

# 机电产品加速贮存寿命试验评估方法

杨策<sup>1</sup>, 李鸿志<sup>2</sup>, 姚金勇<sup>2</sup>

(1. 海军装备研究院, 北京 100161; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:** **目的** 研究长期贮存产品的贮存寿命评估方法。**方法** 采用步进应力加速贮存寿命试验, 对原始试验数据进行预处理后建立性能退化轨道, 得到产品伪寿命值, 然后对高加速应力水平下的贮存寿命分布进行假设检验及参数估计, 最后根据加速方程外推到常应力水平下的贮存寿命分布。**结果** 推测出正常贮存条件下的产品贮存寿命。**结论** 该方法避免了复杂的性能退化模型分析和建模工作, 能有效地对样本量少、无失效信息的贮存产品进行贮存寿命评估。

**关键词:** 加速贮存寿命试验; 贮存寿命评估; 伪寿命; 加速方程

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2015.04.021

**中图分类号:** TJ089; V57 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2015)04-0110-05

## An Evaluation Method of Accelerated Storage Life Test for Mechanical and Electronic Products

YANG Ce<sup>1</sup>, LI Hong-zhi<sup>2</sup>, YAO Jin-yong<sup>2</sup>

(1. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the method to evaluate storage life for long-term storage products. **Methods** With the preprocessed data from the step stress accelerated storage life test, performance degradation path was built to obtain the pseudo life. After estimating parameters of the life distribution at high stress levels, storage life distribution in normal stress level was extrapolated by the acceleration equation. **Results** Storage life under normal storage condition was deduced. **Conclusion** The method proposed in this paper could avoid complicated performance degradation modeling and effectively evaluate the storage life of products with small sample volume and little failure information.

**KEY WORDS:** accelerated storage life test; storage life evaluation; pseudo life; acceleration equation

很多产品具有长期贮存、一次使用的特点, 即在其全寿命周期内的绝大多数时间内, 都是处于贮存或不工作状态。贮存寿命和贮存可靠性是其重要的技术指标, 关系到产品的有效使用, 以及因不合理报废所造成的经济损失。因此, 加强对这类产品(尤其是武器装备)贮存寿命的研究, 使贮存寿命工作真正落

到实处是非常有必要的。

## 1 评估方法

现有的加速贮存寿命的可靠性评估通常包含基于退化轨迹和退化量分布两种途径<sup>[1-3]</sup>。前者是一种

收稿日期: 2015-04-13; 修订日期: 2015-05-06

Received: 2015-04-13; Revised: 2015-05-06

作者简介: 杨策(1975—), 男, 辽宁葫芦岛人, 硕士, 主要研究方向为可靠性与综合保障工程。

Biography: YANG Ce(1975—), Male, from Huludao, Liaoning, Master, Research focus: reliability and integrated support engineering.

较成熟、直观的方法,其基本思路是在建立退化轨道模型的基础上,通过设定失效阈值来确定产品的伪寿命,其核心是根据通过统计信息或物理模型来确定退化轨道。关于退化模型的研究,目前多是基于回归分析研究的。Gopikrishnan<sup>[4]</sup>分析了线性退化轨道下随机截距和随机斜率的统计推断。Meeker等<sup>[5]</sup>采用非线性模型建立退化轨道,利用极大似然函数进行参数估计。关于贮存寿命的可靠性评估,马小兵<sup>[6]</sup>分模块的对某电子产品进行模型参数估计及利用Fisher信息进行正常应力水平下可靠度置信区间估计。赵艳涛<sup>[7]</sup>分析了电磁阀的失效机理,用最小方差无偏估计和最小二乘法对数据进行估计,最后得出贮存寿命结论。

文中在对试验数据进行分析与预处理的基础上,从性能参数退化的角度,利用线性模型建立退化轨道,在失效机理一致性的基础上,将退化模型与加速模型结合外推正常应力水平下的贮存寿命。主要工作分为数据预处理、试验数据统计分析、评估结果分析和模型校验四大部分。评估方法流程如图1所示。

