

文章编号: 1000-8055(2003)04-0549-05

航空发动机性能趋势监控定量化的方法研究

王英俊, 谢寿生

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 通过对某型飞机飞行参数记录系统记录信息的破译、分析和处理, 对得到的与发动机性能相关的数据在航空发动机性能趋势监控中的应用进行了较为深入的研究。提出了如何利用这些数据得到综合参数, 并采用综合参数作为评判发动机性能状况的量化指标以及在此基础上建立发动机预警信号系统的实现方法。最后, 利用实际的发动机数据进行了验证。

关键词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 性能趋势监控; 综合参数

中图分类号: V 263. 6

文献标识码: A

Method for Quantification of Aeroengine Performance Tendency Monitoring

WANG Ying-jun, XIE Shou-sheng

(Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The application of data acquired from a certain engine to the performance tendency monitoring of aeroengine is studied in-depth. The approach to obtaining integrative parameter from these data is demonstrated. The integrative parameter, in turn, can be employed as a quantitative criterion for judging the engine performances on which basis engine early-warning signal system can thus be established. Finally, the method was verified by real engine data.

Key words: aerospace propulsion system; aeroengine; performance tendency monitoring; integrative parameter

1 前言

对航空发动机进行连续性的性能趋势监控是保证发动机乃至飞机飞行安全的有效方法^[1]。为了完成对发动机的性能趋势监控, 应该首先对发动机各项工作参数(如转子转速、温度、振动值等等)进行记录, 并根据这些单独的工作参数是否接近理想值完成发动机单项工作参数的标准化, 也就是得到功效函数^[2]。利用这些功效函数得到表

征发动机总体性能变化趋势的综合参数后, 就可以将其应用于发动机使用方法的决策上。

2 量化方法

本文提出了三种利用这些功效函数得到综合参数的算法, 它们是定权值法^[3], 主成分法, 旋转因子法^[4]。

2.1 定权值法

定权值综合参数算法用下式表达:

收稿日期: 2002- 10- 08; 修订日期: 2003- 03- 20

作者简介: 王英俊(1972-), 男, 河北石家庄人, 西安市空军工程大学工程学院博士生, 主要从事航空推进装置综合控制与故障诊断研究

$$Q(t) = \frac{\sum_{s=1}^k \gamma_s \cdot \hat{x}_s(k)}{\sum_{s=1}^k \gamma_s} \quad (1)$$

$$k = 1, 2, \dots, m$$

其中 m 为发动机被监控参数的数目, γ_s 为参数 $\hat{x}_s(k)$ 的权, 反映了在估计被监控状态时该参数的重要性。不同参数的权值, 可以从每个参数的信息分析中, 或者根据经验来确定。 γ_s 的限制条件是:

$$0 \leq \gamma_s \leq 1; \quad \sum_{s=1}^m \gamma_s = 1$$

本文中默认的权值为: 高、低压转子转速和转差率均为 $1/8.7$, 排气温度和振动值均为 $2/8.7$, 高、低压导流叶片角度均为 $0.05/8.7$, 尾喷口指示值为 $1.5/8.7$, 滑油压力为 $0.1/8.7$ 。这些权值可以在使用过程中根据使用情况进行修正, 以便获得更合理的综合参数值。

根据上式和标准值的定义, 综合参数的变化范围为: $0 \leq Q(t) \leq 1$

只有当所有被监测参数全部超出正常工作范围时, $Q(t) = 0$; 当发动机处于最优工作状态时, $Q(t) = 1$ 。因此, $Q(t)$ 的值, 可用于监控发动机的状态。

2.2 主成分法

主成分分析法本来是用于高维数据的降维, 但是在这里, 我们将用这种方法来监控发动机的性能趋势。在进行主成分分析之前, 仍然要首先计算出发动机各个被监控参数对应的标准值(功效函数)。

2.2.1 主成分分析法原理

用 n 维模式向量 U 描述发动机工作到某个时间后记录下来的多组标准值(或功效函数), 记做 $U = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n]$, 其中 n 为被检测参数的数目, u_i 为被检测参数的标准值(或功效函数), 各 u_i 之间相关, 并可得到 U 的 k 个样本(假设此时共有 k 组飞行数据, 也就是有 k 组标准值)。在不考虑降维的情况下对 U 进行如下线性变换:

$$V_{n \times 1} = A_{n \times n} U_{n \times 1} = \begin{bmatrix} a_{(1)} \\ \vdots \\ a_{(n)} \end{bmatrix} U \quad (2)$$

