

文章编号: 1000-8055(2009)04-0804-06

涡轮盘低循环疲劳寿命的概率分析

高 阳¹, 白广忱¹, 张瑛莉²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 贵州航空发动机研究所, 平坝 561102)

摘 要: 疲劳寿命呈现异方差特性, 其标准差随弹性应变幅和塑性应变幅的减小而增大, 因此在 Manson-Coffin 公式中引入标准正态变量 μ 和线性标准差 σ_e, σ_p , 将 $\varepsilon-N$ 曲线参数表示为标准正态变量 μ 的函数, 建立了低循环疲劳寿命的概率模型. 针对某涡轮盘材料, 在低循环疲劳试验数据的基础上应用异方差回归分析方法获得了概率模型的参数, 应用该模型对涡轮盘销钉孔的低循环疲劳寿命进行了 Monte-Carlo 数值模拟, 获得了寿命的概率分布. 得到可靠度 0.998 7 的概率寿命与轮盘技术寿命相一致, 相对误差仅为 4%. 该模型参数均来自疲劳试验数据的统计分析, 寿命预测精度高, 具有较好的工程应用前景.

关 键 词: 涡轮盘; 低循环疲劳; 异方差回归分析; 蒙特卡洛法; 可靠性

中图分类号: V231.95

文献标识码: A

Probability analysis for the low cycle fatigue life of a turbine disk

GAO Yang¹, BAI Guang-chen¹, ZHANG Ying-li²

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Guizhou Aeroengine Research Institute, Pingba 561102, China)

Abstract: The standard deviation of fatigue life increases with reduction of elasticity and plasticity strain components. A standard normal random variable μ and linear standard deviations σ_e and σ_p were introduced into Manson-Coffin equation, so the probabilistic model of fatigue life was established, in which four parameters were expressed as the functions of μ . The parameters of the probabilistic model were obtained by the heteroscedastic regression analysis method based on the low cycle fatigue (LCF) test data, the fatigue life probability analysis for the pinhole of a disk was achieved by this model, and the distribution of the fatigue life of the pinhole was obtained. The results show that the life with the reliability of 0.9987 is well consistent with the technical life of the disk based on test evaluation. This model is suitable for engineering application with its good precision.

Key words: turbine disk; low cycle fatigue; heteroscedastic regression analysis; Monte-Carlo method; reliability

随着现代高性能、高推重比航空发动机的发展, 涡轮盘承受的应力水平大幅度提高, 危险部位已经存在较大的塑性变形, 低循环疲劳失效是其

主要失效模式, 并且疲劳寿命具有较大的分散性, 因此涡轮盘低循环疲劳寿命的概率分析在发动机可靠性设计中有着重要的意义.

收稿日期: 2008-04-09; **修订日期:** 2008-06-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (2006AA04Z405)

作者简介: 高阳 (1979 -), 男, 河北衡水人, 博士生, 主要从事发动机结构疲劳可靠性、机构可靠性仿真方面研究.

E-mail: buaagy@sina.com

从 $P-E-N$ 角度研究低循环疲劳寿命的概率特性,把循环应变作为常值,研究一定循环应变下的疲劳寿命的分布.而涡轮盘结构的循环应变受到转速、温度、密度、几何尺寸等随机因素的影响,具有一定的分散性,会导致寿命分散性增大^[1].针对轮盘低循环疲劳寿命的概率分析方法通常在随机有限元分析的基础上,假定疲劳性能参数服从某种分布,利用 Hosmer-Lemeshow 方法^[2]或数值模拟方法^[3-4]进行疲劳寿命分析.这种方法由于假设疲劳性能参数的分布类型,均值和标准差等,因此离实际工程应用还存在一定的差距,并且随机变量是否相互独立也会影响分析的精度.唐俊星等人针对以上问题发展了一种概率寿命模型,引入两个相关随机变量将 Mason-Coffin 公式随机化,并在某涡轮盘低循环疲劳寿命可靠性研究中得到了应用^[5-6],但是该模型中假设疲劳寿命标准差为常数,在分析中存在一定的误差,因为大量的疲劳试验研究发现疲劳寿命呈现异方差特性^[7-8],对数寿命的标准差随弹性应变幅 $\Delta\varepsilon$ 和塑性应变幅 $\Delta\varepsilon_p$ 的减小而增大,并且理论上可以证明对数寿命的标准差随对数弹性应变幅和对数塑性应变幅呈线性变化.

