

结合不确定度的发动机模型 辨识气路诊断

白磊^{1,2}, 胡骏¹, 黄顺洲², 杨磊², 何龙²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 针对航空发动机气路诊断中测量参数个数小于待诊断参数个数的不适定问题, 利用了发动机平衡技术, 结合非线性的发动机数学模型, 并综合考虑了测量参数的不确定度和理论模型部件性能的不确定度, 建立了一种结合不确定度的发动机气路故障诊断辨识算法——变分加权最小二乘法, 并将该算法应用于某发动机的诊断分析中。结果表明: 运用该方法可分析出测量数据和模型计算数据之间的差别, 同时, 利用所得的故障参数修正量修正原发动机数学模型, 使模型计算推力与试验测量推力最大偏差由 8.25% 减小到 1.66%, 耗油率最大偏差由 6.25% 减小到 1.50%。

关 键 词: 不确定度; 发动机模型; 变分加权最小二乘法; 模型辨识; 气路诊断

中图分类号: V263.6

文献标志码: A

Pattern recognition with uncertainty for engine gas path diagnosis

BAI Lei^{1,2}, HU Jun¹, HUANG Shun-zhou², YANG Lei², HE Long²

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. China Gas Turbine Establishment,

Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: For the ill-posed problem in aero-engine gas path diagnosis that the amount of measuring parameters is less than the amount of parameters to be measured, considering the uncertainty of both the measuring parameters and the theoretic model component characteristics, a fault diagnostic algorithm called variational weighed least squares was built using engine counterbalance technology and non-linear mathematical model. The algorithm was applied to an engine fault diagnosis. The results show that the difference between the measurements and calculation results can be obtained with the algorithm. At the same time, through modifying the original mathematical model by employing fault parameter corrections, the thrust maximum deviation between the calculation and measurement decreases from 8.25% to 1.66%, and the maximum deviation of fuel consumption rate from 6.25% to 1.50%.

Key words: uncertainty; engine model; variational weighed least squares; pattern recognition; gas path diagnosis

在航空发动机模拟技术越来越先进的今天, 发动机试验研究在整个发动机研究过程中仍然占据非常重要的地位。通过气路故障诊断, 在发动机

试验中, 可定量地确定发动机及其部件、系统的性能, 并验证它是否满足设计要求, 在此基础上提出相适宜的改进方法或措施, 从而降低试车成本, 减

少盲目性,减少人为因素,使发动机的设计更完善.同时,气路故障诊断也是视情维修、预测与健康管理的(PHM)、航空发动机健康管理(EHM)等系统的重要环节之一^[1-3].

国内外对气路故障诊断都有广泛的研究.从1967年Urban提出气路分析(GPA)的线性模型方法以来,发动机气路故障诊断技术得到很大的发展^[4],但线性模型需要的测量参数多,而且没有考虑测量的噪声、不确定度等,研究表明,线性化在一定范围外可能失效.文献[5]中采用了有限个测量参数的非线性气路故障诊断系统以克服线性GPA的局限性. Escher于1995年在Cranfield大学的Pythia软件中实现了非线性GPA故障诊断,但它们并没有解决测量不确定性的影响.文献[6]中运用最优估计技术,采用加权最小二乘法(WLS)估算出独立参数改变量. GE公司曾将WLS用于气路故障诊断(软件为TEMPER—Turbine Engine Module Performance Estimation Routine)^[7]. 文献[8]中开展了多状态模型辨识法的研究. 文献[9]在文献[8]的基础上,使用数理统计方法进行了改进,通过建立故障参数的概率密度函数,开展了发动机双重故障隔离的研究,并取得了较大进展. 另外,还有基于概率神经网络的方法^[10]、基于神经网络和证据融合的方法^[11]、基于信息融合^[12]等发动机气路故障诊断方法.

综上,在各类气路故障诊断中,与发动机测量参数不确定度相结合的研究较少. 本文通过发动机平衡技术,在非线性的发动机数学模型基础上,结合工程发动机试验中测量参数的不确定度以及发动机模型的不确定度,提出发动机模型辨识气路诊断算法,阐述了该发动机气路故障诊断数学原理,该算法采用了正则化思想,将不适定问题转化为适定问题. 研究表明,该算法具有稳定性和工程适用性.

