

敏感器的步降应力加速寿命试验方法研究

王绍山, 宣兆龙, 王耀冬, 王维

(军械工程学院, 石家庄 050003)

摘要: 目的 分析敏感器的加速寿命试验方法,为下一步试验的实施奠定基础。方法 采用步降应力加速寿命试验方法,利用逆矩估计法和最优线性无偏估计方法对数据进行分析。结果 确定了加速试验所需的各项参数,为数据处理提供了理论依据。结论 利用逆矩估计法和最优线性无偏估计方法对各参数进行估计是有效的,能够分析出样品的各可靠性指标。

关键词: 可靠性; 加速寿命试验; 敏感器

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.03.025

中图分类号: TJ02; TB114.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)03-0132-05

Research on Methods of Step-down-stress Accelerated Life Test of Sensors

WANG Shao-shan, XUAN Zhao-long, WANG Yao-dong, WANG Wei

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the accelerated life test (ALT) of sensors so as to lay foundation for further tests.

Methods The ALT was conducted and the data was analyzed by methods of inverse moment and best linear unbiased estimation (BLUE). **Results** Each parameter for the test was determined, which provided evidence for data processing.

Conclusion Using inverse moment and BLUE to estimate each parameter was effective, and could analyze each index of sample reliability.

KEY WORDS: reliability; accelerated life test; sensor

敏感器作为智能弹药的重要组成部分,对储存环境比较敏感,是弹药储存过程中的短板,其储存寿命长短直接决定智能弹药的储存可靠性和储存年限。由于敏感器中存在着大量易损的光电器件,其储存寿命的不确定性增加了弹药仓库管理的难度,因此如何对敏感器的储存可靠性进行评估成为研究人员关注的焦点。文中以敏感器为研究对象,在分

析敏感器特点的基础上,提出采用步降应力加速寿命试验对敏感器进行试验,并利用最优线性无偏估计方法进行了分析。

1 敏感器

敏感器是智能弹药的核心关键件之一,主要用

收稿日期: 2015-01-04; 修订日期: 2015-01-23

Received: 2015-01-04; Revised: 2015-01-23

作者简介: 王绍山(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为弹药保障与安全技术。

Biography: WANG Shao-shan(1990—), Male, Master graduate student, Research focus: ammunition support and security technology.

通讯作者: 宣兆龙(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向为装备防护。

Corresponding Author: XUAN Zhao-long(1976—), Male, Ph. D., Associate Professor, Research focus: equipment protection.

来完成对目标的探测、识别等功能。敏感器按照电磁波探测的方式可以分为有源和无源两种:有源探测器特指各波段的雷达,利用其散射截面来提供弹与目标的距离;无源探测器特指辐射计,测量目标与其背景间的辐射功率差异^[1]。敏感器具有以下特点^[2]:探测时停留时间较短,对本身有较高的方向性要求。适应能力较强,能在多种环境条件下工作。探测距离较近,一般在几十米到几百米之间。结构复杂,储存环境要求高。

以末敏弹为例,美国、俄罗斯、法国、德国和瑞典等国家从20世纪70年代开始研制末敏弹。其敏感器由刚开始的单一敏感体制发展到现在的复合敏感体制,集红外敏感器、毫米波雷达、毫米波辐射计和激光雷达等功能于一体,各探测器优势互补,使其在复杂环境中能够保证完成探测识别。

目前,世界上具有代表性的末敏弹中利用的敏感器探测识别系统见表1。

表1 末敏弹载敏感器配置

Table 1 Configuration of sensors in each terminal-sensitive projectile

名称	敏感器配置	国家
SADARM	13元线阵红外敏感器、8 mm波雷达、8 mm波辐射计、磁强计	美国
SMArt	5元红外敏感器、3 mm波雷达、3 mm波辐射计	德国
9M55K1	双色红外探测体制,第三代改为红外/毫米波复合敏感体制	俄罗斯
SKeet	双模红外和激光测距仪	美国
BONUS	三波段红外辐射计、5元激光测距仪	瑞典

2 敏感器的可靠性评估方法

敏感器储存寿命的长短对部队来说至关重要,进行可靠性评估能够使弹药仓库人员明确其储存可靠性和储存年限。文中采用步降应力加速寿命试验对敏感器进行试验,检验其可靠性。

2.1 步降应力加速寿命试验

步降应力加速寿命试验是通过对样本加载应力水平步降减小的加速应力来进行试验,进而分析得到样本寿命统计特征的加速寿命试验方法^[3]。试验时,对样品首先进行高应力水平试验,在到达设定的条件(定时或定数)后,将应力下降到下一水平,直到达到