本文考虑了疲劳寿命的线性异方差特性,引入线性标准差 σ , σ_p 和标准正态变量 μ 将 Mason-Coffin 公式随机化,建立了疲劳寿命的概率模型,模型中的系数 σ'/E , ε' 和指数 b , c 均表示为标准正态变量 μ 的函数;并在 250 °C 下涡轮盘材料 GH4133 的低循环疲劳试验数据的基础上,应用线性异方差回归分析方法,得到了概率模型中四个参数的随机表达式.为了验证模型精度,结合文献[5]中某涡轮盘销钉孔危险点的循环应变拟和公式,对涡轮盘进行了疲劳寿命概率分析,获得了寿命的概率分布,并得到了可靠度 0.998 7 的概率寿命与轮盘技术寿命相吻合.本文方法不同于常规方法,没有假设疲劳性能参数的分布形式分散系数,并且考虑了疲劳寿命的异方差特性,由试验数据的统计分析确定模型参数,概率寿命预测精度高,更具有工程实用价值.

1 低循环疲劳寿命概率模型

低循环疲劳寿命分析中最常用的是 Mason-Coffin 公式

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon' (2N_f)^c \quad (1)$$

其中 $\Delta\varepsilon$, $\Delta\varepsilon_p$, σ' , E , b , ε' , c 分别为弹性应变

幅、塑性应变幅、疲劳强度系数、弹性模量、疲劳强度指数、疲劳塑性系数和疲劳塑性指数. Mason-Coffin 公式的核心是在双对数坐标内,疲劳寿命分别与弹性应变幅和塑性应变幅呈线性关系.确定性 Mason-Coffin 公式仅表示了疲劳寿命均值与循环应变之间的关系,为了描述疲劳寿命的分散性,需要将 Mason-Coffin 公式随机化,建立概率模型.常规方法假设疲劳性能参数 σ' , b , ε' , c 为正态分布或某种已知分布形式的随机变量,这种假设缺乏理论依据,并且一般也没有给出确定变量均值、标准差的方法,因此工程实际应用存在一定的困难.

1.1 疲劳寿命概率模型

大量疲劳试验数据已经证实对数疲劳寿命遵循正态分布.根据 Mason-Coffin 公式弹、塑性线中对数疲劳寿命分别表示为

$$\lg(2N_f) = \frac{1}{b} \lg\left(\frac{\Delta\varepsilon}{2}\right) - \frac{1}{b} \lg\left(\frac{\sigma'}{E}\right) \quad (2)$$

$$\lg(2N_f) = \frac{1}{c} \lg\left(\frac{\Delta\varepsilon}{2}\right) - \frac{1}{c} \lg(\varepsilon') \quad (3)$$

为了方便概率模型的推导,令 $y_e = \lg(2N_f)$, $x_e = \lg(\Delta\varepsilon/2)$, $a_e = -\lg(\sigma'/E)/b$, $b_e = 1/b$ 可得弹性线的标准线性方程

$$y_e = a_e + b_e x_e \quad (4)$$

同样令 $y_p = \lg(2N_f)$, $x_p = \lg(\Delta\varepsilon_p/2)$, $a_p = -\lg(\varepsilon')/c$, $b_p = 1/c$ 可得到塑性线的标准线性方程

$$y_p = a_p + b_p x_p \quad (5)$$

概率模型中将系数 a_e , b_e , a_p , b_p 均视为随机变量.假设 σ , σ_p 分别为对数寿命 y_e , y_p 的标准差,则可以将 y_e , y_p 表示为随机变量的形式

$$y_e = \bar{a}_e + \bar{b}_e x_e + \mu\sigma_e \quad (6)$$

$$y_p = \bar{a}_p + \bar{b}_p x_p + \mu\sigma_p \quad (7)$$

其中 $\bar{a}_e$, $\bar{b}_e$, $\bar{a}_p$, $\bar{b}_p$ 分别为 a_e , b_e , a_p , b_p 的均值; μ 为标准正态随机变量.如果标准差 σ , σ_p 为常数,则可以得到 b_e , b_p 为常数,而 a_e , a_p 为正态随机变量

$$a_e = \bar{a}_e + \mu\sigma_e \quad (8)$$

$$a_p = \bar{a}_p + \mu\sigma_p \quad (9)$$

进一步可以得到与文献[1]相同的概率模型,指数 b , c 为常数,参数 σ'/E 和 ε' 满足

$$\lg\left(\frac{\sigma'}{E}\right) = -\frac{\bar{a}_e + \mu\sigma_e}{b_e} \quad (10)$$

$$\lg(\varepsilon') = -\frac{\bar{a}_p + \mu\sigma_p}{b_p} \quad (11)$$

可以看出假设疲劳寿命对数标准差为常数的情况

下,系数 $\alpha'/E, \varepsilon'$ 均为对数正态随机变量.

