某发动机涡轮叶片使用寿命可靠性分析

王大伟 苗学问 洪 杰

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 发动机的载荷谱是发动机结构寿命研究的依据. 利用某短寿命发动机的开车数据,对其高压涡轮叶片使用寿命进行了预测. 建立了发动机等效寿命消耗计算模型,采用数据压缩处理技术,有效地提取了发动机的工作载荷. 根据发动机短使用寿命这一特点,用威布尔分布模型描述此发动机涡轮叶片寿命分布,建立了发动机寿命可靠性模型,采用不完全寿命数据的中位秩法对发动机叶片寿命进行可靠性计算. 随着可靠性增长,发动机寿命不断提高,考虑样本的时效性,用动态的威布尔分布模型来描述此发动机可靠性的增长,以便发动机在研制过程中的可靠性评估.

关 键 词: 蠕变寿命; 低循环疲劳; 中位秩; 威布尔分布; 可靠性

中图分类号: TB 114

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)08-0903-05

Reliability lifetime analysis of the turbine blade of turbofan engine

Wang Dawei Miao Xuewen Hong Jie

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The loading spectrum is the foundation on which the life analysis of the aeroengine structure is discussed. The life usage consumption of turbine operating blade of some typical missile turbofan engine was predicted by working data processing. The life consumption models was established on which the working data was processed and the loading spectrum of the aeroengine was gained. Distribution of life consumption of the blade was discussed by the Weibull distribution model, and based on which reliability anglicizing models was established. The reliability methods of calculating the usage life by using the middle rank of incomplete life data in the statistical field were introduced. The life of the engine gradually develops with the increases of the reliability growth. Considering the time effect of the sample, the dynamic Weibull distribution model embodies the reliability growth of this engine. The analytical methods were used to estimate the engine's reliability at research stage.

Key words: creep life; LCF; middle rank; Weibull distribution; reliability

数据压缩处理是发动机载荷数据处理的基本技术,它包括峰谷值检测、无效幅值去除、雨流计数等过程. 通过数据压缩处理,得到发动机涡轮叶片使用载荷,再通过高压涡轮叶片寿命计算模型计算叶片等效寿命消耗. 对高压涡轮叶片寿命消耗主要考虑的是蠕变寿命和低循环疲劳寿命,叶片的蠕变寿命取决于其在材料蠕变范围内的所有温度下的工作时间. 叶片的低循环疲劳寿命是由作用其上的主循环及次循环的次数和程度决定的. 按照线性累积损伤理论,在寿命计算分析中对蠕变寿命和低循环疲劳寿命采用线性叠加方法等效. 短寿命发动机的寿命只有十几个小时,对其定寿比较困难,低循环疲劳对其寿命的损耗是寿命消耗的主要因素[1].

威布尔分布是可靠性理论中较复杂的一种分布,它有 3 个参数,对各种类型的试验数据拟合能力强. 一般情况,威布尔分布能很好地描述零件的寿命问题. 高压涡轮叶片,是此短寿命发动机的关

收稿日期: 2005-10-18

作者简介: 王大伟(1975-),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士生, wangdawei@ sjp. buaa. edu. cn.

键件,它的寿命决定了整个发动机的寿命,叶片的寿命分布可以用威布尔分布来分析. 根据发动机等效寿命消耗数据,采用不完全数据的中位秩法进行参数估计,利用威布尔概率坐标纸,编写威布尔参数估计程序进行三参数线性回归拟合,然后根据发动机叶片故障概率密度函数进行可靠度和可靠寿命计算. 随着发动机可靠性的增长,用动态的威布尔模型来描述发动机的寿命.

1 数据压缩处理

发动机使用载荷谱由与发动机载荷相关的各种参数所构成,如高压涡轮叶片的载荷参数主要由转速和温度构成. 通过对发动机使用载荷的数据处理,可以得到整机和零部件的工作过程和状态,这是发动机结构强度、寿命、可靠性分析的载荷依据.

对使用寿命消耗有决定性影响的是发动机的转速和在各高温环境下的持续工作时间. 数据处理包括峰谷值检测、无效幅值去除和雨流计数.

峰谷值检测采用三点法,即 3 个相邻采样点数值比较法,这种方法处理速度比较快.