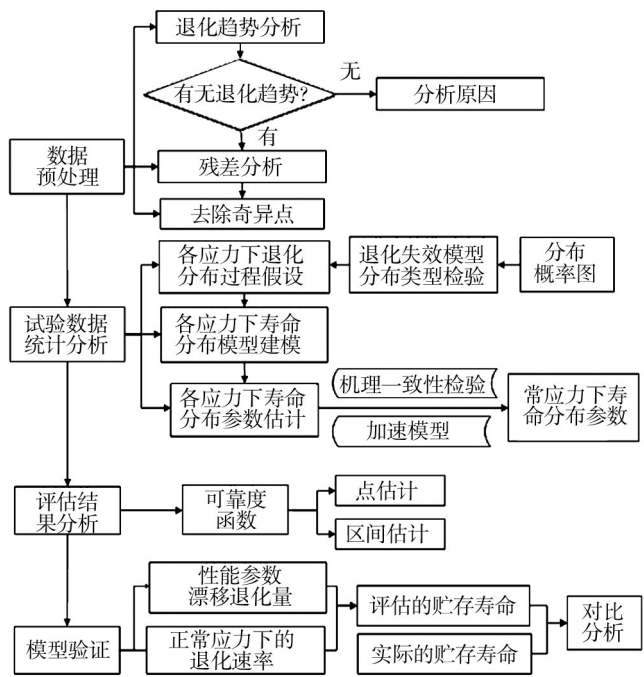


图1 评估方法流程

Fig.1 Flow chart of the evaluation method

1.1 残差分析

在实际工程中,偶然因素的干扰以及观察员的粗心,常常会使所得到的数据不完全可靠,也就是出现异常数据,造成残差特别大。为提高回归方程的质量,一旦发现异常数据,应及时剔除,并利用剩下的数

据重新建立回归方程<sup>[8]</sup>。所谓残差是指实际观察值与回归估计值的差,即:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$
 (1)

即使通过F检验或相关系数证实回归方程可靠,也不能排除存在异常数据。残差分析的目的就在于解决以上问题。

1.2 分布假设与检验

首先,通过分析试验过程中产品性能参数的退化趋势,采用线性方程拟合出退化轨迹,推测出产品性能退化量达到失效阈值的时间(即伪寿命)<sup>[9-10]</sup>。在同一应力水平S下,同一类产品样本的退化轨迹可以用相同形式的曲线方程来描述。由于产品样本间的随机波动性,所以不同产品的退化轨迹方程有不同的方程系数。由于这种随机波动也有一定的随机性,因此可以利用某种分布来描述伪寿命的这种随机性,如图2所示。

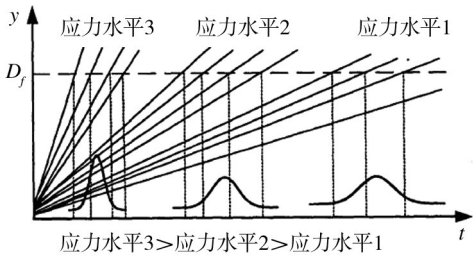


图2 产品性能退化曲线与寿命分布关系

Fig.2 Relationship between the performance degradation curve and the product life distribution

在不同应力水平下,产品贮存寿命随应力水平的增加而降低,因此寿命分布参数与应力水平相关。产品间的随机波动性导致产品贮存寿命存在随机性,对于同一应力水平下,产品贮存寿命所服从的分布相同,但全部或部分分布参数不同。针对参数建立加速方程,外推出常应力水平下贮存寿命分布参数,可以对产品进行寿命分析与预计。

1.3 机理一致性检验

加速寿命试验中有一条基本假定,即失效机理一致性。它是指在不同的应力水平下产品的物理或化学变化过程有相同的本质,满足该假定是保证加速寿命试验评估结果正确的前提,因此需要检验试验过程中产品失效机理的一致性。目前,国内外判定一致性的方法有3种:基于统计分析、基于加速模型参数不变、基于试验观察。

2 应用案例

摄像稳定装置作为飞行器下视系统的关键部分,其主要功能是随时拍摄地面图像作为下视系统匹配定位的实时图像,需要经受长期的贮存过程。对摄像稳定装置进行加速贮存寿命试验,采用了115,105,95℃三个应力水平,按照步进应力方式依次施加。

