

文章编号: 1000-8055(2002) 05-0645-05

一种故障可诊断性分析方法

李家文, 张振鹏

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘要: 介绍了应用结构排除法进行故障诊断时故障的可诊断性, 指出了使用 $(0, 1)$ 故障矩阵时有可能出现错误的诊断结果, 介绍了计算敏感度矩阵的方法, 同时也和 $(0, 1)$ 故障矩阵进行了比较。在设计故障诊断系统时, 利用敏感度矩阵, 能够针对不同的关系式故障选择最佳检验参数和排除参数的组合, 可以提高故障诊断结果的可信度。

关键词: 故障诊断; 结构排除法; 敏感度矩阵; 可信度

中图分类号: V430

文献标识码: A

A Method for Analysing Sensitivity of Fault

LI Jia-wen, ZHANG Zhen-peng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper discusses the sensitivity of fault in fault diagnosis when structural elimination method is applied. Fault diagnosis in the structural elimination is based on mathematical model and measured parameters. Because the measured parameters vary with the different faults, it is necessary to make deeper analysis when employing $(0, 1)$ fault matrix to reduce the possibility of making wrong diagnosis. The analytical method mentioned above which uses the sensitivity matrix is proposed in this paper. The method of calculating sensitivity matrix and an example that uses the matrix are also presented. The sensitivity matrix as well as the sensitivity degree of parameters for fault is compared with $(0, 1)$ fault matrix. The best test parameters can be chosen and the parameter's combination can be eliminated according to different relationships of fault when the fault diagnosis system is designed by using the sensitivity matrix. Therefore, the reliability of the result of fault diagnosis will be improved.

Key words: fault diagnosis; structural elimination method; sensitivity matrix; reliability

1 引言

故障诊断系统的主要指标是可监测故障的范围和故障诊断深度。若系统故障与系统正常状态是可分离的, 则称故障是可监测的。若故障还能由诊断系统估计, 则称故障是可诊断的^[1]。由于一些诊断信息的无法获得或技术与经济上的问题, 复杂诊断对象内部的故障并不是都能被监测和诊断

的。在设计诊断系统时应该确定不能诊断的故障, 以及由此带来的无故障工作、寿命等指标的降低。

应用诊断算法对故障进行诊断时, 能否获得可靠的诊断结果, 一方面取决诊断对象本身, 另一方面取决所使用的诊断算法。在文献[2]中给出了确定燃气轮机可监测性的因素: 监测参数的数量, 监测参数对故障的敏感度, 被测量的物理量是否稳定, 发动机结构能否允许使用无损探测设备。

监测参数在同一个发动机不同时间或同样条件不同发动机上能否有稳定的数值,决定了用作诊断故障的信息是否可靠,故障所引起的测量参数的变化应该在给定概率下大于测量参数的方差。

现在应用的诊断算法大多是针对某一类故障而设计的,这也就是诊断算法的局限性。前苏联技术人员对 ПД-170, ПД-120, ПД-0120 等发动机的故障进行了分析,提出了按故障发生的时间分成三类:第一类故障发生的时间比要求完成防护工作的时间短,在这一类故障中有涡轮泵的故障和结构元件的快速烧蚀故障。对这一类故障需采用以结构元件状态信息为基础的振动诊断算法,以实现早期预测和诊断。第二类故障的发生时间为 0.04~0.05 s,可用以压力、温度等参数为基础的算法来诊断。第三类故障的发生时间要更长些(缓发性故障),可以利用发动机的工作参数和数学模

型来诊断。

本文所研究的结构排除法^[3,4]是基于诊断对象数学模型和被测量的工作参数的,能够对缓发性故障进行诊断。下面对结构排除法中缓发性故障的可诊断性进行分析。

2 故障矩阵分析

在结构排除法中,诊断结果是利用特征向量和故障矩阵进行比较来获得的,而故障矩阵是通过测量参数计算出来的,也就是说,故障诊断系统所测量的诊断对象工作参数确定了整个系统的诊断深度,也就是哪些故障可以诊断,哪些无法和其它故障区分,甚至无法诊断。文献[4]通过对一个液体管路系统计算,得出了下面的(0,1)故障矩阵(本文其它计算结果也是针对文献[4]中的液体管路得到的):

