

基于故障影响系数矩阵的涡轴发动机气路分析技术

张伟

(中国航发湖南动力机械研究所 湖南 株洲 412002)

摘要: 气路分析技术 (GPA) 是航空发动机性能故障诊断的重要手段。本文阐述了基于故障影响系数矩阵的 GPA 技术诊断涡轴发动机性能的原理; 建立涡轴发动机计点模型后, 通过基因遗传算法对模型进行了非设计点的校准; 介绍了如何利用校准后的发动机模型进行性能诊断, 并使用仿真数据进行了性能诊断。结果表明, GPA 技术能够很好地诊断出单个部件或多个部件的故障。

关键词: 故障影响系数矩阵; 涡轴发动机; 气路分析

0 引言

航空发动机结构复杂, 工作在高速、高温的恶劣环境中, 属于多发故障机械, 维护技术对于航空发动机的使用至关重要, 其发展可以划分为 3 个阶段。第 1 阶段 (20 世纪 40 年代到 20 世纪 50 年代) 称为损坏后维修; 第 2 阶段 (20 世纪 50 年代初到 20 世纪 70 年代末) 称为定期维护; 第 3 阶段 (20 世纪 70 年代末至今) 称为视情维护。

GPA 技术是随着航空发动机维护技术的发展而出现的一项新技术。近二十多年来国外先进的航空发动机均匹配了不同形式的故障诊断系统, 国内在航空发动机性能诊断方面尚处于初步研究阶段, 中国航发湖南动力机械研究所与 Cranfield 大学合作开展了基于故障影响系数矩阵的涡轴发动机气路分析技术的研究。

1 气路故障诊断流程

发动机性能诊断首先要根据设计点的相关参数和部件特性图建立发动机的初步模型, 然后利用测试数据和遗传算法校准发动机在设计点及非设计点的模型, 把得到的模型作为清洁发动机的模型。在确定性能变化后的发动机工作条件下, 通过模型计算出性能参数, 再把它与衰减时的测试数据同时输入故障诊断模块, 通过该模块诊断出发动机故障的情况。

2 非线性修正的模型校准方法

精确的模型是进行发动机性能诊断的基础。由于零件公差、装配质量等因素的影响, 批量生产的同一型号发动机性能会有一定的差别, 所以在发动机建模时必须使用特定发动机的试验数据来校准模型。

设计点模型校准相对简单, 在足够数量和一定精度的试验数据基础上, 通过多次的部件参数的调节和计算,

可以使设计点的性能参数与试验测试数据有很好的重合性, 为非设计点的计算和校准做好准备。

发动机非设计点的性能是非线性的, 取决于部件特性。如果在模型中用于非设计点计算的特性图与实际的部件特性图不一样, 就会产生误差, 越是远离设计点误差会越大。所以, 非设计点模型的校准就是对部件特性图的校准。

部件特性图的校准可以通过适当地缩放因子来对特性图中的性能参数进行校准。缩放特性图的移动量取决于缩放因子的大小, 如果缩放因子非常接近 1, 那么缩放后的特性图相对于原始特性图的移动将会很小, 反之亦然。

一般的修正方法往往是给每个缩放因子一个固定的值, 那么整个部件特性图的每一条曲线移动的比例将会一样, 称之为线性修正。线性修正的方法能够从一定程度上减小计算误差, 但是对于发动机性能诊断来说还不够。为了提高修正精度, 本文采用非线性修正的方法, 将压气机和涡轮各缩放因子的值定义为换算转速的二次函数, 将燃烧室缩放因子定义为燃烧室进口压力的二次函数。

式 (1) 是计算缩放因子的二次方程。

$$SF_x = 1 + b \left(\frac{L_{OD} - L_{DP}}{L_{DP}} \right) + C \left(\frac{L_{OD} - L_{DP}}{L_{DP}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: SF_x —缩放因子, 下标 x 表示不同的特性参数; b, c —方程式系数。

