【后勤保障与装备管理】　doi：10.11809/scbgxb2015.03.026

舰炮弹药储存可靠寿命计算方法

赵　翀[1a]，马　野[1b]，董彩霞[2]，张熹涛[1a]

（1. 海军大连舰艇学院　a. 研究生管理大队；b. 舰炮系，大连　116018；
2. 西安理工大学 自动化与信息工程学院，西安　710048）

摘要：针对当前舰炮弹药需大量长期储存导致质量及可靠性降低等现状，提出了对小子样条件下舰炮弹药进行储存可靠性评估，预测储存可靠寿命；依据 Bayes 方法对数据进行处理，求出在各已知点的可靠度，结合储存寿命分布函数，对储存可靠寿命进行预测；最后通过实例验证该方法的合理性和有效性。

关键词：储存可靠寿命；Bayes 算法；可靠性评估；小子样

本文引用格式：赵翀，马野，董彩霞，等. 舰炮弹药储存可靠寿命计算方法[J]. 四川兵工学报，2015(3)：98－101.

Citation format：ZHAO Chong, MA Ye, DONG Cai-xia, et al. Study on Calculation of Reliable Storage Life of Naval Gun Ammunition[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015(3)：98－101.

中图分类号：TJ410.89　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006－0707(2015)03－0098－04

Study on Calculation of Reliable Storage Life of Naval Gun Ammunition

ZHAO Chong[1a], MA Ye[1b], DONG Cai-xia[2], ZHANG Xi-tao[1a]

(1. a. Postgraduate Team; b. Department of Naval Gun, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China; 2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Owing to the current situation that the quality and reliability of ammunition will decline after a long-time massive storage, storage reliability assessment and life prediction of naval gun ammunition were proposed with small-scale. Data was processed by using Bayesian approach and the reliability of certain times was calculated. Reliable storage life was predicted according to distribution function. The algorithm is turn out to be reasonable and effective by the actual example.

Key words: reliable storage life; Bayesian approach; reliability assessment; small-scale

舰炮弹药是舰炮武器系统的核心，是完成作战任务的最终手段。舰炮弹药作为重要的军用物资，消耗量和需求量大，需要有充足且长期的储备。然而在储存期间，受储存条件或弹药本身设计工艺等因素的影响，储存质量会随之下降，因此对舰炮弹药的储存可靠寿命进行预测是当前急需研究的问题。由于舰炮弹药的特殊性，试验样本不能重复使用，加之经济性等原因，在进行可靠性试验时不可能采用大量成批样本进行试验，因此不宜使用传统可靠性分析理论，但符合小子样情况，需要运用小子样理论。常见用的小子样可靠性评价方法有置信区间法、Bayes 方法、Fiducial 方法、近似正态方法、信息熵法和矩拟合方法等[1]。其中 Bayes 方法便于利用先验信息、节约时间成本、结果准确性高而被广泛使用[2,3]。

1　舰炮弹药储存可靠寿命

1.1　舰炮弹药储存可靠性

舰炮弹药储存可靠性是指弹药在规定的储存条件下和规定的储存时间内，保持规定功能的能力，是衡量弹药质量优劣的重要指标[4]。

收稿日期：2014－09－15

作者简介：赵翀(1990—)，女，硕士研究生，主要从事战储器材轮换研究。

储存条件是指弹药储存的自然环境条件和人为环境条件。自然环境条件主要指储存地区的温度、湿度、空气环境等外在环境;人为环境条件主要指包装运输、储存地点及周边环境等环境。储存时间一般是指弹药从出厂开始计算直至储存到某一时刻的时间。规定功能是指根据使用目的而赋予弹药的各种功能,主要包括保证安全和可靠作用两方面的若干项具体功能。

衡量舰炮弹药的储存可靠性的参数是舰炮弹药的储存可靠度。储存可靠度是指舰炮弹药出厂后,在规定的储存、维护条件下,到规定的储存时间仍能通过鉴定试验的弹药检测合格率[5]。

1.2　舰炮弹药储存可靠寿命

舰炮弹药储存可靠寿命是指在规定的储存条件下,满足规定功能要求所对应的最短储存时间。设 T 为储存寿命,T_R 为储存可靠寿命,R 为储存可靠度,则三者的关系可以概率表示为

$$R = P\{T \geqslant T_R\} = \gamma \tag{1}$$

式(1)中,γ 为置信度,表示允许的合格率。

预测可靠寿命的基本方法有 2 种:一种是时间序列预测法,该方法不考虑数据产生的原因,只按数据产生的时间顺序排列做预测分析,虽然使用范围很广,但精度较低。另一种是可靠性统计分析方法,该方法是基于储存弹药抽样试验观测数据与弹药性能指标对比,通过统计分析预测存储寿命,精度更高,因此本文选用该方法进行舰炮弹药储存可靠寿命预测。

