

液体火箭发动机故障诊断的最优回归方法*

朱恒伟 黄卫东 王克昌 陈启智

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

摘要 提出了一种基于最优回归理论的液体火箭发动机故障诊断方法,可以在测量参数较少的情况下诊断出较多的发动机故障。当发动机故障不太严重、故障因素也不多时,得到比较满意的关于故障定位和故障大小的结果;在发动机故障比较严重的情况下,仍能得到比较好的故障定位结果;当存在多个故障因素时,诊断效能有所下降。结果表明本文所提方法在比较大的范围之内具有良好的效果。

关键词 液体火箭发动机,故障诊断,线性回归,小偏差方程

分类号 V423

An Optimal Regression Approach to Fault Diagnosis of Liquid Rocket Engine

Zhu Hengwei Huang Weidong Wang Kechang Chen Qizhi

(Department of Astronautics Technology, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract An optimal regression approach to fault diagnosis of liquid rocket engine is presented in this paper, which can diagnose a number of faults with fewer measurements. When the kinds of fault are fewer and the faults are not serious, rather satisfactory results of fault isolation and fault severity estimation are obtained. When the kinds of fault are fewer and the faults are serious, this approach still gives rather good fault isolation result. When there exist several kinds of fault and the faults are serious, the diagnostic effect decreases somewhat. This indicates that the result of this method is satisfactory at a wide value range of fault factors.

Key words liquid propellant rocket engine, fault diagnosis, linear regression, linearized model

发动机的故障一般都与发动机模型中某个物理参数的变化相联系。从测量参数和数学模型中找出发生变化的物理参数并估计其大小,就能达到故障诊断的目的。在航空发动机领域,Urban 提出了影响系数法^[1,2],它要求测量参数个数多于故障量的个数,这往往难以满足。为解决此问题,范作民提出主特征量模型^[3]和主因子模型^[4],陈大光^[5]则采用多个状态下的测量参数和小偏差系数进行航空发动机故障诊断。本文参考主特征量模型和主因子模型,利用最优线性回归理论实现液体火箭发动机故障诊断。

1 故障诊断的最优回归模型和方法

从故障诊断的角度将液体火箭发动机的小偏差方程表示为:

$$Y = A \cdot X + e \quad (1)$$

其中 Y 为测量参数与额定值的偏差, X 为(可能)达到故障的物理参数的偏差(故障量)。 A 为有关的小偏差系数。 e 为忽略了处于正常范围的物理参数的变化量(干扰量)及测量等因素带来的误差。

以 A 作设计矩阵、 X 、 Y 分别作回归系数和因变量,式(1)就变成一个线性回归模型。利用式(1)找合理的故障量并估计其值的问题可作为一个寻找合适的回归子集的问题求解。

* 1996年12月19日收稿
第一作者:朱恒伟,男,1968年生,博士

发动机的小偏差方程描述确定性的关系，线性化决定了其适用的故障量变化的范围很小。回归模型是描述相关关系的模型，即使故障量变化超出小偏差方程的适用的范围，只要测量参数变化量与设计矩阵列向量依然存在相关关系，它仍在一定程度上成立。因此，回归模型能诊断的故障量可能大于小偏差方程成立所要求的范围。

考虑齐次和非齐次两类回归模型，它们分别由式(2)和式(3)给出。

$$Y = A \cdot X + e, E(e) \sim N(0, \sigma^2 I) \quad (2)$$

$$Y = A \cdot X + x_0 \mathbf{1} + e, E(e) \sim N(0, \sigma^2 I) \quad (3)$$

其中 $\mathbf{1} = (1 \ 1 \ \dots \ 1)^T$, I 为单位阵。当 $D(e)$ 不为单位阵时，应在(1)两边左乘其逆使之化为单位阵。式(3)中 x_0 的引入是为了给模型误差等提供一个额外的自由度，以期得到更好的结果。

结合故障诊断的要求，采用数理统计中最优回归的算法^[6,7]，得如下故障诊断算法：

(1) 用全回归子集法寻找回归合理解

(a) 从 N 个故障量中每次选取 n 个组成回归子集，其中， $n = 1, 2 \dots m$ ，对非齐次模型， $m = M - 1$ ，对齐次模型， $m = M$ ， M 为测量参数个数。

