

文章编号: 1000-8055(2010)01-0129-07

发动机故障诊断主因子模型的测量参数选择

孙祥逢, 陈玉春, 胡 福

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 研究了航空发动机气路故障诊断的测量参数选择的问题. 基于发动机故障诊断的主因子模型, 结合预测平方残差和(prediction error sum of squares, 简称 PRESS) 准则, 建立了一种选择风扇流量、风扇出口压力、压气机出口压力、压气机出口温度、涡轮后温度和燃油流量这 6 个测量参数进行单轴涡扇发动机故障诊断的方法. 大量的实例表明, 合理运用该方法选择测量参数的种类和数量, 既能取得比较满意的诊断效果, 又能利用发动机控制系统已有的测量参数, 降低诊断成本, 具有一定的工程应用价值.

关 键 词: 故障诊断; 主因子模型; 共轭梯度法; PRESS (预测平方残差和) 准则

中图分类号: V231

文献标识码: A

Research on selection of measurement parameters of engine fault diagnosis based on primary factor model

SUN Xiang-feng, CHEN Yu-chun, HU Fu

(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The selection of measurement parameters of engine air path fault diagnosis was researched in this paper based on the primary factor model and prediction error sum of squares (PRESS) principle. Through plenty of computing results, a method was established for fault diagnosis of one spool turbofan engine by selecting six measurement parameters, namely, corrected mass flow of fan, outlet total pressure of fan, outlet total temperature of compressor, outlet total pressure of compressor, outlet total temperature of low-pressure turbine and fuel mass flow. This can also obtain satisfactory diagnosis results while the results can also be applied to other forms of aero engines. It is indicated that the reasonable type and quantity selection of measurement parameters not only guarantees the diagnosis, but also cuts down the cost. The method is of some engineering value.

Key words: fault diagnosis; primary factor model; conjugate gradient method; PRESS (prediction error sum of squares) principle

航空发动机的故障诊断是保证发动机安全工作、延长发动机使用寿命的一项重要技术措施, 近年来愈来愈受到人们的重视. 航空发动机故障诊断方程的建立和求解是实现故障诊断的基础. 故障诊断方程的建立是基于发动机测量参数和征兆变量的小偏差. 故障方程的求解, 需要合理有效的测量参数, 即故障诊断依据的信息来自于发动

机的测量参数; 不言而喻, 测量参数的选择对发动机故障诊断有着重大的影响. 由于受到传感器数量及安装条件等因素的限制, 只能选取有限个测量参数作为诊断依据^[1-2].

为选择合理有效的测量参数, 降低诊断成本, 本文利用航空发动机故障诊断的主因子模型和 PRESS (prediction error sum of squares) 准则, 对

收稿日期: 2009-05-13; 修订日期: 2009-10-26

作者简介: 孙祥逢(1982-), 男, 江苏海安人, 硕士生, 主要从事发动机总体性能方面的研究.

发动机故障诊断测量参数的选择进行了全面系统的研究,并利用大量算列验证了所选取的测量参数的种类和数量的有效性,具有一定的工程实际应用价值.

1 发动机故障诊断的主因子模型

发动机故障诊断方程是以故障因子为自变量,以测量参数偏差为响应,其矩阵形式为^[1-2]

$$\delta_y = A\delta_x + e \tag{1}$$

式中 δ_y 为 $m \times 1$ 测量参数偏差向量; δ_x 为 $n \times 1$ 状态量偏差向量; e 为 $m \times 1$ 随机误差向量; A 为 $m \times n$ 影响系数矩阵.已知 δ_y 和 A ,可以由式(1)求出 δ_x 中的非零值元素 δ_{x_j} ($j = 1 \sim n$),其中状态量 x_j 代表故障的类型, δ_{x_j} 代表故障的严重程度.对故障方程的求解主要存在以下两个问题^[1-2]:

- 1) 测量量的个数小于故障因子个数;
- 2) 故障方程存在着严重的多重共线性.