2.1 数据预处理

2.1.1 退化趋势分析

摄像稳定装置有四个主要的性能参数:传递函数、信噪比、均匀性和定位误差。对加速贮存寿命试验数据进行观察,发现四个性能指标中只有传递函数有明显的退化趋势,其试验数据绘成曲线如图3所示。

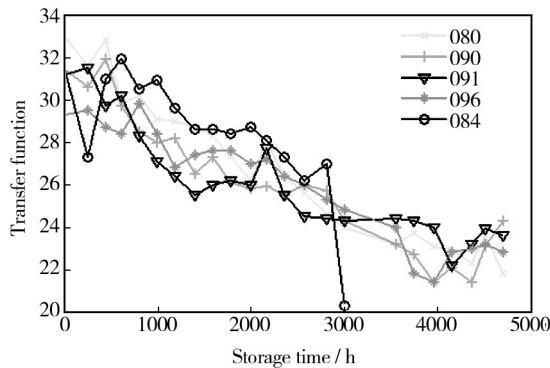


图3 传递函数指标变化趋势  
Fig.3 Variation trends of transfer function index

2.1.2 残差分析

从图3可以发现原始试验数据非常粗糙,故不能直接进行分析,需要先剔除奇异点。参照残差分析结果(以080试验数据残差分析为例,见图4),对试验数据进行分析处理。将异常点剔除后,各产品的传递函

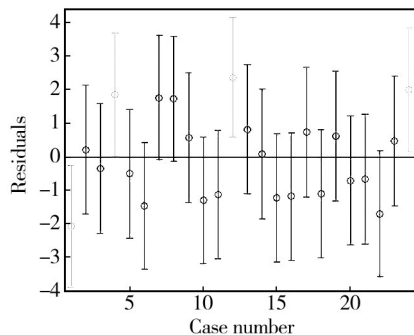


图4 080的残差分析  
Fig.4 Residual analysis of 080

数退化曲线如图5所示。

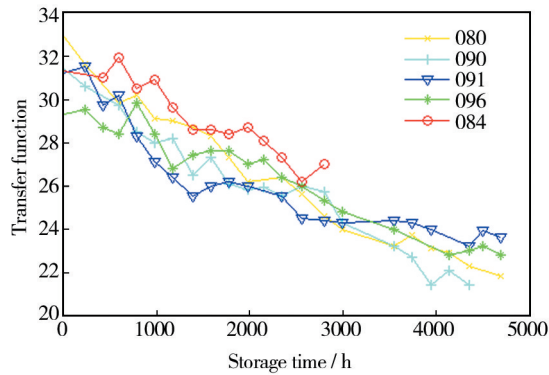


图5 处理后的传递函数退化趋势  
Fig.5 Degradation trends of transfer function after processing

2.2 退化轨迹建模及参数估计

根据传递函数的退化趋势,采用线性退化模型对退化轨迹进行建模:

$$y_{ij} = \alpha_{ij} + \beta_{ij}t_{ij} + c_{ij} \quad (2)$$

式中: $y_{ij}$ 为第*i*个产品在第*j*个应力水平下的传递函数参数测量值( $i=1,2,3,4,5; j=1,2,3$ );  $\alpha_{ij}$ ,  $\beta_{ij}$ 为第*i*个产品在第*j*个应力水平下的传递函数退化轨道线性模型参数;  $c_{ij}$ 为第*i*个产品在第*j*个应力水平下的传递函数退化轨道线性模型残差,  $c_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ , 其中  $\sigma$  为产品数据的标准差。

