

某型发动机性能衰退的统计分析和预测

空军工程学院 李 珈** 陶增元

【摘要】 本文根据 500 多台次经过 0~3 次翻修的同一型号发动机的台架性能, 运用统计和综合分析的方法对发动机性能衰退进行了分析。提出了反映发动机整体性能的总体性能指数的概念。建立了翻修性能衰退的数学模型, 并对性能衰退的发展趋势进行了预测。其结果与实际情况较为吻合, 从而为发动机的使用和寿命研究提供了依据。

为了研究发动机在总寿命期内的性能变化, 我们提出了发动机翻修性能衰退的概念。发动机经过一个使用寿命期和工厂翻修一次后的性能恶化称为翻修性能衰退。找出翻修性能的变化规律, 是十分必要的。随着国内军用发动机翻修次数的增多和使用寿命的提高, 性能衰退的问题将会越来越突出。

一、翻修性能衰退的统计分析

引起发动机翻修性能变化的因素很多, 这就使得具体某一台经过使用和翻修后的发动机性能变化具有一定的随机性, 但从统计的观点来看也必然具有规律性。为此, 我们录取了 500 台次不同翻修次数的发动机台架试车数据, 建立了数据库。

一般来说, 发动机几何尺寸调整可使部件之间的匹配关系重新组合。所以不仅要比较各次翻修的 F (推力)、 $sf c$ (燃油消耗率), 而且还应考虑发动机的其它参数和条件的异同, 然后进行综合评定。根据对双转子发动机台架验收

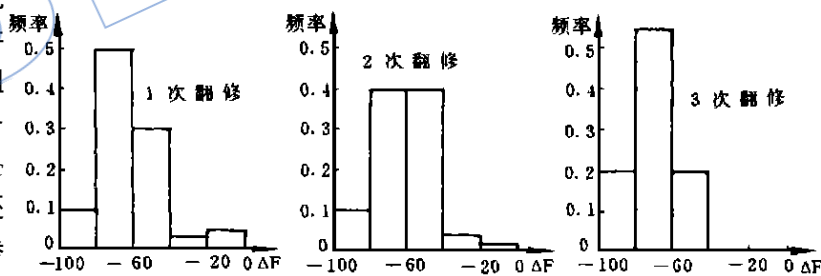


图1 频率 (频数/每台) 分布直方图

的分析可选择台架主要验收性能参数 ΔF 、 $\Delta sf c$ 、 T_3 、 T_4 、 ΔS 和全加力余气系数 ALF 进行分析。 ΔF 和 $\Delta sf c$ 分别是推力、油耗与其验收曲线的上限的差值, ΔS 是转差距转差验收曲线下限的差值。直接用这些性能参数进行分析可以消除换算转速 N_{1HS} 对性能的影响。图 1 列出了中间状态不同翻修次数推力差 ΔF 的频率分布图。同样也可以得出 $\Delta sf c$ 、 T_4 、 T_3 、 ΔS 等性能参数的频率分布情况。从频率分布来看, 性能参数母体服从正态分布的可能性较大。概率纸检验和 χ^2 检验的结果说明了这一点。表 1 中列出了最大状态和中间状态性能参数的均值。

表 1 不同状态性能参数的均值

	参 数	$\overline{\mu_{DF}}$	$\overline{\mu_{sc}}$	$\overline{\mu_{T3}^*}$	$\overline{\mu_{T4}^*}$	$\overline{\mu_{DS}}$	$\overline{\mu_{ALF}}$
最大	一次翻修	- 32	- 0.082	968.6	704.6	16.6	1.3701
	二次翻修	- 33	- 0.0818	974.7	703.2	13.1	1.3643
	三次翻修	- 50	- 0.0633	971.7	701.4	15.2	1.3520
中间	一次翻修	- 54	- 0.0276	985.6	712.9	16.5	
	二次翻修	- 59	- 0.0227	989.5	713.3	13.2	
	三次翻修	- 71	- 0.0171	978.5	724.7	15.2	