发动机故障诊断的主因子模型是针对上述的两个问题提出的,主因子模型的基本内容就是对所有可能的或具有代表性的故障因子组合(主因子组合)建立主因子方程.本文利用共轭斜量法对主因子方程进行求解,对求解结果通过合理性(偏差方向性准则、小偏差准则、定偏差准则、部件间偏差分配合理性准则)分析,直至求出发动机的真实故障.

故障因子的选取要根据发动机的结构、使用

情况而定.发动机故障主要发生在风扇、压气机、燃烧室、涡轮、混合器等部件上,因此本文研究的单轴涡扇混合排气发动机选取的故障因子如下:风扇换算流量 W_{afc} ,风扇效率 E_{taf} ,压气机换算流量 W_{acc} ,压气机效率 E_{tac} ,主燃烧室总压损失系数 D_{pcom} ,主燃烧室燃烧效率 E_{tab} ,涡轮流通能力 T_{flca} ,涡轮效率 E_{tatp} ,内涵进口面积 A_{55} ,外涵出口面积 A_{25} ,喉部面积 A_8 . 测量参数初选为:风扇换算流量 W_{afc} ,风扇出口总温 T_{22} ,风扇出口总压 p_{22} ,压气机出口总压 p_3 ,涡轮出口总温 p_{55} ,发动机台架推力 F_n ,燃油流量 W_{fb} .

测量参数、故障因子选定后,即可根据发动机性能计算模型求解特定飞行状态下的故障诊断矩阵^[3-4].为了合理选择测量参数,利用小偏差原理列出了某型单轴涡扇发动机所有可能的可测量参数 W_{afc} , T_{22} , p_{22} , T_3 , p_3 , T_{55} , p_{55} , T_6 , p_6 , F_n , W_{fb} 在地面对 11 个故障因子的小偏差系数表(表 1).

算例 1:某故障样本的测量参数百分偏差 $\delta_y^T = (-0.75, 0.57, 1.16, 2.10, 4.98, 2.96, 7.69)$,采用主因子模型进行故障诊断分析,共有 1254($C_{11}^1 + C_{11}^2 + C_{11}^3 + C_{11}^4 + C_{11}^5 + C_{11}^6 + C_{11}^7$)组结合,分别利用共轭斜量法对 1254 个主因子方程求解.根据合理性准则,选取前三类组合的前 4 个计算结果,即普通残差和 RSS(residual sum of squares)值为最小的前 5 组解,结果如表 2 所示.

表 1 $Ma = 0$, $H = 0$ km, $n = 100$ %完全故障诊断矩阵
Table 1 Total fault diagnosis matrix as $Ma = 0$, $H = 0$ km, $n = 100$ %

	W_{afc}	E_{taf}	W_{acc}	E_{tac}	D_{pcom}	E_{tab}	T_{flca}	E_{tatp}	A_{55}	A_{25}	A_8
W_{afc}	0.5134	0.1493	0.1103	0.1595	-0.0130	0.0031	-0.0231	0.2913	-0.0218	0.0302	0.5138
T_{22}	0.3703	-0.3277	-0.0834	-0.1206	0.0098	-0.0023	0.0175	-0.2206	0.0165	-0.0228	-0.3898
p_{22}	0.7583	-0.2302	-0.1702	-0.2460	0.0200	-0.0048	0.0357	-0.4494	0.0337	-0.0465	-0.7927
T_3	0.6085	-0.0952	0.8263	-0.4703	0.0843	-0.0082	0.9804	-0.8365	0.0115	-0.0013	-0.6269
p_3	0.3331	-0.2940	0.3968	-0.6369	0.0424	-0.0042	0.4827	-0.4354	0.0072	-0.0028	-0.3492
T_{55}	0.9515	-0.8784	-0.1921	-1.0823	0.0848	0.0152	0.0924	-1.9398	0.0038	0.0396	-1.0257
p_{55}	0.6844	-0.2263	0.0694	-0.3608	0.0508	0.0033	-0.0211	-0.7239	-0.0016	0.0643	-1.2479
T_6	0.7242	-0.7438	0.1674	-1.0069	0.0778	0.0023	0.0567	-1.8086	0.0209	0.0078	-1.2622
p_6	0.6906	-0.2241	0.0149	-0.3317	0.0429	0.0011	-0.0066	-0.6538	0.0132	0.0344	-1.1594
F_n	1.5987	-0.4267	0.3934	-0.6514	0.0494	-0.0119	0.0122	-1.1579	-0.0186	0.0595	-1.0096
W_{fb}	1.8122	-1.1934	0.4127	-1.6586	0.1275	-0.9628	0.0787	-2.9747	0.0161	0.0441	-1.7600

