doi: 10.7690/bgzdh.2015.06.002

弹药长期储存可靠性数据分析方法

熊　尚[1]，戴　荣[1]，纪京新[2]
（1. 中国人民解放军 91872 部队武备室，北京 102442；2. 海军工程大学兵器工程系，武汉 430033）

摘要：为了根据弹药的分布模型计算弹药的可靠储存寿命，对基于指数分布、威布尔分布与极小值分布的 3 种计算思想的弹药储存模型进行比较分析。采用非均匀分布修正法对弹药可靠性试验的数据进行修正，根据修正后的试验数据，结合威布尔分布和极小值分布模型，对失效分布函数采用极大似然估计的方法进行参数估计，且将该分布模型计算出的可靠度与 GJB 可靠度进行比较，通过最大似然估计法计算，极小 χ^2 检验法检验出其中较优的分布模型。实验结果证明：极小值模型为最优，该批弹药的储存寿命为 24 a。

关键词：极小值分布；弹药储存寿命；最大似然估计法；极小 χ^2 检验法；可靠度
中图分类号：TJ410.6　　**文献标志码**：A

Research on Data Analysis Methods of Reliability About Ammunition's Long-term Storage

Xiong Shang[1], Dai Rong[1], Ji Jingxin[2]
(1. *Armament Research Room*, *No*. 91872 *Unit of PLA*, *Beijing* 102442, *China*;
2. *Ordnance Engineering Department*, *Naval University of Engineering*, *Wuhan* 430033, *China*)

Abstract: For calculating reliable ammunition storage life based on ammunition distribution model, compare and analyze ammunition storage models of index distribution, weibull distribution and minimum distribution. Use non-uniform distribution correction method to correct ammunition reliability test data. According to correction test data, combined with weibull distribution model and minimum distribution model, use maximum likelihood estimation method to estimate parameter of failure distribution function, and then compare reliability degree of this model with GJB reliability degree. Through maximum likelihood estimation method calculation and minimum χ^2 tested method, test the optimal distribution model. The test results show that: the minimum method model is optimal, its ammunition storage life is 24 years.

Keywords: distribution of minimum; ammunition storage life; maximum likelihood estimation method; minimum χ^2 test method; reliability

0　引言

弹药的贮存可靠性是指弹药产品在规定的条件下，在规定的贮存时间内，保持规定状态的能力[1]。在对弹药储存可靠性进行评估时，只能以个别弹药产品作为样品进行分析，但人们关心的往往是一批弹药产品的贮存寿命，因此，统计学范畴的弹药贮存寿命更具有研究价值[2]。在进行统计分析时，根据相关研究结果和试验数据，用几种已知的拟合分布模型拟合弹药的失效分布，确定最佳的分布模型，然后根据分布模型计算弹药的可靠储存寿命，所以分布模型的选取是结果评估准确性的关键。

1　数据获取

储存寿命是弹药的重要质量特性，正确评估弹药储存寿命的目的是以最低的寿命周期费用实现弹药装备的完好性，提高可用性并减少后勤保障费用[3]。弹药产品长期储存后的使用可靠性检测可以分为射击试验和实验室试验 2 种方式。射击试验是采用射击(含抛射)的方法对弹药进行质量检测；实验室试验是在实验室条件下，通过对弹药分解后的元部件分别进行检测，分别确定弹药或弹药元件的失效数。弹药的失效数为含有一个或一个以上失效元件的弹药发数，各类元件的失效数为本元件外观检测、分解检查与射击试验或实验室试验失效数之和，根据失效数及抽样的数量，确定弹药或弹药元件的失效率。

2　可靠性试验数据处理

2.1　数据的修正

弹药在某次试验中进行 m 次随机抽样，设在进行第 i 次试验时弹药储存年限为 t_i，抽取样品数为 n_i，失效数为 r_i。

那么失效率为：$P_i=r_i/n_i(i=1,2,\cdots,m)$。

弹药在长期储存中，由于受外界环境影响和自身性能的下降，其失效率会随着时间的推移而不断增长。但是在实际试验中，有时会出现 $P_i>P_{i-1}$ 的

收稿日期：2015-01-14；修回日期：2015-03-03
作者简介：熊　尚(1990—)，男，湖北人，学士，助理工程师，从事弹药工程研究。

现象，这种现象称为“逆序”或“倒挂”，是由于抽样原因引起的，显然，这种数据会对弹药的可靠性研究产生不利影响，因此，必须对弹药可靠性试验的数据进行修正[4]。

笔者采用“非均匀分布修正法”，记 $\theta_0=p_{i-1}$，$\theta=p_i$，则 θ 的 Byes 估计为：

$$\hat{\theta}=p_i'=a/(n_i+1.5)+D(a,b,x)/[(n_i+1.5)F(a,b,x)] \quad (1)$$

式中：$b=n_i-r_i+1$，$a=r_i+0.5$，$x=\theta_0=\hat{p}_{i-1}$，$D(a,b,x)=x^a(1-x)^b$，$F(a,b,x)=\int_x^1 y^{a-1}(1-y)^{b-1}\mathrm{d}y$。