利用 Matlab 编程,得到参数估计值见表1。

表1 模型参数值估计值  
Table 1 Estimated values of model parameters

| 温度/℃ | 编号  | $\beta_{ij} (\times 10^{-3})$ | $\alpha_{ij}$ |
|------|-----|-------------------------------|---------------|
| 115  | 080 | -2.9                          | 33.100        |
|      | 090 | -2.8                          | 31.230        |
|      | 091 | -3.4                          | 31.408        |
|      | 096 | -2.8                          | 30.140        |
|      | 084 | -3.2                          | 31.911        |
| 105  | 080 | -2.2                          | 30.930        |
|      | 090 | -1.7                          | 28.933        |
|      | 091 | -2.0                          | 30.545        |
|      | 096 | -2.1                          | 32.507        |
|      | 084 | -1.8                          | 32.077        |
| 95   | 080 | -1.5                          | 30.442        |
|      | 090 | -1.4                          | 29.362        |
|      | 091 | -1.1                          | 28.989        |
|      | 096 | -1.2                          | 29.073        |
|      | 084 | —                             | —             |

以 105 ℃ 为例给出退化轨道,如图 6 所示。

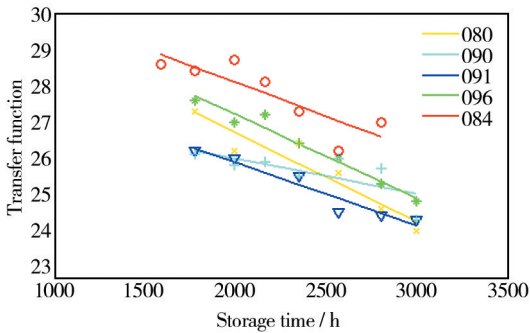


图 6 105 ℃ 下产品的退化轨道  
Fig.6 The degradation path of the products at 105 ℃

对于单应力下多水平的加速寿命试验,性能退化有一个累积的过程,退化轨迹是由各个应力水平下单独的退化轨迹经过折算后叠加起来的。设定一个失效阈值  $L$ , 产品性能退化到失效阈值的时间即为产品失效时间。根据 Wiener 过程特性,产品的性能退化时间可以认为是布朗运动的某质点首次穿越某预定值(失效阈值)的时间,因此性能退化  $T$  可以表示为:

$$T=\inf\{t:t>0,Y(t)=L\}+\tau_{ij} \tag{3}$$

式中:  $\tau_{ij}$  为应力水平  $S_i$  下的贮存时间对应力水平  $S_j$  下的折算时间,计算方法见式(4):

$$\tau_{ij}=\alpha_{ij}\cdot t_i \tag{4}$$

式中:  $\alpha_{ij}$  为应力水平  $S_i$  相对于应力水平  $S_j$  的加速因子,可由 Arrhenhuis 反应率模型计算得到:

$$\alpha_{ij}=\exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_j}-\frac{1}{T_i}\right)\right] \tag{5}$$

式中:  $T$  为绝对温度, K;  $k$  为玻尔兹曼常数,取  $8.617\times10^{-5}\text{ eV/K}$ ;  $E_a$  为激活能,取 0.4 eV。

据此,可得摄像稳定装置在 115, 105, 95 ℃ 时的伪寿命值,见表 2。

表 2 不同应力水平下的伪寿命  
Table 2 Pseudo life under different temperature stress levels

| 编号  | 应力水平/℃ |        |        | h |
|-----|--------|--------|--------|---|
|     | 115    | 105    | 95     |   |
| 080 | 5225.0 | 5965.1 | 8544.2 |   |
| 090 | 4773.3 | 6544.7 | 7635.9 |   |
| 091 | 3975.1 | 6202.2 | 9956.2 |   |
| 096 | 4283.3 | 6818.5 | 9303.7 |   |
| 084 | 4336.5 | 7732.8 | —      |   |

2.3 寿命分布模型假设检验

为推导摄像稳定装置在常应力水平下的贮存寿

命,首先需对其进行贮存寿命分布假设。由于威布尔分布的适用性较好,采用两参数 Weibull 分布进行概率分布假设检验。由中位秩公式  $F(t_i)=\frac{i-0.3}{n+0.4}$  估算失效概率  $\hat{F}(t_i)$ , 将三组应力水平下的数据点  $(t,\hat{F}(t_i))$  画到威布尔概率纸上,如图 7 所示。

