

武器装备

# 加速试验在新型弹药可靠性研究上的应用

崔增辉, 宣兆龙, 李天鹏, 杨清熙

(陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050000)

**摘要:** 介绍了新型弹药和加速试验的相关理论, 并分析了加速试验在新型弹药方面研究的国内外现状。对新型弹药全寿命周期各阶段进行了划分, 概述了加速试验在不同阶段的应用状况。区分了加速寿命试验和加速退化试验两种类型, 对加速试验数据的处理流程进行了阐述。分别对寿命分布模型、加速模型及参数估计三个内容进行了简要概括, 指出了常见模型的种类、假设检验和参数估计的一般方法。最后指出了加速试验的现状及下一步的研究方向。

**关键词:** 新型弹药; 加速试验; 可靠性

中图分类号: TJ410.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)09-0001-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.09.001

## Application of Accelerated Test in Reliability Research of New Ammunition

CUI Zeng-hui, XUAN Zhao-long, LI Tian-peng, YANG Qing-xi

(Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050000, China)

**ABSTRACT:** The relevant theories of new ammunition and accelerated testing are introduced, and the current status of accelerated testing in new ammunition research at home and abroad is analyzed. The stages of the full life cycle of the new ammunition are divided, and the application of accelerated tests in different stages is outlined. Two types of accelerated life test and accelerated degradation test are distinguished, and the processing flow of accelerated test data is described. The life distribution model, acceleration model and parameter estimation are briefly summarized respectively, and the types of common models, general methods of hypothesis testing and parameter estimation are pointed out. Finally, the status of accelerated testing and the next research direction are pointed out.

**KEY WORDS:** new ammunition; accelerated test; reliability

随着高新技术的发展, 特别是微电子技术、复合材料技术、信息技术等在武器装备上的广泛应用, 具备各类不同功能的新型弹药不断研制并配发部队。随着新型弹药制导能力、命中能力、杀伤能力的不断提升, 弹药本身的可靠性却在不断下降, 从传统弹药的

贮存寿命长达 30 a 到现今新型弹药的 10 a 左右, 可靠性的降低, 使弹药可靠性方面的研究成为国内外研究的重点, 并且具有重大的军事意义和经济意义。

可靠性研究需要相关数据的支撑, 主要通过两方面来获得: 自然环境试验和实验室加速试验<sup>[1]</sup>。就新

收稿日期: 2021-03-20; 修订日期: 2021-05-02

Received: 2021-03-20; Revised: 2021-05-02

作者简介: 崔增辉(1985—), 男, 硕士, 主要研究方向为弹药工程。

**Biography:** CUI Zeng-hui (1985—), Male, Master, Research focus: ammunition engineering.

通讯作者: 宣兆龙(1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为弹药工程。

**Corresponding author:** XUAN Zhao-long (1976—), Male, Doctor, Professor, Research focus: ammunition engineering.

引文格式: 崔增辉, 宣兆龙, 李天鹏, 等. 加速试验在新型弹药可靠性研究上的应用[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 001-006.

CUI Zeng-hui, XUAN Zhao-long, LI Tian-peng, et al. Application of accelerated test in reliability research of new ammunition[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(9): 001-006.

型弹药而言，第一，弹上电子元器件众多，检测次数的增加会造成弹药故障几率的提高，一般在贮存期间会尽量减少检测或者不检测；第二，新型弹药本身成本高、贮存少的现状，使得自然环境监测数据的获取变得很困难；第三，信息的时效性。这几方面的原因使得难以从自然数据方面来评估新型弹药的可靠性。随着可靠性试验在工程领域的不断应用及统计方法的日渐成熟，加速试验能够短时间内获得新型弹药充足的寿命信息，提升效率的同时，也降低了成本，受到很多国内外学者的青睐，在弹药的可靠性领域研究中被广泛应用。

## 1 新型弹药加速试验概述

### 1.1 新型弹药的基本概念

新型弹药是一种统称，指的是随着高新技术在传统弹药上的大量应用而形成的更具智能化、功能更具多样化的新类型弹药。新型弹药也可以称为智能化弹药、信息化弹药，目前国内外对新型弹药的技术界定是比较含混的。在《信息化弹药》中对信息化弹药的定义为<sup>[2]</sup>：信息化弹药泛指以弹体为运载平台，通过信息技术的应用能够实现战场侦察、电子对抗、态势感知、精确制导、高效毁伤和毁伤评估等功能的智能化、灵巧化、微型化、制导化、多功能化弹药。