1 结合不确定度的模型辨识法

1.1 基于平衡准则的模型辨识法

结合不确定度的模型辨识法的根本在于模型辨识,即建立基于各部件性能的非线性性能仿真模型,利用发动机非线性性能仿真模型,把可能发生故障的部件性能参数如部件效率、流通能力、压力恢复系数、冷气流量等作为待诊断参数. 辨识的过程,就是通过对转速、燃油流量、排气温度和推力变化等的测量,并调整发动机性能仿真模型中的待诊断参数修正量,使仿真模型计算的发动机

性能参数与通过间接或直接测量获得的发动机同一性能参数匹配或平衡(平衡准则),而发动机性能仿真模型中待诊断参数修正量就代表了该故障程度严重性.

发动机同一性能参数的平衡准则方程如式(1)所示:

$$P_{ts}(\omega_1, \dots, \omega_i, \dots, \omega_n) + \Delta P_{ts}(\Delta \omega_1, \dots, \Delta \omega_i, \dots, \Delta \omega_n) = P_{ms}(z_1, \dots, z_j, \dots, z_r; v_1, \dots, v_k) + \Delta P_{ms}(\Delta z_1, \dots, \Delta z_j, \dots, \Delta z_r; \Delta v_1, \dots, \Delta v_k) \quad (1)$$

式中 $\omega_i, \Delta \omega_i$ 表示试验中测量的第 i 个参数值及其相应修正量; $z_j, \Delta z_j$ 表示第 j 个模型参数值及其相应修正量; $v_k, \Delta v_k$ 表示第 k 个表征发动机状态的参数及其相应修正量; $P_{ts}, \Delta P_{ts}$ 表示利用试验测量数据推导的发动机性能中第 s 个参数及其相应的修正量,角标“t”表示该参数为试验测量推导结果, $P_{ts}, \Delta P_{ts}$ 分别是试验测量参数 ω_i 和 $\Delta \omega_i$ 的函数; $P_{ms}, \Delta P_{ms}$ 表示利用模型推导的发动机性能中第 s 个参数及其相应的修正量,角标“m”表示该参数为模型推导结果, $P_{ms}, \Delta P_{ms}$ 是模型参数 $(z_j, \Delta z_j)$ 和状态参数 $(v_k, \Delta v_k)$ 的函数; n, r, k 分别表示测量参数 ω 、模型参数 z 及状态参数 v 的个数.

在实际分析中,式(1)中的发动机状态参数 v 是测量参数 ω 的函数, ω_i 和 z_j 均为已知. 由此,在上述发动机平衡准则方程中,仅含有 $n+r$ 个未知量 $\Delta \omega_i$ 和 Δz_j . 通常,式(1)这样的平衡方程共有 m 个(即匹配参数 m 个),且 $n+r > m$, 因此,该方程组是未定的.

为了解决该方程组未知量大于方程组个数的问题,可采用变分加权最小二乘法^[13-15],其实质是:在满足由式(1)的 m 个方程组条件下,使测量参数修正量 $\Delta \omega_i$ 与模型参数修正量 Δz_j 可以从闭合差加权平方和的最小化条件得到,即

$$\left\{ \begin{aligned} f(\cdot) &= \sum_{i=1}^n \gamma_i (\Delta \omega_i)^2 + \sum_{j=1}^r \gamma_j (\Delta z_j)^2 \\ Y(\cdot) &= \min[f(\cdot)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 γ_i, γ_j 分别表示 $\Delta \omega_i$ 与 Δz_j 的系数; $Y(\cdot)$ 为目标函数,即修正量 $\Delta \omega_i$ 与修正量 Δz_j 加权平方和的最小值.

将式(1)改写为

$$G_s = P_{ts} + \Delta P_{ts} - P_{ms} - \Delta P_{ms} \quad (3)$$

由于式(1)这样的平衡方程共有 m 个,即角标 $s=1, \dots, m$.