规定条件。其应力加载的过程如图1所示。

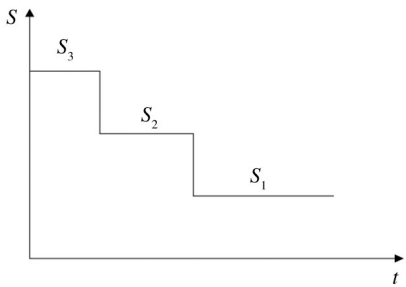


图1 步降应力加速寿命试验应力加载

Fig.1 Stress of step-down-stress accelerated life test

1980年,Nelson在试验的基础上提出了著名的“累积失效模型”,即产品的残存寿命仅依赖于已经累积的失效概率和当前的应力水平,与累积方式无关^[4]。步降应力加速寿命试验将最高应力放在前面,要达到相应的失效概率需要的时间大大缩短。

2.2 敏感器的步降应力加速寿命试验

由于各敏感器中有着大量的光电探测器件,所以根据实际经验,其寿命服从威布尔分布,其分布函数为:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right], t > 0 \quad (1)$$

式中: m 为形状参数; η 为特征寿命^[5]。

结合敏感器的实际情况,步降应力加速寿命试验中部分试验参数,如应力模型、截尾方式、应力水平、试验时间等可基本确定。

2.2.1 应力模型

在加速寿命试验中,有3种最常用的应力模型,即Arrhenius模型、逆幂律模型和Eyring模型。由于敏感器中存在大量的电子元器件,因此,在选择温度作为加速应力时,应当选取Arrhenius模型。

Arrhenius模型主要是以温度作为加速试验应力,能加快元件特别是电子元器件内部反应,促使其失效。该模型表达式为:

$$\xi = A \exp(E/KT)$$

式中: ξ 为产品的某个寿命特征; A 为常数; E 为激活能,与材料有关; K 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度。

将Arrhenius模型两边取对数后,可得:

$$\ln \xi = a + b/T$$

式中: $a = \ln A$, $b = E/K$ 。这表明产品某个寿命特征的对数与温度的倒数是线性关系,简化了试验后的数据处理。在此次试验中,选取 ξ 为 η 。即:

$$\eta = \exp(a + b/T) \quad (2)$$

2.2.2 截尾方式

在加速寿命试验中,截尾方式有定时和定数截尾两种。如果使用定数截尾,那么在试验过程中需要进行连续、实时检测^[6],这加大了试验量。另外,敏感器作为高价值弹药的一部分,其失效个数会较少,甚至会出现零失效,因此,在试验时应当选取定时截尾方式。为了不使失效个数过少或过多,恰当的规定试验的截止时间是成功实施定时截尾试验的关键^[3]。

2.2.3 加速应力水平的确定

试验选取的应力水平越多,则试验后的分析精度越高,但是试验的样本量和成本也会增加。鉴于某型敏感器造价昂贵,不可能有大量样品进行试验,同时,在国标中对试验应力水平也做出了相关的建议,所以,平衡之下选取4个应力水平(S_4, S_3, S_2 和 S_1)。最高应力水平不能超过敏感器的极限应力,一般低于极限应力3~5℃,应力与应力间隔为5~10℃。

2.2.4 步降应力试验时间的确定

根据国军标对步加试验时间的确定方法,步加试验总时间是贮存寿命值的1/20至1/40^[7]。文献[4]和[8]中指出,在保证相同试验信息量的前提下,步降应力试验的总试验时间是步进应力试验总时间的30.7%。因此,步降应力试验总时间可以选择为贮存寿命值的1.535%~0.7675%。步降应力试验各应力水平下试验时间分别为总时间的1/10,2/10,3/10,4/10,当第一个应力水平下无失效样品出现时,则延长第一个应力的试验时间,直到出现失效为止。其他应力水平试验时间也相应的延长,分别是第一应力水平时间的2倍、3倍和4倍。

