

文章编号: 1000-8055(2007)05-0792-05

某型涡扇发动机部件老化对性能影响的分析与计算

王占学¹, 刘增文¹, 叶新农²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 海军航空兵驻西安航空发动机(有限)公司军事代表室, 西安 710089)

摘 要: 详细分析了部件老化对发动机性能影响的机理. 利用所能得到的统计数据, 基于部件匹配技术, 通过将考虑部件老化影响的部件特性嵌入到发动机稳态性能计算模型中, 建立了考虑部件老化的发动机性能计算模型, 采用 Newton Raphson 迭代收敛技术求解非线性方程组, 获得考虑部件老化影响的发动机性能. 以某型涡扇发动机为例, 定量地计算分析了部件老化对发动机性能的影响, 计算结果和发动机实际试车数据对比具有较好的一致性, 表明本文发展的方法是合理的.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 涡扇发动机; 部件老化; 性能损失

中图分类号: V 231.9

文献标识码: A

Effect of component deterioration on turbofan engine performance

WANG Zhan-xue¹, LIU Zeng-wen¹, YE Xin-nong²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Representative office of Navy Aviation

Army in Xi'an Aeroengin(group) Ltd, Xi'an 710089, China)

Abstract: The effect of component deterioration on engine performance is considerable. This influence can not be easily computed with normal engine steady performance computer program. A new mathematical method and computer program were developed to accurately compute the effect of component deterioration on engine performance. First, the mechanisms of the effect of component deterioration on engine performance were analyzed; then, statistical method was used to calculate this influence. Taking a turbofan engine as an example, the effect of component deterioration on engine performance, such as specific fuel consumption and temperature at turbine inlet was computed with this method, and compared with experimental data. The results indicate that the mathematical model in this paper can be used to compute the effect of component deterioration on engine performance.

Key words: aerospace propulsion system; turbofan engine; component deterioration; performance loss

发动机部件老化对涡扇发动机性能影响的研究, 最早是由美国 NASA 对高涵道比涡扇发动机 CF6 和 JT9D 进行的^[1,2]. 其研究的初衷是希望通

过对部件老化程度的检查, 确定随着飞行循环数的增加, 发动机各部件老化引起发动机性能降低多少, 这样就可以确定返修的最佳时间, 既不因过

早维修使维修成本过高,也不因维修过迟使飞行性能降低太多.经过 20 多年的研究,国外在这方面已经取得了大量的研究成果.但是,由于部件老化对发动机性能的影响不直观,不易通过试验测量,而必须通过对大量的在役发动机的使用情况进行跟踪,通过统计的方法来确定,因此,开展发动机部件老化对性能影响的研究涉及面广、周期长,因此,在国内关于这一方面的研究报道很少.本文在这方面做了一定的尝试,在统计国内和国外发动机数据的基础上,从理论上进行了发动机部件老化对发动机性能影响机理的详细分析,并建立了相应的数学模型,以某型涡扇发动机为例,定量地计算出飞行一定的循环数后的性能损失值,并和试验数据进行了对比,计算结果和实验数据具有相当好的一致性.

1 部件老化对发动机性能影响的机理

发动机部件性能老化起源于各种各样的原因^[3,4],包括气路腐蚀、由于磨损造成密封间隙的增加、动叶和静叶外型及表面光洁度的变化.一般地,这些变化是由于腐蚀、外物损伤以及某些部件的修理引起.为了更清楚地说明问题,下面以高压压气机部件的老化为例,从中可详细地了解发动机性能老化的原因.

造成高压压气机性能损失的三大原因可归纳为:(1) 转子叶片叶尖间隙的变化;(2) 翼型表面粗糙度的变化;(3) 翼型外型腐蚀.

