

双重失效模式下民用航空发动机高压涡轮叶片报废特性与可靠性分析

刘 政, 谢 立, 张继君, 龙长江, 江 宽

(珠海保税区摩天宇航空发动机维修有限公司 系统工程部, 广东 珠海 519030)

摘 要: 基于某型民用航空发动机下发后观测涡轮叶片报废状态的双重失效模式, 计算了高压涡轮 (HPT) 叶片由自新使用循环数 (CSN) 引起的报废率。并结合疲劳损伤累积理论, 探究了叶片报废率与失效分布函数之间的关系, 得到了涡轮叶片失效分布与寿命期望的计算方法。基于大量涡轮叶片的观测数据, 拟合出涡轮叶片按 CSN 计的失效分布, 研究发现: 某型民用航空发动机在成熟期内, 第 1 级高压涡轮叶片失效规律服从指数分布, 而第 2 级服从可靠性统计中不常见的指数-指数分布。

关 键 词: 高压涡轮叶片; 双重失效模式; 报废率; 可靠性; 失效分布

中图分类号: V232.4; O213.2

文献标志码: A

Analysis of scrapping characteristics and reliability of civil aero engine high pressure turbine blade in dual failure modes

LIU Zheng, XIE Li, ZHANG Jijun, LONG Changjiang, JIANG Kuan

(System Engineering Department,

MTU Maintenance Zhuhai Company Limited, Zhuhai Guangdong 519030, China)

Abstract: The scrapping rate of high pressure turbine (HPT) blades varying with cycles since new (CSN) was calculated in the dual failure modes, and the scrapping of HPT blades was observed after engine removal from wings. The relationship between scrapping rate and failure distribution of HPT blades was proposed in accordance with the theory of fatigue damage accumulation so that the failure distribution and life expectation of blades was obtained. Based on the proposal above and a large number of HPT blade maintenance data of a type of civil aero engine, the failure distribution function of HPT blades was fitted with CSN increasing. It was found that the failure of the Stage 1 HPT Blades of this type of aero engine was subject to exponential distribution, and the failure of Stage 2 HPT Blades subject to uncommon exponential-exponential distribution in the current reliability statistics.

Key words: high pressure turbine blade; dual failure modes; scrapping rate; reliability; failure distribution

航空发动机涡轮叶片是整台发动机中除限寿件外总价值(数量乘以单件价值)最高的零件。据

某民用航空发动机大修厂内数据统计, 当整机做性能恢复时, 涡轮叶片的新件成本可占有叶片

收稿日期: 2021-01-07

作者简介: 刘政(1991—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事民用航空发动机维护、大修与故障诊断方面的研究。

引用格式: 刘政, 谢立, 张继君, 等. 双重失效模式下民用航空发动机高压涡轮叶片报废特性与可靠性分析[J]. 航空动力学报, 2022, 37(2): 235-240. LIU Zheng, XIE Li, ZHANG Jijun, et al. Analysis of scrapping characteristics and reliability of civil aero engine high pressure turbine blade in dual failure modes[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(2): 235-240.

60%~70%。同时,涡轮叶片损伤为常见的热端部件故障,造成民用发动机下发超过20%的比例,是制约发动机大修时间间隔(mean time between overhaul, MTBO)的主要因素之一。因此,分析涡轮叶片报废率与可靠性,在民航领域成本估算与排发计划具有重要意义。另一方面,确定零件寿命分布是一项需要大量数据的基础性工作^[1]。然而,现有阶段限于我国民用航空发动机市场化进度,在工程应用上鲜有专业的涡轮叶片的报废统计与失效、寿命分布研究^[2]。

不同于通常的Ⅰ型或Ⅱ型截尾试验,本文采样基于真实服役环境下的民用航空发动机不满足在翼性能,下发后被送到大修厂内,然后分解高压涡轮来观测涡轮叶片的可用或报废状态。其中,发动机下发事件即整机失效,为第一重失效;叶片报废为零件失效,为第二重失效,表示涡轮叶片随自新使用时间(time since new, TSN)或自新使用循环数(cycle since new, CSN)的失效与寿命分布属性。当整机与零件双重失效的模式叠加表现在叶片的采样数据上时,其分布不仅依赖于叶片自身的失效特性,同时也包含了发动机下发的分布规律,在典型的发动机下发时间段上能观测到更多的叶片个体。从失效试验角度看,叶片样本数据具有观测时间上的非均匀性随机抽样^[3-4]和不时随机截尾试验的特征;在观测之前,报废叶片的物理状态就已不满足检测标准,即提前失效,但失效时刻未知。