对于压气机和涡轮来说, L_{OD} 和 L_{DP} 分别表示非设计点和设计点的换算转速; 对于燃烧室来说, L_{OD} 和 L_{DP} 分别表示非设计点和设计点的燃烧室进口压力。这样缩放部件特性就转化为寻找各个缩放因子函数中的系数 b 和 c 的问题了。

为了衡量缩放因子函数中系数的合理性, 引入目标方程式 (2)。

$$OF = \frac{1}{n} \frac{1}{m} \left[\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sigma_i \left| \frac{P_{(predicted)i,j} - P_{(actual)i,j}}{P_{(actual)i,j}} \right| \right] \times 100 \quad (2)$$

式中: n —非设计点的数量;

m —测试参数数量;

σ_i —参数的权重;

$P_{predicted}$ —模型计算值;

P_{actual} —试验数据。

为了获得最佳的系数,使得目标方程的值最小,本文采用遗传算法进行计算。

图1所示为非设计点校准的流程图。首先根据初始特性图计算出非设计点的性能数据;然后利用这些数据与试验数据求出目标方程的值;如果目标方程满足要求则直接完成校准;如果不满足则需要利用基因遗传算法计算出特性图缩放方程的系数,进行特性图缩放;最后利用缩放后的特性图进行非设计点的性能计算,这个循环将不断进行,直至满足退出条件。

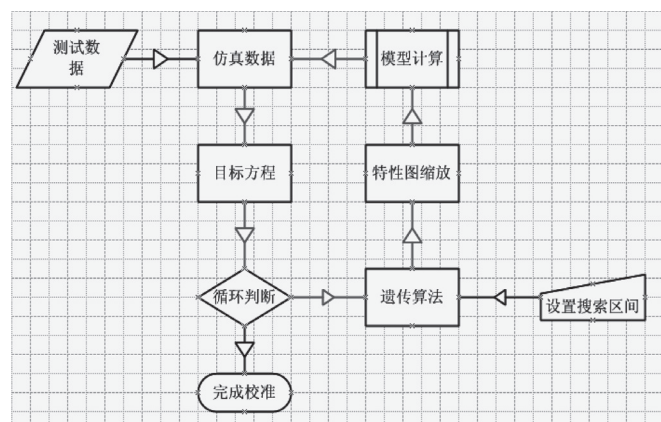


图1 非设计点校准流程图

对比了燃气发生器转速分别为96.5%、97.5%和98.5%的3个转速下T3、P3、功率和燃油流量4个参数在进行非设计点校准前后的误差对比,可以看出这些参数的误差都大幅度降低,所有参数计算前后的平均误差从原来的2.52%下降到0.69%。

3 气路故障诊断

3.1 GPA线性计算方法

GPA线性计算方法是在Urban提出的故障影响系数矩阵的基础上发展而来的,发动机在特定工作条件下的性能方程可以表示如下:

$$\bar{z} = h(\bar{x}) \quad (3)$$

式中: $\bar{z}$ —测试参数向量, $\bar{z} \in R^M$, M 是目标性能参数的个数;

$\bar{x}$ —需要部件性能参数, $\bar{x} \in R^N$, N 是需要校准的部件参数的个数;

$h(\bar{x})$ —向量方程,通常是非线性的,通常对应发动机性能计算模型。

如果给定测试参数 $\bar{z}$,就能够从 h 的反函数计算出部件性能参数 $\bar{x}$ 。

$$\bar{x} = h^{-1}(\bar{z}) \quad (4)$$

在初始设计点,方程(3)可以通过泰勒级数展开为:

$$\bar{z} = \bar{z}_o + \frac{\partial h(\bar{x})}{\partial \bar{x}} \bigg|_o (\bar{x} - \bar{x}_o) + \text{HOT} \quad (5)$$

方程(5)中的HOT为可忽略的高阶展开式。初始设计点附近的需要校准的部件参数的偏差与目标性能参数的关系可以表示为如下的线性关系:

$$\Delta \bar{z} = H \cdot \Delta \bar{x} \quad (6)$$

式(6)中, $\Delta \bar{z}$ 是测试参数偏差向量。

$$\Delta \bar{z} = \bar{z} - \bar{z}_o = \begin{pmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \vdots \\ \Delta z_M \end{pmatrix} \quad (7)$$