(1) 转子叶片叶尖间隙的变化:顶端间隙变化主要是由于:①飞机/发动机不稳定工作使在可磨损的摩擦带中形成槽道;②摩擦带的腐蚀;③叶片变短.当发动机使用时间较短时,在叶片上和摩擦带都不会发生腐蚀现象.但是,在发动机设计时,允许配合有预定的摩擦,这样就在叶片和摩擦带之间形成一个槽道.使用的中期,尽管由于摩擦对槽道深度的影响变小,致使槽道相对深度减小,但是由于叶片和叶片顶端前后的壁面开始出现腐蚀现象,叶片和壁面间隙有所增加.使用较长的时期,叶片腐蚀和槽道腐蚀占据主要地位,进一步的腐蚀,使叶片变短,壁面腐蚀也到了槽道消失的程度,总的间隙进一步增加.

(2) 表面粗糙度:由于凹坑和尘物堆积,叶片表面光洁度发生变化.普惠公司对某发动机新的和用过的部件进行测量.根据测量结果看,超过

2 000 飞行循环,不能观察到表面粗糙度变化的趋势,而在 2 000 飞行循环以内,表面粗糙度是迅速增加的.同时,也注意到,表面粗糙度对翼型损失的影响是作为翼型弦长和雷诺数的函数,随着粗糙度/弦长的增加,表面粗糙度对翼型损失的影响增大,而随着雷诺数增大,表面粗糙度对翼型损失的影响减小.

(3) 翼型腐蚀:高压压气机转子叶片翼型沿弦长的腐蚀主要发生在靠近轮缘 50% 的表面,而在靠近轮毂 50% 的表面,翼型腐蚀很少.而且静子叶片和转子叶片腐蚀情况有所不同,高压压气机静子叶片在较少的飞行循环数时,翼型腐蚀基本不会造成叶片外形损失,只在较多的飞行循环数时,这种影响才会出现.从统计 JT9D 发动机数据看出,只是在大于 5 400 飞行循环数时,静子叶片腐蚀才会发生,而转子叶片始终存在腐蚀的现象,所以可以得出这样的结论,在一定的飞行循环数内,静子叶片腐蚀不是压气机性能老化的主要原因,转子叶片外型腐蚀才是引起性能老化的主要原因.

上面分析了间隙、表面粗糙度、翼型腐蚀分别对压气机性能的影响,若要确定三者对压气机性能总的影 响,必须把三者结合起来综合考虑.通过把上述三项对效率、质量流量影响的统计数据叠加在一起,可以建立完整的性能老化分析模型,三者对压气机性能的共同影响见表 1,同时表 2 给出各项在不同时期对总性能的影响趋势.在较少的飞行循环数,大部分性能损失是由于摩擦带而引起;飞行循环数多时,翼型腐蚀对性能的影响亦相当重要.例如在 6 000 飞行循环数,由于老化引起的效率降低约为 9.4%,而间隙变化占据了效率降低(9.4%) 的 61%,翼型外型腐蚀占据 36%.

表 1 部件老化引起的高压压气机性能损失
Table 1 Effect of component deterioration on high pressure compressor performance

循环数	流量损失/ %	效率损失/ %
1 000	1. 30	1. 35
2 000	2. 50	2. 00
3 000	3. 70	3. 00
4 000	5. 63	4. 00
5 000	8. 75	5. 75
6 000	13. 75	9. 40

表 2 各项损失对总的性能损失的贡献

Table 2 Estimated overall performance loss for high pressure compressor

时间/h	循环数	总效率 损失/ %	叶尖间隙		表面 光洁度/ %	叶片外形 腐蚀/ %
			摩擦带磨损/ %	叶片长度损失/ %		
3 500	1 000	1. 35	70	13	17	0
12 250	3 500	3. 40	62	28	7	3
21 000	6 000	9. 40	36	25	3	36