表 2 主因子模型第一次优化求解结果

Table 2 First optimized results of primary factor model

主因子组合	主因子组合的解			RSS/ 10^{-3}
x_8	- 2. 614			3. 972
x_4	- 4. 485			9. 632
x_2	- 6. 090			4828
x_{11}	- 3. 763			8799
x_5	59. 824			9034
$x_8 \ x_{10}$	- 2. 626	- 0. 542		1. 926
$x_8 \ x_9$	- 2. 636	0. 930		1. 959
$x_7 \ x_8$	0. 044	- 2. 610		2. 345
$x_5 \ x_8$	0. 809	- 2. 582		2. 435
$x_4 \ x_8$	- 1. 381	- 1. 809		2. 576
$x_3 \ x_4 \ x_6$	- 0. 084	- 4. 467	- 0. 106	0. 2071
$x_4 \ x_7 \ x_8$	21. 131	0. 668	- 14. 864	0. 7080
$x_3 \ x_8 \ x_9$	0. 039	- 2. 635	1. 094	0. 7089
$x_3 \ x_8 \ x_{10}$	0. 038	- 2. 623	- 0. 631	0. 7089
$x_5 \ x_8 \ x_9$	0. 679	- 2. 606	0. 823	0. 8998

由表 2 可见:

1) 单因子模式中,通过 RSS 值分析,最有可能出现故障的是涡轮效率 x_8 和压气机效率 x_4 ,这是由于 x_8 与 x_4 互为相似故障因子;

2) 双因子和三因子的组合模式中也表明涡轮效率 x_8 和压气机效率 x_4 最可能导致故障,即初步诊断出压气机和涡轮部件可能发生故障.

在此基础上剔除不相关的故障因子,只留下压气机和涡轮部件的 4 个故障因子,即压气机换算流量 x_3 、压气机效率 x_4 、涡轮流通能力 x_7 、涡轮效率 x_8 ;同时选取有关的 4 个测量参数,即风扇换算流量 y_1 、压气机出口总压 y_4 、涡轮出口总温 y_5 、发动机燃油流量 y_7 ,再次主因子模型进行故障诊断. 计算结果为 $\delta x^T = (- 8. 157, 0. 363, - 1. 107, 2. 882)$,其中压气机效率 x_4 的值太小(故障诊断达不到这样的精度,同时这样的故障程度影响也较小),可以把它当作零看待,也就是指出了故障发生在涡轮上,这刚好符合实际中地面试车时涡轮出故障的状况.

通过大量的算例表明,发动机故障诊断的主因子模型克服了 Urban 方法要求测量参数不得小于故障因子的个数、人为选择故障因子、不能消除故障方程多重共线性等缺点,在故障诊断过程

中,取得了令人满意的效果.

2 测量参数的选择

测量参数的选取要根据故障因子而定,要对所选取的故障因子要有足够的敏感性,且能够比较明显地反映故障因子的变化. 测量参数之间的相关性要尽量小,并使所选取的测量参数能够表现各个截面的变化,最理想的状况是使测量参数分布在每一个截面上. 另外,还要纵向比较,对不同的故障,测量参数要表现出不同的变化特征,只有这样才能达到隔离故障的目的^[5-6].