将 $\hat{\theta}$ 代替 $\hat{p}_i$，则此时 $p_{i-1}<p_i$。处理后如果仍存在“逆序”，则按照上述方法进行处理，直到失效率呈递增序列为止。

2.2 分布拟合

2.2.1 分布模型

弹药产品的失效，通过调查发现，一般假定认为弹药储存寿命符合下列 3 种分布模型[5]。

指数分布：

$$F(t)=1-\mathrm{e}^{-\lambda t} \quad (2)$$

式中 λ 为失效率。

威布尔分布：

$$F(t)=1-\mathrm{e}^{-(t/\eta)m} \quad (3)$$

式中：m 为形状参数；η 为尺度参数，均大于零。

极小值分布：

$$F(t)=1-\exp\left[-\mathrm{e}^{(t-\eta)/\sigma}\right] \quad (4)$$

式中：η 为位置参数；σ 为尺度参数。

在这 3 种分布中，指数分布可以看作是威布尔分布的特殊情况($\eta=1/\lambda$, $m=1$)；所以，笔者在对威布尔分布和极小值分布模型进行参数确定的基础上，通过拟合分布检验确定较优的分布模型。

2.2.2 分布模型参数的计算

根据修正后的试验数据，结合威布尔分布和极小值分布模型，对失效分布函数采用极大似然估计的方法进行参数估计。

样本似然函数为

$$L(\theta)=L(x_1,x_2,\cdots,x_m;\theta)=\prod_{i=1}^{m}f(x_i,\theta) \quad (5)$$

其中 $f(x_i,\theta)$为概率密度。

那么，$\hat{\theta}$ 可从对数似然方程方程 $\mathrm{d}\ln L(\theta)/\mathrm{d}\theta=0$ 解得。$\hat{\theta}(x_1,x_2,\cdots,x_m)$ 为 θ 的最大似然估计量。当存在多个未知参数时，可以联立方程组，对于 2 种分布模型的参数，可以利用最大似然估计法求解。

2.3 分布模型确定

分布模型的检验就是从上述 2 种分布中确定一个作为弹药失效的分布。极小 χ^2 检验法是一种较好的检验方法，通过对 χ^2 的计算，值越小的就是较好的分布[6]。其中，χ^2 的计算采用下式进行：

$$\chi^2=\sum_{i=1}^{m}n_i(\hat{F}(t_i)-\hat{p}_i)/(\hat{F}(t_i)(1-\hat{F}(t_i))) \quad (6)$$

其中 $\hat{p}_i=r_i/n_i$，可以由检测结果求出。对 χ^2 进行比较，χ^2 越小，说明该分布越好。在得到可靠分布模型之后，就可以求出在一定置信水平下的可靠度。

2.4 结果的验证

在对弹药失效模型进行确定后，也可以计算出弹药储存过程中各个时间段的可靠度。笔者根据 GJB 5706—2006《通用弹药例行监测方法》中规定的可靠度计算方法，结合试验原始数据，计算各个检测年度的可靠度。通过与文中确定的分布模型计算的各抽样年度的可靠度比较，验证方法的正确性。

GJB 5706—2006 中规定按照下式计算抽样批弹药可靠度 R 的单侧置信下限。

$$\left.\begin{array}{l} r=0\text{时}, R_L=\sqrt[n]{1-\gamma} \\ r>0\text{时}, \sum_{x=0}^{F}\binom{n}{x}R_L^{n-x}(1-R_L)^x=(1-\gamma) \\ r=n-1\text{时}, R_L=1-\sqrt[n]{\gamma} \\ r=n\text{时}, R_L=0 \end{array}\right\} \quad (7)$$

式中：γ 为给定的置信水平；R_L 为可靠度单侧置信下限。

3 实例计算

笔者针对某海岛的某型弹药的可靠性实验数据进行分析，其中原始试验数据如表 1 所示。

表 1 原始数据

储存年限/a	样本量	失效数	失效率
0	—	—	0.005
5	50	0	0
10	100	1	0.01
15	100	0	0
17	100	2	0.02
19	40	0	0
21	30	1	0.033

对“逆序”数据进行修正处理后，结果如表 2。

（下转第 24 页）