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

故障矩阵 Z 的第 1、6 行,第 4、5、7 行重合,这代表利用 Z 能够区分四种故障: $(f_1, f_6), f_2, f_3, (f_4, f_5, f_7), f_i$ —描述诊断对象数学模型中的第 i 个关系式。如果故障矩阵的某一行全部是由 1 组成的 $Z_i = \{1, 1, \dots, 1\}$,那么这一行所对应关系式的故障将不能被诊断出。通过这样的分析,可以在诊断系统建立开始阶段(诊断对象额定工况还没有确定,还没有精确的数学模型)把理论上能够获得的诊断深度确定下来,或者根据给定的诊断深度选择所需测量参数。

获取故障矩阵 Z 的过程中对参数变化和故障的关系只是进行了质的分析,所以故障矩阵 Z 是由 0 和 1 组成的。如果由 x_1 和 x_2 形成的故障矩阵 Z 的第 i 行不是全部由 1 组成, $Z_i \neq \{1, 1, \dots, 1\}$,理论上讲,可以利用 x_1 和 x_2 这两个参数诊断故障矩阵 Z 的第 i 行所对应的数学模型中第 i 个关系式 f_i 。但由于有计算误差和测量误差的存在,每个测量参数都要给出各自的允许相对偏差,在实际应用过程中发现,当检验参数测量值与计算值相对偏差小于允许相对偏差时,系统内部也有可能发生了故障。这就需要在建立了诊断对象的精确数学模型后,分析每组检验参数和排除

参数对不同的关系式故障的敏感度。

3 敏感度分析

如果诊断对象可以用方程组表示:

$$f_j(x_i) = 0 \quad (1)$$

$$j = 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, n$$

假设某个部件发生了故障,可以认为是描述这个部件的方程由 $f_k(x_i) = 0$ 转变成 $q(x_i) = 0$,也可以认为是 $f_k(x_i) = \Delta_k \neq 0$ 。当诊断对象内部发生故障,一部分参数的测量值 x^* 就会不等于它的计算值 x^0 , $\Delta x = x^* - x^0 \neq 0$,如果使用的是非线性模型,把方程组(1)在 $X^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ 利用泰勒公式线性化:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)}$$

用 $\Delta X = \{\Delta x_i\} = \{x_i - x_i^0\}$ 表示 X 相对于 X^0 的变化,方程组(1)线性化后可以得到:

$J \times \Delta X = 0$ (2)

关系式 f_k 发生故障后方程组(2)改变为:

$J \times \Delta X = B$ (3)

$B = \{b_i\} \quad , \quad b_k = \Delta k,$

当 $i \neq k$ 时, $b_i = 0$ 。

根据克莱姆规则对方程组(3) 求解: $\Delta x = D^{-1} B$, D_i 是把 D 中第 i 列替换成常数项 B , 由于常数项 B 中只有 b_k 不为零, 按第 i 列把行列式 D_i 分解后得到:

$\Delta x_i = (-1)^{(i+k)} \frac{M_{ki}}{D} \cdot \Delta_k$ (4)

M_{ki} 是代数余子式(把矩阵 J 的第 k 行和第 i 列消

除后得到的 $(n-1)$ 阶行列式)。

在对方程组(3) 求解时, 假设 $\Delta_k = 1$, 就可以求出 x_i 对 f_k 故障的敏感度。通过表 1 给出的计算结果可以看出对各个关系式故障最敏感的参数(对关系式 f_1 最敏感的是 $x_1, f_2-x_4, f_3-x_2, f_4-x_2, f_5-x_2, f_6-x_3, f_7-x_2$)。

在计算诊断特征向量第 j 个($j = 1, n$) 元素时, 将排除参数 x_e 的测量值 x_e^* 代入方程组(1) 中, 同时排除方程 f_j , 或者把方程 f_j 替换为 $\Delta x_e = x_e^* - x_e^0$, 雅可比矩阵 J 转变为 J' !

$$J' = \left[\begin{array}{cccccc} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{e-1}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_e} & \frac{\partial f_1}{\partial x_{e+1}} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial f_{j-1}}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_{j-1}}{\partial x_{e-1}} & \frac{\partial f_{j-1}}{\partial x_e} & \frac{\partial f_{j-1}}{\partial x_{e+1}} & \cdots & \frac{\partial f_{j-1}}{\partial x_n} \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial f_{j+1}}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_{j+1}}{\partial x_{e-1}} & \frac{\partial f_{j+1}}{\partial x_e} & \frac{\partial f_{j+1}}{\partial x_{e+1}} & \cdots & \frac{\partial f_{j+1}}{\partial x_n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_{e-1}} & \frac{\partial f_n}{\partial x_e} & \frac{\partial f_n}{\partial x_{e+1}} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{array} \right]_{(x_1^0, x_2^0, \cdots, x_n^0)}$$