可靠性统计分析方法的关键是找出作为抽样的弹药样本,通常分批次选取不同储存时间不同的弹药进行抽样,通过获得对抽样样本进行试验得出试验数据。具体步骤如图 1 所示。

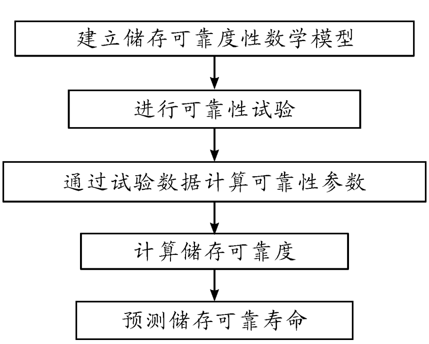

图 1　可靠性统计分析法步骤

2　舰炮弹药储存可靠寿命预测

2.1　基本思路

储存条件下舰炮弹药产品的可靠性分为固有可靠度 R_0 和条件储存可靠度 $R_i(t)$ 。R_0 表示弹药固有的可靠度,$R_i(t)$ 表示储存环境条件对产品性能影响的大小。产品储存可靠度计算公式为

$$R_S(t) = R_0 R_i(t) \tag{2}$$

储存可靠性评估的基本思路如下[6,7]:

对不同年份的产品抽样进行试验,根据出厂验收数据和鉴定试验数据按二项分布估计产品的固有可靠度 $\hat{R}_0$ 和置信下限 R_{0L};依据 Bayes 理论计算产品在各已知年份点 t_i 上的可靠度点估计 $\hat{R}_{si}$ 和置信下限 R_{iL}。

假定一条储存寿命分布函数,利用最小二乘法估计分布参数,计算任意时间点的条件储存可靠度 $\hat{R}_i$;根据式(2)计算产品的储存可靠度 $R_s(t)$ 和储存寿命。

2.2　Bayes 评估方法

依据以上思路,可知在使用 Bayes 方法对舰炮弹药储存可靠性进行评估时,需要计算弹药的固有可靠度、各已知时间点的储存可靠性、条件储存可靠性函数和任意时刻的可靠性这四个参数。

统计舰炮弹药的出厂验收数据和鉴定试验数据,确定总样本数和失效数。设 n 为总样本数,f 为失效数,s 为成功数。舰炮弹药的储存可靠性实验是成败型服从二项分布,则 s 对 R 的条件概率密度为

$$g(s \mid R) = \binom{n}{s} R^s (1 - R)^{n-s} \tag{3}$$

二项分布的共轭先验分布为贝塔分布,取先验分布为:

$$\pi(R) = Beta(R \mid a, b), 0 < R < 1 \tag{4}$$

故后验密度函数为

$$f(R \mid s) = \frac{R^{a+s-1}(1 - R)^{n-s+b-1}}{B(a + s, n + b - s)} = \frac{\Gamma(n + a + b)}{\Gamma(a + s)\Gamma(n + b - s)} R^{a+s-1}(1 - R)^{n-s+b-1} \quad 0 < R < 1 \tag{5}$$

此时 R 的期望后验估计值为

$$\hat{R} = \frac{a + s}{n + a + b} \tag{6}$$

其中,a,b 为待定参数,可由验前信息确定,即 $\pi(R) = B(R, 1 + s, 1 + f)$;当无验前信息时可运用 Jeffrey 准则,取 $a = b = \dfrac{1}{2}$。

单侧置信下限 R_L 根据公式

$$\int_{R_L} f(R \mid s)\,\mathrm{d}R = \gamma \tag{7}$$

确定。其中 γ 为置信度。

1）固有可靠度 R_0。由于缺少相关出厂数据,根据 Jeffrey 准则,取 $a = b = \dfrac{1}{2}$,则 R_0 的后验密度为[8-10]

$$f(R_0) = Beta\left(R \,\middle|\, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) = \frac{\Gamma(1)}{\Gamma(\frac{1}{2})\Gamma(\frac{1}{2})} R^{-1/2}(1 - R)^{-1/2} \tag{8}$$