将式(3)与式(2)联合,采用拉格朗日法,引入未定乘数 k_s ,构造辅助函数

$$\psi = f(\bullet) - 2k_1 G_1 - \cdots - 2k_m G_m \quad (4)$$

当 $d\psi=0$, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial \psi}{\partial \Delta w_i} = 0 \\ \frac{\partial \psi}{\partial \Delta z_j} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

则根据式(5)和式(3), 则能构造 $n+r+m$ 个方程. 由此, 可将不适定问题转化为适定问题, 可求解出模型参数修正量 $\Delta z_j (j=1, \cdots, r)$ 、测量参数修正量 $\Delta w_i (i=1, \cdots, n)$ 以及 $k_s (s=1, \cdots, m)$, 从而可以求出 $Y(\bullet)$.

在上述气路故障诊断中, 发动机测量参数和模型参数修正量的权系数与不确定度可以关联在一起. 在发动机试验测量参数置信概率相同条件下, 测量参数不确定度区间越小, 则该测量参数最佳估计值变化范围和相应修正量均越小, 由此, 该测量参数最佳估计值在气路故障诊断中的权重越大. 基于此, 本文采用“ 3σ ”准则(3σ 为不确定度, σ 为标准差)和平方倒数关系(也可采用其他数学关联方法, 如标准差倒数关系等), 将发动机测量参数的不确定度与气路故障诊断中测量参数修正量权值相关联, 将发动机模型参数不确定度与发动机模型参数修正量权系数相关联, 因此, 式(2)中的 γ_i, γ_j 分别为

$$\gamma_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad \gamma_j = \frac{1}{\sigma_j^2} \quad (6)$$

由此, 可形成涵盖试验测量技术和专家模型整个系统的发动机气路故障诊断方法.

1.2 发动机模型参数不确定度

发动机模型参数的不确定度是根据一定的经验选取而定, 需要充分考虑到各部件的实际情况, 主要包含了设计数据在经过制造加工后产生偏离的可能范围以及各部件单独试验时求得的性能曲线可能变形等诸多因素, 通常模型参数不确定度由部件设计专家根据被验证的设计经验数据并结合该部件的试验性能综合考虑后提供, 因此发动机模型参数的不确定度评估又称为专家评估. 在实践分析中, 模型参数不确定度往往可由部件试验确定, 同时可结合客观情况与该部件设计和试验专家评估综合确定. 例如, 某低压比风扇部件总性能试验中的不确定度结果如表1所示(由于压比较低所以采用了扭矩效率而非温升效率). 综合考虑测量截面的流场不均匀性以及串装整机需磨叶尖等各类因素, 因此, 在利用该试验性能不确定度作为风扇模型参数不确定度时, 可在该风扇

部件总性能试验不确定度(表1)基础上结合试验和设计专家意见进行适当调整.

表1 风扇部件总性能试验不确定度示例

Table 1 Uncertainty demonstration for the overall performance test of a fan

风扇相对 换算转速	不确定度/%		
	流量	压比	扭矩效率
0.2	7.00	0.90	33.0
0.4	1.40	0.80	8.9
0.6	0.50	0.70	3.5
0.8	0.20	0.60	1.8
1.0	0.15	0.55	1.1

1.3 发动机测量参数不确定度

在发动机整机试验中, 测量参数类型很多, 有些参数可以直接测量, 有些参数只能间接测量, 且某些间接测量参数(如空气流量、耗油率等)所涉及的相关因素较多, 因此无法用同一方法确定所有测量参数的不确定度. 通常发动机测量参数的不确定度在测量校准试验报告中会有详细推导和分析结果. 通过深入分析, 发动机整机试验(含地面台和高空台)中, 各类测量参数不确定度基本可按照如图1所示步骤确定.