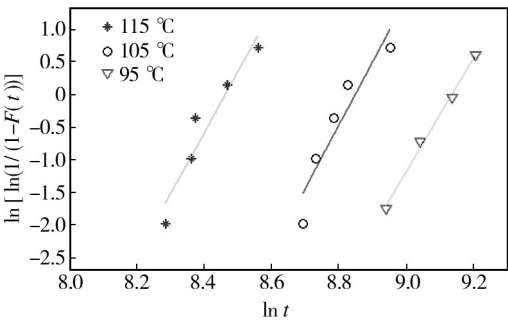


图 7 Weibull 概率纸  
Fig.7 Weibull probability levels

由图 7 可知,在同一应力水平下,伪寿命值基本分布在一条直线上,故可以认为各应力水平下摄像稳定装置贮存寿命均服从两参数 Weibull 分布。

2.4 寿命模型参数估计

两参数 Weibull 分布  $W(m,\eta)$  的概率密度函数为:

$$f(t)=\frac{m}{\eta}\left(\frac{m}{\eta}\right)^{m-1}e^{-(t/\eta)^m} \tag{6}$$

在各温度应力条件下,产品伪寿命的顺序统计量为  $t_{j1}\leq t_{j2}\leq\cdots\leq t_{jr}$ 。当温度为 115, 105 ℃ 时,  $r=5$ ; 当温度为 95 ℃ 时,  $r=4$ ;  $j=3$ 。

其似然函数为:

$$L(m,\eta)=\prod_{i=1}^r\frac{m}{\eta}\left(\frac{t_{ji}}{\eta}\right)^{m-1}e^{-(t_{ji}/\eta)^m} \tag{7}$$

对式(7)取对数并求导,整理化简后可得:

$$\begin{cases} \frac{1}{m}+\frac{1}{r}\sum_{i=1}^r\ln t_{ij}-\frac{\sum_{i=1}^rt_{ji}^m\ln t_{ji}}{\sum_{i=1}^rt_{ji}^m}=0 \\ \eta^m-\frac{1}{r}\sum_{i=1}^rt_{ji}^m=0 \end{cases} \tag{8}$$

利用二分法迭代求解,  $\hat{m}$  在 115, 105, 95 ℃ 应力水平下的值分别为 10.8, 10.7, 11.9。  $\hat{\eta}$  分别为 4723.3, 6946.4, 9262.4。

2.5 机理一致性检验

由图 7 可知,不同应力下的威布尔概率纸检验直

线近似平行,说明摄像稳定装置在加速贮存寿命试验过程中退化机理并未发生改变,因此可以利用加速方程外推在常应力 25℃ 下贮存寿命分布函数的参数。

## 2.6 常应力水平下贮存寿命

加速贮存寿命试验采用温度作为加速应力,根据 Arrhenius 反应率模型,外推常应力下的贮存寿命分布参数 $\hat{\eta}$ ,即,

$$\ln \eta_i = a + b/T_i \quad (9)$$

计算参数估计值: $a = -3.93$ ,  $b = 4822.5$ ,  $\hat{\eta}_0 = 2.10 \times 10^5$ ,即在常应力 25℃ 下摄像稳定装置特征寿命为 23.9 年。

$$\hat{m}_0 = \frac{n_1 m_1 + n_2 m_2 + n_3 m_3}{n_1 + n_2 + n_3} = 11.25 \quad (10)$$

故在 25℃ 下,摄像稳定装置贮存寿命分布函数为  $W(11.25, 2.10 \times 10^5)$ ,可靠度函数  $R(t)$  为:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{2.10 \times 10^5}\right)^{11.25}\right] \quad (11)$$

平均寿命点估计 $\hat{t}_e$ 为:

$$\hat{t}_e = \hat{\eta}_0 \Gamma\left(1 + \frac{1}{\hat{m}_0}\right) = 2.1 \times 10^5 \quad (12)$$

在可靠度为  $R=0.9$  时,可靠性寿命的点估计为:

$$\hat{t}_{0.9} = \hat{\eta}_0 [\ln(1/R)]^{1/\hat{m}_0} = 1.72 \times 10^5 \quad (13)$$

在置信度为  $1 - \alpha = 0.95$  的条件下,可靠度为 0.9 时的可靠寿命单侧置信下限为:

$$\hat{t}_{0.9} = Q \times \hat{t}_{0.9} \quad (14)$$

$$\text{式中: } Q = \exp\left(-\frac{\partial + m_1}{\hat{m}_0}\right); \quad \partial = [y \cdot$$