比较各翻修次数下的性能参数均值, 可以得出各性能参数随翻修次数的变化规律。从表 1 中的数据可以看出, 随着翻修次数增加, 最大状态下, 余气系数有降低趋势, 排气温度略有下降, 油耗增加, 推力减小; 中间状态, 推力减小, 油耗增加, T_4 增加, 转差的变化是不大的。这在一定程度上表现出了发动机的性能衰退。为了定量的综合考虑发动机的性能衰退, 根据多目标决策理论, 引入了总体性能指数的概念。

设发动机性能矩阵为 $[Z] = [Z_1 \ Z_2 \ Z_3 \ \dots \ Z_n]$, 其中, k_1 个性能参数希望尽量大 (如 F), k_2 个性能参数希望尽量小 (如 T_3 、 T_4 、 sfc), k_3 个性能参数希望尽量适中 (如 ΔS 、 ALF)。对于这些目标 Z_i , 分别给以一定的功效系数 (即评分) d_i , d_i 是在 $[0, 1]$ 之间的某一个数。当目标达到最满意时, 取

$d_i = 1$; 当最差时取 $d_i = 0$ 。根据对发动机性能验收标准的分析可以得出 $d_i = 0$ 和 $d_i = 1$ 时的 Z 值, 即性能 Z_i 的上下限。通常可用验收曲线的上下边界或一定数量发动机台架性能统计的极值作为性能的上下限。描述 d_i 与 Z_i 之间

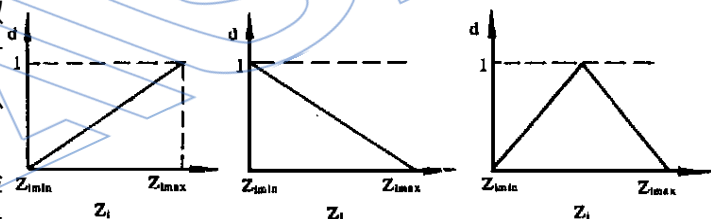


图 2 功效函数模型

的关系称为功效函数。由于性能参数的上下限之间的距离较小, 所以根据小偏差理论功效函数近似考虑为线性函数。功效函数一般有三种 (图 2)。

有了功效函数以后, 对每个性能参数都可对应为相应的功效函数。性能参数可转换为功效系数, 对每一台发动机各主要状态的全部性能参数所对应的功效系数。用它的算术加权平均值

$$D = (r_1 d_1 + r_2 d_2 + \dots + r_n d_n) / n \quad (1)$$

式中 $r_1, r_2, \dots, r_n$ 为各种性能参数的加权系数, 他们可由小偏差法或发动机稳态程序算出。显然 D 越大越好。 $D = 1$ 时发动机的总体性能最佳, 反之 $D = 0$ 为最差。我们不妨称 D 为发动机总体性能指数。

对于全部 500 多台发动机子样, 不同翻修次数的发动机总体性能指数均值的估计值

$$E(D) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \cdot E(d_i) \quad (2)$$

其中 $d_i = C_1 (Z_i - C_2) + C_3$, C_1, C_2, C_3 为常数, 由功效函数确定。

所以

$$\begin{aligned} E(D) &= -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \cdot E[C_1(Z_i - C_2) + C_3] \\ &= -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [r_i \cdot C_1 \cdot E(Z_i) - r_i \cdot C_1 \cdot C_2 + r_i \cdot C_3] \\ &= -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [r_i \cdot C_1 \cdot \bar{Z}_i - r_i \cdot C_1 \cdot C_2 + r_i \cdot C_3] \end{aligned} \tag{3}$$