在上述步骤中, 测量参数不确定度的来源比较复杂, 在对发动机地面台和高空台各类测量参数不确定度分析时, 主要根据实际情况分析对测量结果有明显影响的不确定度来源和大小, 如发

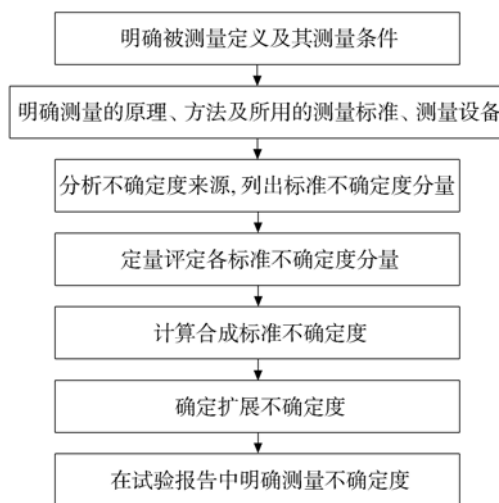


图1 发动机测量参数不确定度的确定步骤

Fig. 1 Establishment steps of the uncertainty of engine measuring parameters

动机空气流量、推力、耗油率等间接测量参数不确定度的主要影响因素和次要影响因素达数 10 余项以上^[16]。

另外,对于压力和温度这类测量参数,发动机台架测试系统仅提供被测量截面每个测点的压力或温度的不确定度,而在发动机气路故障诊断分析时,需要代表测量截面的平均压力或平均温度的不确定度,这类测量参数不确定度的确定必须考虑 3 个层面的因素:第 1 层,测试设备系统本身的不确定度;第 2 层,需考虑单点测量的重复性,也是时间因素,即在发动机同一个稳定状态下,稳态数据采集系统对单点压力或温度的多次测量;第 3 层,需考虑由于测点布局所带来的影响,也是空间因素。在第 3 层因素中,由于需考虑旋转部件流场的不均匀性、尾迹、测量堵塞比等^[17],所以测点布局通常由测试人员和部件设计人员共同确定,在计算不确定度时,可以按照均值与测点的函数关系计算均值合成不确定度。

以发动机整机试验的流量喷嘴(用于确定发动机进口空气流量测量的校准)为例,其校准的 B 类相对合成标准不确定度确定如下:

$$\sigma_w = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + C^2} \quad (7)$$

式中 σ_w 为流量喷嘴流量 B 类相对合成标准不确定度; u_1 为流量喷嘴前压力引起的相对标准不确定度,

$$u_1 = \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_{p_s}}{p_s} \right], \frac{\sigma_{p_s}}{p_s} = \pm \frac{\text{传感器量程} \times \text{精度}}{\sqrt{3} \times \text{测量值}};$$

u_2 为流量喷嘴前后压差 Δp 引起的相对标准不确定度,

$$u_2 = \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_{\Delta p_s}}{\Delta p_s} \right], \frac{\sigma_{\Delta p_s}}{\Delta p_s} = \pm \frac{\text{传感器量程} \times \text{精度}}{\sqrt{3} \times \text{测量值}};$$

u_3 为流量喷嘴温度引起的相对标准不确定度,

$$u_3 = \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_{T_s}}{T_s} \right], \frac{\sigma_{T_s}}{T_s} = \pm \frac{1}{\sqrt{3} \times \text{测量值}}; C \text{ 由流量喷嘴测}$$

量设备本身的不确定度 0.7% (置信率为 95%, t 分布) 得来, $C=0.35\%$ (扩展因子为 2)。

2 某型涡扇发动机诊断示例

本文以一个双轴分排涡扇发动机为例,应用结合不确定度的模型辨识法,对该发动机进行气路故障诊断分析。诊断前需对发动机模型参数及测量参数进行相应的预处理。发动机数学模型预处理部分主要包括各部件试验性能的回归拟合(便于发动机数学模型计算中的插值与迭代)以及确定部件试验中性能参数的不确定度。在测量参数预处理方面,需确定发动机台架所测量传感器是否出现故