在可靠性寿命试验中,大多数元器件寿命服从指数分布、威布尔分布、对数正态分布和极值分布^[5],以及指数-威布尔分布^[6-7]。在机床、卫星、设备等不定时随机截尾试验方面,罗静等^[8]采用故障总时间法将随机截尾时间转化为加工中心的故障总时间,进行数据分布判断,得到可靠性函数。金颖超^[9]基于异步运行、左截尾的机载设备现场数据,选取最佳寿命分布推断了机载设备的可靠性测度点估计与置信限。贾祥^[10]利用威布尔分布和指数分布下的不等定时截尾数据,对卫星平台的可靠度进行统计推断。熊申辉等^[11]基于随机截尾数据,利用两参数威布尔分布建模方法,分析了某型液压泵的可靠性。王智明等^[12]提出了用Akaike information criterion(AIC)、Bayesian information criterion(BIC)信息准则判断多台数控机床故障间隔时间的分布模型与可靠性指标点估计。李海波等^[13]对服从威布尔分布的随机截尾数

据建立似然方程,给出模型参数的极大似然估计,并基于火箭发动机试车试验数据进行了可靠性评估分析。但以上理论与工程分析,只包含了整机的可靠性评估与单重失效分布,未考虑到双重失效模式下的零部件报废且失效时间未知的情况。

涡轮零件硬件性能预测方面,Giesecke等^[14-15]采用Bayesian belief network(BBN)考虑了在翼循环、叶片材料、使用推力等对CF6-80C2航空发动机涡轮导流叶片、转子叶片的物理性能退化做了预测。但本文所述涡轮叶片数据采样含有双重失效模式特征,目前国外文献也鲜见对此类涡轮叶片报废率直接相关的参考论述。

基于以上原因,本文先提出了双重失效模式下涡轮叶片报废率的计算方法;然后结合疲劳损伤累积理论,明确了叶片报废率的物理意义,建立了与可靠性指标的联系,给出了涡轮叶片的失效分布函数与寿命期望;再利用某民用航发大修厂最近10年以来500多台发动机、每级超过3万片涡轮叶片在同等推力条件下的进厂检测记录,进行某型发动机两级高压涡轮叶片失效分布的确定与模型参数估计;进一步分析涡轮叶片随自新使用循环数的报废特性和失效规律,为研究涡轮叶片的失效、寿命与可靠性提供一般的结论与参考方法。

1 涡轮叶片报废率计算及其与可靠性之间的关系

1.1 涡轮叶片报废率的计算方法

提取涡轮叶片样本的两个主要信息特征,标记为两个标签:叶片被观测时的时间标签 T 和状态标签 S ,并记报废 $S=0$,非报废 $S=1$ 。本文为说明数学模型的思路,涡轮叶片的时间标签只采用了民用航空发动机更为关注的CSN,但仍记为 T 。此处,一个循环是指发动机经历一次完整启停的低周疲劳循环,叶片CSN即为叶片自新至观测时所发生的总低周疲劳循环数。在时间标签的意义下,后文中所涉及的时间变量 T 及变量值 t 均指自新使用循环数,用来表征叶片在翼运行时长。

若由样本获得的二维统计变量 (T, S) ,服从某种二维分布 $F(t, s) = P(T \leq t, S \leq s)$,其中随机变量 T 为连续变量, S 为0~1二项离散变量,则本文所讨论的由CSN引起的、只含有第二重失效的涡轮叶片报废率问题归结为,当某台发动机的涡轮叶片在某一时刻 $T=t$ 进厂检测(后文称为观

