]和神经元网络方法[3]. 它们各自具有不同的特点及适用性. 本文综合运用空间几何方法和参数辨识方法,在系统分解的基础上,提出了一种系统故障检测与定位的新方法. 此方法具有设计灵活及简化计算的特点.

2 空间几何方法

假设系统的模型为[2]

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = A\boldsymbol{x}(t) + B\boldsymbol{u}(t) + \sum_{i=1}^{K} L_i \boldsymbol{m}_i(t),$$
$$\boldsymbol{y}(t) = C\boldsymbol{x}(t), \quad (i = 1, 2, \cdots\cdots, K), \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{m}_i(t)$ 与 L_i 分别为故障模式向量与故障特征矩阵.

故障检测要求设计监视器,其状态空间描述为

本文于1993年3月3日收到

$$\dot{\boldsymbol{w}}(t) = F\boldsymbol{w}(t) + G\boldsymbol{u}(t) + E\boldsymbol{y}(t),$$
$$\boldsymbol{r}(t) = P\boldsymbol{w}(t) + H\boldsymbol{y}(t), \tag{2}$$

并满足下述条件

1) $\boldsymbol{m}_i(t) = \boldsymbol{0}, \|\boldsymbol{r}(t)\| \to 0, (i = 1,2,\cdots,K)$.

2) 当且仅当 $\boldsymbol{m}_j(t) \neq \boldsymbol{0}, \boldsymbol{m}_i(t) = \boldsymbol{0} (i \neq j)$ 时，有 $r_j(t) \neq 0$，其它 $\|r_i(t)\| \to 0$. $r_i(t)$ 为 $\boldsymbol{r}(t)$ 的第 i 个分量.

考虑以监视器输出的第 i 个分量为输出的综合系统

$$\dot{\bar{\boldsymbol{x}}}(t) = \bar{A}\bar{\boldsymbol{x}}(t) + \bar{B}_i\bar{\boldsymbol{u}}_i(t) + \bar{L}_i\boldsymbol{m}_i(t),$$
$$r_i(t) = \bar{H}_i\bar{\boldsymbol{x}}(t), \tag{3}$$

其中

$$\bar{\boldsymbol{x}}(t) = \begin{pmatrix} \boldsymbol{x}(t) \\ \cdots\cdots \\ \boldsymbol{w}(t) \end{pmatrix}, \quad \bar{\boldsymbol{u}}_i(t) = \begin{pmatrix} \boldsymbol{u}(t) \\ \boldsymbol{m}_1(t) \\ \vdots \\ \boldsymbol{m}_{i-1}(t) \\ \boldsymbol{m}_{i+1}(t) \\ \vdots \\ \boldsymbol{m}_K(t) \end{pmatrix},$$

$$\bar{A} = \left(\begin{array}{c|c} A & 0 \\ \hline EC & F \end{array}\right), \quad \bar{B}_i = \left(\begin{array}{c|cccc} B & L_1\cdots L_{i-1} & L_{i+1} & \cdots L_K \\ \hline G & 0\cdots 0 & 0 & \cdots 0 \end{array}\right),$$

$$\bar{L}_i = \begin{pmatrix} L_i \\ \cdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{H}_i = (H_iC \,\vdots\, P_i). \tag{4}$$

H_i 与 P_i 分别为H与P的第 i 个行向量.

定理 1. 若(3)式表示的系统渐近稳定,且满足下述条件:

i) $\mathscr{I}_m\bar{B}_i \subset \mathscr{S}^1_{inv\lambda} \subset \mathscr{K}_{er}\bar{H}_i$;

ii) $\mathscr{I}_m\bar{L}_i \subset \mathscr{S}^2_{inv\lambda}$, 且 $\mathscr{S}^2_{inv\lambda} \cap \mathscr{K}_{er}\bar{H}_i = \{0\}$;

iii) $(H_iC \,\vdots\, P_i) = \bar{H}_i$ 有解 H_i,

则监视器问题(2)有解,即存在不全为零的 E,F,G,H 和 P，使按(2)式构造的监视器的输出 $\boldsymbol{r}(t)$ 满足条件 1),2).

其中 $\mathscr{I}_m\bar{B}_i$ 表示 $\bar{B}_i$ 的值空间，$\mathscr{K}_{er}\bar{H}_i$ 表示 $\bar{H}_i$ 的核空间，$\mathscr{S}_{inv\lambda}$ 表示 $\bar{A}$ 的非平凡不变子空间.

注. $\mathscr{S}$ 的上标用于区分不同的非平凡不变子空间.