2. 1 测量参数的种类对故障诊断的影响

由表 1 可以看出,故障因子对测量参数偏差的影响不同,若一个部件发生故障,这个部件的故障因子对一个或几个测量参数的影响较大,对其它测量参数影响很小,则偏差大的测量参数就和这个故障联系在一起.

例如,燃油流量 W_{fb} 对燃烧室故障因子 E_{iab} 影响比较大,其他测量参数几乎对他们没有影响,因此为了辨别燃烧室故障,就必须测量燃油流量 W_{fb} . 同样,高压压气机出口压力 p_3 对涡轮效率 E_{tatb} 影响比较大,同时 W_{fb}/p_3 又是燃油调节需要的参数,因此 W_{fb} 和 p_3 应该用于故障诊断.

涡轮后温度 T_{55} 对涡轮流通能力 T_{flca} 比较敏感,对其他故障参数相对不敏感,因此 T_{55} 对隔离涡轮故障是有利的,同时,发动机控制系统中也需要测量 T_{55} ,因此 T_{55} 可用于故障诊断.

另外,由表 1 可以看出,几乎所有的测量参数对混合室内外涵进口面积 A_{55}, A_{25} 的影响都非常小,因此很难辨别这两种故障.

仿真实验表明,对单轴涡扇发动机而言,压气机效率 E_{tac} 和涡轮效率 E_{tatp} 的变化对多数测量参数的影响是相同或相近的,但对压气机出口温度 T_3 的影响却比较明显. 如果用 T_3 代替 T_{22} 作为测量参数,用以隔离压气机效率 E_{tac} 和涡轮效率 E_{tatp} 所表征的故障,仿真实验证明这是可靠的,并且效果很明显. 仿真结果见图 1 和图 2. 图 1 和图 2 中分别预设压气机效率降低 4%(故障 1 假定 $\delta_{etatp} = - 0. 4\%$)和涡轮效率降低 4%(故障 2 假定 $\delta_{etac} = - 0. 4\%$),图中图形为利用主因子模型求出的 $\delta_{etaf}, \delta_{etac}, \delta_{etatp}$. 经比较可以看出,只把 T_{22} 换成 T_3 ,压气机效率 E_{tac} 和涡轮效率 E_{tatp} 所表征的故障就被隔离开了,效果是非常明显的.

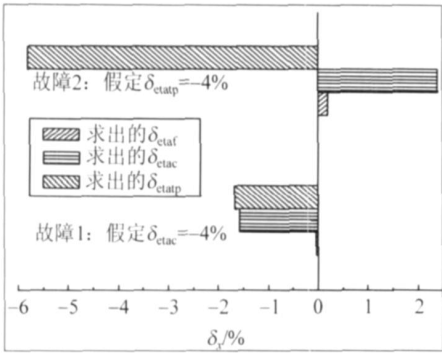


图 1 $W_{afc}, p_{22}, p_3, T_{22}, T_{55}, F_n, W_{fb}$ 7 个测量参数
Fig. 1 Measure parameters are $W_{afc}, p_{22}, p_3, T_{22},$
 T_{55}, F_n, W_{fb}

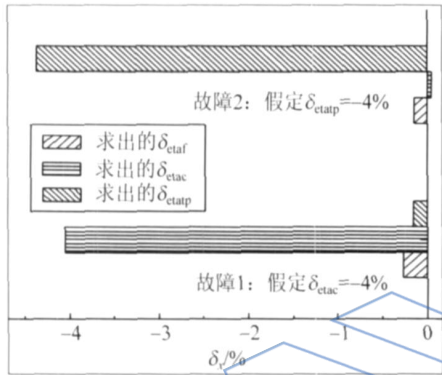


图 2 $W_{afc}, p_{22}, p_3, T_3, T_{55}, F_n, W_{fb}$ 7 个测量参数
Fig. 2 Measure parameters are $W_{afc}, p_{22}, p_3, T_3,$
 T_{55}, F_n, W_{fb}

2.2 测量参数的数目对故障诊断的影响

测量参数的多少反映了对发动机运行状况的了解程度,所以,从故障诊断的目的出发,希望测量参数越多越好.但是,发动机不可能允许无限制地安装传感器(尤其是在空中飞行时),在实际使用中往往测量参数非常有限,这就构成了一对矛盾.

