

奇偶空间法用于液体火箭发动机故障诊断^{*}

刘 冰 张育林

(国防科学技术大学航天技术系, 长沙, 410073)

摘 要: 基于液体火箭发动机系统测量输出之间的内在一致性, 直接利用液体火箭发动机试车的测量参数, 采用奇偶空间方法对仿真的液体火箭发动机16种故障进行分离, 结果证明该方法对实现液体火箭发动机故障诊断有较好的效果。

主题词: 液体推进剂火箭发动机, 发动机故障, 故障诊断, 奇偶校验

分类号: V 434. 1

PARITY SPACE METHOD FOR FAULT DIAGNOSIS OF LIQUID ROCKET ENGINE

Liu Bing Zhang Yulin

(Dept. of Aerospace Technolgy, National Univ. of Defence Technology, Changsha, 410073)

Abstract: Based on the consistency of output parameters of liquid rocket engine system, the different faults were separated using the measuring parameters in engine test by parity space method. The results show that this method have good effect on liquid rocket engine fault diagnosis.

Subject terms: Liquid propellant rocket engine, Engine failure, Fault diagnosis, Parity check

1 引 言

在液体火箭发动机试车时, 采用大量的传感器测量发动机动态过程的输出。由于液体火箭发动机系统是一个内在统一的完整功能系统, 因此无论这些传感器是否种类相同, 是否具有硬件冗余备份, 测量传感器的输出都可以通过理论关系建立冗余作用, 即解析冗余。在各传感器均正常工作的情况下, 各传感器的输出因发动机系统性能参数的内在统一性而具有内在的一致性。如果某个传感器出现故障, 则故障传感器于其余传感器之间的这种测量输出的内在一致性就会遭到破坏。这种反映各传感器输出的内在一致性的关系称为奇偶方程, 而由奇偶方程所产生的余差矢量称为奇偶矢量, 奇偶矢量反映了各测量传感器测量输出的内在一致性, 通过奇偶矢量的检测可以实现对传感器故障的检测和液体火箭发动机故障的诊断^[1, 2]。

2 奇偶方程的建立

从处于准稳态状态下的动态系统数学模型出发, 若用 m 个传感器测量 m 个系统输出, 则传感器输出方程的矢量形式为:

$$z(k) = Cx(k) = v(k) \quad (1)$$

* 收稿日期: 1998-11-07, 修回日期: 1999-04-20

其中 $\mathbf{z} \in \mathbf{R}^m$, $\mathbf{v} \in \mathbf{R}^m$, $\mathbf{v}(k)$ 为传感器的测量噪声序列, 在传感器正常的条件下, $\mathbf{v}(k)$ 为白噪声高斯序列, 有零均值且协方差矩阵为 $\mathbf{R}$ 。设系统可以测量的输出数目 m 大于状态序列的维数 n , 选择有 m 个数所组成的数组 $(s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im})$ 使得

$$(s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im})\mathbf{C} = 0 \quad (2)$$

由于 $m > n$, 因而满足式 (2) 的 $m-n$ 组线性独立的解构成矩阵 $\mathbf{C}$ 的左零矩阵 $\mathbf{S}$ 的行, $\mathbf{S}$ 称为奇偶矩阵。将奇偶序列 $\mathbf{p}(k)$ 定义为: $\mathbf{p}(k) = \mathbf{S}\mathbf{z}(k)$, 则有奇偶方程:

$$\mathbf{p}(k) = \mathbf{S}\mathbf{z}(k) = \mathbf{S}\mathbf{v}(k) \quad (3)$$

在故障检测或诊断中, 可以将奇偶矢量 $\mathbf{p}(k)$ 作为系统的余差。在各传感器正常的情况下, $\mathbf{p}(k)$ 是零均值白噪声序列。当传感器或发动机系统发生故障时, 奇偶方程成为

$$\mathbf{p}(k) = \mathbf{S}\mathbf{v}(k) + \mathbf{S}\mathbf{e}_j\mathcal{Y}(k) = \mathbf{S}\mathbf{v}(k) + \mathbf{s}_j\mathcal{Y}(k) \quad (4)$$

其中 $\mathbf{s}_j$ 为矩阵 $\mathbf{S}$ 的第 j 列元素所组成的矢量。由式 (4) 可以看出, 奇偶矢量 $\mathbf{p}(k)$ 属于由 $\mathbf{S}$ 的列所张成的子空间, 称为奇偶空间, $\mathbf{s}_j$ 代表了传感器 j 的故障在奇偶空间中的矢量。当认为传感器正常, 而发动机系统有故障时, 奇偶矢量 $\mathbf{p}(k)$ 也就代表了发动机故障模式矢量。对于不同的故障类型, 奇偶矢量 $\mathbf{p}(k)$ 的空间伸展方程也会不同, 从而可以实现不同故障的分离^[3]。