测)时,预估此状况下的某级涡轮叶片的报废率,或某一片涡轮叶片的报废概率。表述为数学语言,即求

$$P(S=0|T=t) \quad (1)$$

设当前采集数据的发动机台数为 n ,每台发动机单级涡轮叶片数目为 N_0 ,落在观测区间 $t_1 < T \leq t_2$,状态 $S=0$ 的涡轮叶片数量为 $N(t_1 < T \leq t_2, S=0)$,则有

$$N(t_1 < T \leq t_2, S=0) = [nP(t_1 < T \leq t_2)][N_0P(S=0|t_1 < T \leq t_2)] \quad (2)$$

$$N(t_1 < T \leq t_2, S=0) = [nN_0P(S=0)]P(t_1 < T \leq t_2|S=0) \quad (3)$$

其中 $P(t_1 < T \leq t_2)$ 为全部叶片样本落在观测区间 $t_1 < T \leq t_2$ 的概率。由于涡轮叶片总数正比于发动机台数,因此也为发动机下事件(第一重失效)落在区间 $t_1 < T \leq t_2$ 的概率; $P(t_1 < T \leq t_2|S=0)$ 为报废叶片样本落在观测区间 $t_1 < T \leq t_2$ 的概率; $P(S=0)$ 为叶片报废的平均概率。联立式(2)、式(3),可得

$$\frac{P(S=0|t_1 < T \leq t_2)}{P(S=0)P(t_1 < T \leq t_2|S=0)} = \frac{P(t_1 < T \leq t_2)}{P(t_1 < T \leq t_2)} \quad (4)$$

式(4)实际为贝叶斯公式。若 $P(T \leq t)$ 和 $P(T \leq t|S=0)$ 在 $t > 0$ 上一阶连续可导,则只含有第二重失效、单纯由 T 引起的涡轮叶片报废率

$$P(S=0|T=t) = \frac{P(S=0)p(t|S=0)}{p(t)} \quad (5)$$

其中 $p(t)$, $p(t|S=0)$ 分别为所有叶片、报废叶片在 T 上的概率密度函数,可用双重失效数据进行拟合或参数估计。对于涡轮叶片的平均报废概率,可用下式计算:

$$\begin{aligned} P(S=0) &= P(S=0) \int_0^{+\infty} p(t|S=0)dt = \\ &= \frac{N(T < +\infty, S=0)}{nN_0} = \frac{N(S=0)}{N(S=0) + N(S=1)} \end{aligned} \quad (6)$$

当样本量足够大, $P(S=0)$ 依概率稳定在某常数,记为 P_0 。

根据式(2),落在观测区间 $t_1 < T \leq t_2$ 内的涡轮叶片的平均报废概率为

$$\begin{aligned} P(S=0|t_1 < T \leq t_2) &= \\ &= \frac{N(t_1 < T \leq t_2, S=0)}{nN_0P(t_1 < T \leq t_2)} = \\ &= \frac{N(t_1 < T \leq t_2, S=0)}{N(t_1 < T \leq t_2)} \end{aligned} \quad (7)$$

进一步,在区间 $(t_1, t_2]$ 内取 $t = (t_1 + t_2)/2$,则可得离散的 $P(S=0|T=t)$ 。容易推断,式(5)是式(7)的连续拟合,即用频率来推断概率。因此,实际计算中为避免两次拟合发动机下发分布 $p(t)$ 和报废涡轮叶片分布 $p(t|S=0)$,可以直接对式(7)的离散报废率进行变换分析,判断分布类型。

1.2 涡轮叶片报废率的物理意义及其与可靠性之间的关系

涡轮叶片在服役过程中,裂纹、烧蚀、凹坑等损伤逐渐累积。以疲劳裂纹为例,根据疲劳损伤累积理论,典型疲劳裂纹扩展与时间的 a - T 曲线如图1所示。以某一检查标准 a_{lim} 衡量叶片损伤时,则存在一个叶片寿命 T_b 对应于此标准。在 t 时刻观测某一涡轮叶片,如果叶片的累积损伤 a 超过检查标准 a_{lim} ,该叶片的状态被标记为报废 $S=0$,表明 a_{lim} 对应的寿命 T_b 小于时长 t ,如图1中曲线 $S=0$ 所示。实际上,在厂内检测后、报废涡轮叶片正是因为叶片累积损伤已经超过发动机手册规定的接受标准。反之,叶片损伤未超过检查标准则被标记为 $S=1$,如图1中曲线 $S=1$ 所示。