要解决这对矛盾就必须了解测量参数的多少与诊断结果的关系.测量参数减少究竟对诊断结果有多大的影响?至少需要多少个测量参数才能保证故障诊断结果是可信的?

本文利用回归模型诊断中的预测残差准则(PRES 准则)^[7-9]来判断测量参数选择的有效性,其故障模型的最小二乘解可表示为

$$X = (C^T R^{-1} C)^{-1} C^T R^{-1} Y$$

式中 $X = (x_1, \cdots, x_m)^T$ 为 m 个故障参数偏差的向量, $Y = (y_1, \cdots, y_n)^T$ 为 n 个测量参数偏差的向量, R^{-1} 为权系数, R 为测量随机误差的协方差

阵, C 为影响系数矩阵,可从小偏差系数表中(表 1)中提取.这时估值的普通残差和(RSS)为

$$S_{rs} = \sqrt{\frac{1}{n-m} \left(\sum_{i=1}^m \Delta x_i^2 \right)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{ii}}$$

则预测残差和(PRESS)为

$$S_{pre} = \frac{S_{rs}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (1 - H_{ii})}}$$

式中 $P = (C^T R^{-1} C)^{-1}$, H 为帽子矩阵 $H = C(C^T R C)^{-1} C^T R$.

根据 PRESS 值计算,可得到不同测量参数组合下利用故障模型估值的准确性. PRESS 值越小表示诊断越准,一般认为 $S_{pre} < 1$,可进行部件故障定量诊断, $1 < S_{pre} < 2$,可进行部件故障定性诊断, $S_{pre} > 2$ 则故障诊断系统无效.

对表 1 列出的单轴涡扇发动机中所有的可测量的参数分别选择数目不同的测量参数进行分析,得出的结论如表 3 所示.由于不同测量参数的组合种类非常多,5~8 个测量参数的组合种类分别为 $C_{11}^5, C_{11}^6, C_{11}^7, C_{11}^8$ 种,即为 462, 462, 330, 165 种,本文限于篇幅所限,仅列出不同数目下的 PRESS 值为最小的前 4 个组合.

由表 3 可知,当测量参数的个数分别为 5, 6 时,其 PRESS 值部分小于 1,其组合可以对发动机部件故障进行定位和定量诊断,当测量参数个数为 7, 8 时, PRESS 值均大于 1,可以用于故障诊断,其组合只能对发动机部件故障进行定位诊断,当测量参数个数为 9 时 PRESS 值 $S_{pre, min} = 2.6143$, 测量参数个数为 10 时 $S_{pre, min} = 16.3313$, 其组合就不能应用于故障诊断.

表 3 所列的可行方案中都有 p_3, T_{55}, W_{fb} 这 3 个测量参数,这与人工定性分析得到的结果相同,这说明这 3 个测量参数是比较重要的监视参数.

实际选择监视参数时,必须考虑成本和数量,尽可能利用控制系统已有的测量参数,使发动机监视和控制系统共享测量参数.