3 奇偶矩阵的确定

奇偶矩阵 $\mathbf{S}$ 是由满足式 (2) 的 $m-n$ 个线性独立的解构成的 $(m-n) \times m$ 维矩阵。式 (2) 存在多个线性独立的解的充分且必要条件为矩阵 $\mathbf{C}$ 的维数满足 $m > n$, 这也就意味着直接冗余的奇偶矢量的存在条件是测量输出的数目大于状态矢量的维数。由式 (2) 得到的线性独立解的个数是确定的, 但是这 $(m-n)$ 个线性独立解不是唯一的, 也就是 $\mathbf{S}$ 矩阵不是唯一的。在确定对 $\mathbf{S}$ 的具体形式时引入约束: $\mathbf{S}\mathbf{S}^T = \mathbf{I}$ 。其中单位矩阵 $\mathbf{I}$ 的维数为 $(m-n) \times (m-n)$ 。基于这一考虑, 可以推导出最后的奇偶矩阵。设矩阵 $\mathbf{C}$ 的秩为 n , 定义矩阵 $\mathbf{T}$ 和 $\mathbf{W}$ 分别为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} (\mathbf{C}^T\mathbf{C})^{-1}\mathbf{C}^T \\ \mathbf{S} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W} = (\mathbf{C} \quad \mathbf{S}^T)$$

$$\text{则有} \quad \mathbf{T}\mathbf{W} = \begin{bmatrix} (\mathbf{C}^T\mathbf{C})^{-1} \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} (\mathbf{C} \quad \mathbf{S}^T) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n \times n} & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_{(m-n) \times (m-n)} \end{bmatrix} = \mathbf{I}_{m \times m}$$

由于方阵的左逆与右逆必相等, 必然有 $\mathbf{S}^T\mathbf{S} = \mathbf{I}_{m \times m} - \mathbf{C}(\mathbf{C}^T\mathbf{C})^{-1}\mathbf{C}^T$ 。因此, 若令 $\mathbf{S}_m = \mathbf{I}_{m \times m} - \mathbf{C}(\mathbf{C}^T\mathbf{C})^{-1}\mathbf{C}^T$, 则 $\mathbf{S}_m$ 为矩阵 $\mathbf{C}$ 的左零矩阵, 即可将 $\mathbf{S}_m$ 作为矩阵 $\mathbf{C}$ 的等效奇偶矩阵, 且可定义等效奇偶矢量:

$$\mathbf{p}_m(k) = \mathbf{S}_m\mathbf{z}(k) = [\mathbf{I}_{m \times m} - \mathbf{C}(\mathbf{C}^T\mathbf{C})^{-1}\mathbf{C}^T]\mathbf{z}(k) = \mathbf{z}(k) - \hat{\mathbf{z}}(k)$$

其中 $\hat{\mathbf{z}}(k)$ 代表 $\mathbf{z}(k)$ 的最小二乘估计, $\hat{\mathbf{z}}(k)$ 的具体算法相当于利用 $\hat{\mathbf{z}}(k)$ 的测量值得到 $\mathbf{x}(k)$ 的最小二乘估计 $\hat{\mathbf{x}}(k)$, 再由 $\hat{\mathbf{x}}(k)$ 计算出估计值 $\hat{\mathbf{z}}(k)$, 因此, $\mathbf{p}_m(k)$ 代表了一个 m 维奇偶向量, 由 $\hat{\mathbf{z}}(k)$ 的测量值减去最小二乘估计 $\hat{\mathbf{z}}(k)$ 而得到。

4 利用奇偶矢量进行故障诊断

考虑对文献 [4] 中图1示意的发动机系统, 建立了如下形式的准稳态方程:

$$\bar{\mathbf{X}}(k+1) = \mathbf{A}\bar{\mathbf{X}}(k) + \mathbf{B}\bar{\mathbf{U}}(k), \quad \bar{\mathbf{Y}}(k) = \mathbf{C}\bar{\mathbf{X}}(k)$$