障,传感器布置的位置与当初设计是否有偏移。

在本文双轴分排涡扇发动机气路诊断示例中,抽取了覆盖慢车状态和中间状态共计 5 个不同转速状态点测量参数,测量参数为发动机台架试车所测量的参数,主要测量参数及其扩展不确定度见表 2,表 2 中测量参数扩展不确定度对应的置信概率与标准正态分布中的 3 倍标准差所对应的置信概率相同。本示例中, n 为 17 见表 2, r 为 33 见表 3, k 为 3 (分别为环境压力、环境温度、高压转速), m 为 8 (分别为进口空气流量、燃油流量、压气机后静压、高/低压转速、推力、涡轮后燃气温度、风扇后总压)。另外,由于测量数据随机性始终存在,采用了狄克逊(Dixon)法^[18]对测量数据进行数据异常值处理,当数据经检验被判断为异常值时,通常采用以下原则:①当从技术或物理上,如果有足够的理由解释异常值存在的合理性时,保留异常值;②如果判断出属于不合理的异常值时,则直接从数据中剔除,或者可以将异常值修正为较合理的数据再作统计分析。

表 2 发动机试车主要测量参数及其扩展不确定度

Table 2 Main measuring parameters and their uncertainty of engine test

测量参数	扩展 不确定度/%	对应修正量 权值
环境压力	0.06	2500
发动机进口处总温	0.2	225
发动机进口处总压	0.3	100
发动机进口处静压	0.3	100
风扇进口处总压	0.3	100
风扇出口处总温	1	9
风扇出口处总压	0.5	36
压气机出口壁面静压	0.3	100
低压涡轮出口总温	1	9
低压涡轮出口总压	0.5	36
外涵出口总压	0.5	36
低压转子转速	0.2	225
高压转子转速	0.2	225
燃油流量	2	2.25
发动机推力	2	2.25
内涵出口面积	1.5	4
外涵出口面积	1.5	4

通过上述结合不确定度的模型辨识法,对该双轴分排涡扇发动机 5 个状态点进行气路故障诊断,综合诊断结果见表 3 和图 2. 表 3 中的模

型辨识修正量为模型计算结果与试验结果平衡时待诊断参数的修正值. 图 2 是利用表 3 数据生成的对比图.

表 3 模型辨识法的诊断结果

Table 3 Result of faults diagnosis with pattern recognition

模型辨识修正量	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5
流量管进口面积修正量 A_{in}	0	0	0	0	0
进气段总压恢复系数修正量 S_{in}	-0.0022	-0.0019	-0.0044	-0.0016	0.0101
内涵推力系数修正量 F_{n1}	0	0	0	0	0
风扇进口轴向速度系数修正量 L_f	0.0001	0.0015	-0.0018	0.0009	0.0001
风扇压比修正量 P_f	0.0008	0.0008	-0.0039	0.0014	0.0019
风扇效率修正量 E_f	-0.0098	-0.0467	-0.0813	-0.0395	0.0070
风扇出口到压气机进口总压恢复系数修正量 S_f	-0.0070	-0.0083	-0.0016	-0.0044	0.0005
外涵推力系数修正量 F_{n2}	0	0	0	0	0
压气机进口轴向速度系数修正量 L_c	-0.0204	-0.0275	-0.0122	-0.0321	0.0038
压气机压比修正量 P_c	0	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001
压气机效率修正量 E_c	-0.0002	-0.0014	-0.0064	-0.0030	0.0011
压气机进口面积修正量 A_{ci}	-0.0002	-0.0002	0	-0.0001	0
压气机出口面积修正量 A_{co}	-0.0011	-0.0011	-0.0013	-0.0016	0
冷气流量修正量 G_c	0.0012	0.0015	0.0010	0.0011	-0.0002
燃烧室燃烧效率修正量 E_{cb}	0	0	-0.0016	0.0035	0
燃烧室总压恢复系数修正量 S_{cb}	0.0008	0.0008	0.0001	0.0011	0.0001
燃油热值修正量 H_u	0.0011	0.0024	-0.0004	0.0018	0.0003
高压涡轮进口平均直径修正量 D_{ht}	0	0	0	0	0
高压涡轮进口换算流量修正量 A_{ht}	0.0072	0.0222	0.0421	0.0412	0.0026
高压涡轮效率修正量 E_{ht}	-0.0034	-0.0059	-0.0110	-0.0097	0.0002
高压转子机械效率修正量 E_{hm}	0.0002	0.0004	-0.0007	0	0.0002
高压涡轮后总压恢复系数修正量 S_{ht}	0	0	0	0	0
低压涡轮进口平均直径修正量 D_{lt}	0	0	0	0	0
低压涡轮进口换算流量修正量 A_{lt}	0	0.0043	0.0014	0.0010	-0.0007
低压涡轮效率修正量 E_{lt}	-0.0011	-0.0083	-0.0029	-0.0032	0.0002
低压转子机械效率修正量 E_{lm}	0.0002	-0.0004	-0.0002	0	0.0001
低压涡轮后总压恢复系数修正量 S_{lt}	0.0005	0.0007	0.0004	0.0004	-0.0011
外涵道总压恢复系数修正量 S_{do}	-0.0273	-0.0370	-0.0145	-0.0237	-0.0006
内涵喷管流量系数修正量 A_{fn1}	0.0065	0.0061	0.0030	0.0086	-0.0079
内涵道出口面积修正量 A_{n1}	0.0040	0.0033	0.0007	0.0021	-0.0050
外涵喷管流量系数修正量 A_{fn2}	-0.0364	-0.0269	-0.0126	-0.0298	-0.0012
外涵道出口面积修正量 A_{n2}	-0.0199	-0.0139	-0.0032	-0.0065	-0.0009
燃烧室进口面积修正量 A_{cb}	0.0001	0	0	0	0