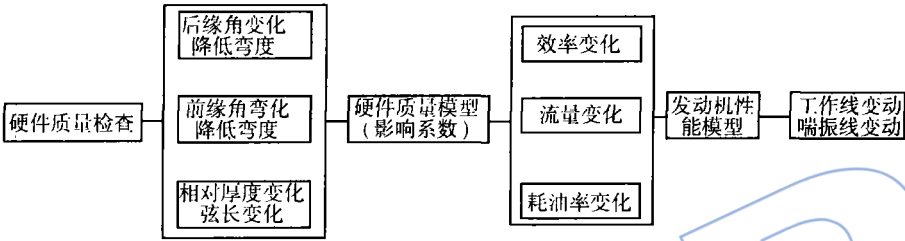


图 1 发动机部件老化对性能影响的计算模型

Fig. 1 Computational model of effect of component deterioration on engine performance

从上述的分析可以看出,对压气机性能的影响是由三者的共同作用,不是单独由某一项作用引起的,只是在不同的飞行循环数,各项影响的程度不同,在进行总的性能损失计算时,必须把三者结合在一起考虑。

2 数学模型和计算结果分析

通过分析,作者认为考虑部件老化对性能影响的模型如图 1 所示。但是,在国内,不可能得到多的发动机制造厂给出的影响系数,因此,为了保证计算程序的准确性,本文对某型国产化发动机部件老化对效率和质量流量的影响进行了统计,并发展了针对此国产化发动机部件老化引起性能损失的计算程序,计算部件老化引起的该发动机的性能损失。

本文基于部件匹配技术,通过保持发动机部件间的动量守恒(功率平衡)、流量连续和能量守恒,建立描述涡轮发动机工作的非线性方程组^[5]。假定若干初始参数(根据不同的发动机结构确定),基于牛顿-拉姆森(Newton-Raphson)的迭代技术求解非线性方程组,直到得到使所有误差都接近于零(小于某个微小值)的那一组数据,即可得到发动机的平衡工作点。

将本文提出的如图 1 所示的发动机部件老化对性能影响的计算模型嵌入到发动机性能计算模

型中,对风扇、高压压气机、燃烧室、高低压涡轮等易损部件的特性进行老化修正,如对部件效率、流通流量等的修正,用修正后的压气机特性参数重新进行平衡工作点的计算,即可得出老化后的发动机共同工作线,见流程图 2。

根据建立的计算部件老化对发动机性能影响的计算模型,本文以某型国产化涡扇发动机为例进行了部件老化对发动机性能影响的计算分析。图 3 和图 4 表示了发动机推力一定的前提下,燃油消耗率(SFC)和涡轮前温度(T_4^*)随使用时间的变化,图 5、图 6 表示了发动机推力一定的前提下,燃油消耗率、涡轮前温度相对新发动机的燃油消耗率、涡轮前温度的差值随使用时间的变化。可以明显看出,随着发动机使用时间的增加,由于发动机部件的老化,发动机的燃油消耗率、涡轮前温度增加。图中还给出了从某发动机生产、修配厂得到的该涡扇发动机试验测试数据,可以看出,计算结果和试验数据比较吻合。说明本文发展的计算部件老化对发动机性能影响的方法和程序是可靠的。这里需要强调的是,返厂发动机试车时推力是确定的,为保证计算和实测数据的对比基准一致,因此数值计算时也是通过调整推力和试车推力一致,对比耗油率和涡轮前温度的变化。另外,试车得到的发动机涡轮前温度是通过测量涡轮出口温度并根据生产厂专用计算程序得到的。