对上式两边取转置, 即:

$$V^T = U^T A^T, \quad V V^T = A U U^T A^T$$

两边取数学期望, 可得:

$$R_V = A R_U A^T \quad (3)$$

式中, R_U 和 R_V 分别为向量 U 和 V 的自相关矩阵。

而且:

$$R_U = \frac{1}{K} \sum_{s=1}^K u(j) u(j) \quad (4)$$

$$R_V = [E(\hat{v}_i^2)] \quad (5)$$

这里, R_U 是实对称矩阵, R_V 是对角矩阵。所以, 式(5)给出了对 R_U 进行正交变换使其转换为对角矩阵 R_V 的算法, 变换矩阵是正交矩阵。另一方面, 非负定矩阵有 n 个正实特征根 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 并且:

$$R_V = [E(\hat{v}_i^2)] = [\lambda] \quad (6)$$

$$(\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n > 0)$$

与此项对应的标准化特征向量就是 A 中的列向量 $A_{(i)}$ 。由此, 可以方便的解决式(2)的变换问题。

对于模式向量 V 的降维问题, 可通过特征根 λ_i 计算比值。该比值反映了 V 中第 i 个分量对整体方差的贡献率。贡献率越大, 则该分量越重要。通常推荐, 从 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 中选取前 m 个特征根, 使得:

$$\frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} > 85\% \quad (7)$$

由此, 可找出相应的 m 个分量 V 组成一反映 U 的 n 个分量的主要特征, 这 m 个分量就称为主分量(或主成分)。

同时, 可按:

$$\lambda_i A_{(i)} = a_{(i)} R_U \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

选出 m 个 λ 求出 A 的 m 个分量, 并由它们组成变换矩阵, 使得:

$$V_{m \times 1} = A_{m \times n} U_{n \times 1} \quad (9)$$

这样, 就实现了对模式向量 U 的降维处理, 得到了低维的、各元素相互独立的主成分 V 。

在本课题中, 降维并不是最重要的, 我们做主成分分析的主要目的在于把贡献率作为计算综合参数的权值。

2.2.2 主成分分析法计算步骤

(1) 主成分提取的步骤。

根据上述推导分析, 采用主成分分析法进行特征量(征兆)提取的步骤可以具体描述为:

步骤1: 根据 U 的 k 个训练样本估计 U 的自相关矩阵 R_U ;

步骤2: 解 R_U 的特征方程 $|R_U - \lambda I| = 0$, 得到特征根 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$;

步骤3: 由式(7)式确定主分量所对应的 m 个

特征根:

步骤4: 由式(8)求出A的 m 个分量,并由它们组成变换矩阵;

步骤5: 由式(9)计算出主成分 v 。

(2) 综合参数的计算

再通过以上步骤得到了主成分的各个向量 $v_1, v_2, \dots, v_m$,以及主成分的各个向量对应的贡献率后,综合参数就可以通过下式算出:

$$Q(t) = \sum_{j=1}^m \left[\left(\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \right) v_j \right] \quad (10)$$

其中, $\omega = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j}$ 为加权系数,也就是前面讲到的贡献率。

2.3 旋转因子法

当主成分分析所得的 $v_1, v_2, \dots, v_m$ 难以赋予具有实际背景的合理解释时,需要将这 m 个主成分作为初始因子做一定规则的坐标旋转,这种获得理想因子的方法称为旋转因子分析。

2.3.1 旋转因子分析法原理

旋转因子的目的是为获取意义明确的综合因子。旋转方法中较常见的为最大方差旋转法。该法选择的旋转矩阵 $\Pi = (\lambda_{ij})_{m \times m}$ 使 $O^* = \Pi O = (\rho_{kj}^*)$ 按行(列)向0或1两极分化,即 O^* 能使新产生的综合因子明显的代表某些变量,且各因子对应的变量不相重叠,用公式表示,即选择 $\Pi = (\lambda_{ij})_{m \times m}$ 使以下的方差值 φ 达到最大:

$$\varphi = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^J (d_{kj}^2 - \bar{d}_k)^2 \quad (11)$$

式中: $d_{kj} = \frac{\rho_{kj}^*}{h_j}$, $\bar{d}_k = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J d_{kj}^2$

$$h_j = \sqrt{\max_{i \neq j} |y_{ij}|}$$

用 ρ_{kj}^* 除以 h_j 再求方差,其作用类似于标准化,目的在于消除各指标(变量)对综合因子 f_i 依赖程度不同的影响。

2.3.2 旋转因子分析法计算步骤

步骤1: 用主成分分析法选择初始因子 $v_1, v_2, \dots, v_m$,

步骤2: 计算关于 $v_1, v_2, \dots, v_m$ 的因子载荷矩阵:

$$\left. \begin{aligned} O &= (\rho_{kj})_{m \times J} \\ \rho_{kj} &= \rho(v_k, u_j) = \sqrt{\lambda_k} c_{kj} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中: c_{kj} 为矩阵R的单位特征向量。