$\Delta \bar{x}$ 是部件参数偏差向量。

$$\Delta \bar{x} = \bar{x} - \bar{x}_o = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_N \end{pmatrix} \quad (8)$$

H 是影响系数矩阵。

$$H = \frac{\partial \bar{z}}{\partial \bar{x}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial H_1(\bar{z})}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial H_1(\bar{z})}{\partial x_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial H_M(\bar{z})}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial H_M(\bar{z})}{\partial x_N} \end{pmatrix} \quad (9)$$

通过式(6)可以得到 H 的逆矩阵(故障系数矩阵) H^{-1} ,于是可以计算出部件参数的偏移量。

$$\Delta \bar{x} = H^{-1} \Delta \bar{z} \quad (10)$$

3.2 GPA非线性计算方法

为了提高精度,在线性计算的基础上,本文引入了Newton-Raphson算法,将性能诊断转化为非线性的计算,基本思路如下:

(1) 核心计算方法和GPA线性计算一样,它的基本方程仍为式(9)。

(2) 得到计算结果后得到部件参数的解向量。

$$\bar{x}_{new} = \bar{x}_{old} + \Delta \bar{x} \quad (11)$$

(3) 使用Newton-Raphson算法进行迭代。

(4) 当 $\Delta \bar{z}_{sum} < \delta$ 时结束迭代,得到非线性解, $\Delta \bar{z}_{sum}$ 的定义如下:

$$\Delta \bar{z}_{sum} = \sum_j^M |\Delta z_{meas_j} - \Delta z_{cal_j}| \quad (12)$$

图2中, X 轴为自变量偏移量, Y 轴为因变量偏移量。迭代过程如下。

(1) 点1表示某个部件性能参数从0(基准点)点发生了偏移。那么测试参数也会相应发生偏移,移动到

图中“性能衰减”线上。

(2) 通过发动机在点 0 的模型计算出 GPA 影响系数矩阵 H , 通过转置得到故障系数矩阵 H^T , 这样就可以计算出基准点到性能衰减时的部件参数偏移量点 2。

(3) 取点 2 偏移量的 66% (点 3), 通过点 3 计算出此时发动机测试参数的偏移量点 4, 将点 4 作为迭代的基准。重新计算出影响系数矩阵 H , 和故障系数矩阵 H^T 再次得到部件参数偏移量点 5。

(4) 从点 6 开始进行重复迭代可以到达点 8。每经过一次迭代部件性能参数的移动越来越小。

(5) 测试参数的偏移量与试验数据的偏移量逐渐靠近, 当达到收敛标准 (式 (13)) 或是迭代次数达到预定值时就停止迭代, 得出非 GPA 计算结果。

$$\Delta \bar{z}_{sum} = \sum_{j=1}^M |\Delta z_{meas_j} - \Delta z_{cal_j}| \leq \delta \quad (13)$$

式中: M —测试参数的个数;

Δz_{meas_j} —实际测试数据的偏差量;

Δz_{cal_j} —得出部件参数偏移后计算出的测试参数偏移量;

δ —收敛的判定标准。

3.3 确定故障部件的方法

在进行故障诊断时为了建立方程, 需要事先知道故障部件。Zedda 和 Singh 提出了一种首先计算出所有部件故障的组合, 然后通过计算结果确定故障部件的方法。在这种方法中定义了 GPA 指数 (GPA Index)。

$$\text{当 } (2.5 \frac{1}{1+\varepsilon}) - 1.25 \leq 0.5 \text{ 时:}$$

$$\text{GPA Index} = 0.1$$

$$\text{当 } (2.5 \frac{1}{1+\varepsilon}) - 1.25 \geq 0.9 \text{ 时:}$$

$$\text{GPA Index} = 1.0$$

$$\text{当 } 0.5 < (2.5 \frac{1}{1+\varepsilon}) - 1.25 < 0.9 \text{ 时:}$$

$$\text{GPA Index} = (2.5 \frac{1}{1+\varepsilon}) - 1.25$$

式中: ε —试验测试与模拟仿真的部件测试参数的平均误差。

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta z_{i,measured}}{\Delta z_{i,clea}} - \frac{\Delta z_{i,predicted}}{\Delta z_{i,clea}} \quad (14)$$