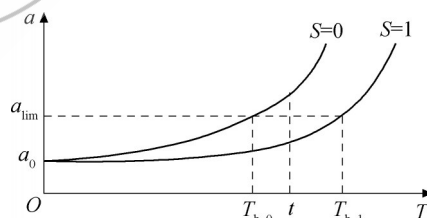


图1 叶片累积损伤曲线与观测时高压涡轮叶片的状态
Fig.1 Curves of fatigue damage accumulation and the status of HPT blades when observed

因此,大修厂内涡轮叶片报废率的物理意义就是该叶片在手册规定的检查标准 a_{lim} 下的实际使用寿命 T_b 不超过时长 t 的概率,表示为

$$P(T_b < t) = P(S=0|T=t) \quad (8)$$

根据可靠性理论^[1],涡轮叶片的失效分布函数

$$F_b(t) = P(T_b < t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} \quad (9)$$

其中 $\lambda(t)$ 为失效率函数,依此可以判断涡轮叶片的失效分布。剔除第一重失效因素,只含有第二重失效的涡轮叶片寿命分布的概率密度函数为

$$p_b(t) = \frac{dF_b(t)}{dt} = \lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} \quad (10)$$

涡轮叶片在该检查标准下的寿命期望

$$\bar{T}_b = \int_0^{+\infty} t p_b(t) dt = \int_0^{+\infty} t \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} dt \quad (11)$$

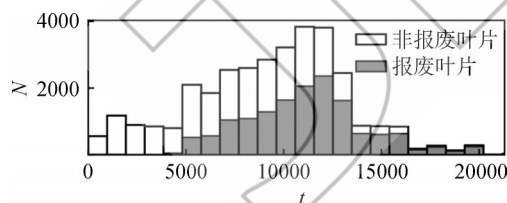
至此,可以根据涡轮叶片的观测数据(T, S),估计出 $P(S=0|T=t)$,结合式(8)、式(9)可以确定涡轮叶片单纯由CSN引起的失效分布(第二重失效分布) $F_b(t)$,求得 $\lambda(t)$,进而得到涡轮叶片随CSN的概率密度函数 $p_b(t)$ 和寿命期望 $\bar{T}_b$ 。

2 某型民用航空发动机两级高压涡轮叶片报废特性与可靠性分析

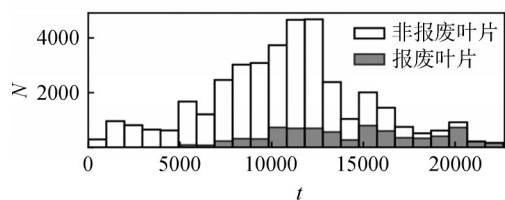
本节利用某民用航发大修厂最近10年以来500多台发动机、每级超过3万片涡轮叶片在同等推力条件下的进厂检测记录,确定某型民用航空发动机两级高压涡轮叶片报废率与使用循环 t (本节按CSN计)的关系,再用数据拟合涡轮叶片对CSN的分布函数,从而得到涡轮叶片的报废特性与寿命期望。

根据式(7)得到一组与 T 相关离散的叶片报废率,记 $y_i = P(S=0|T=t_i)$,其中 $t_i = (t_{i,1} + t_{i,2})/2$ 为分组区间首尾中值, $i=1,2,\dots,m$ 。 m 为分组数,取值以发动机台数按文献[16]推荐,保证每个分组区间内都有合适的样本量。该型发动机两级涡轮非报废叶片与报废叶片数目 N 对使用循环 t (以CSN计)的堆积频数直方图如图2所示。

根据式(9)的形式,对离散的叶片报废率做两次对数变换 $\ln[-\ln(1-y_i)]$ 。变换后的数据与 t



(a) 第一级高压涡轮叶片频数直方图



(b) 第二级高压涡轮叶片频数直方图

图2 两级高压涡轮叶片相对于使用循环 t (以CSN计)的堆积频数直方图

Fig.2 Stacking frequency histogram of two stages of HPT blades varying with used cycles t (in CSN)

的点($t_i, \ln[-\ln(1-y_i)]$)如图3(a)所示,与 t 的平移对数 $\ln(t-t_0)$ 的点($\ln(t_i-t_0), \ln[-\ln(1-y_i)]$)如图3(b)所示。