在工程上,为减少数据量往往把对构件疲劳寿命损伤不大的次小循环的峰谷值去掉,使记录的峰谷值点数大大减少,这就是无效幅值去除. 对于发动机转速这种高均值偏态波型,可选用下述公式来定义次小循环:

$$D_{\min} = (P_{V_{\max}} - P_{V_{\min}}) \times \Delta\% \qquad (1)$$

式中,$D_{\min}$为次小循环幅值门槛值;$P_{V_{\max}}$为载荷参数最大值;$P_{V_{\min}}$为载荷参数最小值;$\Delta\%$ 为经验给定的百分数. 无效幅值去除采用“最短航道法”进行.

雨流计数的主要功能是把经过峰谷值检测、无效幅值去除后的实测载荷历程以载荷循环的形式表示出来,雨流计数就是载荷根据材料的应力-应变迟滞回线进行循环计数的. 雨流计数的详细规则见文献[2],数据处理的具体应用程序可见文献[3].

2 叶片等效寿命消耗

2.1 等效寿命

叶片寿命主要考虑的是低循环疲劳和蠕变寿命消耗,根据线性累积损伤理论,无论是疲劳还是蠕变,都是一种能量损伤的形式,可以累加. 设发动机在标准状态下工作的低循环疲劳寿命为 N 次,在标准状态下工作的持久寿命为 S 小时,虽然二者单位不同,但它们对材料的损伤程度是等价的,也就是说,一次标准低循环疲劳寿命 = 标准状态蠕变寿命 S/N 小时. 根据这个等价原理,可以把低循环疲劳寿命消耗等价地折合成蠕变寿命消耗.

对应不同温度下的蠕变寿命消耗,根据累积损伤等效原理,也可以折合成标准状态下的蠕变寿命消耗,这样折合后的寿命就成为等效寿命.

2.2 蠕变和低循环疲劳寿命计算

蠕变是材料在一定温度下经受持续载荷所产生的变形. 工作温度和在该温度下持续的时间是 2 个最重要的参量. 蠕变寿命消耗计算式为

$$D_{\mathrm{c}} = \sum \frac{s_i}{S_i} \qquad i = 1,2,3,\cdots \qquad (2)$$

式中,D_{c} 为某工况下的蠕变损伤;s_i 为某工况下的实际工作时间;S_i 为某工况下的材料持久寿命.

一般来说,每次开车都只有一个 0—最大—0 的主循环,其他都是循环谷值和均值都不为 0 的次循环,而依赖预计寿命消耗的材料应力-寿命曲线只适用于脉动或对称循环,因此寿命计算时需将这些次循环按照 Goodman 图转换成脉动循环. 然后根据线性累积损伤理论,每个应力循环对材料造成的损伤可以累加,即

$$D_{\mathrm{f}} = \sum \frac{n_i}{N_i} \qquad i = 1,2,3,\cdots \qquad (3)$$

式中,D_{f} 为给定载荷水平下的循环疲劳损伤;n_i 为给定载荷水平下的实际消耗的循环数;N_i 为给定载荷水平下的疲劳寿命.

根据低循环疲劳与蠕变寿命的等效关系,把低循环疲劳寿命消耗等效转换成以时间为单位的蠕变寿命消耗,然后将与时间无关的疲劳损伤和与时间相关的蠕变损伤相加得到叶片的总寿命消耗.

2.3 短寿命发动机的寿命

此短寿命发动机实际工作时间很少,也就在十几个小时范围内,出厂前试车调试过程对发动机寿命的消耗占很大的比例,发动机总寿命包括地面开车寿命和空中飞行寿命 2 部分.

根据累积损伤等效原理,将低循环疲劳寿命消耗等效成标准状态下蠕变寿命消耗,这样,总寿命消耗统一以时间为单位,为发动机寿命可靠性分析提供寿命数据. 计算结果如表 1 所示. 其发动机共 6 台,按发动机编号排列,3 台发动机故障,3 台发动机试验中止.