(b) 对每个回归子集，求故障量的最小二乘解并计算 F 和 T_i 。根据选定的显著水平 α ，判断 $F > F_\alpha(M, M - p)$ ， $T_i > t_\alpha(M - p)$ ，是否成立。对带截距项的线性模型 $p = n + 1$ ， $i = 0, 1 \dots n$ ，不带截距项的线性模型 $p = n$ ， $i = 1, 2 \dots n$ 。如果成立，则接受这个回归子集为回归合理解。此处 F 和 T_i 分别为回归模型和第 i 个因子的显著水平。

(2) 根据物理合理性准则从回归合理解中选出物理合理解

实际的故障量，其数值都有一定的范围，如泵的效率不会大于1等。线性模型也有一定的适用范围，故障量的偏差量不能太大。这些都是物理合理性的限制条件。

(3) 给出故障诊断结果

将物理合理解按最优值 $F/F_\alpha(M, M - p)$ 从大到小顺序排列，选前面几个最优值明显大于其它最优值的解为诊断结果。将与那些多次出现在不同 n 值的诊断结果中的那些故障量有关的故障作为最可能的故障。根据各故障量所属于的不同发动机部件，还可得到发动机部件级的诊断结果。

2 液体火箭发动机故障诊断仿真结果和分析

为了检验线性回归故障诊断方法的有效性，本文利用某大型泵压式液体火箭发动机的静态非线性模型^[8]，仿真有故障的发动机的测量数据，用其在设计工作点的小偏差方程构造回归模型进行故障诊断。将46个内外干扰因素中的26个考虑为可能的故障因素。选择 $x(1)$ 、 $x(2)$ 、 $x(8)$ 、 $x(12)$ 、 $x(13)$ 这5个参数作为测量参数。各符号的意义与文献^[8]相同。

首先比较了非线性静态模型及其小偏差(线性)模型的解。结果表明，对本文所研究的发动机，故障因素变化量在20%范围内时，小偏差(线性)模型基本适用。

表1为氧化剂泵效率下降的诊断结果。表中， D_1 、 D_2 、 D_3 分别表示氧化剂泵、燃烧剂泵和涡轮的效率， a_{10} 、 a_{15} 、 a_{17} 分别表示几个管道的流阻系数。对相同的仿真故障，线性回归方法可能给出多个解，表中没有列入那些最优指标明显小于表中所列值的解。由表1可见，除了故障很大的极个别的情况以外，都获得了比较满意的结果。诊断结果覆盖了实际故障，与实际故障一致的结果一般都具有最大的最优指标，设置的故障的大小也在诊断结果的置信区间之内或附近。特别是，在氧化剂泵效率下降达到60%时，诊断结果中仍包含有实际故障。如果将涡轮泵作为一个整体部件，则用带截距模型在氧化剂泵效率下降90%时，仍能作出故障发生在涡轮泵的诊断结果。由表1还可看出，故障越严重，诊断结果的最优指标越低、置信区间越大。这是因为故障越严重，测量参数越不符合线性模型，小偏差方程预测的值与实测值相差越多。表1的结果还表明，非齐次模型的综合效能相对齐次模型更好。对 D_2 、 D_3 等变化的故障的诊断仿真结果也有相似的现象。