### 1.2 新型弹药加速试验的研究现状

加速试验是一种高效率、低成本，针对高可靠长寿命产品进行寿命评估的一种试验方法。从 20 世纪 60 年代至今，已逐渐成为弹药可靠性工程中被广泛应用的手段。

国内对新型弹药加速试验的研究工作起步较晚，主要还是以自然环境试验为主。加速试验相关研究多见于各军兵种机构和院校，对元器件、材料级及部件级取得了一些研究成果。如对某型末制导炮弹储存性能的研究<sup>[5]</sup>、对某型火箭弹控制仓可靠性的研究<sup>[6]</sup>、对末敏弹子弹关重件的研究等。

国外对新型弹药的研究较多，其中以美国和俄罗斯的相关研究最为成熟<sup>[7]</sup>。美军从 20 世纪 60 年代开始实施装备的可靠性研究工作，对导弹实施加速试验，并结合现场贮存数据，历时十几年时间形成了 4 份导弹贮存可靠性研究报告，得到了大量的可靠性数据。在此基础上，随后分别在“大力神 II”、“铜斑蛇”、“民兵 II”、“民兵 III”等导弹的可靠性研究中进行了加速试验<sup>[8]</sup>，确定了服役年限及相应的延寿计划，见表 1。美国空军实施的“长期寿命分析计划”，准确预估了导弹发动机的储存寿命，极大地延长了出厂规定的服役寿命。俄罗斯对整弹加速试验的研究处于领先地位，火炬设计局建立的加速贮存试验技术，在 6 个月时间完成了对“道尔”、“C-300”等多种导弹储

存 10 a 仍满足可靠性的验证<sup>[9]</sup>。

表 1 美国在部分导弹上的可靠性研究  
Tab.1 Research on the reliability of the United States on some missiles

导弹型号	应用的试验类型	结论
大力神 II	实际性能监测和 元器件加速贮存 试验	可服役 25 a
铜斑蛇	元器件和零部件 的加速老化试验	贮存 10 a 的可靠度为 0.89
民兵 II	加速寿命试验	置信度 0.90，可靠度 0.99 前提下，一级发动机寿命为 11 a
民兵 III	实际性能监测	预测寿命，更换部件，服役年限远超 10 a 设计寿命

## 2 加速试验在新型弹药全寿命周期中的应用

全寿命周期指的是产品从设计生产到使用报废的寿命历程内所经历的所有阶段，综合分析每个阶段有助于提高产品的环境适应性及可靠性<sup>[10]</sup>。新型弹药全寿命周期包括论证研制、定型生产、出厂验收、装卸运输、库房储存、训练发射等各个阶段<sup>[11]</sup>，其全寿命周期剖面如图 1 所示。

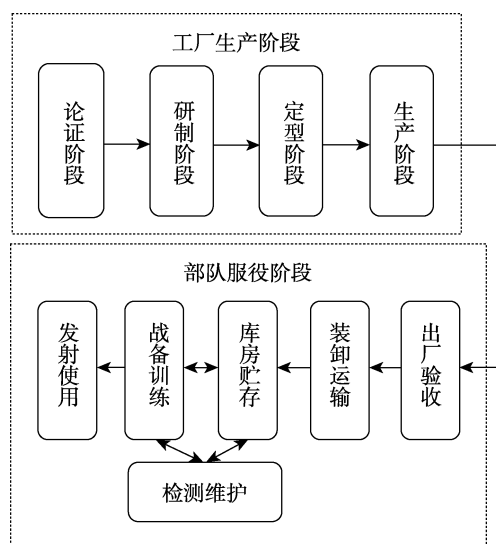


图 1 新型弹药全寿命周期剖面  
Fig.1 Life cycle profile of new ammunition

### 2.1 在工厂生产阶段的应用

新型弹药上应用的大量高新技术，决定了其研制周期要远大于传统弹药，不同技术、材料及工艺的兼容性，器件之间的配套性，分系统间的协调性，这些内容都需要加速试验来进行验证。加速试验主要应用在研制定型阶段（见表 2），包含以下几方面内容。