然而大量疲劳试验数据显示对数寿命 y_e, y_p 的分散性随 $\Delta\varepsilon_e$ 和 $\Delta\varepsilon_p$ 的减小而增大;理论上也可以证明对数寿命的标准差随对数弹性应变幅和对数塑性应变幅呈线性变化,因此 α 和 σ 可表示为^[8]

$$\alpha_e(x_e) = \alpha_{e0} [1 + \theta_e (x_e - x_{e0})]$$

(12)

$$\sigma_p(x_p) = \sigma_{p0} [1 + \theta_p (x_p - x_{p0})]$$

(13)

其中 α_{e0}, σ_{p0} 分别表示对数寿命 y_e, y_p 在对数应变幅 x_{e0}, x_{p0} 处的标准差; θ_e, θ_p 分别表示 α_e, σ_p 线性变化的斜率. 对于弹性线,将式(12)代入式(6)得到

$$y_e = \bar{a}_e + \alpha_{e0} (1 - \theta_e x_{e0}) \mu + (\bar{b}_e + \alpha_{e0} \theta_e \mu) x_e$$

(14)

则有 a_e, b_e 均为正态随机变量

$$a_e = \bar{a}_e + \alpha_{e0} (1 - \theta_e x_{e0}) \mu$$

(15)

$$b_e = \bar{b}_e + \alpha_{e0} \theta_e \mu$$

(16)

因此可以得到弹性线的系数和指数的随机变量表达式分别为

$$\lg\left(\frac{\sigma'}{E}\right) = -\frac{\bar{a}_e + \alpha_{e0} (1 - \theta_e x_{e0}) \mu}{\bar{b}_e + \alpha_{e0} \theta_e \mu}$$

(17)

$$b = \frac{1}{\bar{b}_e + \alpha_{e0} \theta_e \mu}$$

(18)

塑性线与弹性线具有相同形式的均值和标准差方程,同理可得,塑性线的系数和指数为

$$\lg(\varepsilon') = -\frac{\bar{a}_p + \alpha_{p0} (1 - \theta_p x_{p0}) \mu}{\bar{b}_p + \alpha_{p0} \theta_p \mu}$$

(19)

$$c = \frac{1}{\bar{b}_p + \alpha_{p0} \theta_p \mu}$$

(20)

式(17)~(20)中的参数 $\bar{a}_e, \bar{b}_e, \alpha_{e0}, \theta_e, x_{e0}, \bar{a}_p, \bar{b}_p, \alpha_{p0}, \theta_p, x_{p0}$ 均可由疲劳试验数据的线性异方差回归分析获得,得到 Mason-Coffin 公式中的 4 个参数的随机变量表示,建立了低循环疲劳寿命的异方差概率模型,模型中将系数 $\sigma'/E, \varepsilon'$ 和指数 b, c 均作为随机变量,没有事先假定其分布形式,而将其表示为标准正态变量 μ 的函数. 对应一定的疲劳寿命分布概率 P, μ 取确定值,因此可以得到一组对应的参数,这一组参数确定了概率 P 下的应变-寿命关系. 从 4 个参数的表达式可以看出,它们并不符合正态分布或对数正态分布,指数 b 和 c 的倒数为正态变量,而系数 $\sigma'/E, \varepsilon'$ 的分布形式则较为复杂.

1.2 概率模型参数的确定

某航空发动机一级涡轮盘,材料为 GH4133, 轮盘与轴之间由销钉连接,销钉孔是轮盘上的薄

弱环节,容易出现低循环疲劳裂纹. 涡轮盘工作中,销钉孔温度基本保持在 250 ℃,为了分析涡轮盘销钉孔的低循环疲劳可靠性,根据 250 ℃下 GH4133 材料的低循环疲劳试验数据^[9],如表 1 所示,建立疲劳寿命的异方差概率模型.