表1 氧化剂泵效率(D1)下降的诊断结果

设置故障大小	非齐次模型诊断结果			齐次模型诊断结果		
	故障量代号	$\Delta X(\%) \pm$ 置信区间(%)	最优指标	故障量代号	$\Delta X(\%) \pm$ 置信区间(%)	最优指标
-10.09%	D1	-10.52±0.30	758.2	D1	-10.66±0.05	17240
	D2	-10.22±0.29	757.1	D2	-10.35±0.05	17671
	D3	-5.16±0.15	758.2	D3	-5.23±0.02	17671
-30.0%	D1	-35.23±3.56	60.12	D1	-36.85±0.61	1404
	D2	-34.22±3.46	60.10	D2	-35.79±0.59	1408
	D3	-17.28±1.75	60.12	D3	-18.07±0.30	1404
-60.00%	D1	-84.46±23.70	7.801	D1	-96.26±4.32	189.1
	D2	-82.03±23.02	7.800	D2	-93.50±4.20	189.0
	D3	-41.42±11.62	7.801	D3	-47.21±2.12	189.1
-70.00%	a17	13801.79±4661.46	5.383	a17	15611.73±709.26	184.8
	D3	-51.35±19.46	4.274	D3	-61.63±3.71	105.3
	a17	17131.36±6706.65	4.007	a10	2423.35±215.38	10.89
-80.00%				a15	6701.02±678.98	
	D3	-61.82±32.21	2.262	D3	-80.43±6.59	56.92
-90.00%				a10	4216.21±674.57	3.361
	D3	-70.19±54.07	1.034	a15	11622.86±2126.57	

表2 设置的故障数为2时的最优回归算法诊断结果

设置故障的大小 (%)				非齐次模型诊断结果				
				故障量代号 $\Delta X \pm$ 置信区间(%) (诊断结果中有多个故障时以“;”相隔) 最优指标				
a0	20.00	a1	20.00	a0	19.93±2.29;	a1	19.68±2.60	38.99
a0	20.00	a14	50.00	a0	20.08±2.39			43.21
a0	20.00	a13	100.00	a0	20.00±3.38;	a13	75.37±20.42	8.726
a17	100.00	a18	100.00	D11	2.24±0.42;	D14	3.39±0.16	1480
				D14	3.39±0.16;	a17	99.23±18.77	1479
a17	100.00	a19	200.00	无解				
a9	100.00	a10	100.00	a9	83.76±7.78;	a10	96.68±20.93	36.67
a9	1000.00	a10	1000.00	a9	395.22±148.46;	a10	691.41±399.35	1.812
D1+50		D2+30		D3	39.17±7.22			18.06

此外,对设置的故障个数为1和2的多种情况用非齐次模型进行了故障诊断的仿真。设置的故障数为1时,最优回归算法在大部分的情况下能得到比较满意的关于故障位置及故障大小的诊断结果。当故障轻微时,诊断结果非常准确,在故障超出小偏差方程的适用范围较大情况下,仍基本能找到发生变化的故障量,但对故障大小的估计有较大的误差。在设置的故障数为2时,诊断结果(表2)也比较令人满意,但与故障数为1的情况相比,算法的效能有所降低。

3 结论

(1) 最优回归故障诊断方法可以在测量参数较少的情况下对发动机回归模型考虑的所有故障进行诊断, 给出所有合理的回归诊断结果, 其中包括故障分离和故障严重程度的信息。

(2) 最优回归故障诊断方法的适用范围比小偏差方程的适用范围大得比较多。

(3) 在故障严重时, 最优回归故障诊断方法的置信度减小, 表现为最优回归指标的减小和参数估计置信区间的增大。

(4) 同时存在故障的越多, 最优回归故障诊断方法的有效度越低。

(5) 非齐次模型比齐次模型更有效。

致谢 沈赤兵同志提供了发动机模型系数, 特此致谢。

参考文献

- 1 Urban I. A. Gas Path Analysis Applied to Turbine Engine Condition Monitoring. AIAA 72-1082, 1972
- 2 U. S. Naval Air Engineering Center. Non-integrated Gas Turbine Engine Diagnostics Tradeoff Analysis. AD-A039494, 1977
- 3 范作民, 孙春林, 林兆福. 发动机故障诊断的主特征量模型. 航空学报, 1990, 11 (1)
- 4 范作民, 孙春林, 林兆福. 发动机故障诊断的主因子模型. 航空学报, 1993, 14 (12)
- 5 陈大光, 韩风学, 唐耿林. 多状态气路分析法诊断发动机故障的分析. 航空动力学报, 1994, 9 (4)
- 6 陈希孺, 王松桂. 近代实用回归分析, 南宁: 广西人民出版社, 1984
- 7 王松桂. 线性模型的理论及其应用. 合肥: 安徽教育出版社, 1987
- 8 吴建军, 张育林, 陈启智. 液体火箭发动机稳态故障仿真及分析. 推进技术, 1994 (3)