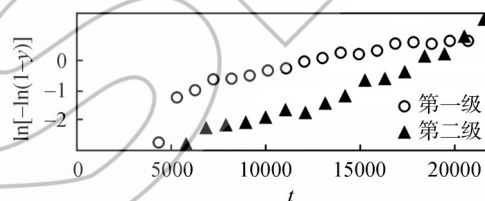
由图3(b)可见,双对数变换后的第一级高压涡轮叶片报废率与 t 的平移对数 $\ln(t-t_0)$ 满足线性关系

$$\ln[-\ln(1-y_i)] = k \ln(t_i - t_0) + \tilde{b} \quad (12)$$

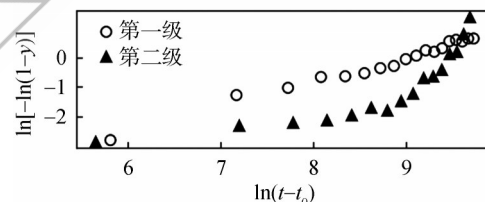
经计算两者线性相关系数 $R=0.991$;而由图3(a)可见,双对数变换后的第二级高压涡轮叶片报废率直接与 t 呈线性关系

$$\ln[-\ln(1-y_i)] = k(t_i - t_0) + \tilde{b} = kt_i + b \quad (13)$$

线性相关系数 $R=0.978$ 。式(12)、式(13)中的未知参数 $k, \tilde{b}, b, t_0$ 由样本数据估计。至此,由图3、式(12)、式(13)可以判断出式(9)具体的分布类型和表达形式,为下一步参数估计找到目标函数。



(a) 双对数变换后高压涡轮叶片报废率与使用循环数的关系



(b) 双对数变换后高压涡轮叶片报废率与使用循环对数的关系

图3 经两次对数变换后的高压涡轮叶片报废率对使用循环 t (以CSN计)的关系

Fig.3 Relationship between twice-logarithm-transformed HPT blade scrapping rates and used cycles t (in CSN)

由式(12)反解出第一级高压涡轮叶片的失效分布函数,此时式(9)表示为三参数威布尔分布形式

$$F_b(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{b}\right)^k\right] \quad (14)$$

因此,可以断定第一级高压涡轮叶片失效服从三参数威布尔分布。

同理,反解满足式(13)的第二级高压涡轮叶片的失效分布函数,可以表示为指数-指数分布

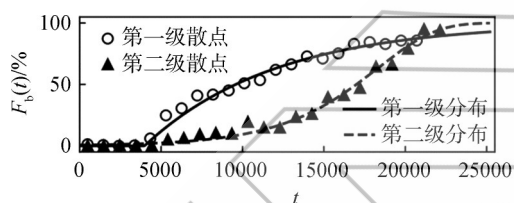
$$F_b(t) = 1 - \exp[-\exp(kt + b)] \quad (15)$$

表现为在一段时间内,失效率较小且增长缓慢;超出这段时间,失效率迅速增大。这是一类典型的有限寿命设计,有相关研究提出ZZ分布来刻画类似的失效模型^[17-18],但指数-指数分布不属于可靠性统计中^[1,5-7,16]常见的失效分布类型,尚未有专门的数理统计方法来分析。

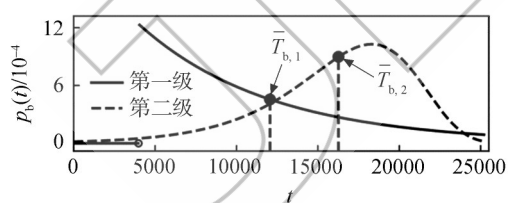
每个分组区间包含的叶片数目不同,宜对每个数据点加权拟合。具体来说,式(12)含有未知最小失效时间 t_0 ,因此采用粒子群算法^[19]以加权最

小误差平方和 $\sum_{i=1}^m \frac{1}{\hat{\sigma}_i^2} \left[1 - e^{-\left(\frac{t_i - t_0}{b}\right)^k} - y_i \right]^2$ 为优化对

象求取最优参数,其中 $\hat{\sigma}_i^2$ 为第 i 组样本均值的方差;对式(13)做加权线性回归,第 i 组权重为样本均值方差 $\hat{\sigma}_i^2$ 的倒数。求得参数 k, b, t_0 后,分别带入式(14)、式(15)得到两级涡轮叶片随使用循环 t (以CSN计)的失效分布 $F_b(t)$,如图4(a)所示。再由式(10)、式(11),分别得到两级高压涡轮叶片的第二重失效概率密度函数和寿命期望,如图4(b)所示。