图 3 所示为 GPA 指数产生的过程, 通过清洁发动机数据与衰减后发动机数据的对比得到测试部件参数的偏差 $\Delta \bar{z}_{measured}$; 设置某个部件性能衰减, 通过 GPA 非线性方法计算出部件偏移量, 并把部件偏移量带入模型, 计算出发动机在次偏移量下的性能数据, 通过与清洁发动机测试数据

的比较得出 $\Delta \bar{z}_{predicted}$, 然后将其带入式 (14) 计算出 ε , 最后便可计算出 GPA 指数。

图 4 所示为如何利用 GPA 指数确定故障部件。通过 GPA 非线性方法计算出每一个可能衰减的部件组合和相应的 GPA 指数。在判断时, GPA 指数越高, 表明其出现故障的几率越高, 通过这样的方法可以判断出现故障的部件。

4 故障诊断结果

为了验证诊断结果, 使用仿真数据进行性能诊断。对单个部件故障的诊断能力进行检测, 检测结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出对于单个部件故障, 这种方法不但定性地指出故障部件, 还能定量地确定衰减的程度。

对组合部件故障进行诊断, 结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 对于组合部件, 这种方法仍然可以指出故障部件, 能够计算出性能衰减量, 但是计算精度稍微有所下降。

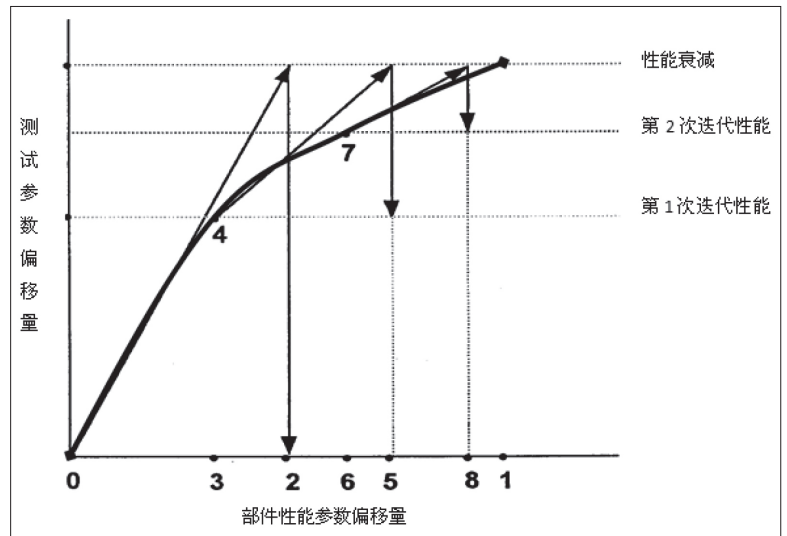


图 2 非线性 GPA 迭代示意图

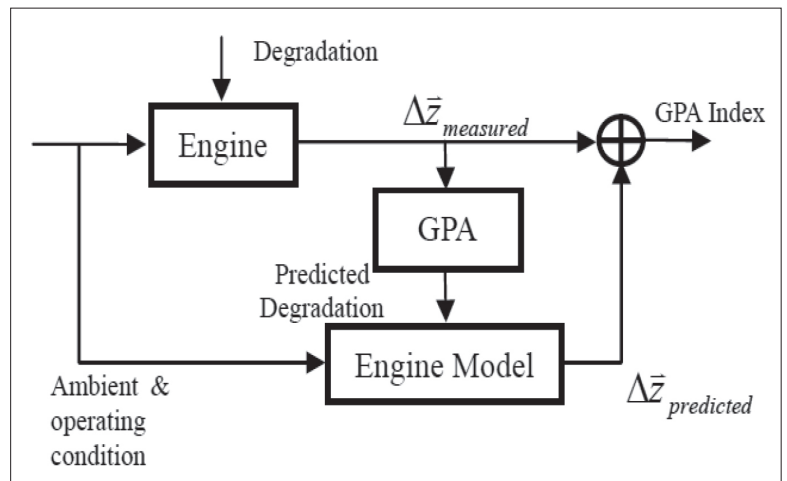


图 3 GPA Index 计算过程

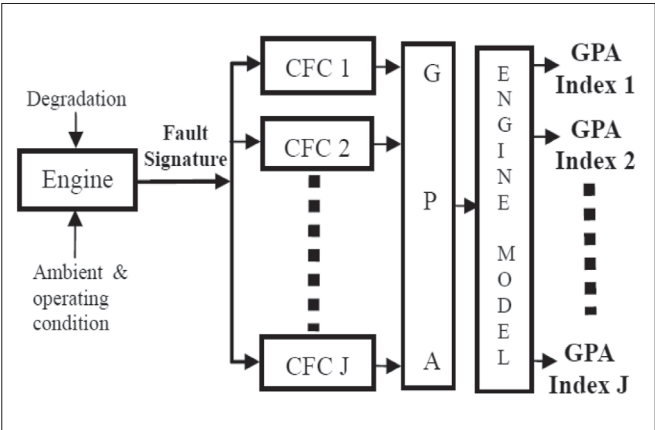


图 4 应用 GPA 确定故障部件

5 结语

本文基于 GPA 的非线性计算方法能够很好地诊断出模型模拟的性能衰减，展示出其功能强大的一面。但是，这对使用者有较高的要求：首先，建立模型和校准模型需要使用者对航空发动机有深刻的理解，这样才有助于建立合理的模型和加速模型的校准；其次，这种方法对于测试精度有较高的要求；再次，在进行诊断时诊断参数的选择也非常重要；最后，使用者要具有对计算结果（GPA 指数）进行合理分析的能力。

参考文献：