- 1) 结构设计方面。部件结构之间的连贯设计，运输及发射中的抗震减振设计等。
  - 2) 材料抗性方面。所选材料的抗高温、抗低温、抗腐蚀、硬度、绝缘、防滑等特性。
  - 3) 密封设计方面。整弹或者关键部件的防水、防潮、防尘、防污染等密封性设计。
- 以上内容都需要加速试验来验证，一方面，对比不同选择之间的优劣；另一方面，加速暴露存在的问题，能极大程度缩短研制定型的时间，提高新型弹药的可靠性<sup>[12]</sup>。

表 2 加速试验在不同阶段的应用

Tab.2 Application of accelerated test in different stages

序号	阶段	内容
1	研制阶段	对选择的材料、元器件及其它部件用加速试验进行对比或者暴露其薄弱环节，得出可靠性信息
2	定型阶段	利用研制阶段的加速试验数据，结合相似产品数据及相关历史数据，评估新型弹药寿命
3	贮存、使用阶段	结合实际贮存及使用数据，对元器件、零部件、整机级或者整弹进行研究，分析薄弱环节，开展加速试验，进行统计分析，重新评估寿命并开展延寿工作

### 2.2 在部队服役阶段的应用

新型弹药在出厂时给出的寿命值一般是一个预估值，是结合同类产品数据及历史数据评估后给出的经验值，还需要通过科学手段结合自然环境数据进一步评估其可靠性。

新型弹药在交付部队后，会遭遇一系列真实的环境考验，能够获得一定的自然环境数据。如贮存中的检测数据、发射后的飞行命中数据等。这些数据结合加速试验进行相关研究，能进一步明确弹药的可靠性信息，为延寿工作打下基础。

## 3 加速试验的统计分析方法

在工程研究中，因整机级以上产品或复杂部件失效模式的多样性、复杂性，产品本身存在多种失效竞争的情形，因此主要研究方向多为元器件、材料级和简易部件级这类失效模式比较单一的产品。文中主要对加速寿命试验（ALT）和加速退化试验（ADT）两种试验方法进行分析。

### 3.1 加速试验分析过程

在产品的实际使用过程中，会受到各种不同类型环境应力的作用，但对某种失效模式而言，起决定性作用的都是其中的 1 种或者 2 种环境应力，称为敏感应力。ADT 和 ALT 都是通过加大作用于产品本身的敏感应力水平，来促进性能退化或者失效的出现，并

且都是基于试验中失效机理不变这个前提。

加速试验的数据处理方法并非一成不变的，国内外很多学者在试验的优化设计、数据的统计分析及建模的方法研究等方面，都进行了大量的研究<sup>[13-15]</sup>。如 ADT 中基于伪失效寿命建模、基于退化量分布建模<sup>[16-17]</sup>、基于 Gamma 或 Wiener 随机过程建模<sup>[18-19]</sup>，ALT 中基于三步分析法建模等，不同的建模方法对数据处理的步骤也不相同<sup>[20]</sup>，如图 2、图 3 所示。另外，从图 2、图 3 及相关的文献可以看出，在数据处理中很重要的几个因素为寿命模型的确定、加速模型的选择、参数的估计。