根据 PRESS 值分析,测量参数可为 5, 6, 7 个,综合考虑诊断效果和成本,6 个是比较合理的,参数少难以满足诊断系统冗余要求,参数多可能引起参数间的相互干扰.分析所有测量参数个数为 6 时,出现次数比较多的其他 3 个测量参数为 W_{afc}, p_{22}, T_3 ,一般来说冷端部件的参数容易测量,且这 3 个测量参数分布在不同的截面上,至此,

表 3 不同的测量参数方案的 PRESS 值
Table 3 PRESS values with various measure parameters

测量组合	编号	W_{afc}	T_{22}	p_{22}	p_3	T_3	T_{55}	p_{55}	T_6	p_6	F_n	W_{fb}	PRES,RSS
5	1	×			×		×	×				×	0.5928
		◆		◆		◆			◆			◆	0.5683
	2	×			×		×			×		×	0.5953
		◆				◆		◆	◆			◆	0.5725
	3				×		×	×			×	×	0.5968
6		◆				◆			◆	◆		◆	0.6767
	4				×		×			×	×	×	0.6181
		◆		◆		◆		◆				◆	0.7877
	5				×	×	×	×		×		×	0.8282
		◆		◆		◆		◆	◆			◆	0.8112
7	6	×			×	×	×			×		×	0.8296
		◆		◆	◆			◆	◆			◆	0.9082
	7	×			×	×	×	×				×	0.8305
		◆	◆			◆		◆	◆			◆	0.9792
	8	×		×	×	×	×					×	0.8366
8		◆			◆	◆		◆	◆			◆	1.0416
	9			×	×	×	×		×		×	×	1.0268
		◆		◆	◆	◆		◆	◆			◆	1.1769
	10	×		×	×	×	×				×	×	1.0669
		◆	◆		◆	◆		◆	◆			◆	1.3197
9	11				×	×	×	×	×		×	×	1.0731
		◆	◆	◆		◆		◆	◆			◆	1.3897
	12				×	×	×		×	×	×	×	1.1101
		◆	◆	◆	◆			◆	◆			◆	1.4079
	13				×	×	×		×	×	×	×	1.4764
10		◆	◆	◆	◆			◆	◆			◆	1.6901
	14		×		×	×	×	×			×	×	1.4862
		◆	◆	◆	◆	◆		◆	◆			◆	1.9476
	15	×	×	×	×	×	×				×	×	1.5027
		◆	◆	◆	◆	◆		◆				◆	3.3132
11	16		×		×	×	×	×	×		×	×	1.5033
		◆	◆	◆	◆	◆		◆	◆		◆	◆	3.4074

◆表示按照 Urban 故障模型中最小二乘估值误差因子得到的选取结果;
×表示按照 PRESS 准则得到的选取结果^[5-6,8-9].

得到了对某单轴涡扇发动机进行故障诊断的最优测量参数组合 (W_{afc} , p_{22} , T_3 , p_3 , T_{55} , W_{fb}),而通过最小二乘估值误差因子得到的最优参数组合为 (W_{afc} , p_{22} , T_3 , p_{55} , T_6 , W_{fb}).

3 算例分析

利用 PRESS 准则分析得到的测量参数组合 (W_{afc} , p_{22} , T_3 , p_3 , T_{55} , W_{fb}) 分别对 15 种故障进行诊断,诊断结果如图 3~图 6 所示,并与利用最小二乘估值误差因子得到的最优参数组合 (W_{afc} , p_{22} , T_3 , p_{55} , T_6 , W_{fb}) 的诊断结果进行了比较. 图

3 预设的故障分别为风扇效率、压气机效率、燃烧室效率和涡轮效率分别降低 4%,图 4 预设的故障分别为压气机流量、燃烧室总压恢复系数、涡轮流量和尾喷管喉部面积分别降低 4%,图 5 预设的故障分别为压气机流量、混合室内涵进口面积和混合室外涵进口面积分别降低 4%,图 6 是双因子故障情况,预设故障分别为风扇效率降 3%和压气机效率降 5%、风扇效率降 2%和涡轮效率降 4%、燃烧室总压恢复系数降 4%和涡轮流量降 2%.