表 1　发动机工作时间及状态

序号	发动机编号	等效寿命/h	状况
1	S11	44.5	–
2	S12	28.6	–
3	S13	29.8	故障
4	S14	36.6	故障
5	S15	23.1	–
6	S16	24.3	故障

3　叶片寿命可靠性分析

3.1　威布尔分布及概率坐标纸

此发动机设计使用寿命仅为十几个小时,为短寿命发动机. 此短使用寿命发动机按照设计准则设计出来,并对零件、部件和组件进行了不同种类和数量的试验验证,因此,必定有一个最小保证使用寿命,即安全寿命,同时由于材料、工况、装配等诸多因素的影响会使寿命分布较为分散. 综合各方面因素用威布尔分布来描述此短寿命发动机涡轮叶片的寿命分布是比较合理的.

威布尔分布是可靠性理论中较复杂的一种分布,它有 3 个参数,对各种类型的试验数据拟合能力强. 威布尔分布的概率密度函数为

$$f(x)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{x-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1}\mathrm{e}^{-\left(\frac{x-t_0}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{4}$$

式中,β 为形状参数,影响威布尔分布曲线的形状,也叫威布尔斜率;η 为尺度参数,当输入变量为寿命时,也叫特征寿命;t_0 为位置参数,影响威布尔分布曲线的水平位置,也叫最小保证寿命.

威布尔分布的累积分布函数为

$$F(x)=1-\mathrm{e}^{-\left(\frac{x-t_0}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{5}$$

当输入变量为寿命时,则它表示累积故障概率.

威布尔概率纸又称为威布尔画图纸,简记为 WPP. 当 $t_0=0$ 时,用 $X=\ln x$ 为横坐标,$Y=\ln\ln\frac{1}{1-F(x)}$ 为纵坐标,可以得到在 X-Y 等距离坐标纸上的一条直线方程,它的斜率就是威布尔分布的形状参数 β,截距 $a=-\beta(\ln\eta)$ 是尺度参数 η 的函数. 如果根据子样能大致确定 X-Y 坐标下的一条直线,那么就可以判定这个子样是来自某个威布尔分布总体,于是这个威布尔分布的 2 个未知参数 β 和 η 就可从这条直线上确定[4].

3.2　不完全寿命数据处理

对于一组不完全寿命数据,由于其中那些尚未发生故障而中途停止试验的样本,什么时间发生故障无法预计,因此就不能直接使用平均秩或近似中位秩公式计算. 但可以根据故障样本和中止样本的总顺序号,估计出新的顺序号,这个新的顺序号被称为调整秩,然后用调整秩计算近似中位秩.

对于有中止项的试验数据,考虑到中止项对故障结果的影响,通常给出调整级的一般公式[5]

$$\text{级增量}\ \Delta A_k=\frac{(N+1)-\text{前一级调整秩数}\ A_{k-1}}{1+\text{计算级所在的倒数位置数}}$$

式中 N 为试验件的总数,包括发生故障的和试验中止而被挂起的部件,则可得到新的调整秩

$$A_k=A_{k-1}+\Delta A_k$$

有了新的调整秩 A_k,就可以代入近似中位秩公式(6)(见文献[6])计算得到不完全寿命数据的近似中位秩.

$$F_n(t_k)=\frac{A_k-0.3}{N+0.4} \tag{6}$$

应用计算出来的中位秩和故障时间,在威布尔坐标纸上拟合一条直线,它的斜率就是威布尔分布的形状参数 β,失效概率 $F(t)=63.2\%$ 所对应的寿命就是威布尔分布的特征寿命参数 η. 把表 1 寿命数据按故障时间由低到高的顺序排列,然后根据不完全数据中位秩的计算方法计算出调整后的调整秩,结果如表 2 所示.

例如计算 S13 发动机中位秩:

$$\text{S13 发动机的级增量}=\frac{(6+1)-1.17}{1+3}=1.46$$

式中,6 为发动机总数,无论是否发生故障;1.17 为以前调整级秩数;3 为计算项 S13 所在的倒数位置数.

因此 S13 发动机的调整秩为:1.17+1.46=2.63. S13 发动机的中位秩$=\frac{2.63-0.3}{6+0.4}=36.4\%$

表 2　新的调整秩

序号	发动机编号	等效寿命/h	状况	调整秩	中位秩
1	S15	23.1	–	–	–
2	S16	24.3	故障	1.17	0.136
3	S12	28.6	–	–	–
4	S13	29.8	故障	2.63	0.364
5	S14	36.6	故障	4.09	0.592
6	S11	44.5	–	–	–

3.3　威布尔分析程序

本计算程序使用 LabWindows/CVI 5.5 语言编写,软件的功能采用事件驱动操作,界面以窗体结构为主,根据威布尔概率作标纸的构成,以图形显示故障概率函数的回归直线. 直接输入故障时间与对应的中位秩,回归直线是以最小二乘法拟合的. 威布尔分布的参数在界面直接显示,如图 1 所示.