由上面的分析很容易得知，总体性能指数与发动机台架性能参数之间存在线性关系。所以可推知总体性能指数也是正态分布，其均值可由上式算得，结果见表 2。

表 2 总体性能指数均值的估算值

	参 数	df	dfs_c	$dt3$	$dt4$	dds	$dalf$	D
最	一次翻修	0.68	0.41	0.52	0.41	0.81	0.53	0.55
	二次翻修	0.69	0.41	0.44	0.42	0.94	0.51	0.53
	三次翻修	0.50	0.32	0.48	0.43	0.91	0.47	0.49
中	一次翻修	0.46	0.55	0.49	0.42			0.47
	二次翻修	0.41	0.45	0.43	0.42			0.43
间	三次翻修	0.29	0.34	0.60	0.30			0.36

由表 2 中的总体性能指数的均值看出，随着翻修次数的增加，发动机在各个状态下的总体性能指数的均值是减小的。它表明总体性能指数的均值反映了各翻修次数下发动机性能的整体衰退程度。

二、数学模型及其预测

1 数学模型 由于翻修发动机的性能是以翻修次数为时间序列，并考虑到目前大多数发动机翻修次数较少，所以采用指数平滑预测模型。根据计算和分析，我们采用了二次曲线趋势指数平滑预测模型，即为

$$D(T+L) = a + bL + cL^2, \quad L = 1, 2, \dots \tag{4}$$

式中， T 为当前时期， L 为预测长度， a 、 b 、 c 值计算如下：

$$a = 3S'(T) - 3S''(T) + S'''(T)$$

$$b = Q [(6 - 5Q)S'(T) - 2(5 - 4Q)S''(T) + (4 - 3Q)S'''(T)] / [2(1 - Q)(1 - Q)]$$

$$c = Q \times Q / [(1 - Q)(1 - Q)] \cdot [S'(T) - 2S''(T) + S'''(T)]$$

$S'(t)$ 、 $S''(t)$ 、 $S'''(t)$ 为各翻修次数的总体性能指数 $D(1)$ 、 $D(2)$ 、...、 $D(T)$ 的一、二、三次指数平滑值。 Q 为加权系数，一般取 0.01~ 0.3。

一次指数平滑值的计算公式为：

$$S'(t) = QD(t) + (1 - Q)S'(t - 1) \quad t = 1, 2, 3, \dots, T$$

二次指数平滑值的计算公式为：

$$S''(t) = QS'(t) + (1 - Q)S''(t - 1) \quad t = 1, 2, 3, \dots, T$$

三次指数平滑值的计算公式为：

$$S'''(t) = QS''(t) + (1 - Q)S'''(t - 1) \quad t = 1, 2, 3, \dots, T$$

2 预测分析 由预测理论可知, 当用于预测的数据较少时, 应取较大的加权系数。所以在以下分析中试给加权系数 $Q = 0.3$, 并根据实际参数的具体情况试给适当的初值。对每次翻修发动机不同状态下的总体性能进行预测, 并给出了不同翻修次数的总体性能指数的预测值、预测误差和模拟均方差, 结果见表 3。

表 3 总体性能指数的预测值、预测误差和模拟均方差

最大状态							
预测模型: $D_Y(T+L) = 0.489 - 0.099L - 0.0009L^2$							
模拟均方差: $S = 0.087$ 初值 $S_{01} = S_{02} = S_{03} = 0.57$							
翻修次数	1	2	3	4	5	6	7
总体性能指数 D	0.550	0.530	0.490	(0.40)			
预测值 D_Y				0.389	0.288	0.185	0.080
中间状态							
预测模型: $D_Y(T+L) = 0.358 - 0.097L - 0.001L^2$							
模拟均方差: $S = 0.073$ 初值 $S_{01} = S_{02} = S_{03} = 0.50$							
翻修次数	1	2	3	4	5	6	7
总体性能指数 D	0.470	0.430	0.360	(0.28)			
预测值 D_Y				0.260	0.159	0.057	- 0.048