2.2.5 加速系数的确定

加速系数是指正常应力下某种特征寿命与加速应

力相应寿命特征的比值^[9]。敏感器在服从威布尔分布条件下,其特征寿命 η 一般选取其 p 分位寿命(此处 $p=1-e^{-1}=0.632$)。因此,两个加速应力之间的加速系数为:

$$\tau_{s_2 \sim s_1} = \eta_1 / \eta_2 \quad (3)$$

2.3 试验数据的处理

对寿命服从威布尔分布的元器件的试验数据进行处理,确定相关参数时,比较经典的方法是极大似然估计法和逆矩估计法。由于极大似然估计在计算时较为复杂,所以选择逆矩估计法^[10]。

2.3.1 数据的折算

由式(1)可知,服从威布尔分布的敏感器寿命的密度函数是:

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} \exp \left(- \left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right), \quad m, \eta > 0 \quad (4)$$

定时截尾试验所得数据是: $t_{41} < t_{42} < \dots < t_{4r_4} \leq \tau_4$, $t_{21} < t_{22} < \dots < t_{2r_2} \leq \tau_3$, $t_{21} < t_{22} < \dots < t_{2r_2} \leq \tau_2$, (其中 τ_i 为第 i 个应力水平下试验的截止时间,样品数为 n ,各个应力水平下样品失效数为 r_i)。由于每个应力水平下失效样品的失效时间并非完全是在该应力下的时间,所以,在进行计算前,应将试验数据加上前面的试验时间。根据累积失效模型,可将试验数据转化到同一应力水平下,这里选择转化到第一个应力水平(即 S_4)下。

由式(2)和式(3)得时间折算公式为: $t_{ij} = \tau_{ij} t_i = \frac{\eta_j}{\eta_i}$ 。
 $t_i = \exp(b(1/T_j - 1/T_i)) t_{i0}$ 。若令 $r = \sum_{i=1}^4 r_i$, $p(i) = 1/T_4 - 1/T_i$, $i=1, 2, 3, 4$,则利用时间折算公式可以将试验得到的失效数据折算到应力水平 S_4 下,即为:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{41}, t_{42}, \dots, t_{4r_4} \\ \exp(bp(4))\tau_4 + \exp(bp(3))t_{31}, \exp(bp(4))\tau_4 + \exp(bp(3))t_{32}, \dots, \exp(bp(4))\tau_4 + \exp(bp(3))t_{3r_3} \\ \sum_{i=3}^4 \exp(bp(i))\tau_i + \exp(bp(2))t_{21}, \sum_{i=3}^4 \exp(bp(i))\tau_i + \exp(bp(2))t_{22}, \dots, \sum_{i=3}^4 \exp(bp(i))\tau_i + \exp(bp(2))t_{2r_2} \\ \sum_{i=2}^4 \exp(bp(i))\tau_i + \exp(bp(1))t_{11}, \sum_{i=2}^4 \exp(bp(i))\tau_i + \exp(bp(1))t_{12}, \dots, \sum_{i=2}^4 \exp(bp(i))\tau_i + \exp(bp(1))t_{1r_1} \end{array} \right.$$

记以上数据分别为 $t_1(b) < t_2(b) < \dots < t_r(b)$ 。

2.3.2 参数的求值

$$\text{若令} \left\{ \begin{array}{l} C_1 = nm_1^m(b) \\ C_2 = (n-1)(t_2^m(b) - t_1^m(b)) \\ \dots \\ C_r = (n-r+1)(t_r^m(b) - t_{r-1}^m(b)) \end{array} \right., \text{则}$$

可以证明得到 $C_1, C_2, \dots, C_r$ 独立同分布且服从指数分布 $\exp(1/\theta)$ ^[11]。令 $u_i(m, b) = \sum_{j=1}^i t_j^m(b) + (n-i) \cdot t_i^m(b)$, $i=1, 2, \dots, r$,则可以得到:

$$\sum_{i=1}^{r-1} \ln \frac{u_r(m, b)}{u_i(m, b)} = r-1 \quad (5)$$

式(5)中含有两个未知数即 m 和 b 。因此,可再利用最优线性无偏估计增加一个关于 m 和 b 的关系式^[12]:

$$\hat{m} = \frac{1}{\hat{\sigma}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^r C(n, r, j) \ln t_j(b)}$$

至此,可以求出 m 和 b 的逆矩估计 $\hat{m}$ 和 $\hat{b}$ 。

将 $\hat{m}$ 和 $\hat{b}$ 代入 η 的逆矩估计公式^[13]可得到 η_1 的估计:

$$\hat{\eta}_1 = \left\{ \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r t_i^{\hat{m}}(b) + (n-r)t_r^{\hat{m}}(b) \right] \right\}$$