表 1 GH4133 低循环疲劳试验数据

Table 1 LCF test data of GH4133

试件数	$\Delta\varepsilon_e/2$	$\Delta\varepsilon_p/2$	$\Delta\varepsilon_f/2$	$2N_f$
1	0.00421	0.00402	0.00019	15900
2	0.00418	0.00395	0.00023	12500
3	0.00425	0.00401	0.00024	22546
4	0.00425	0.00405	0.00020	19050
5	0.00424	0.00405	0.00019	9984
6	0.00485	0.00442	0.00043	11724
7	0.00481	0.00440	0.00041	9338
8	0.00484	0.00445	0.00039	10154
9	0.00481	0.00431	0.00050	10862
10	0.00481	0.00434	0.00047	10836
11	0.00544	0.00467	0.00077	6674
12	0.00540	0.00474	0.00066	7198
13	0.00543	0.00468	0.00075	7906
14	0.00545	0.00462	0.00083	10266
15	0.00538	0.00466	0.00072	9598
16	0.00697	0.00533	0.00164	4690
17	0.00699	0.00515	0.00184	2752
18	0.00695	0.00527	0.00168	3368
19	0.00701	0.00518	0.00183	3674
20	0.00692	0.00524	0.00168	3334

试验数据中 $\Delta\varepsilon_e, \Delta\varepsilon_p$ 都呈随机变化,导致数据呈散点状,给材料疲劳寿命的统计造成了一定的困难. 异方差回归分析方法,对数据要求不高,能够将各个应变水平下的散点数据作为一个整体进行统计分析,充分地利用数据的横向信息. 在试件数一定的时候可以提高分析精度,在精度相同的情况下能够大量节约试件,因此具有显著的工程意义^[8]. 应用线性异方差回归方法,对表 1 数据进行统计分析,以确定疲劳寿命概率模型中的相关参数. 具体算法可参考文献[7-8],这里不再赘述. 得到弹、塑性线的均值标准线性方程和对数寿命标准差为

$$y_e = - 8.9696 - 5.5038 x_e \quad (21)$$
$$y_p = 1.6281 - 0.7085 x_p \quad (22)$$
$$\sigma_e(x_e) = 0.1057[1 - 0.9499(x_e + 2.3415)] \quad (23)$$
$$\sigma_p(x_p) = 0.1105[1 - 0.3536(x_p + 3.2320)] \quad (24)$$

进而根据式(17)~(20)得到概率模型的参数表达式

$$\lg\left(\frac{\sigma'}{E}\right) = \frac{- 8.9697 - 0.12936\mu}{5.5038 + 0.10038\mu} \quad (25)$$
$$b = \frac{- 1}{5.5038 + 0.10038\mu} \quad (26)$$
$$\lg(\sigma'_f) = \frac{1.6281 - 0.01580\mu}{0.7085 + 0.03908\mu} \quad (27)$$
$$c = \frac{- 1}{0.7085 + 0.03908\mu} \quad (28)$$

1.3 非对称循环的修正

以上得到的式(25)~(28)是对称循环即应变比为 - 1 时, GH4133 材料的疲劳参数随机表达式. 而涡轮盘危险点的应变循环为非对称循环, 应变比约为 0.35^[5], 预测寿命时需要修正平均应力 σ_m 的影响. 同时考虑到应变比大于 0, 具有降低疲劳寿命分散性的作用^[10], 其对数寿命标准差小于对称循环的对数寿命标准差, 因此, 通过在对称循环概率模型中添加 Morrow 修正项^[5-6]来修正平均应力对寿命均值的影响, 以对称循环的对数寿命标准差代替非对称循环的对数寿命标准差, 得到修正的涡轮盘概率寿命模型

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \left[\frac{\sigma'_f}{E} - \frac{\sigma_m}{E} \right] (2 N_f)^b + \sigma'_f (2 N_f)^c \quad (29)$$

虽然该模型分散性偏大, 但是进行可靠性设计分析时能够得到偏于安全的可靠性寿命, 对于缺少非对称循环试验数据的情况, 在工程应用上仍然不失为一种有效的修正模型.