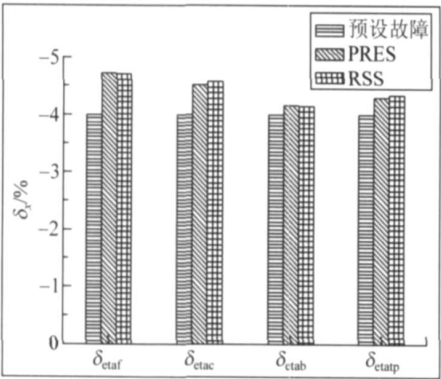


图 3 单因子诊断

Fig. 3 One fault diagnosis

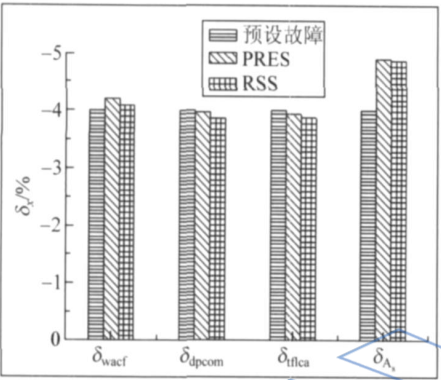


图 4 单因子诊断

Fig. 4 One fault diagnosis

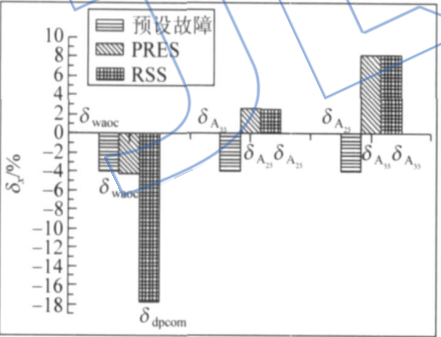


图 5 单因子诊断

Fig. 5 One fault diagnosis

通过计算表明,测量参数个数为 6 时,能取得比较好的诊断精度.对单因子故障还是双因子故障,其利用 PRES 准则获得的组合参数组合的诊断偏差基本上控制在 1% 以内,诊断结果较最小二乘估值误差因子得到的最优参数组合诊断结果,特别在对双因子故障诊断时有很大的提高,初步分析造成误差的原因与小偏差模型的精度有关,本文的小偏差模型的偏量为 1%,而发动机是高度非线性的,本文所假设故障都是 4%,这必然会导致诊断精度降低.

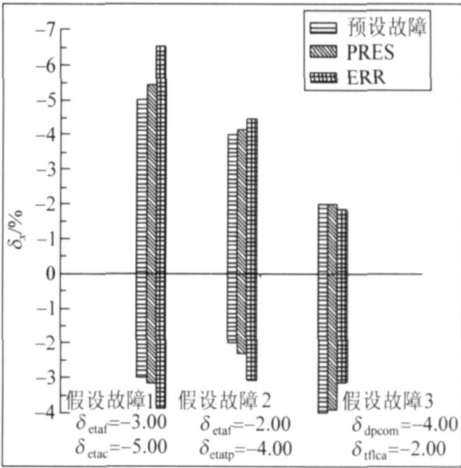


图 6 双因子故障诊断

Fig. 6 Two fault diagnosis

诊断表明对内外涵进口面积 A_{55} , A_{25} 这两个故障的诊断效果不是很好,通过其他各种组合的计算表明,这并不是测量参数选择的原因,初步辨明原因除模型精度不够外,还可能与其门限值较低有关,由表 1 可以看出,可测量参数对他们的影响非常小,甚至可以忽略不计.

算例 2: 某故障样本的测量参数百分偏差 $\delta y^T = (-0.75, 1.16, 1.07, 2.10, 4.98, 7.69)$, 利用主因子模型进行故障诊断分析,结果如表 4 所示.