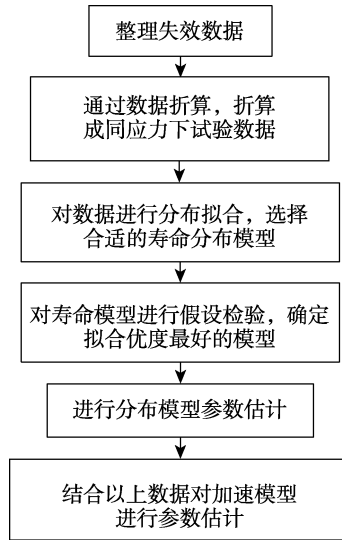


图 2 ALT 数据处理流程 Fig.2 ALT Data processing flow

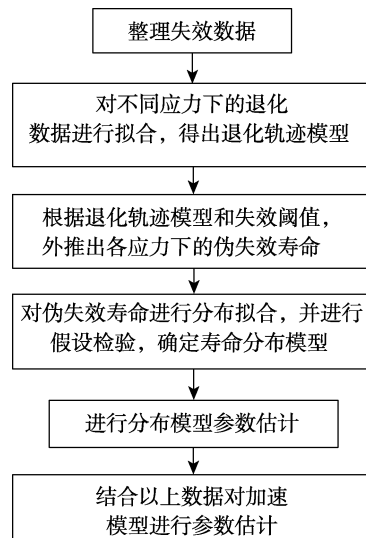


图 3 ADT 数据处理流程 Fig.3 ADT Data processing flow

### 3.2 寿命分布模型

产品类型的不同，其符合的寿命分布也不相同。一般的寿命分布包括威布尔分布（Weibull）、指数分

布、正态分布、对数正态分布、伽马分布 (Gamma) 等。通过对失效数据 (伪失效数据) 的分析, 根据 WPP 图估法、概率纸法等方法可初步判定产品的寿命分布, 或者也可根据产品的失效模式, 结合经验资料进行分布假设。对寿命分布模型进行估计后, 可利用假设检验的方法来对寿命分布进行拟合优度检验, 以确定产品的寿命分布与初步判定结果是否相同。

假设检验分为参数检验和非参数检验, 参数检验是在已知总体分布或者假定服从某分布的前提下, 用样本均值或方差的估计值对总体的检验, 如  $u$  检验、 $t$  检验、 $F$  检验等; 非参数检验不需对分布进行假设, 可在总体参数未知的情况下, 通过样本数据推断总体分布, 如卡方 ( $\chi^2$ ) 检验、二项分布检验、K-S 检验等, 部分常用的非参数检验方法见表 3<sup>[21-22]</sup>。非参数检验对数据的要求不高, 计算简单、便于掌握, 使用上灵活广泛, 能适用于不同分布, 但存在针对性差的缺点, 如在分布已知的情况下功效不高。在非参数检验方法中,  $\chi^2$  检验法一般要求样本量大于 50, 且分组频数不小于 5<sup>[23]</sup>, 不适用于新型弹药这种造价高昂、样本量小的情况; K-S 检验较卡方检验来说适用面更广, 对数据的利用上不需分组, 可直接对样本随机值数据进行检验, 且更具有稳健性。

表 3 非参数检验方法  
Tab.3 Nonparametric test method

样本量	检验方法
单样本	单样本 K-S 检验、卡方 ( $\chi^2$ ) 检验、二项分布检验、符号秩检验等
双样本	独立样本: 双样本 K-S 检验、U 检验、Wald 检验等 相关样本: Sign 检验、符号秩检验等
多样本	独立样本: 中位数检验、K-W 检验等 相关样本: Friedman 检验、Kendall 协同系数检验、Cochran Q 检验等

### 3.3 加速模型

加速模型是用来描述产品可靠性特征量与应力水平之间关系的方程, 通过加速模型才能将高应力下的寿命信息转化为正常应力水平下的信息。加速模型包括物理加速模型和数学加速模型两类, 如 Arrhenius 模型、逆幂律模型及 Eyring 模型属于物理加速模型, 多项式模型属于数学加速模型<sup>[24]</sup>。物理加速模型是基于失效物理而来的, 具有较高的可信度, 可经过适当的方式进行线性拟合; 而数学加速模型是对物理加速模型的数学假设, 虽然适用面比较广, 但存在风险大的缺点。不同模型适应的应力种类不同, 经大量工程实践证明, 各类环境因素中对新型弹药影响较大的因素之一为温度, 故经常选择 Arrhenius 模型作为加速模型。

### 3.4 参数估计

在对寿命分布模型、加速模型及退化轨迹模型进行数据处理时, 都需要对模型中的未知参数进行估计。常用的参数估计方法有最小二乘法 (LSE)、极大似然估计法 (MLE)、Bayes 估计法等。

最小二乘估计法<sup>[25]</sup>其实就是使实际值与估计值之差的平方和最小的方法, 能较为简便地求出未知数据, 并通过使误差平方和最小的方式找出数据的最佳函数匹配。但最小二乘法在工程应用中会引入误差, 使信息丢失, 并且使用的是线性估计, 使用上有一定的局限性。

Bayes 估计法是采用高次概率分布的积分法对模型的未知参数进行估计, 需要利用历史数据或者同类产品的相似经验等作为先验信息, 结合加速试验所得小样本数据对产品的分布及参数进行推断<sup>[26-27]</sup>。如果没有一定的先验信息, 则不适合用此方法估计。

极大似然估计法<sup>[28-29]</sup>是使似然函数最大化来确定参数估计值的方法, 使用上较为直接, 有良好的不变性, 在参数估计中应用最为广泛。对于大样本的完整数据, 这 3 种方法都能提供较为一致的结论。但针对新型弹药而言, 数据量较少, 极大似然估计法更具优势。特别是相比于另两种方法, 极大似然估计法具有标准离差更小、参数估计更为准确的优点, 并且能对模型参数的置信区间进行有效计算, 对数据的利用也较为完整<sup>[30]</sup>。