2 涡轮盘低循环疲劳寿命概率分析

为了验证本文提出的异方差概率模型, 对涡轮盘进行低循环疲劳寿命概率分析时, 直接采用了文献[5]中通过响应面方法拟和得到的涡轮盘销钉孔危险点的循环应变函数

$$\Delta \varepsilon = 1.297913 \times 10^{-5} \omega - 2.018947 \times 10^{-7} T^2 - 3.567047 \times 10^{-11} E \omega - 2.352948 \times 10^{-8} \omega T \quad (30)$$

其中 ω 为轮盘最大转速, E 为弹性模量, T 为模拟销钉过盈配合量的虚拟温度. 应用异方差概率模型进行可靠性分析时的随机变量如表 2 所示.

表 2 随机变量表

Table 2 Variables in reliability analysis

变量	均值	标准差
ω (rad/ s)	1331	4.4
E / GPa	199	9.57
T / °C	86	14
μ	0	1

分析采用 Monte-Carlo 数值模拟方法, 对表 2 中的变量进行 10 万次随机抽样, 然后由式(30)计算得到循环应变幅, 由式(25)~(28)得到寿命模型中的参数, 最后代入式(29)计算疲劳寿命, 其中平均应力 σ_m 取其均值 310 MPa^[6], 得到疲劳寿命的 10 万次数值模拟. 绘制了疲劳寿命的直方图, 如图 1 所示, 横坐标为疲劳寿命, 纵坐标为数值模拟次数, 可以看出寿命呈明显的偏态分布. 进一步统计分析, 得到了对应一定可靠度的疲劳寿命, 并与文献[5]的计算结果及轮盘寿命试验评估结果进行了对比, 如表 3 所示.

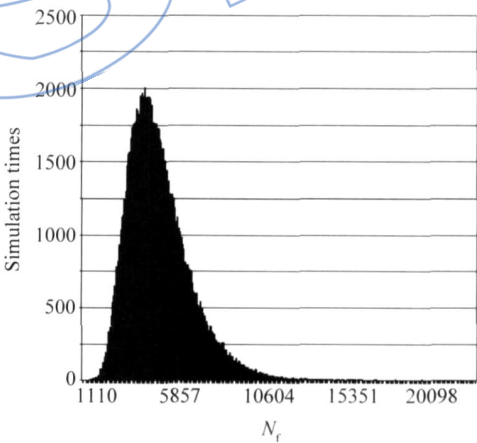


图 1 疲劳寿命直方图

Fig.1 Distribution of the fatigue life

表 3 涡轮盘销钉孔的可靠度寿命

Table 3 LCF reliability life of the turbine disk

可靠度 R	N_f	N_f in reference [5]
0.9987	2110	1885
0.5	5265	4733
0.0013	14743	12335
最大概率密度	4512	4250
轮盘试验寿命	4725	4395
轮盘技术寿命	2198	

在循环应变响应和结构随机变量的分布均相同的情况下,本文分析结果与文献[5]比较接近,相对误差在10%左右,本文得到的各可靠度水平的疲劳寿命均大于文献[5],主要原因是试验数据的差异,本文建立模型所采用的试验数据在3个应变水平上的平均寿命大于文献[5]的试验结果,所以本文的预测寿命在整体上较文献[5]结果偏大.本文得到的可靠度0.0013的寿命与可靠度0.9987的寿命之比为6.987,而文献[5]为6.544.这主要是由于本文考虑了疲劳寿命的异方差特性,而文献[5]基于同方差分析,在试验应变范围的低应变水平(0.0045左右)得到的对数寿命标准差估计值偏小,所以其寿命分散性较小.文献[11]在涡轮盘试验基础上,由疲劳寿命分散系数法得到置信度0.95,可靠度0.9987的轮盘技术寿命为2198次循环,与本文数值模拟得到的可靠度0.9987的寿命2110次循环相吻合,二者相对误差为4%;另外本文得到的最大概率寿命为4512次循环,与涡轮盘试验寿命4725和4395次循环的相对误差分别为4.5%和2.7%.可以认为两个轮盘试验寿命比较接近该涡轮盘的实际最大概率寿命,如果以试验寿命的平均值4560次循环作为最大概率寿命的估计值,则本文得到的最大概率寿命与之吻合,相对误差为1.1%.

对比分析说明本文给出的考虑疲劳寿命异方差特性的概率模型,能够较好的反映疲劳寿命分散性,并且异方差概率模型的参数均由试验数据的统计分析获得,更适合结构可靠性分析的工程应用,具有较高的概率寿命预测精度.