则可靠度的点估计 $\hat{R}_0$ 为

$$\hat{R}_0 = \frac{s + 1/2}{n + 1} \tag{9}$$

单侧置信下限 R_{0L} 由公式

$$\int_{R_{0L}}^{1} Beta(R \mid s + 1/2, n - s + 1/2)\mathrm{d}r = \gamma \tag{10}$$

确定。

2）各已知时间点的储存可靠性。结合舰炮弹药可靠性数据 (n_i, f_i)，可得可靠度后验密度为

$$Beta(R \mid a + n_i - f_i, b + f_i) \tag{11}$$

则可靠度点估计为

$$\hat{R}_{si} = \frac{a + 2(n_i - f_i)}{2n_i + a + b} \tag{12}$$

置信下限 R_{iL} 由公式

$$\int_{R_{iL}}^{1} Beta(R \mid a + n_i - f_i, b + f_i)\mathrm{d}R = \gamma \tag{13}$$

确定。

3）条件储存可靠度函数。经大量研究实验证明，舰炮弹药的寿命分布属于 Weibull 分布模型，可靠度函数为

$$R_i(t) = e^{-(\frac{t}{\eta})^m} \tag{14}$$

m、η 的值可以通过最小二乘法估计得[11,12]。

4）任意时刻储存可靠性评估。根据式(2)可知任意 t 时刻的弹药储存可靠度为

$$R_s(t) = R(t)\ {}_iR_0$$

$R_s(t)$ 的方差近似为

$$V(R_s(t)) = R_s^2(t)[\ln R_s(t)]^2\{1.109 - 0.514\ln(-\ln R_s(t)) + 0.608[\ln(-\ln R_s(t))^2]\}/n_0 \tag{15}$$

其中，n_0 为抽样点样本量的平均值，因此置信水平为 γ 的单侧可靠度置信下限为

$$R_{sL}(t) = R_s(t) - \mu_\gamma\sqrt{V(R_s(t))} \tag{16}$$

其中，μ_γ 为标准正态分布的 γ 的分位数。

5）储存可靠寿命。设产品允许的最低可靠度为 R_L，根据式(1)，给定置信度 γ 的可靠储存寿命 T_R 应满足：

$$P(R_s(T_R) \geqslant R_L) = \gamma \tag{17}$$

根据正态近似法，认为 $R_s(T_R)$ 近似服从均值为 $R_s(t)$，方差 $\sigma^2(t)$ 为 $R_s(t)[1 - R_s(t)]/n_0$ 的正态分布，根据式(14)得：

$$P\{[R_s(t) - R(T_R)]/\sigma(t) \leqslant [R_s(t) - R_L]/\sigma(t)\} = \gamma \tag{18}$$

其中

$$\sigma(t) = \sqrt{R_s(t)[1 - R_s(t)]/n_0} \tag{19}$$

则可靠储存寿命 T_R 满足：

$$[R_s(T_R) - R_L]/\sigma(T_R) = \mu_\gamma \tag{20}$$

3 实例分析

随机对某仓库6个不同年份的相同批次的某型舰炮弹药进行抽样检测，统计数据及固有可靠度如表1所示。

表1 抽样统计数据

储存年限	样本量 n	失效数 f	可靠度 R
0	50	0	0.990 2
3	60	1	0.983 6
5	50	1	0.980 4
7	40	1	0.975 6
9	30	1	0.967 7
10	50	2	0.960 8
13	50	2	0.960 8
15	40	2	0.951 2
19	50	4	0.921 6
23	30	3	0.903 2
25	20	3	0.857 1
30	10	2	0.818 1