式中: $\bar{\mathbf{X}} = (\delta\dot{m}_{ok}, \delta\dot{m}_{oll}, \delta\dot{m}_{of}, \delta n_o, \delta\dot{m}_{rk}, \delta\dot{m}_{rf}, \delta n_r, \delta p_k, \delta p_f, \delta T_o, \delta T_r)^T$

$$\bar{\mathbf{Y}} = (\delta p_{ok}, \delta p_{ovk}, \delta p_{of}, \delta n_o, \delta p_{rk}, \delta p_{rf}, \delta n_r, \delta p_k, \delta p_f, \delta T_{oe},$$

$$\delta T_{re}, \delta p_{ovk}, \delta p_{ovf}, \delta p_{rvk}, \delta p_{rvf}, \delta m_o, \delta m_f, \delta p_{rwi}, \delta p_{oe}, \delta p_{re})^T$$

对原始输出方程通过采用求全微分的方法将非线性方程转化为线性方程组 $y_i = c_i^T \bar{X}$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。可得到输出系数矩阵 C 。

$$\delta p_{ovi} = 2\bar{m}_{ovz} \zeta_{vz} \delta \dot{m}_{ovz} + (b_1 + 2b_2 T_{oe} + 3b_3 T_{oe}^2) \delta T_{oe}$$

$$\delta p_{oki} = 2\bar{m}_{ok} \zeta_{kp} \delta \dot{m}_{ok} + 2\bar{m}_{ok} \zeta_{kp} \delta \dot{m}_{ol1} + \delta p_k$$

$$\delta p_{of} = 2\bar{m}_{of} \zeta_{fp} + \delta p_f, \delta n_o = \delta n_o$$

$$\delta p_{rk} = 2\bar{m}_{rk} \zeta_{kp} \delta \dot{m}_{rk} + \delta p_k, \delta p_{rf} = 2\bar{m}_{rf} \zeta_{fp} + \delta p_f$$

$$\delta n_r = \delta n_r, \delta p_k = \delta p_k, \delta p_f = \delta p_f, \delta T_{oe} = \delta T_{oe}, \delta T_{re} = \delta T_{re}$$

$$\delta p_{ovi} = [2\bar{m}_{ol} \zeta_{li} + 2(\bar{m}_{ol1} + \bar{m}_{ovz})(\xi_{okzh} + \xi_{okp})] \delta \dot{m}_{ol} +$$

$$2(\bar{m}_{ol1} + \bar{m}_{ovz})(\xi_{okzh} + \xi_{okp}) \delta \dot{m}_{ovz} + \delta p_k$$

$$\delta p_{orf} = 2\bar{m}_{of} \zeta_{fp} \delta \dot{m}_{of} + (b_1 + 2b_2 T_{oe} + 3b_3 T_{oe}^2) \delta T_{oe}$$

$$\delta p_{rvi} = 2\bar{m}_{rk} \zeta_{vz} \delta \dot{m}_{rk} + (b_4 + 2b_5 T_{re} + 3b_6 T_{re}^2) \delta T_{re}$$

$$\delta p_{rvf} = 2\bar{m}_{rf} \zeta_{vf} \delta \dot{m}_{rf} + (b_4 + 2b_5 T_{re} + 3b_6 T_{re}^2) \delta T_{re}$$

$$\delta \dot{m}_o = \delta \dot{m}_{ovz} + \delta \dot{m}_{ol1} + \delta \dot{m}_{of}, \delta \dot{m}_r = \delta \dot{m}_{rk} + \delta \dot{m}_{rf}$$

$$\delta p_{oe} = (2a_1 \bar{Q}_o + a_2 \bar{n}_o) \delta \dot{m}_{ovz} + (2a_1 \bar{Q}_o + a_2 \bar{n}_o) \delta \dot{m}_{ol1} + (2a_1 \bar{Q}_o + a_2 \bar{n}_o) \delta \dot{m}_{of} +$$

$$(2a_3 \bar{n}_o + a_2 \bar{Q}_o) \delta n_o$$

$$\delta p_{re} = (2a_4 \bar{Q}_r + a_5 \bar{n}_r) \delta \dot{m}_{rk} + (2a_4 \bar{Q}_r + a_5 \bar{n}_r) \delta \dot{m}_{rf} + (2a_6 \bar{n}_r + a_5 \bar{Q}_r) \delta n_r$$