将 $\hat{\eta}_1$ 的值代入式(2)即可得 a 的估计值 $\hat{a}$,进而可以求得各个应力下的特征寿命 η 的估计值 $\hat{\eta}_i$ ^[14]。有了参数的估计值,就能求出正常应力水平下试验样品德可靠性指标。

3 结语

文中以敏感器作为研究对象,分析了其步降应力加速寿命试验所需的各项参数,利用三步分析法^[15]对数据进行处理,即数据折算,分布参数估计和加速模型回归分析。分析结果表明,利用逆矩估计法可以估计出样品的可靠性参数,为步降应力加速寿命试验的具体实施奠定了基础。

参考文献:

- [1] 杨绍卿. 灵巧弹药工程[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
YANG Shao-qing. Smart Munition Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [2] 程泽. 基于小子样理论的某型末敏弹鉴定试验方法研究[D]. 石家庄:军械工程学院,2013.
CHENG Ze. Research on Evaluation Test of a Terminal-Sensitive Projectile Based on Small Sample Statistic Theory[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2013.
- [3] 张春华. 步降应力加速寿命试验的理论和方法[D]. 长沙:国防科技大学,2002.
ZHANG Chun-hua. Theory and Method of Step-down-stress Accelerated Life Testing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002.
- [4] NELSON W. Accelerated Life Testing-step-stress Models and Data Analysis[J]. IEEE Trans on Reliability, 1980, 29(2): 103—108.
- [5] 茆诗松,王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京:科学出版社,1997.
MAO Shi-song, WANG Ling-ling. Accelerated Life Test[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [6] 宣兆龙,程泽,刘亚超. 红外敏感器加速寿命试验方法研究[J]. 装备环境工程,2012,9(6):44—50.
XUAN Zhao-long, CHENG Ze, LIU Ya-chao. On Accelerated Life Test Method of High-power Infrared Sensor[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 44—50.
- [7] GJB5103—2004, 弹药元件加速寿命试验方法[S].
GJB5103—2004, Accelerated Life Test Method for Ammunition Components[S].
- [8] 陈循,张春华,汪亚顺,等. 加速寿命试验技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, WANG Ya-shun, et al. Accelerated Life Testing Technology and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [9] 丁孝均,赵光辉,赵云峰,等. 橡胶密封材料加速系数研究[J]. 宇航材料工艺,2013,1:93—97.
DING Xiao-jun, ZHAO Guang-hui, ZHAO Yun-feng, et al. Investigation on the Accelerated Factor of Rubber Sealing Materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013, 1: 93—97.
- [10] 王炳兴. Weibull分布基于恒加寿命试验数据的统计分析[J]. 应用概率统计,2002,18(4):413—418.
WANG Bing-xing. Statistical Analysis for the Weibull Distribution Based on Constant Stress Accelerated Life Test Data[J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 2002, 18(4): 413—418.
- [11] 明志茂,陶俊勇,陈循,等. 动态分布参数的贝叶斯可靠性分析[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
MING Zhi-mao, TAO Jun-yong, CHEN Xun, et al. Bayes Reliability Analysis of Dynamic Distribution Parameter[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [12] 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 Its Statistical Analysis[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2002.
- [13] 张春华,温熙森,陈循. 加速寿命试验技术综述[J]. 兵工学报,2004,25(4):485—490.
ZHANG Chun-hua, WEN Xi-sen, CHEN Xun. A Comprehensive Review of Accelerated Life Testing[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(4): 485—490.
- [14] 李海波,张正平,胡彦平. 加速寿命试验方法及其在航天产品中的应用[J]. 强度与环境,2007,34(1):2—10.
LI Hai-bo, ZHANG Zheng-ping, HU Yan-ping. Accelerated Life Testing Method and Its Applications for Space Products[J]. Structure & Environment Engineering, 2007, 34(1): 2—10.
- [15] 张春华,陈循,温熙森. 步降应力加速寿命试验(下篇)——统计分析[J]. 兵工学报,2005,26(5):666—669.
ZHANG Chun-hua, CHEN Xun, WEN Xi-sen. Step-down-stress Accelerated Life Testing-Statistical Analysis[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(5): 666—669.