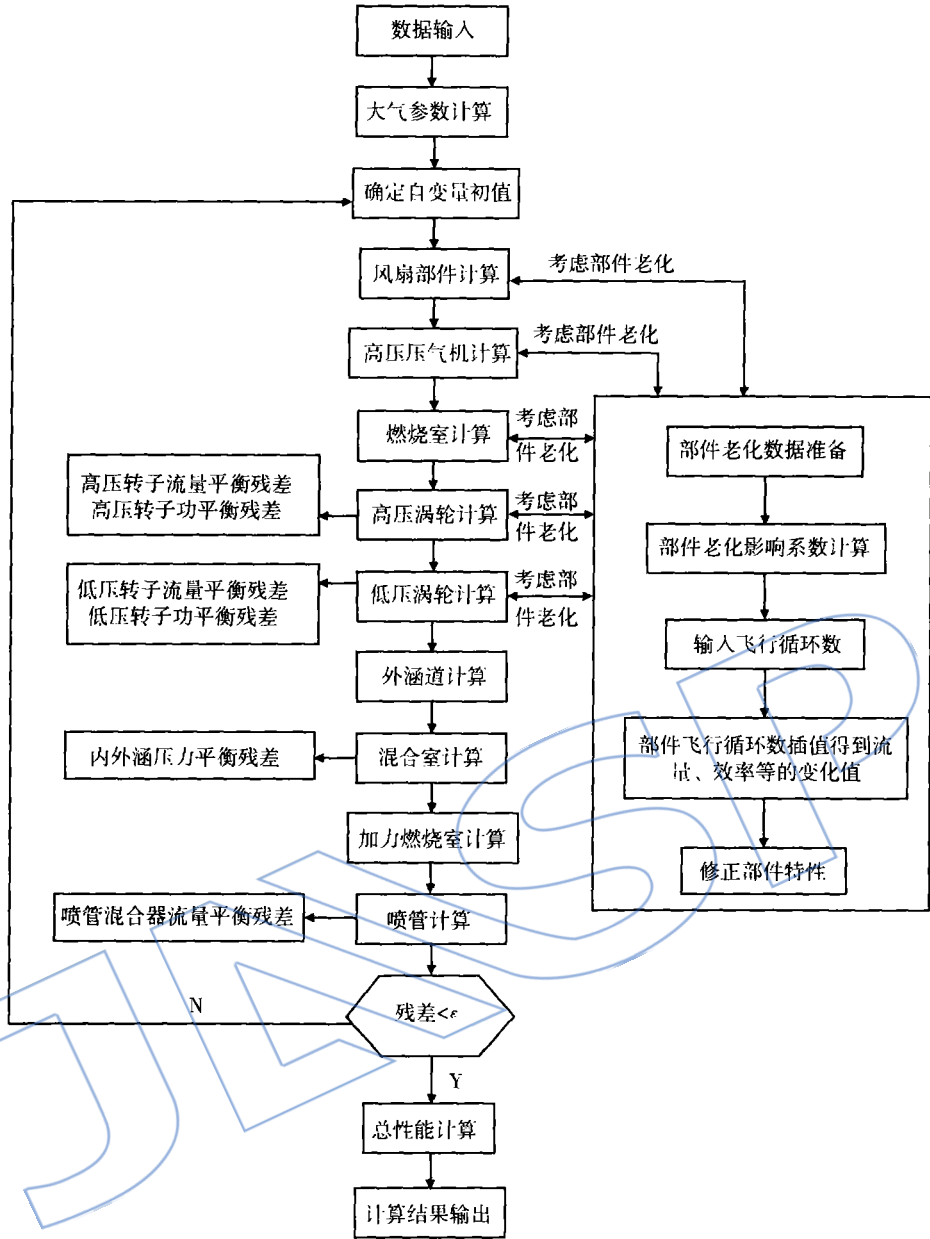


图 2 考虑部件老化的发动机性能计算流程图

Fig. 2 Computational flow chart of effect of component deterioration on engine performance