定理 2. 设系统(1)的阶次为 n，输出向量 $y(t)$ 的维数为 q，且 $q \leqslant n$，则监视器问题有解的必要条件为 $q + n_1 \geqslant K$. 其中 n_1 为监视器(2)的阶次.

3 参数辨识的结果

多变量系统以脉冲传递矩阵形式给出

$$\boldsymbol{y}(z) = G(z)\boldsymbol{u}(z),$$

$$G(z)=\begin{pmatrix} B_{11}(z^{-1}) & \cdots\cdots & B_{1p}(z^{-1}) \\ \vdots & & \vdots \\ B_{q1}(z^{-1}) & \cdots\cdots & B_{qp}(z^{-1}) \end{pmatrix}\cdot\frac{1}{A(z^{-1})}, \tag{5}$$

其中

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1+a_1z^{-1}+\cdots\cdots+a_nz^{-n}, \\ B_{ij}(z^{-1}) &= b_1^{(ij)}z^{-1}+\cdots\cdots+b_n^{(ij)}z^{-n}. \end{aligned} \tag{6}$$

令

$$\boldsymbol{a}=\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix},\quad \boldsymbol{b}_i=\begin{pmatrix} b^{(i1)} \\ \vdots \\ b_n^{(i1)} \\ \vdots \\ b_n^{(ip)} \end{pmatrix},\quad \boldsymbol{\theta}=\begin{pmatrix} \boldsymbol{a} \\ \boldsymbol{b}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{b}_q \end{pmatrix},\quad \boldsymbol{u}(k)=\begin{pmatrix} u_1(k-1) \\ \vdots \\ u_1(k-n) \\ \vdots \\ u_p(k-n) \end{pmatrix}.$$

$$\boldsymbol{y}(k)=\begin{pmatrix} y_1(k) \\ \vdots \\ y_q(k) \end{pmatrix},\quad \boldsymbol{z}_i(k)=\begin{pmatrix} -y_i(k-1) \\ \vdots \\ -y_i(k-n) \end{pmatrix},$$

$$\widetilde{H}(k)=\begin{pmatrix} \boldsymbol{z}_1^{\mathrm{T}}(k) & \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(k) & \boldsymbol{0} & \cdots & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{z}_2^{\mathrm{T}}(k) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(k) & & \boldsymbol{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{z}_q^{\mathrm{T}}(k) & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \cdots & \boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(k) \end{pmatrix}. \tag{7}$$

又设测量数据长度为 N，令

$$Y_N=\begin{pmatrix} \boldsymbol{y}(1) \\ \vdots \\ \boldsymbol{y}(N) \end{pmatrix},\quad \widetilde{H}_N=\begin{pmatrix} \widetilde{H}(1) \\ \vdots \\ \widetilde{H}(N) \end{pmatrix}, \tag{8}$$

则有 $Y_N=\widetilde{H}_N\boldsymbol{\theta}$. 据最小二乘法[4]，系统参数 θ 的估计值为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{LS}=(\widetilde{H}_N^{\mathrm{T}}\widetilde{H}_N)^{-1}\widetilde{H}^{\mathrm{T}}Y_N. \tag{9}$$

4　系统故障的检测与定位

任意有限维线性定常系统均可表示成多个子系统和组合系统，如

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}} &= \left(\begin{array}{c:c} A_1 & A_{12} \\ \hdashline A_{21} & A_2 \end{array}\right)\boldsymbol{x}+\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix}\boldsymbol{u}, \\ \boldsymbol{y} &= (C_1 \vdots C_2)\boldsymbol{x}, \end{aligned} \tag{10}$$

可分解为两个子系统构成的组合系统

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_1 = A_1\boldsymbol{x}_1 + \bar{B}_1\boldsymbol{u}_1,\\ \boldsymbol{y}_1 = \boldsymbol{C}_1\boldsymbol{x}_1,\end{cases}\quad \begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_2 = A_2\boldsymbol{x}_2 + \bar{B}_2\boldsymbol{u}_2,\\ \boldsymbol{y}_2 = C_2\boldsymbol{x}_2,\end{cases} \tag{11}$$

其中

$$\bar{B}_1 = (B_1 \vdots A_{12}),\ \bar{B}_2 = (B_2 \vdots A_{21}),\quad \boldsymbol{u}_1 = \begin{pmatrix}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{x}_2\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{u}_2 = \begin{pmatrix}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{x}_1\end{pmatrix}. \tag{12}$$

基于定理 1 和系统的分解,给出系统故障检测与定位的设计步骤如下:

1) 将系统按一定的故障检测要求,分解为适当的输入输出可测的子系统构成的组合系统。

2) 由故障模式 $\boldsymbol{m}_i(t)$ 对状态 $\boldsymbol{x}_i$ 的影响程度,取定故障特征 L_i。

3) 将状态空间 $\mathscr{X}$ 表示成 A 的特征子空间的直和

$$\mathscr{X} = \bigoplus_{t=1}^{T} V_A^t. \tag{13}$$

其中 V_A^t 表示 A 的第 t 个特征子空间,并满足以 $L_i(i = 1,2,\cdots,K)$ 的列向量生成的空间 V_{L_i},有

$$V_{L_i} \subset \mathscr{S}^i = \bigoplus_{n=1}^{N} V_A^{t_n}. \tag{14}$$

且当 $i \neq j$ 时,$\mathscr{S}^i \cap \mathscr{S}^j = \{0\}$.

4) 取 $n_1 \geqslant K - q$,并取G使

$$B_G = \begin{pmatrix}B\\ G\end{pmatrix} \tag{15}$$

的列向量与按(4)式中定义的 $\bar{L}_i(i = 1,2,\cdots,K)$ 的列向量线性无关.

5) 选取 E,F 渐近稳定,且使按(4)式中定义的 $\bar{A}$ 满足

$$\mathscr{B} \subset \mathscr{S}^{B_G} = \bigoplus_{n=1}^{N(B_G)} V_n^{t_n}, \tag{16}$$

并且对任意的 i 均有 $\mathscr{S}^{B_G} \cap \bar{\mathscr{S}}^i = \{0\}$.
其中 $\mathscr{B}$ 是以 B_G 的列向量生成的空间,

$$\bar{\mathscr{S}}^i = \{\bar{x} \mid \bar{x} = (x\ \ 0)^{\mathrm{T}}, x \in \mathscr{S}^i\}. \tag{17}$$

6) 取 $\bar{H}_i^{\mathrm{T}} \in \left(\mathscr{S}^{B_G} \oplus \left(\bigoplus_{j \neq i} \bar{\mathscr{S}}^j\right)\right)^{\perp}$,使

i) $\bar{H}_i^{\mathrm{T}}$ 与 $\bar{\mathscr{S}}^i$ 的任一基底均不正交;

ii) $(H_i C \vdots P_i) = \bar{H}_i$ 有解 H_i.

7) 用得到的 H_i 和 P_i 构成H和 P,并用 E,F,G,H,P 作监视器(2).

8) 按规定的故障阈值,在系统运行中采样 $r(t)$,对子系统进行故障检测.

9) 当检测到某一子系统发生故障后,对其输入及输出采样,按(9)式进行参数辨识.

10）由辨识结果，求解相应的方程，或采用参数的扰动灵敏度分析，确定故障发生的原因并采取相应的对策。

5 举例

考虑单输入双输出系统

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} u,$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}. \tag{18}$$

1）将系统分解为如下两个子系统：

i) $$\dot{\boldsymbol{x}}_1 = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 0 & -2 \end{pmatrix} \boldsymbol{x}_1 + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \boldsymbol{u}_1,$$

$$\boldsymbol{y}_1 = (1 \ \ 0)\boldsymbol{x}_1. \tag{19}$$

ii) $$\dot{\boldsymbol{x}}_2 = -3\boldsymbol{x}_2 + \boldsymbol{u}_2,$$

$$\boldsymbol{y}_2 = \boldsymbol{x}_2. \tag{20}$$

其中

$$\boldsymbol{x}_1 = (x_1 x_2)^{\mathrm{T}}, \ \ \boldsymbol{x}_2 = x_3,$$

$$\boldsymbol{y}_1 = x_1, \ \ \boldsymbol{y}_2 = x_3, \ \ \boldsymbol{u}_1 = u, \ \ \boldsymbol{u}_2 = x_2. \tag{21}$$

令 $\boldsymbol{m}_1(t), \boldsymbol{m}_2(t)$ 分别为子系统输出 $\boldsymbol{y}_1, \boldsymbol{y}_2$ 的故障模式，并取故障特征为

$$L_1 = (100)^{\mathrm{T}}, \ \ L_2 = (001)^{\mathrm{T}}, \tag{22}$$

对子系统进行故障检测。

2）设计监视器

按上节步骤 1)—7) 可求得监视器为

$$\dot{w} = -2w + u,$$

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \end{pmatrix} w + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{y}_1 \\ \boldsymbol{y}_2 \end{pmatrix}. \tag{23}$$