依据概率论的分析可知, 对预测值 D_Y 而言, 置信水平为 $100(1 - \alpha)\%$ 的预测区间为

$$D_Y \pm t_{\alpha/2}(N - 2)P(T + L) \quad (5)$$

其中 $N = T$, $P^2(T + L) = P(T) \left[1 + 1/N + (X_o - X) / \sum_{i=1}^N (X_i - X) \right]^2$, $P^2(T) = \sum_{i=1}^n (D(i) - D_Y(i))^2 / (N - 2)$, $t_{\alpha/2}(N - 2)$ 可通过查 t 分布表求得, $X = (1 + 2 + \dots + T) / T$

取置信水平 95% 时, 第四次翻修总体性能指数的预测区间在最大力状态和中间状态分别为 $0.0109 < D < 0.669$ 和 $0.094 < D < 0.426$ 。

为了验证预测模型的精度, 用仅有的一台第四次翻修的性能进行了检验, 见表 3 中带括号的数据。可见其总体性能指数均值在预测区间内。与预测值的相对误差小于 7%, 从而验证了数学模型和预测方法的可靠。

三 结 论

1 对既有随机性又有规律性, 且为多参量的发动机翻修性能的衰退问题, 采用统计和综合分析的方法进行分析是必要的和可行的。在此基础上建立的预测模型与实际情况较为吻合。

2 由初步分析可以看出翻修后发动机的整体性能衰退是明显的。从预测的结果可以看出, 第四次翻修后 (即寿命可到 500 小时) 各状态发动机的性能均能满足要求。但预测区间的下边界已接近。在以后的翻修中应进采取进一步措施, 如喷涂、化学清洗等。

3 由于目前只有第三次翻修的发动机, 数据还不十分充足, 有待进一步完善。

distortion, the vortex size must be measured. It is defined classically by velocity correlation and more directly than by total pressure. Some typical results are shown in a table. The vortex size is increased by the flow velocity. At 1D section the vortex size of torus with 20 degree slanted cut is about two times larger than the size of 90 degree torus quadrant. But at 3D section the former decreases and the later increases slightly.

EXERGY ANALYSIS OF AEROENGINE AND ITS SIGNIFICANCE

Li Ruhui and Qiu Xiaomei

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT An exergy analysis method of an aeroengine is presented and compared with the traditional energy analysis method. The significance of the exergy analysis for the aeroengine engineering is considered. It must be underlined that the main part of the energy loss in the aeroengine comes out of the combustor. Therefore, to enhance of the exergy efficiency of the combustor is an essential measure to improve aeroengine performance.

STATISTICAL ANALYSIS AND PREDICTION OF AEROENGINE DETERIORATION

Li Jia and Tao Zengyuan

(Air Force Engineering College, Xian 710038)

ABSTRACT An aeroengine deteriorates in the course of its service. Although its performance may be restored to some extent after overhaul, it goes down gradually in general. Based on the statistical information analysis of the test-bed performance decay of 500 engines after 0 to 3 overhauls, a concept of an overall performance index is proposed to reflect the overall performance of the engine. According to this concept, a mathematical model of the engine deterioration is presented which is established by means of the exponential smoothing theory. The prediction of the engine deterioration has been made which is quite consistent with the practice. The final analysis shows that it is necessary and also feasible to adopt the method of statistical and synthetic analysis for the overall engine performance decay of both randomness and regularity and, what is more, with many parameters.

A DIRECT-PROBLEM CALCULATION METHOD FOR GAS TURBINES WITH BOWED AND TWISTED BLADES

Wang Zhongqi, Yang Hong, Liu Fengjun, Huang Yinghong, Feng Guotai

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150006)

ABSTRACT The necessity of the direct-problem calculation in aerodynamic design of gas turbines with bowed and twisted blades is discussed and a practical direct-problem calculation program is developed for the S_2 stream surface transonic flow in a multi-stage gas turbine. In the calculation, the shape of the mean S_2 stream surface is taken as that of the blade mean camber surface which is modified properly to guarantee a reasonable S_2 stream surface shape, and the circulation is specified by the stream surface shape and the axial velocity. In the supersonic region, the density is corrected by means of the artificial compressibility treatment to make the calculation stable and the velocity is solved by density.