5 诊断结果

对文献[4]中图1所示结构的发动机,进行了如下16种故障的仿真:(1)氧涡轮入口燃气泄漏,(2)氢涡轮入口燃气泄漏,(3)氧泵后泄漏,(4)氧主文氏管后泄漏,(5)氢泵后泄漏,(6)氢主文氏管后泄漏,(7)氧主文氏管堵塞,(8)氢主文氏管堵塞,(9)氧副文氏管堵塞,(10)氢副文氏管堵塞,(11)发生器温度异常,(12)氧主活门故障,(13)氧涡轮效率下降,(14)氢涡轮效率下降,(15)氧泵扬程下降,(16)氢泵扬程下降。因为上述输出方程是建立在发动机额定工况附近的线性邻域内的,当发动机性能参数处于非线性变化状态时(见图1),输出矩阵就不再有效了,所以只对发动机向量参数处于线性变化范围内的故障进行仿真。每一种故障仿真50个样本。利用上述所选中的输出参数得到的奇偶向量构成判定向量,当采用样本的均值作为判定模板矢量时,所得的结果见表1。从计算结果得知7号故障有3个被错判为12号故障和13号故障有7个被错判为12号故障。通过对发动机故障产生的机理进行分析可以发现7号和12号故障产生的机制非常相似。对这些输出的影响也比较一致,因而相互之间难以通过现有这几个输出来实现分离。至于13号故障被错判为12号故障是因为这两种故障都会直接导致燃烧室压力和燃烧室氧喷前压力急剧下降,同时所仿真的故

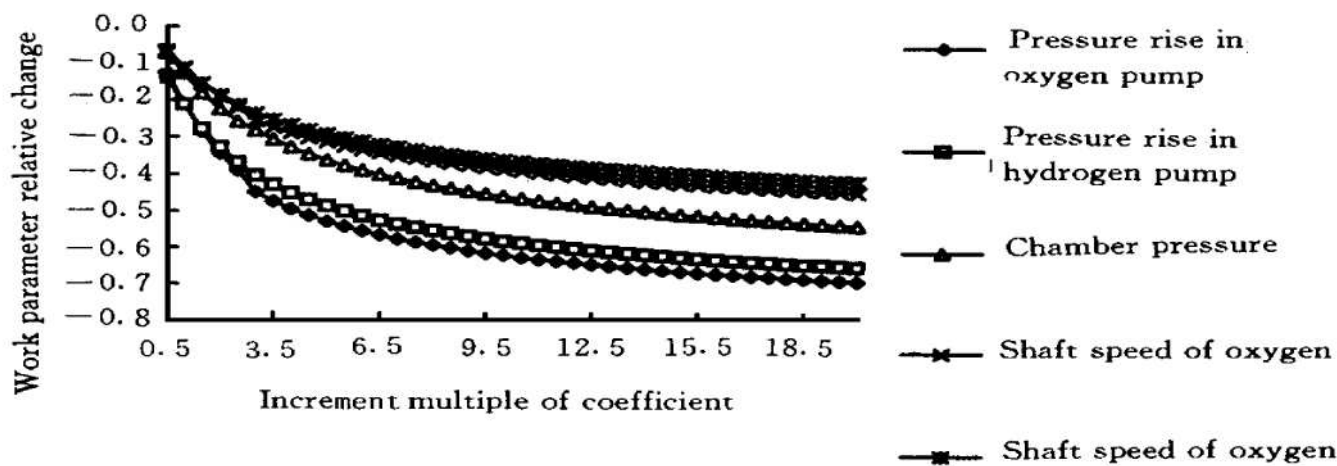


Fig. 1 Fault diagnosis of oxygen cavitating-venturi
Table 1 The results of fault diagnosis

Serial number of fault	Max angle in classes/ °C	Min angle between classes/ °C	Mistake number of classify	Mistake number of classify of directly
1	4. 10	8. 67	0	0
2	1. 32	16. 86	0	0
3	1. 43	37. 31	0	25
4	19. 99	79. 97	0	10
5	0. 73	55. 75	0	0
6	1. 54	74. 65	0	8
7	3. 37	4. 16	3	5
8	2. 11	74. 65	0	0
9	3. 92	16. 85	0	0
10	46. 95	29. 54	0	30
11	1. 03	37. 31	0	0
12	1. 83	3. 46	0	0
13	2. 99	3. 47	7	25
14	0. 92	53. 36	0	0
15	2. 75	50. 61	0	6
16	0. 27	63. 36	0	0

障大多处于初始阶段，而且错判的故障亦为故障刚开始发生的几个，而故障均是从稳定点出发的，当故障程度很小时，不同故障引起的发动机参数偏离稳定点亦很小，故难以分离。

参 考 文 献

1 Medvedev A. Fault detection and isolation by a continue parity space method. Automatica, 1995, 31 (7)

2 Patton R J, Chen J. Review of parity space approaches to fault diagnosis for aerospace systems. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1994, 17 (2)

3 张育林, 李东旭. 动态系统故障诊断理论与应用. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997.

4 刘冰, 张育林. 液氢液氧火箭发动机稳态数值仿真与故障分析. 国防科技大学学报, 1997 (6)