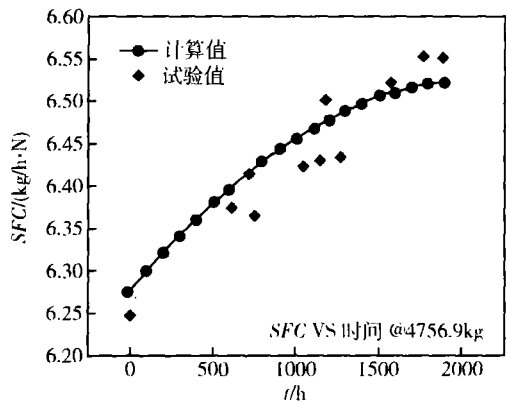


图 3 SFC 随发动机使用时间的变化
Fig. 3 SFC as a function of engine age

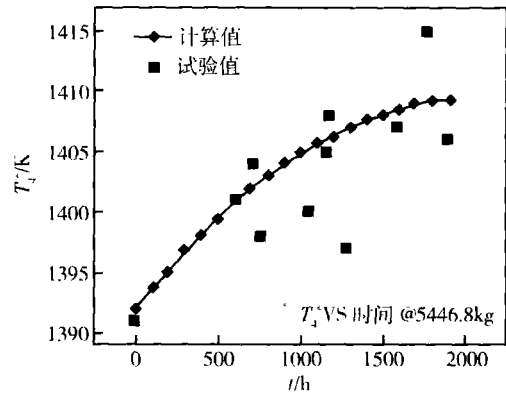


图 4 T₄^{*} 随发动机使用时间的变化
Fig. 4 T₄^{*} as a function of engine age

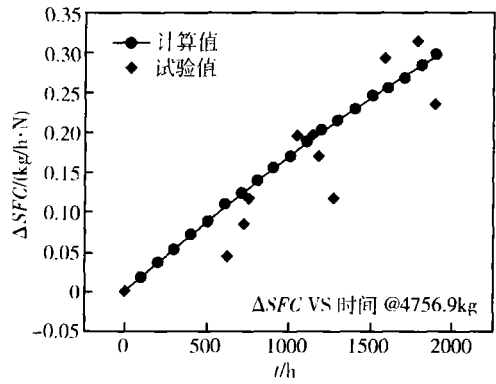


图 5 SFC 的增加值随发动机使用时间的变化

Fig.5 SFC deterioration trends as a function of engine age

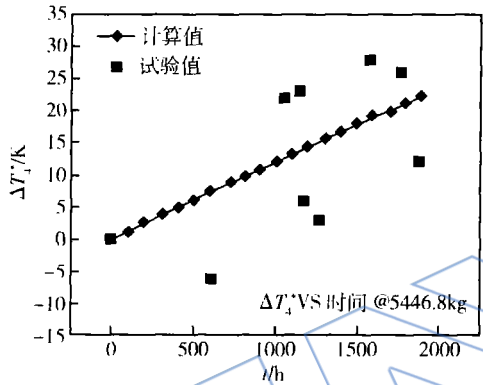


图 6 T_4^* 的增加值随发动机使用时间的变化

Fig. 6 T_4^* deterioration trends as a function of engine age

3 结 论

(1) 本文通过对某型发动机使用寿命期内生产、维修过程性能的统计,将部件老化的影响以影响系数的方式对部件特性进行修正;

(2) 将修正后的部件特性重新嵌入到发动机性能计算模型中,基于部件匹配技术,建立描述发动机工作的非线性方程组,通过 Newton Raphson 迭代技术,得到了考虑部件老化的发动机性能;

(3) 基于本文建立的考虑部件老化对发动机性能影响的模型和软件,对某型涡扇发动机部件老化对性能的影响进行了计算分析,并与实际发动机试车数据进行了对比分析,表明本文给出的计算模型和方法具有较好的工程计算精度.

参考文献:

[1] Wulf R H. CF6 jet engine performance deterioration[R]. AIAA 79-1233.

[2] Richardson J H, Sallee G P. Causes of high pressure compressor deterioration in service[R]. AIAA 79 1234.

[3] Fasching W A. CF6 jet engine performance improvement summary report[R]. NASA CR-165612. 1982.

[4] Broede J. Statistical correlations for analysis and prediction of turbine engine component life usage[R]. AIAA 2001-3754.

[5] 叶新农. 军用单元体发动机维修与使用寿命研究不稳定因子[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.