本计算程序分 3 部分,第 1 部分是数据输入部分,输入的是寿命及其对应的中位秩,输入点直

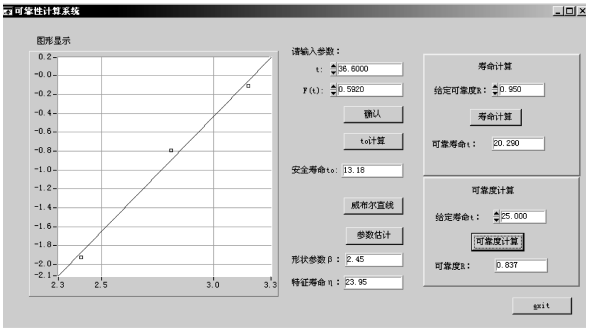


图1 威布尔分析程序界面

接显示在图形上;第2部分是参数估计,先根据经验公式估算出 t_0,然后根据二参数威布尔分布计算出形状参数 β 和特征寿命 η;第3部分是寿命及可靠度计算,根据分布参数的估计,可绘出发动机寿命分布模型,同时计算发动机在给定可靠度下的寿命,也可以计算发动机在工作了一定寿命下的可靠度.

威布尔概率纸是在 $t_0=0$ 情况下构造出来的,当 $t_0\neq 0$ 时,所做出的直线是弯曲的. 因此需要把曲线直线化. 根据参考文献[6]确定 t_0 的方法有经验公式

$$t_0 = t_2 - \frac{(t_3 - t_2)(t_2 - t_1)}{(t_3 - t_2) - (t_2 - t_1)} \tag{7}$$

式中,t_1 为首次故障时间;t_3 为最后一次故障时间;t_2 为 t_1 与 t_3 对应在纵轴上连线中点相对应的故障时间.

3.4 参数估计及可靠性分析

首先根据经验公式计算最小保证寿命

$$t_0 = 13.18$$

通过最小二乘拟合得到形状参数和特征寿命分别为

$$\beta = 2.45$$

$$\eta = 23.95$$

因此,发动机高压涡轮叶片寿命的概率密度函数为

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t - t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta}} =$$

$$0.1023\left(\frac{t - 13.18}{23.95}\right)^{1.45} e^{-\left(\frac{t-13.18}{23.95}\right)^{2.45}}$$

发动机的叶片寿命概率密度曲线可用图2表示.

根据威布尔分布的累积故障概率函数(简称故障概率)得到发动机工作时间 t 后的可靠度为

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{8}$$

例如计算发动机在等效寿命消耗25 h后的可靠度为

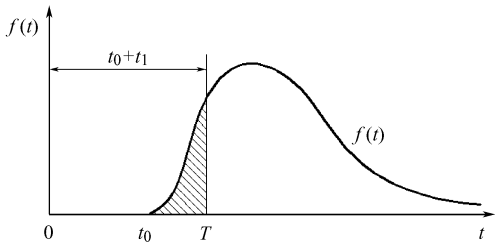


图2 叶片寿命可靠性示意图

$$R(25) = e^{-\left(\frac{25-13.18}{23.95}\right)^{2.45}} = 83.7\%$$

同样,如果给定可靠度 R,可靠寿命为

$$t_R = t_0 + \eta(-\ln R)^{\frac{1}{\beta}} \tag{9}$$

例如给定可靠度,计算可靠寿命为

$$t_{0.95} = 13.18 + 23.95 \times$$

$$(-\ln 0.95)^{\frac{1}{2.45}} = 20.3(\text{h})$$

如图2所示,$f(t)$ 是发动机高压涡轮叶片寿命的概率密度函数,图中阴影部分表示发动机可能发生故障的区域;T 是发动机实际等效工作时间,此时发动机的可靠度是由 T 和曲线的分布参数所决定的.