表 4 主因子模型第一次优化求解结果

Table 4 First optimized results of primary factor model

主因子组合	主因子组合的解			RSS/ 10^{-3}
X_8	- 2. 538			128. 2
X_4	- 4. 452			1429
X_2	- 6. 456			23740
X_{11}	- 3. 094			37900
$X_7 \ X_8$	- 0. 127	- 2. 574		0. 1698
$X_5 \ X_8$	- 2. 503	- 2. 671		0. 2361
$X_2 \ X_8$	- 0. 446	- 2. 382		13. 05
$X_3 \ X_8$	- 0. 141	- 2. 579		17. 17
$X_1 \ X_5 \ X_8$	- 0. 005	- 2. 497	- 2. 675	0. 1076
$X_1 \ X_7 \ X_8$	- 0. 003	- 0. 127	- 2. 577	0. 1131
$X_4 \ X_7 \ X_8$	- 0. 025	- 0. 127	- 2. 560	0. 1323
$X_5 \ X_6 \ X_8$	- 2. 406	- 0. 020	- 2. 662	0. 1388

由表 4 可知,利用利用 PRES 准则分析得到的测量参数组合 (W_{af} , p_{22} , T_3 , p_3 , T_{55} , W_{fb}) 对单轴涡轮发动机进行故障诊断,只要进行第一次优

化计算即可对故障进行定位定量,且通过实际发动机试车表明,其诊断结果较算例 1 的诊断结果有明显的提高,尤其是隔离相似故障的能力有了显著提高。

4 结 论

1) 主因子模型和共轭斜量法的组合能够利用较少的测量参数求解多故障问题,克服了 Urban 方法要求的测量参数要大于等于故障因子数的要求,科学地寻找的故障因子组合,很好地克服方程组多重共线性对诊断结果的严重影响。

2) 主因子模型虽然能够比较好地对发动机故障进行诊断,但由算例 1 可以看出,主因子模型隔离相似故障的能力还是比较差,但可以通过选择测量参数来克服。

3) 通过对单轴涡扇发动机的研究表明,通过对小偏差系数矩阵进行人工定量分析,以及利用最小二乘估值误差因子进行定量分析,对合理选择测量参数的种类和数量是十分有效的,对其它结构形式的发动机而言,依然适用。

4) 测量参数的种类和多少严重影响诊断的精度,本文通过大量算例表明,合理有效地选择有限个数的测量参数(包括利用发动机控制系统已有的测量的参数)就能很好地对发动机进行故障诊断,既满足了诊断精度的要求,又最大限度地降低了诊断成本。

参考文献:

- [1] 范作民,孙春林,林兆福. 发动机故障诊断的主因子模型[J]. 航空学报,1993,14(12):588-599.
FAN Zuomin, SUN Chunlin, LIN Zhaofu. Primary factor model for jet engine fault diagnosis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1993, 14(12):588-599. (in Chinese)
- [2] Torella G, Torella R. Probabilistic expert system for the diagnostics and trouble-shooting of gas turbine apparatuses [R]. AIAA 99-2842.
- [3] Urban L A. Gas path analysis applied to turbine engine condition monitoring[R]. AIAA 72-1082.
- [4] Urban L A. Parameter selection for multiple fault diagnostics of gas turbine engines[R]. ASME 74-GT-82.
- [5] Kos J M. Multiple fault gas path analysis applied to a twin spool mixed flow[R]. ADA 019183, 1975.
- [6] Stamatis A, Mathioudakis K, Papiliou K, et al. Jet engine fault detection with differential gas path analyses at discrete operating points[R]. ISABE 89-7133, 1989.
- [7] Rama K, Shankar Y P, Siddiqi M. Modeling, diagnostics and prognostics of a two-spool turbofan engine[R]. AIAA 2005-4344.
- [8] Li Y G. Performance analysis-based gas turbine diagnostics: a review[J]. Journal Power and Energy, 2002, 216(5):363-377.
- [9] 唐耿林. 航空发动机性能监视参数选择的研究[J]. 推进技术, 1998, 19(2):92-96.
TANG Genglin. Investigations on selecting performance-monitoring parameters of aeroengine[J]. Journal of Propulsion Technology, 1998, 19(2):92-96. (in Chinese)