注:状态 1 为中间状态;状态 3 为慢车状态;状态 2,4,5 为中间状态和慢车状态之间的节流状态.

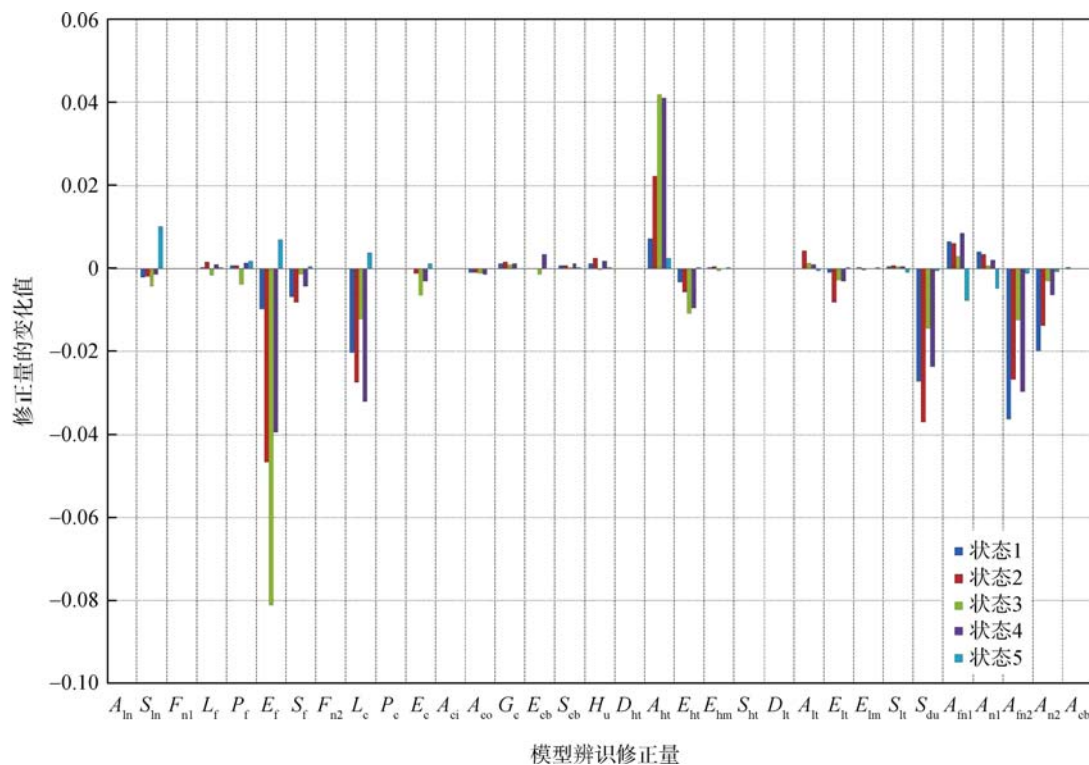


图2 模型辨识法诊断结果的直方图

Fig 2 Histogram of diagnosis results by pattern recognition

根据图2和表3可以发现:①风扇效率修正量 E_f 性能下降,平均下降0.034,下降幅值变化范围位于0.007~0.0813之间,在状态1(中间状态)时,风扇效率仅下降0.007,在状态3(慢车状态)时,风扇效率下降0.0813,而慢车状态的风扇试验效率不确定度为0.0888(因低转速下风扇增压比低、流量小、扭矩小等,导致风扇低转速下效率不确定度较大),故该慢车状态风扇效率修正量在可接受范围内;②压气机进口轴向速度系数修正量 L_c (由于压气机尺寸在各状态下变化几乎为零,这里压气机进口轴向速度系数和压气机进口流量成正比,即反映了压气机进口流量)整体上略有降低,平均下降0.0177左右;③高压涡轮进口换算流量修正量 A_{ht} (该值实际上反映了高压涡轮导向器喉道面积)增加,平均增加0.023;④外涵道总压恢复系数修正量 S_{du} 下降,平均下降0.02,外涵喷管流量系数修正量 A_{fn2} 下降均值为0.021。汇集以上诊断结果,影响该发动机性能的主要因素是压气机空气流量、高压涡轮导向器面积以及外涵道流路损失等这几个关键参数。

为了证实上述诊断结论,将带修正量/不带修正量的模型计算结果与试验结果进行对比分析(见表4)。从表4中可以看出:带修正量的发动机模型计算性能与试验结果的一致性精度得到了显

著的提高,模型计算推力与试验测量推力最大偏差由8.25%减小到1.66%,耗油率最大偏差由6.25%减小到1.50%。