[1] 郝英, 孙建国, 白杰. 航空燃气涡轮发动机气路故障诊断现状与展望 [J]. 航空动力学报, 2003, 18(06): 753-760.

[2] I. Y. Li. Performance-Analysis-Based Gas Turbine Diagnostics: A Review, IMechE Journal of Power and Energy, 2002, 216(A5): 363-377.

表 1 单个部件诊断结果

部件		流通能力 /%	效率 /%
C	故障设置	-4	-3
	诊断结果	-3.94	-2.98
GT	故障设置	-3	-4
	诊断结果	-3.01	-4.01
PT	故障设置	-3	-3
	诊断结果	-2.9	-3.01

注：表中 C 为压气机，GT 为燃气涡轮，PT 为动力涡轮。

表 2 组合部件故障诊断结果

部件组合		流通能力 1/%	效率 1/%	流通能力 2/%	效率 2/%
C+GT	故障设置	-3	-2	-2	-3
	诊断结果	-2.92	-2	-2	-2.99
C+PT	故障设置	-3	-2	-5	-2
	诊断结果	-2.94	-1.98	-4.99	-2.02
GT+PT	故障设置	-3	-2	-3	-1
	诊断结果	-3	-1.89	-2.6	-1.08

[3] Singh R. Advances and Opportunities in Gas Path Diagnostics. ISABE-2003-1008, 15th ISABE, 2003.

[4] Roth B.A., Mavris D.N. and Doel D.L. Estimation of Turbofan Engine Performance Model Accuracy and Confidence Bounds. ISABE 2003-1208, 2003.

[5] Li Y.G & Singh, R., 2005. An Advanced Gas Turbine Gas Path Diagnostic system PYTHIA (ISABE-2005-1284). In XVII International Symposium on Air Breathing Engines. Munich, Germany, AIAA.