表1 参数对关系式故障的敏感度

	Δx_1	Δx_2	Δx_3	Δx_4	Δx_5	Δx_6	Δx_7
f_1	- 8. 70e- 01	- 4. 02e- 01	- 3. 72e- 01	2. 50e- 01	- 1. 22e- 01	7. 76e- 02	- 4. 46e- 02
f_2	- 8. 76e- 02	- 4. 04e- 02	2. 50e- 01	- 2. 62e- 01	- 1. 23e- 02	7. 81e- 03	- 4. 49e- 03
f_3	4. 28e- 02	- 4. 42e- 01	- 1. 22e- 01	- 1. 23e- 02	- 1. 34e- 01	8. 54e- 02	- 4. 91e- 02
f_4	- 2. 72e- 02	- 3. 54e- 01	7. 76e- 02	7. 81e- 03	8. 54e- 02	- 1. 25e- 01	- 3. 93e- 02
f_5	1. 56e- 02	2. 04e- 01	- 4. 46e- 02	- 4. 49e- 03	- 4. 91e- 02	- 3. 93e- 02	- 8. 84e- 02
f_6	- 3. 05e- 01	- 1. 41e- 01	8. 70e- 01	8. 76e- 02	- 4. 28e- 02	2. 72e- 02	- 1. 56e- 02
f_7	- 1. 41e- 01	- 1. 83e+ 00	4. 02e- 01	4. 04e- 02	4. 42e- 01	3. 54e- 01	- 2. 04e- 01

得到方程组:

$J' \times \Delta X = B'$ (5)

常数项 B 中只有第 j 个元素不为零

$b_j = x_e^* - x_e^0 = \Delta x_e^*$

通过方程组(5) 可以求出检验参数的计算值 x_c' :

$\Delta x_c' = \frac{D_c'}{D} = (-1)^{(c+j)} \frac{M_{jc}'}{D} \Delta x_e^* = (-1)^{(c+j)} \frac{M_{jc}'}{D} (-1)^{(e+k)} \frac{M_{ke}}{D} \cdot \Delta_k$

$\Delta x_c^* = (-1)^{(c+k)} \frac{M_{kc}}{D} \cdot \Delta_k$

$\Delta x_c = x_c' - x_c^* = \Delta x_c' - \Delta x_c^* = \left[(-1)^{(c+j+e+k)} \frac{M_{jc}'}{D} \frac{M_{ke}}{D} - (-1)^{(c+k)} \frac{M_{kc}}{D} \right] \cdot \Delta_k = c \cdot \Delta_k$

矩阵 J 和 J' 的区别只是第 j 行不同, 那么:

$$M_{jc}' = M_{jc}$$

将 D' 按第 j 行展开得到:

$$D' = (-1)^{(j+e)} M_{je}$$

$$\Delta x_c = \left[(-1)^{(c+j+e+k)} \frac{M_{jc}}{(-1)^{(j+e)} M_{je}} \frac{M_{ke}}{D} - (-1)^{(c+k)} \frac{M_{kc}}{D} \right] \cdot \Delta_k = (-1)^{(c+k)} \left[\frac{M_{jc} M_{ke}}{M_{je}} - M_{kc} \right] \frac{\Delta_k}{D} \tag{6}$$

表 2 利用检验参数 x_2 和排除参数 x_4 计算出的敏感度矩阵

	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
f_1	2.22e-18	2.07e-02	5.35e+01	-6.28e+00	-5.70e+00	2.14e-17	-2.43e+00
f_2	1.85e-02	-6.52e-19	-5.35e+01	6.85e+00	6.22e+00	1.78e-01	2.65e+00
f_3	1.85e-02	2.07e-02	-3.17e-16	5.74e-01	5.22e-01	1.78e-01	2.22e-01
f_4	1.37e-02	1.67e-02	3.62e+00	0.00e+00	-5.79e-17	1.32e-01	0.00e+00
f_5	-7.87e-03	-9.59e-03	-2.08e+00	0.00e+00	2.90e-17	-7.59e-02	0.00e+00
f_6	0.00e+00	7.25e-03	1.88e+01	-2.20e+00	-2.00e+00	0.00e+00	-8.51e-01
f_7	7.09e-02	8.64e-02	1.88e+01	-1.28e-16	-3.48e-16	6.84e-01	-4.93e-17