表4 模型计算与试验结果的对比

Table 4 Comparison between calculation and test results

状态	$\Delta_o/\%$		$\Delta_m/\%$	
	推力	耗油率	推力	耗油率
1	1.92	-3.22	0.40	-0.10
2	3.25	-3.29	1.38	-0.04
3	8.25	-4.43	1.66	-0.82
4	-7.23	4.85	-1.72	0.41
5	2.04	6.25	1.12	1.50

注: Δ_o 表示不带修正量的原发动机模型计算结果与试验结果对比的相对变化量; Δ_m 表示带修正量的发动机模型计算结果与试验结果对比的相对变化量。

在上述诊断结果和模型计算的基础上,针对影响该发动机性能的3个关键参数,在该发动机性能改进方案中,采取了适当调节压气机导叶角度和在涡轮导向器叶片上增加涂层,以及一些降低外涵损失措施,包括外涵测试管线的布局优化、适当增加外涵流道面积、燃烧室燃油总管外置改为内置等,上述措施的采用显著改善了该双轴分

排涡扇发动机性能,诊断结果已在该发动机改进后的试验中得到了验证。

3 结 论

1) 本文基于发动机台架试验的特点,建立了一种将试验测量参数的不确定度和发动机专家模型相结合的航空发动机多学科气路故障模型辨识法。

2) 该方法通过结合测量参数的不确定度,综合考虑了由于传感器精度、测量布局位置、测量截面上气流不均匀度等因素所导致的测量系统实测值与真实值之间的偏差。

3) 在本文示例中,运用该方法所得的故障参数修正量修正原发动机数学模型,使模型计算推力与试验测量推力最大偏差由 8.25% 减小到 1.66%,耗油率最大偏差由 6.25% 减小到 1.50%。

参考文献:

- [1] 梁旭,李行善,张磊,等.支持视情维修的故障预测技术研究[J].测控技术,2007,26(6):5-8.
LIANG Xu, LI Xingshan, ZHANG Lei, et al. Survey of fault prognostics supporting condition based maintenance [J]. Measurement and Control Technology, 2007, 26(6): 5-8. (in Chinese)
- [2] 曾声奎, Pecht M G, 吴际.故障预测与健康管理(PHM)技术的现状与发展[J].航空学报,2005,26(5):626-632.
ZENG Shengkui, Pecht M G, WU Ji. Status and perspectives of prognostics and health management technologies [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 626-632. (in Chinese)
- [3] 王施,王荣桥,陈志英,等.航空发动机健康管理综述[J].燃气涡轮试验与研究,2009,22(1):51-58.
WANG Shi, WANG Rongqiao, CHEN Zhiying, et al. Survey on aircraft engine health management [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(1): 51-58. (in Chinese)
- [4] LI Yiguang. Performance analysis based gas turbine diagnostics: a review [J]. Journal of Power and Energy, 2002, 216(5): 363-377.
- [5] Aretakis N, Mathioudakis K, Stamatis A. Nonlinear engine component fault diagnosis from a limited number of measurements using a combinatorial approach [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(3): 642-650.
- [6] Doel D L. Interpretation of weighted-least-squares gas path analysis results [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(3): 624-633.
- [7] Doel D L. An assessment of weighted-least-squares-based gas path analysis [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1994, 116(2): 366-373.
- [8] 朱之丽,孟凡涛.模型辨识法诊断发动机故障的分析[J].北京航空航天大学学报,2003,29(5):398-401.
ZHU Zhili, MENG Fantao. Aircraft engine fault diagnosis research using model identification based method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(5): 398-401. (in Chinese)
- [9] 朱大明,朱之丽.结合统计的模型辨识在发动机故障诊断中应用[J].航空动力学报,2009,24(5):1061-1065.
ZHU Daming, ZHU Zhili. Application of pattern recognition with statistics for engine fault diagnosis [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(5): 1061-1065. (in Chinese)
- [10] 曲建岭,高峰,唐昌盛,等.基于概率神经网络的发动机气路故障诊断[J].仪器仪表学报,2008,29(4):141-147.
QU Jianling, GAO Feng, TANG Changsheng, et al. Probabilistic neural network based diagnosis of aeroengine gas path faults [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(4): 141-147. (in Chinese)
- [11] 陈恬,孙健国,郝英.基于神经网络和证据融合理论的航空发动机气路故障诊断[J].航空学报,2006,27(6):1014-1017.
CHEN Tian, SUN Jianguo, HAO Ying. Neural network and dempster-shafter theory based fault diagnosis for aero-engine gas path [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1014-1017. (in Chinese)
- [12] 鲁峰,黄金泉.基于ESVR信息融合的航空发动机故障诊断研究[J].应用基础与工程科学学报,2010,18(6):982-989.
LU Feng, HUANG Jinqian. Fault diagnosis for aero-engine based on ESVR information fusion [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(6): 982-989. (in Chinese)
- [13] 徐建平,桂子鹏.变分方法[M].上海:同济大学出版社,1999.
- [14] 林彦,孙振齐,邢继祥.变分法与最优控制[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1987.
- [15] 谢政,李建平,汤泽滢.非线性最优化[M].长沙:国防科学技术大学出版社,2003.
- [16] 刘志友,马前容,师伟.改善高空台试验中发动机性能参数不确定度的方法探讨[J].燃气涡轮试验与研究,2011,24(1):1-7.
LIU Zhiyou, MA Qianrong, SHI Wei. Methods of aero-engine performance parameter uncertainty improvement in simulated altitude test [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2011, 24(1): 1-7. (in Chinese)
- [17] 西北工业大学.航空发动机气动参数测量[M].北京:国防工业出版社,1980.
- [18] 潘承毅,何迎晖.数理统计的原理与方法[M].上海:同济大学出版社,1993.

(编辑:陈 越)