进行因子旋转的合理的因子载荷阵 $O^* = (\rho_{kj}^*)_{m \times J}$

步骤4: 计算因子得分

$$f_t = (f_{t1}, f_{t2}, \dots, f_{tm})^T = (O^* R^{-1} O^{*T})^{-1} O^* R^{-1} U_t \quad (13)$$

f_t 即为所求的综合因子。

步骤5: 计算综合参数

$$Q(t) = \sum_{j=1}^m \left[\left(\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \right) v_j \right] \quad (14)$$

其中, $\omega = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j}$ 为加权系数。

3 量化指标的使用

得到发动机性能综合参数的目的是为了提供一个与发动机性能状况相关的定量指标,并用这一指标来决定发动机的使用方法。这个量化指标的具体使用可通过建立预警信号系统来完成^[5]。红绿灯预警信号系统是建立预警系统最直观最常用的方法。系统的建立与功能的实现由选取、确定、输出和分析预警信号步骤来完成。

根据指标选择的原则和标准,首先选择定权值方法计算得到的综合参数值作为预警信号。下面重点讨论预警界限的确定。

原则上,预警界限是在正态分布背景下由分布概率确定,同时结合具体系统的运行特征。考虑到综合参数值的计算过程特点,本文使用数理统计的方法,其假设前提是不同的发动机(正常工作的)在同等使用条件下的综合参数值服从正态分布。

例如,已知某三架飞机上六台发动机在第一次飞行时的综合参数值分别为0.44206, 0.58384, 0.64459, 0.48385, 0.50366, 0.51760。经计算,它们的平均值为0.52927,方差为0.00534744。由这些参数我们可以算得当置信度为0.95时综合参数值的单测置信下限为0.46562466。

进而,如果我们已经知道了多台发动机长时间工作过程中发动机综合参数值的变化情况,就可以计算出多个时刻的综合参数值的置信下限。将这些下限点拟合成一条曲线,就可以作为发动机的综合参数值的预警界限。

在得到了综合参数值的预警界限后,就可以随时把一台发动机在某次飞行时的综合参数值与

之比较, 根据综合参数值与预警界限相互间的关系就可以提出使用建议。具体地说, 如果发现综合参数值已经低于预警界限, 就应立即报警, 提示使用人员进行查故、排故工作; 如果综合参数值高于预警界限但相差不大, 则应提示使用人员应当加强对这台发动机的监控, 还可以考虑根据综合参数值与预警界限接近的速度进行故障预报; 否则, 则认为发动机工作正常, 可以继续放心使用。以上三种情况非常像交通信号系统中使用的红、黄、绿灯, 因此这种预警信号系统被称为红绿灯预警信号系统。

4 结果验证

根据以上思路和方法步骤, 本文对某台发动机的性能趋势进行了分析。这台发动机在工作到第34小时时发生了故障(综合调节器故障)。

由图1、图2、图3都可以看出, 该发动机综合参数值在使用过程中出现了较大幅度的下降, 这说明这些算法都反映出了当时发动机性能出现的恶化。而预警信号系统也在故障发生前8小时发出了预警信号, 提示应对发动机的使用进行监控, 并在故障发生前2小时发出了严重警戒信号, 建议停止

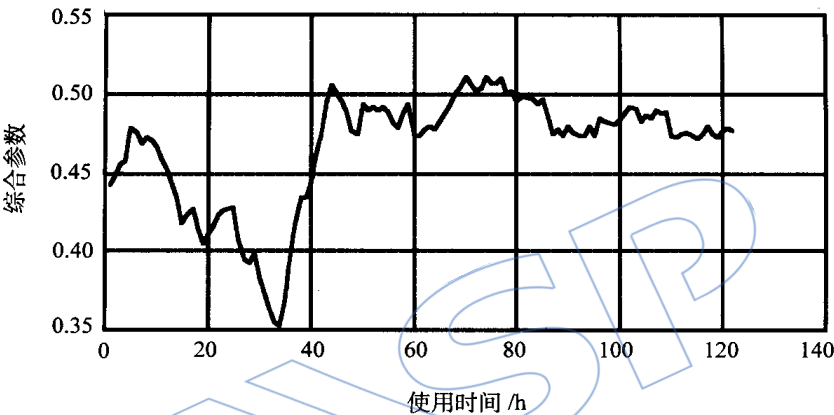


图1 某发动机综合参数值随使用时间的变化情况
(定权值法)

Fig 1 Change course of an engine's integrated parameter by employ time
(dectem inate weights)