3）系统运行

由式(18)，(23)构成的组合系统在初始状态

$$(x_1(0) \ \ x_2(0) \ \ x_3(0) \ \ w(0))^{\mathrm{T}} = (0 \ \ 0 \ \ 0 \ \ 0)^{\mathrm{T}} \tag{24}$$

及单位阶跃输入 $u(t) = 1(t)$ 下启动，运行结果如表 1。

4）故障检测

设在 $t = 1.0$ 时刻，系统矩阵变化为

表 1

t	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
u	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
y_1	0.0000	0.0906	0.1648	0.2256	0.2753	0.3160	0.3494	0.3767	0.3991	0.4174	0.4323
y_2	0.0000	0.0906	0.1468	0.2256	0.2753	0.3160	0.3494	0.3767	0.3991	0.4174	0.4323
r_1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
r_2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.0E-8	3.0E-8	3.0E-8	3.0E-8	0.0000	0.0000

$$A=\begin{pmatrix}-\frac{1}{2} & -1 & 0\\ 0 & -2 & 0\\ 0 & 1 & -3\end{pmatrix}. \tag{25}$$

运行结果如表 2.

表 2

t	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
u	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
y_1	0.4323	0.4660	0.4969	0.5255	0.5519	0.5764	0.5993	0.6206	0.6406
y_2	0.4323	0.4446	0.4546	0.4629	0.4696	0.4751	0.4796	0.4833	0.4868
r_1	0.0000	0.0214	0.0423	0.0625	0.0823	0.1010	0.1203	0.1368	0.1544
r_2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

设 r_1 的故障阈值取为 $|r_{1f}|=0.05$，则由 $t=1.3$ $r_1=0.0626$，判定子系统 i) 出现故障.

5) 故障定位

自 $t=1.4$ 开始,测量子系统 i) 的输入 u_1 及输出 y_1，数据如表 3.

表 3

t	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
u_1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
y_1	0.5519	0.5764	0.5993	0.6206	0.6406	0.7053	0.7636	0.8151	0.8613	0.9029	0.9406	0.9749

按(9)式辨识得系统参数

$$\hat{\theta}_{LS}=(-1.7483\ \ 0.7609\ \ 0.0929\ \ -0.0825)^{T}, \tag{26}$$

与系统正常时的参数

$$\theta_0=(-1.7236\ \ 0.7408\ \ 0.0906\ \ -0.0820)^{T} \tag{27}$$

比较,可看出前两个参数变化较大.通过方程求解,得系统矩阵元素 $\hat{a}_{11}=-0.7164$,$\hat{a}_{22}=-2.016$. 由于 $\hat{a}_{11}$ 与正常值-1相差较大，所以,可得结论：系统故障的原因是参数 a_{11} 的变化.

6 结论

本文提出的故障检测与定位方法具有两个显著的特点：

1) 灵活性。由于采用了系统的分解，可减少被检测的故障模式的个数，容易选择合适的故障特征，从而使得监视器问题的可解性增大。适用性提高。

2) 计算简单。因为仅当检测到子系统出现故障时，才对子系统进行参数辨识。而子系统的阶次低于原系统的阶次，计算得以简化。

由于上述特点，本文的方法在系统运行时占用机时很少，可满足一般系统对故障诊断的实时性要求。

参　考　文　献

[1] Isermann R. Process fault detection based on modeling and estimation methods——a survey. *Automatica*, 1984, **20**: 387—404.

[2] Massoumnia M A, Verghese G C and Willsky A S. Failure detection and identification, *IEEE Trans. on Auto. Contr.*, 1989, **34**(3): 316—321.

[3] Hoskin, et al J. C., Artificial neural models of knowledge representation in chemical engineering. *Compters & Chem. Eng.*, 1989, **12**: 881—890.

[4] 方崇智，萧德云. 过程辨识，清华大学出版社，1988.

FAILURE DETECTION AND LOCATION

Sui Jiaxian

(*Dept. of Automation, Qingdao Institute of Chemical Technology* 266042)

Huang Sunan

(*Dept. of Automatic Control, Shanghai Jiao Tong University* 200030)

Xia Quanshi

(*Dept. of Automation, Qingdao Institute of Chemical Technology* 266042)

Abstract

In this paper, a new method of system failure detection and location is proposed based on the system decomposition and synthetic using geometric method and parameter identification. This method simplifies the calculation of system failure diagnosis. So this method is suitable for the real time system failure diagnosis.

Key words: Failure mode, failure signature, invariant subspace, parameter identification.