3 结 论

1) 在Manson-Coffin公式中引入标准正态变量和对数寿命的线性标准差,将公式中的4个参数表示为标准正态变量的函数,建立了低循环疲劳寿命的概率模型.该模型不事先假设疲劳性能参数的分布形式,参数都来自对疲劳试验数据的统计分析,更有利于工程实际应用.

2) 应用该模型对某涡轮盘进行了低循环疲劳寿命可靠性分析,得到了轮盘销钉孔的寿命分布及可靠寿命.分析结果与轮盘试验评估结果非常接近,相对误差小于5%,验证了疲劳寿命概率模型的合理性,分析结果能够为实际涡轮盘的疲劳寿命评估提供参考.

3) 对疲劳试验数据的统计分析采用异方差

回归分析方法,将不同应变水平下的试验数据作为整体进行推断,能够充分利用数据的横向信息,对疲劳寿命分散性的估计更准确,因此对概率寿命的预测较一般同方差分析方法精度也会更高.

参考文献:

- [1] 唐俊星, 陆山. 轮盘应变疲劳寿命可靠性分析方法[J]. 推进技术, 2005, 26(4): 344-347.
TANG Junxing, LU Shan. Reliability analysis method for the strain fatigue life of a disk[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(4): 344-347. (in Chinese)
- [2] 陆山, 吕文林. 轮盘低周疲劳寿命可靠性分析新方法[J]. 航空学报, 1997, 18(2): 135-138.
LU Shan, LÜ Wenlin. New method for reliability analysis of discs' LCF life[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(2): 135-138. (in Chinese)
- [3] 钱文学, 尹晓伟, 谢里阳, 等. 轮盘疲劳可靠性分析的Monte-Carlo数字仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 254-256.
QIAN Wenxue, YIN Xiaowei, XIE Liyang, et al. Reliability analysis of disk fatigue life based on Monte-Carlo method[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(2): 254-256. (in Chinese)
- [4] 高阳, 白广忱, 任远. 考虑径向温差的轮盘低循环疲劳可靠性分析[C]// 大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会论文集. 深圳: 中国航空学会, 2007.
GAO Yang, BAI Guangchen, REN Yuan. Low cycle fatigue reliability analysis of turbine disk with temperature difference on radius[C]// Proceedings of 2007 Annual forum of Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Shenzhen: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [5] 鲁华平. 涡轮盘低周疲劳寿命可靠性分析及试验评估[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
LU Huaping. Reliability analysis and experiment evaluation for LCF life of a turbine disk[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)
- [6] 唐俊星, 陆山. 某涡轮盘低循环疲劳概率寿命数值模拟[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 706-710.
TANG Junxing, LU Shan. Numerical simulation of LCF probability life of a turbine disk[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 706-710. (in Chinese)
- [7] 傅惠民. 线性异方差回归分析[J]. 航空学报, 1994, 15(3): 295-302.
FU Huimin. Linear variance regression analysis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1994, 15(3): 295-302. (in Chinese)
- [8] 傅惠民, 刘成瑞. εN 曲线和 $P-\varepsilon N$ 曲线整体推断方法[J]. 航空动力学报, 2006, 21(6): 957-961.
FU Huimin, LIU Chengrui. Integral inference method for εN and $P-\varepsilon N$ curves[J]. Journal of Aerospace Power,

2006, 21 (6) : 957-961. (in Chinese)

[9] 王卫国. 轮盘低循环疲劳寿命预测模型和试验评估方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.

WANG Weiguo. Research on prediction model for disc LFC life and experiment assessment methodology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astro-nautics, 2006. (in Chinese)

[10] 赵永翔, 杨冰, 李朋州. 平均应变对 0Cr18Ni10Ti 管道钢随机应变-疲劳寿命关系的影响规律[J]. 核动力工程, 2005, 26(2) : 153-156.

ZHAO Yongxiang, YANG Bing, LI Pengzhou. Mean strain effects on the random cyclic strain-life relations of 0Cr18Ni10Ti pipe steel [J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(2) : 153-156. (in Chinese)

[11] 龚梦贤, 古远兴, 王旅生. 某型发动机 I 级涡轮盘的技术寿命[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2000, 13(4) :22-26.

GONG Mengxian, GU Yuanxing, WANG Lüheng. Service life of an areoengine ' 1st stage turbine disk [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2000, 13(4) : 22-26. (in Chinese)