(a) 高压涡轮叶片对使用循环的累积失效分布函数



(b) 高压涡轮叶片对使用循环的概率密度函数与寿命期望

图4 高压涡轮叶片对使用循环 t (以CSN计)的失效分布与寿命期望

Fig.4 Failure distribution and life expectation of HPT blades varying with used cycles t (in CSN)

本文拟合出的第一级高压涡轮叶片失效分布函数与实测数据统计出的叶片报废率之间的均方误差 $e_1 = 3.54 \times 10^{-2}$,第二级高压涡轮叶片均方误差 $e_2 = 3.63 \times 10^{-2}$ 。结果表明,本文拟合的以高压涡轮叶片失效函数表征的叶片报废率与大量

统计样本反映的叶片报废率平均误差不超过4%。

根据参数计算结果与图3、图4,可以得到以下该型民用航空发动机高压涡轮叶片的报废特性与可靠性特征:

1) 原始数据表明,第一级高压涡轮叶片随CSN的失效服从三参数威布尔分布;第二级高压涡轮叶片随CSN的失效服从指数-指数分布。其中,指数-指数分布是一种可靠性统计中不常见的寿命分布。

2) 参数计算结果表明,第一级高压涡轮叶片在初始一段适应期内($t < t_0$),报废率保持为零;进入运转成熟期后($t \geq t_0$),式(14)威布尔分布的形状参数 $k \approx 1$,失效率函数 $\lambda(t)$ 为一常数,即随CSN增长具有稳定的失效率,第一级高压涡轮叶片在成熟期的分布退化为指数分布。具体至图4(a)中,当 $t < 4\,500$ 循环时,此阶段为第一级高压涡轮叶片的初始适应期,报废率为零;当 $t > 4\,500$ 循环时,叶片进入成熟期,失效分布服从指数分布。

3) 第二级高压涡轮叶片在很长的自新使用期内,保持较低的失效率;超出这段稳定运行期后,报废率陡然增大,失效加快。具体至图4(a)中,当 $t < 13\,000$ 循环时,第二级高压涡轮叶片的报废率始终小于20%,且增长缓慢;而CSN超过13 000循环时,其报废率增长迅速,直至接近100%。结合图2(b), $t = 13\,000$ 这个分界点,既是第二级涡轮叶片被观测的峰值末端节点,根据文中第1.1节论述,也是该型航空发动机在关注推力下的下发高峰期(第一重失效高峰)的末端节点。因此,第二级高压涡轮叶片能在发动机下发高峰期前($t \leq 13\,000$)维持较高的可靠性,在稳定期外($t > 13\,000$)报废率突然快速增大,表现出有限寿命的特征。

4) 容易看出第二级高压涡轮叶片的寿命长于第一级。其中,第一级高压涡轮的平均寿命 $\bar{T}_{b,1}$ 为12 000,第二级叶片的平均寿命 $\bar{T}_{b,2}$ 为16 000。实际上,第一级高压涡轮叶片所处的温度场、气动载荷、外部冲击等工况环境比第二级恶劣得多,腔体冷却效率也显著不同。

3 结 论

本文基于大量的某型民用航空发动机高压涡轮叶片在同等推力条件下的进厂检测记录,利用条件概率计算了涡轮叶片单纯按CSN计的报废率。在疲劳损伤累积的场合下,涡轮叶片报废率

的物理意义是该叶片在某检查标准下的实际使用寿命 T_0 不超过 t 的概率,并以此建立了报废率与可靠性之间的关系,给出了失效分布函数、叶片寿命分布的概率密度函数与寿命期望。利用双对数变换分别检验了两级高压涡轮叶片对于 CSN 的分布类型,发现第一级高压涡轮叶片随 CSN 的失效服从指数分布,在经历初始适应期后的成熟期内,随 CSN 具有稳定的失效率。第二级高压涡轮叶片随 CSN 的失效服从指数-指数分布,表现为在很长的自新使用期内,保持较低的失效率;超出这段稳定运行期后,报废率迅速增大,失效加快。