$\sqrt{(A_3^2 - A_1 A_2) y^2 + r A_1 + 2 r A_3 m_1 + r A_2 m_1^2 - A_3 y^2 - r m_1}] / (r - r_2 A_2); A_1 = 0.49q - 0.134 + 0.622q^{-1}; A_2 = 0.2445 \times (1.78 - q) \times (2.25 + q); A_3 = 0.029 - 1.083 \times \ln(1.325q); m_1 = \ln[-\ln R]; y = u_{0.05}$  是标准正态分布的 0.05 分位点,查表得  $u_{0.05} = 1.65$ 。其中,  $q = r/n$ ,  $n$  表示参试样品总数;  $r$  为试验时间结束时的样品故障数。在该试验中,由于采用伪寿命估计样品真实贮存寿命值,认为试验结束时样品已全部故障,故  $r = 5, q = 1$ 。

由计算式得:

$$A_1 = 0.9760, A_2 = 0.6198, A_3 = 0.2758, m_1 = -2.2504, \partial = 4.9610, Q = 0.7859, \hat{t}_{0.9, L} = 1.3517 \times 10^5$$

故摄像稳定装置可靠寿命 $\hat{t}_{0.9}$ 的 90% 置信下限为 15.4 年。

## 3 结论

文中系统阐述了高可靠长贮存寿命机电产品的可靠性评估方法,在对原始试验数据进行预处理的基础上,进行性能退化轨迹建模,实现了性能退化数据到伪寿命数据的转化,推测出各应力下产品的贮存失效寿命分布。最后,利用加速模型,外推出常应力下的产品贮存寿命失效分布函数。该方法可以避免复杂的性能退化模型分析和建模工作,有效地对样本量少、无失效信息的贮存产品进行可靠性评估。

## 参考文献:

- [1] WHITMORE G A, SCHENKELBERG F. Modeling Accelerated Degradation Data Using Wiener Diffusion with a Time Scale Transformation[J]. Life Data Analysis, 1997, 3(1): 27—45.
- [2] 王亚辉, 李晓钢. 基于步进应力的火工品加速贮存试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 38—40.  
WANG Ya-hui, LI Xiao-gang. Study on Accelerated Storage Life Test of Initiating Explosive Device Based on Step Stress Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 38—40.
- [3] 李迪凡, 封先河, 刘聪. 某型导弹尾翼弹簧贮存寿命评估[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 1—3.  
LI Di-fan, FENG Xian-he, LIU Cong. Storage Life Evaluation of Empennage Springs[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 1—3.
- [4] GOPIKRISHNAN A. Reliability Inference Based on Degradation and Time to Failure Data: Some Models, Methods and Efficiency Comparisons[D]. Michigan: The University of Michigan, 2004.
- [5] MEEKER W Q, ESCOBAR L A, LU J C. Accelerated Degradation Tests: Modeling and Analysis[J]. Technometrics, 1998, 40(2): 89—99.
- [6] 马小兵, 王晋忠, 赵宇. 基于伪寿命分布的退化数据可靠性评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 228—232.  
MA Xiao-bing, WANG Jin-zhong, ZHAO Yu. Based on the Degradation Data for Life Distribution Reliability Assessment Method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 33(2): 261—264.
- [7] 赵艳涛. 电磁阀贮存寿命评估[J]. 质量与可靠性, 2010(5): 25—28.  
ZHAO Yan-tao. Electromagnetic Valve Storage Life Assessment[J]. Quality and Reliability, 2010(5): 25—28.
- [8] CARRASCO J M F, ORTEGA, E M M, PAULA, G A.

(下转第 123 页)

院,2004.

LI De-peng, DAI Xiang-jun. Security of Ammunition Storage and Transportation[M]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2004.

- [13] 易建政,李杏军. 有关 Goff-Gratch 公式的简化处理[J]. 包装工程, 1997, 18(6): 21—24.

YI Jian-zheng, LI Xing-jun. A Simplified Treatment of the Relevant Goff-Gratch Formula[J]. Packaging Engineering, 1997, 18(6): 21—24.