4 动态威布尔分布模型

随着研制过程的发展,发动机不断改进,寿命不断增大,发生故障的发动机越来越少. 不同时期的发动机有不同的可靠性模型,后期的发动机和前期的相比,寿命及可靠性要高得多. 寿命分布的位置和形状也不断变化,这就需要用动态的威布尔分布模型来描述此发动机的寿命.

高压涡轮叶片经表面处理提高其强度以后,发动机的寿命分布也随之跟着改变,寿命提高,曲线整体向右移动,但由于试车条件的变化,寿命曲线的形状也发生变化,希望的是曲线分布范围不要太大,那样的发动机不经济又不利于定寿,因此,以后的发动机寿命长而分布又集中是最好的.

发动机可靠性参数常用平均故障间隔时间 T_{BF} 评定,可靠性增长的杜安模型表达式为:$T_{BF}(t)=\frac{1}{a}t^m$,m 表示增长率. 设发动机在研制过程中的安全寿命按照杜安曲线增长,发动机动态威布尔模型如图3所示,其中安全寿命的增长率 $m=0.5$.

当取定时间 $t=t_0$ 时,发动机寿命 X_{t0} 的概率密度函数为 $f(x;t_0)$,当 t 取遍 0,1,2,…时,相应的概率密度 $f(x;0)$,$f(x;1)$,$f(x;2)$,…形成一族概率分布,记为 $\{f(x;t),t=0,1,2,\cdots\}$. 每一时刻发动机对应的寿命分布是此时发动机的截口分

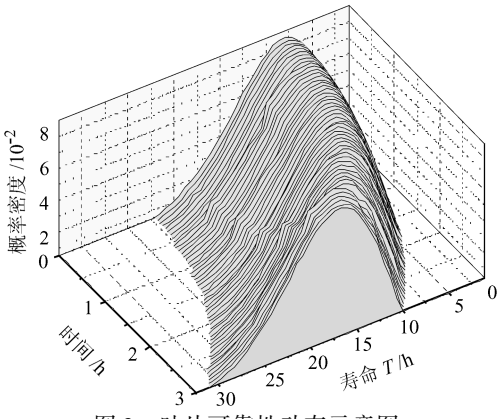


图 3　叶片可靠性动态示意图

布. 随着可靠性的增长,样本的故障时间普遍增长,从故障样本的时效性考虑,样本值增大,安全寿命 t_0 提高,形状参数 β 和特征寿命 η 也需要根据样本的分散度作修正[7].

5　结 束 语

本文根据短寿命发动机的特点,通过对发动机的实测数据进行压缩处理,计算高压涡轮叶片蠕变寿命和低循环疲劳寿命消耗. 采用不完全数据的中位秩法,通过威布尔分析计算程序对寿命的分布参数进行估计,得到了发动机叶片故障概率密度函数,对寿命和可靠度进行计算,用动态威布尔分布模型来描述发动机可靠性的增长. 同时说明用威布尔分布进行寿命可靠性分析是方便可行的,能够实时地反映出发动机的研制情况,这给发动机在研制过程中的可靠性评估提供了理论依据.

参考文献 (References)

[1] Choukairi F F, Barrault J. Use of a statisical approach to verity the cumulative damage laws in fatigue[J]. Int J Fatigue,1993

[2] 高镇同. 疲劳可靠性[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000
Gao Zhentong. Fatigue and reliability [M]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2000(in Chinese)

[3] 宋兆泓. 发动机寿命研究[M]. 北京:航空工业出版社,1987
Song Zhaohong. Life analysis for aeroengine[M]. Beijing: Aviation Industry Press,1987(in Chinese)

[4] Chou P C,Harry Miller. Maximun likelibood estimation of a two segment weibull distribution for fatigue life [R]. ADTM STP1981,1981

[5] Abernethy R B. 威布尔分析手册[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1992
Abernethy R B. Weibull analysis handbook[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,1992(in Chinese)

[6] 孔瑞莲. 航空发动机可靠性工程[M]. 北京:航空工业出版社,1995.
Kong Ruilian. Reliability engineering for aeroengine[M]. Beijing:Aviation Industry Press,1995(in Chinese)

[7] Misra K B. Relibility analysis and prediction[M]. Amsterdam: Elsevier,1992

(责任编辑:娄　嘉)