参考文献:

- [1] 蒯诗松,汤银才,王玲玲.可靠性统计[M].北京:高等教育出版社,2008.
- [2] 李臻,付旭云,钟诗胜.基于全报废模型的航空发动机叶片报废率预测方法[J].航空精密制造技术,2014,50(4):20-23.
LI Zhen, FU Xuyun, ZHONG Shisheng. Scrap probability forecast method of aero-engine blade based on all scrap model[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2014, 50(4):20-23. (in Chinese)
- [3] GOVINDARAJULU Z. Elements of sampling theory and methods[M]. Singapore City, Singapore: Pearson Education Asia Limited, 1999.
- [4] 金勇进.抽样:理论与应用[M].北京:高等教育出版社,2010.
- [5] 郭永基.可靠性工程原理[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [6] 肖明园.指数-威布尔分布的统计分析[D].上海:华东师范大学,2011.
XIAO Mingyuan. Statistical analysis of exponentiated Weibull distribution[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011. (in Chinese)
- [7] 王艳荣.基于可靠性分析的剩余寿命评估方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2015.
WANG Yanrong. The study of remaining life assessment method based on reliability analysis[D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)
- [8] 罗静,马仕川,杨立波.基于随机截尾数据的加工中心可靠性评估[J].重庆理工大学学报:自然科学,2020,34(2):69-74.
LUO Jing, MA Shichuan, YANG Libo. Reliability evaluation of machining centers based on random censored data[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2020, 34(2):69-74. (in Chinese)
- [9] 金颖超.基于现场数据的客机机载设备可靠性评估方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
JIN Yingchao. Research on reliability assessment methods for field data of aircraft airborne equipment[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 贾祥.不等定时截尾数据下的卫星平台可靠性评估方法研究[D].长沙:国防科技大学,2017.
JIA Xiang. The estimation of reliability for satellite platform with multiply Type-I censored data[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [11] 熊申辉,胡良谋,胡飞,等.随机截尾数据下的液压泵故障分布的两参数威布尔分布模型[J].组合机床与自动化加工技术,2016(4):109-112.
XIONG Shenhui, HU Liangmou, HU Fei, et al. Two parameter Weibull distribution model of fault distribution for hydraulic pump based on random censored data[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2016(4): 109-112. (in Chinese)
- [12] 王智明,杨建国,王国强,等.多台数控机床的时间截尾可靠性评估[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(3):85-89.
WANG Zhiming, YANG Jianguo, WANG Guoqiang, et al. Reliability evaluation of multiple NC machine tools with time truncation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(3):85-89. (in Chinese)
- [13] 李海波,张正平,胡彦平,等.基于随机截尾数据下 Weibull 分布的参数极大似然估计与应用[J].强度与环境,2009,36(4):60-64.
LI Haibo, ZHANG Zhengping, HU Yanping, et al. Maximum likelihood estimation of Weibull distribution based on random censored data and its application[J]. Structure & Environment Engineering, 2009, 36(4):60-64. (in Chinese)
- [14] GIESECKE D, FRIEDRICHS J, KENULL T, et al. A method for forecasting the condition of HPT NGV's using Bayesian Belief Networks and a statistical approach[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. Duesseldorf, Germany: ASME, 2014: 1-12.
- [15] GIESECKE D, WEHKING M, FRIEDRICHS J, et al. A method for forecasting the condition of several HPT parts by using Bayesian Belief Networks[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. Montréal, Canada: ASME, 2015: 1-14.
- [16] 庄楚强,何春雄.应用数理统计基础[M].广州:华南理工大学出版社,2006.
- [17] 张宁.截尾数据下 ZZ 分布参数估计及性质[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.
ZHANG Ning. Estimation and characteristic of ZZ distribution based on censored data[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [18] 雷露,张国志,王萍.无失效数据下 ZZ 分布的可靠性分析[J].哈尔滨理工大学学报,2020,25(5):164-170.
LEI Lu, ZHANG Guozhi, WANG Ping. Reliability analysis of ZZ distribution under zero failure data[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2020, 25(5): 164-170. (in Chinese)
- [19] 潘峰,李位星,高琪.粒子群优化算法与多目标优化[M].北京:北京理工大学出版社,2013.

(编辑:张雪)