- [14] 王维,宣兆龙,段志强. 基于 ANSYS Workbench 的某弹药储运方舱支撑件力学分析[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 25—29.

WANG Wei, XUAN Zhao-long, DUAN Zhi-qiang. Mechanics Analysis on Supporting in an Ammunition Storage and Transportation Shelter Based on ANSYS Workbench[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(3): 25—29.

- [15] 靳跃钢,高海波,赵耀辉,等. 美军弹药包装设计与试验要求[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 137—141.

JIN Yue-gang, GAO Hai-bo, ZHAO Yao-hui, et al. Design and Test Requirements of US Military Ammunition Packaging [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 137—141.

- [16] GJB 1444—1992, 弹药包装通用规范[S].  
GJB 1444—1992, General Specification for Ammunition Package[S].

(上接第 114 页)

Log-modified Weibull Regression Models with Censored Data: Sensitivity and Residual Analysis[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2008 52(8): 4021—4039.

- [9] KIM Seong-Joon, BAE Suk Joo. Cost-effective Degradation Test Plan for a Nonlinear Random-coefficients Model[J]. In Reliability Engineering and System Safety February, 2013, 110: 68—79

- [10] CHAOS M T. Degradation Analysis and Related Topics: Some Thoughts and a Review[J]. Proc Natl Sci Coun. ROC (A), 1999, 23(5): 555—566.

- [11] 张志华. 加速寿命试验及其统计分析[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2002.

ZHANG Zhi-hua. Accelerated Life Test and Statistic Analysis [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2002.

- [12] 赵宇,杨军,马小兵. 可靠性数据分析[M]. 北京: 北京航空

航天大学出版社, 2011.

ZHAO Yu, YANG Jun, MA Xiao-bing. Data Analysis of Reliability[M]. Beijing: Beihang University Press.

- [13] YANG Liu-ying, ZHAO Gang, WU Bin-bin, et al. Assembly Sequence Planning for Aircraft Component Based on Improved Clashes Matrix[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 88/89: 22—28.

- [14] 钟强晖,张志华,王磊. 考虑模型选择的退化数据分析方法[J]. 系统工程, 2009, 27(11): 111—114.

ZHONG Qiang-hui, ZHANG Zhi-hua, WANG Lei. About Model Choice of Degradation Data Analysis Methods[J]. Systems engineering, 2009, 27(11): 111—114.

- [15] LI X J. Study on the Confidence Limits for the Mean of Weibull Distributions[J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 2010, (1): 74—56.

(上接第 119 页)

Data and Bayesian Method[C]// 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). 2011: 90—94.

- [10] DASGUPTA A, PECHT M. Material Failure Mechanism sand Damage Models[J]. IEEE Trans on Rel, 1991, 40(5): 531—536.

- [11] 张辉,王陶,李明,等. 基于功能仿真的电子产品性能退化分析方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 43—48.

ZHANG Hui, WANG Tao, LI Ming, et al. Analysis Method of Performance Degradation of Electronic Product Based on Function Simulation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 43—48.

- [12] 邓爱民,陈循,张春华,等. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 546—552.

DENG Ai-min, CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, et al. Reliability Assessment Based on Performance Degradation Data

[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 546—552.

- [13] 丁少娜,冯诚,陈毓,等. 基于性能退化数据分析的训练装备精度保持性评估[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 30—34.

DING Shao-na, FENG Cheng, CHEN Yu, et al. Assessment of Precision Retention of Training Equipment Based on Performance Degradation Data Analysis[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(3): 30—34.

- [14] 潘玉娜. 滚动轴承的性能退化特征提取及评估方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.

PAN Yu-na. Research on Feature Extraction and Evaluation Method of Performance Degradation of Rolling Bearings[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.

- [15] 方峻,魏星,樊黎蔽. 基于多性能参数退化数据的可靠性评估及应用[J]. 装备环境工程, 2008, 5(5): 29—32.

FANG Jun, WEI Xing, FAN Li-bi. Reliability Evaluation and Application Based on Multiple Performance Degradation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(5): 29—32.