## 4 结语

新型弹药的可靠性研究是军工领域研究的热点, 能提高新型弹药对环境的适应性, 延长服役年限, 提高军事效益。目前, 加速试验在新型弹药全寿命期中的应用很多, 但研究层次还处于单一或简单失效机理的元器件、材料级, 对包含多种失效模式、失效机理相互竞争存在的复杂产品研究还不够深入, 相应的统计分析方法也亟需完善。

#### 参考文献:

- [1] 杨玉兴, 程德斌. 加速试验工程运用综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2012, 30(6): 44-47.  
YANG Yu-xing, CHENG De-bin. Review of accelerated test engineering application[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2012, 30(6): 44-47.
- [2] 崔平, 文健, 范志风. 信息化弹药[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2016.  
CUI Ping, WEN Jian, FAN Zhi-feng. Information ammunition[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2016.
- [3] 陈循, 张春华. 加速试验技术的研究、应用与发展[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 130-136.  
CHEN Xun, ZHANG Chun-hua. Research, application

- and development of accelerated testing[J]. Journal of mechanical engineering, 2009, 45(8): 130-136.
- [4] 陈循, 张春华, 汪亚顺, 谭源源. 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.
- [5] 胡恩平. 某型末制导炮弹储存性能研究[D]. 石家庄: 石家庄军械学院, 2000.  
HU En-ping. Research on storage performance of certain type of guided projectile[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Ordnance Academy, 2000.
- [6] 賡罗. 控制舱加速度计加速试验优化设计研究[D]. 石家庄: 石家庄军械学院, 2014.  
GENG Luo. Research on the optimum design of the accelerometer test of the control cabin[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Ordnance College, 2014.
- [7] 吴力力, 丁玉奎, 甄建伟. 国外弹药延寿研究现状[J]. 飞航导弹, 2018(3): 74-77, 95.  
WU Li-li, DING Yu-kui, ZHEN Jian-wei. Current status of foreign ammunition life extension research[J]. Aerodynamic missile journal, 2018(3): 74-77, 95.
- [8] 陈兵, 李星. 加速寿命试验技术在国内外的工程应用研究[J]. 强度与环境, 2010, 37(6): 31-38.  
CHEN Bing, LI Xing. Research of accelerated life testing technology application at home and abroad[J]. Structure & environment engineering, 2010, 37(6): 31-38.
- [9] 王耀东. 某型末敏子弹火工品储存寿命评估方法研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2016.  
WANG Yao-dong. Research on storage life evaluation method of certain type of terminal sensitive bullet initiator[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2016.
- [10] 宣兆龙, 易建政. 装备环境工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.  
XUAN Zhao-long, YI Jian-zheng. Equipment environmental engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [11] 于衍华, 史国华, 山春荣. 武器装备环境适应性论证[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007.  
YU Yan-hua, SHI Guo-hua, SHAN Chun-rong. Demonstration of environmental adaptability of weapons and equipment[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2007.
- [12] 孟涛, 张仕念, 易当祥. 导弹贮存延寿技术概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013.  
MENG Tao, ZHANG Shi-nian, YI Dang-xiang. Introduction to missile storage life extension technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2013.
- [13] 伏洪勇, 党炜, 李锴. 基于性能退化模型的空间电子设备加速寿命试验研究与应用[J]. 载人航天, 2014, 20(3): 267-272.  
FU Hong-yong, DANG Wei, LI Kai. Study and applications of accelerated life tests for space-electronic equipments based on a performance degradation model[J]. Manned spaceflight, 2014, 20(3): 267-272.
- [14] 樊黎霞, 郑肖建, 方峻. 应用多性能参数退化数据评估身管寿命可靠性[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(2): 52-54, 77.  
FAN Li-xia, ZHENG Xiao-jian, FANG Jun. Assessment of life reliability for weapon barrel by multivariate degradation data[J]. Journal of Sichuan ordnance, 2014, 35(2): 52-54, 77.
- [15] 唐圣金, 郭晓松, 周召发, 等. 步进应力加速退化试验的建模与剩余寿命估计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(16): 33-40.  
TANG Sheng-jin, GUO Xiao-song, ZHOU Zhao-fa, et al. Step stress accelerated degradation process modeling and remaining useful life estimation[J]. Journal of mechanical engineering, 2014, 50(16): 33-40.
- [16] 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.
- [17] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 基于加速退化数据的可靠性评估[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(S8): 808-812.  
DENG Ai-min, CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, et al. Reliability assessment based on accelerated degradation data[J]. Journal of projectiles, rockets, missiles and guidance, 2006, 26(S8): 808-812.
- [18] 黄周霖, 王召斌, 王佳炜. 基于性能退化数据的可靠性评估方法综述[J]. 电器与能效管理技术, 2017(19): 35-40.  
HUANG Zhou-lin, WANG Zhao-bin, WANG Jia-wei. Review of reliability evaluation methods based on performance degradation data[J]. Electrical & energy management technology, 2017(19): 35-40.
- [19] 范志锋, 崔平, 王卫民, 等. 基于 Wiener 过程的火箭弹控制系统储存可靠性评估[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(1): 108-110.  
FAN Zhi-feng, CUI Ping, WANG Wei-min, et al. Storage reliability estimation of rocket projectile control system based on Wiener process[J]. Journal of projectiles, rockets, missiles and guidance, 2014, 34(1): 108-110.
- [20] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 加速退化试验技术综述[J]. 兵工学报, 2007, 28(8): 1002-1007.  
DENG Ai-min, CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, et al. A comprehensive review of accelerated degradation testing[J]. Acta armamentarii, 2007, 28(8): 1002-1007.
- [21] 马凤鸣, 王忠礼. 假设检验方法分析及应用[J]. 长春大学学报, 2012, 22(2): 188-192, 196.  
MA Feng-ming, WANG Zhong-li. Analysis and application of hypothesis testing method[J]. Journal of Changchun university, 2012, 22(2): 188-192, 196.
- [22] 尹江丽, 郭效芝. 假设检验方法在兵器试验中的应用研究[J]. 兵工自动化, 2013, 32(4): 69-71.  
YIN Jiang-li, GUO Xiao-zhi. Application & research of