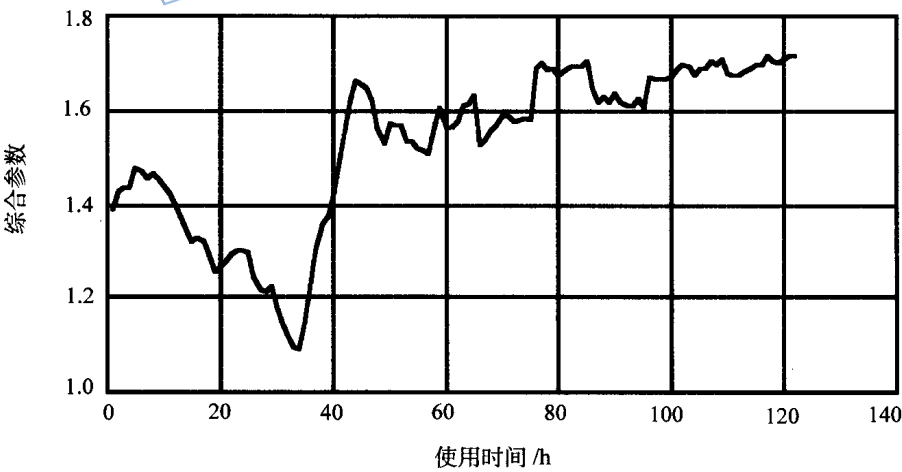


图2 某发动机综合参数值随使用时间的变化情况
(主成份法)

Fig 2 Change course of an engine's integrated parameter by employ time
(thief ingredients)

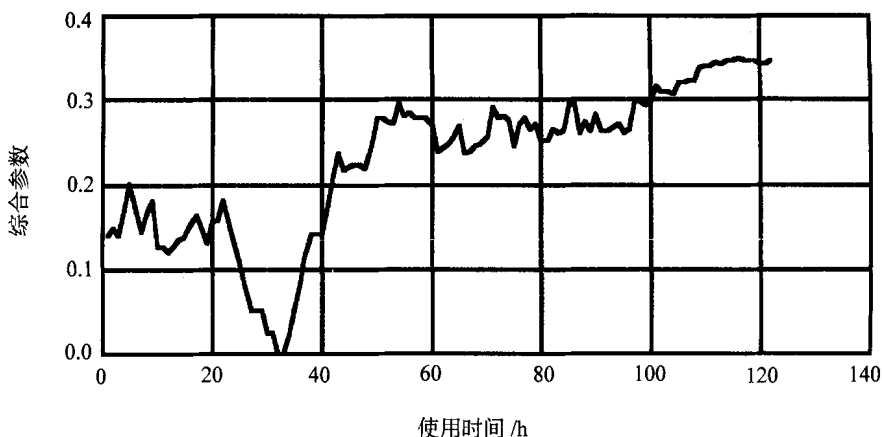


图3 某发动机综合参数值随使用时间的变化情况(旋转因子法)

Fig 3 Change course of an engine's integrated parameter by employ time (rotate factors)

该发动机的使用。在发动机工作34小时后,对发动机进行了更换综合调节器的排故工作,因而综合参数值也相应上升至正常数值范围内。

5 结 论

由前面的三张图还可以看出,三种算法得到的综合参数值随时间的变化趋势还是有细微差别的。按照我们通常的预想,发动机在使用过程中性能总是逐渐下降的,因而其综合参数值曲线也应该逐渐下降,除非在其工作过程中出现故障,使得参数曲线出现波动。就这一点来说,定权值法得到的结果最为合理。

主成分法和旋转因子法同样反映了发动机在使用过程中性能的变化。但是它们的变化数值较大,这应该与其算法特点有关。

针对这三种算法所得结果的特点,最终选择定权值方法计算得到的综合参数值作为主预警信号,利用主成分法和旋转因子法的计算结果作为辅助预警信号。

当然,我们还可以研究更多的算法,并仔细地

研究这些算法的结果。如果能够发现不同的算法与发动机不同的使用过程之间的联系,例如,某一种算法的结果对发动机某一类型的故障比较敏感,就可以将这一种算法用于这一类型故障的诊断。这种特定的算法就起到了故障特征参数的作用。这样,上述算法就不仅能衡量发动机性能变化的大小,还能在发动机出现故障或即将出现故障时进行预测和诊断。

参考文献

- [1] 周宗才,张居仁,李应红. 航空发动机监控与诊断原理[M]. 西安市空军工程大学工程学院, 1988
- [2] 李珈,陶增元. 某型发动机性能衰退的统计分析和预测[J]. 航空动力学报, 1992, 7(2): 173- 176
- [2] 谢寿生. $\times\times$ 飞机发动机故障诊断与性能趋势监测研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1998
- [4] 王英俊. $\times\times$ 型发动机性能趋势监控系统研制[D]. 西安: 空军工程大学, 2001.
- [5] 项静恬,史文恩. 非线性系统中数据处理的统计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1990