表 3 利用检验参数 x_4 和排除参数 x_2 计算出的敏感度矩阵

	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7
f_1	2.22e-18	-1.34e-01	-1.49e+00	-1.38e-01	-1.26e-01	1.07e-17	-5.35e-02
f_2	1.15e-02	2.61e-18	1.49e+00	1.51e-01	1.37e-01	1.11e-01	5.84e-02
f_3	1.15e-02	-1.34e-01	-9.89e-18	1.27e-02	1.15e-02	1.11e-01	4.89e-03
f_4	8.51e-03	-1.08e-01	-1.01e-01	0.00e+00	4.53e-19	8.21e-02	0.00e+00
f_5	-4.89e-03	6.22e-02	5.79e-02	0.00e+00	0.00e+00	-4.72e-02	0.00e+00
f_6	5.56e-19	-4.70e-02	-5.22e-01	-4.85e-02	-4.41e-02	0.00e+00	-1.88e-02
f_7	4.41e-02	-5.60e-01	-5.22e-01	0.00e+00	0.00e+00	4.25e-01	0.00e+00

如果我们把发生故障的关系式排除($j = k$), 公式(6)可写成:

$$\Delta x_c = (-1)^{(c+k)} \left[\frac{M_{kc} M_{ke}}{M_{ke}} - M_{kc} \right] \frac{\Delta_k}{D} = 0$$

这就证明了结构排除法的理论基础^[3]:

在被诊断对象内部出现了故障的情况下, 如果利用一个对此故障敏感的参数的测量值把对应这个故障的方程从描述正常工作状态的方程组中消除掉, 并对得到的方程组求解, 那么, 另一个对此故障敏感的参数的测量值和计算值的差应为零。

在下面两个表格中给出了根据公式(6)利用 x_2 和 x_4 得到的不同的敏感度矩阵(矩阵中有些元素由于计算误差只是近似等于零, 在诊断时应认为等于零)。

可以看出, 通过以上方法得到的敏感度矩阵已不是对称矩阵((0, 1)故障矩阵是对称的), 同时

两个参数互换位置后得到的敏感度矩阵也是不一样的。如果 x_2 和 x_4 的允许相对偏差是一样的话, 利用表 2(x_2 作为检验参数, x_4 作为排除参数)来诊断 f_2 故障要比利用表 3 可靠一些, 因为在表 2 中 f_2 所对应的行的不为零元素比表 3 中的大。

4 结束语

本文对在应用结构排除法进行故障诊断时故障的可诊断性进行了初步分析, 对(0, 1)故障矩阵和敏感度矩阵作了比较。可以采用下面两种方法确定诊断结果:

(1) 将(0, 1)故障矩阵和敏感矩阵组合使用: 在诊断关系 f_i 是否出现故障时, 根据敏感矩阵选择首先使用的故障矩阵, 例如, 根据表 2 和表 3 的对比, 将首先作用 x_2 作为检验参数、 x_4 作为排除参数获得的(0, 1)故障矩阵来诊断 f_2 是否出现故障。

(2) 只使用敏感矩阵: 在这种情况下, 诊断特征向量不是由 0 和 1 组成, 而是由检验参数的相对偏差组成. 通过在敏感度矩阵中寻找和诊断特征向量最相近的行, 来确定诊断结果. 可以利用文献[5]中采用的灰色关联度分析或者计算向量间的角度来比较诊断特征向量和矩阵中的某一行。

通过对敏感度, 可以排辽一些不可靠的初步诊断结果, 提高诊断结果的可信度, 同时, 在使用第 2 种方法进行诊断时, 还可以有可能出现故障的一组关系式中进一步分析, 来确定最有可能出现故障的关系式。例如, 在使用表 2 所对应的(0, 1) 故障矩阵时, 关系式 f_4 和 f_5 的故障是不能区分的, 但在敏感度矩阵中, 它们所对应的的向量的区别是很大的, 可以将两个关系式的故障区分开来。

参考文献:

[1] 张育林, 吴建军, 朱恒伟, 等. 液体火箭发动机健康监控技术 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.

[2] К лев В В, Парк оменко П П, Абрамчук и др В Е. Технические средства диагностирования: справочник [М]. Под общ. ред. В. В. К лова, – М.: Машиностроение, 1989.

[3] Мартиросов Д С. Диагностирование сложных технических систем на основе математических моделей процессов и измеряемых параметров методом структурного исключения [М]. М.: Изд- во МАИ, 1998.

[4] 李家文, 张纯良, 张振鹏, Kolomentsev A I. 基于数学模型和测量参数进行故障诊断的结构排除法 [J]. 宇航学报, 2001, 22(4): 90– 94.

[5] 崔定军, 刘国球, 张振鹏. 基于模型的液体推进系统故障诊断算法 [J]. 航空动力学报, 1995, 10(2): 163– 166.

(责任编辑 杨再荣)