- hypothesis test method in weapon test[J]. Ordnance industry automation, 2013, 32(4): 69-71.
- [23] 陆俭国. 电工产品可靠性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.  
LU Jian-guo. Reliability of electrical products[M]. Beijing: China Machine Press, 1991.
- [24] 黄婷婷, 姜同敏. 加速寿命试验中统计加速模型综述[J]. 装备环境工程, 2010, 7(4): 57-62.  
HUANG Ting-ting, JIANG Tong-min. Review of statistical acceleration models in accelerated life testing[J]. Equipment environmental engineering, 2010, 7(4): 57-62.
- [25] 宣兆龙, 王耀冬, 李翰朋. 基于趋势分析法的火工品可靠储存寿命估计[J]. 火工品, 2017(2): 12-14.  
XUAN Zhao-long, WANG Yao-dong, LI Han-peng. Storage life evaluation of initiating explosive device based on trend analysis[J]. Initiators & pyrotechnics, 2017(2): 12-14.
- [26] 董聪. 可靠性工程中的经验 Bayes 方法(II)[J]. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(4): 460-464.  
DONG Cong. Empirical Bayesian method in reliability engineering(II)[J]. Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics, 1996, 22(4): 460-464.
- [27] 刘江, 姚安东, 王攀, 等. 新型弹药可靠性评估方法[J]. 兵工自动化, 2014, 33(5): 1-3.  
LIU Jiang, YAO An-dong, WANG Pan, et al. Reliability evaluation method of new ammunition[J]. Ordnance industry automation, 2014, 33(5): 1-3.
- [28] 安潇潇. ARMA 相关模型及其应用[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2008.  
AN Xiao-xiao. The model about ARMA and its application[D]. Qinhuangdao, China: Yanshan University, 2008.
- [29] 雷刚. Weibull 分布寿命数据的参数估计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
LEI Gang. Parameter estimation of lifetime data in weibull distribution[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [30] 李慧志, 穆希辉, 张烜工, 等. 基于加速试验的制导弹药贮存寿命评估综述[J]. 飞航导弹, 2019(1): 82-86.  
LI Hui-zhi, MU Xi-hui, ZHANG Xuan-gong, et al. Review of storage life assessment of missile-making munitions based on accelerated tests[J]. Aerodynamic missile journal, 2019(1): 82-86.