表中，储存0 a可靠度认为是弹药固有可靠度 R_0，其他为各已知时间点的可靠度 R_{si}。

根据上述参数，通过 Matlab 运用最小二乘法进行曲线拟合，得 $m = 1.3184$，$\eta = 113.358\ 0$。

则

$$\hat{R}_i(t) = e^{-(\frac{t}{113.358\ 0})^{1.318\ 4}}$$

该型弹药的储存可靠度为

$$R_s(t) = 0.990\ 2e^{-(\frac{t}{113.358\ 0})^{1.318\ 4}}$$

如图2所示。

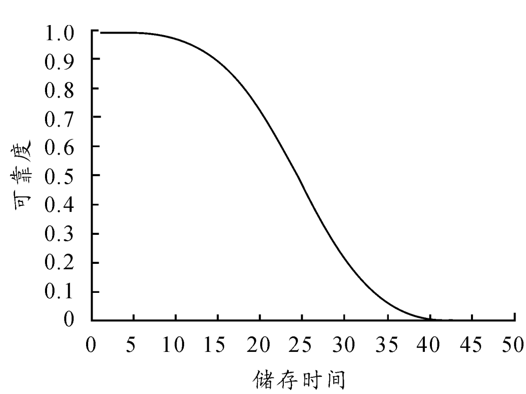

图2 该型弹药储存可靠度

有了储存可靠度分布，便可以进行可靠性评估，对储存可靠寿命预测，要求可靠度下限为 $R_L = 0.9$，取 $\mu_\gamma = 1.23$，根据公式(19)、(20)可计算得 $R_s(T_R) = 0.944\ 8$，即

$$0.990\ 2e^{-(\frac{T_R}{113.358\ 0})^{1.318\ 4}} = 0.944\ 8$$

解得储存可靠寿命 $T_R = 11$ a。符合实际情况。

4　结束语

针对舰炮弹药储存的特殊特点,运用 Bayes 方法对弹药储存可靠性进行评估,结合寿命分布对弹药储存储存可靠寿命进行预测,最后通过实例验证其方法的真实性和合理性。对舰炮弹药仓储管理等相关工作提供有效的决策支持。

参考文献:

[1] 梁庆卫,宋保维,邵成,等. 小子样产品的可靠性评定[J]. 机械设计与制造,2004(1):1-3.
[2] 李强,冯元生. 疲劳寿命小子样可靠性试验评估方法研究[J]. 中国机械工程,1996,7(3):93-95.
[3] 谢敬芝. Bayes 理论在小子样产品可靠性分析中的应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2011.
[4] 周枫. 基于 Bayes 方法的海岛环境弹药储存可靠性研究[D]. 长沙:国防科技技术大学,2010.
[5] 吴进煌,徐德民,宋贵宝,等. 战术导弹储存可靠性计算方法研究[J]. 西北工业大学学报,2008,26(3):288-291.
[6] 朱威,霍晋堂. 电子元器件贮存可靠性评估与预测的贝叶斯方法[J]. 可靠性分析与研究,2007(10):45-46,67.
[7] 陈忠振,许路铁. 弹载光电系统储存可靠性评估方法探究[J]. 价值工程,2013(9):325-327.
[8] 宋保维,秦英孝. 小子样产品的可靠性 Bayes 评定方法[J]. 弹箭与制导学报,1999(2):51-54.
[9] Richard K. Lemaster. Application of Bayesian Reliability Concepts to Cruise Missile Electronic[Z]. AD-A216208,1989.
[10] Theocbre Floropoulos. A Bayesian Method to Improve Sampling in Weapons Testing[Z]. AD-A204365,1989.
[11] 金良琼. 两参数 Weibull 分布的参数估计[D]. 昆明:云南大学,2010.
[12] 刘晗. 基于 Bayes 理论的小子样可靠性评定方法研究[D]. 长沙:国防科技技术大学,2006.
[13] 高萌,王金柱,何学广. 基于可靠性统计分析法的制导弹药储存寿命评估[J]. 装备环境工程,2013(4):110-113.

(责任编辑　杨继森)

(上接第 93 页)

参考文献:

[1] 李德平,潘自强. 辐射防护手册第一分册[M]. 北京:原子能出版社,1987.
[2] 陈宝山. 轻水堆燃料元件[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
[3] 朱继洲. 核反应堆安全分析[M]. 西安:西安交通大学出版社,2004:5-6.
[4] Lin X J. A Scheme for Establishing of Criterions for Reactor of Fuel Clad Failure[J]. Nuclear Power Engineering,2013,10(2):21-26.
[5] 陈彭. 轻水堆核电站燃料棒破损性状分析程序的开发[D]. 北京:中国原子能科学研究院,2006.
[6] Chen P. Development of Fuel Rod Failure On-Line Detection System for Nuclear Power Plant [J]. Atomic Energy Science and Technology,2005,39(s1) :56-59.
[7] Bo Z,Hua Y Y. Analysis of Steady State Temperature Field of Rod-Shaped Fuel Element Based on Virtual Reality[J]. ICONE,2010,4(1) :291-295.
[8] Isakov V P. Oxidation of a Stressed Uranium-Graphite Fuel Element [J]. Theoretical Foundations of Chemical Engineering,2013,47(3):291-294.

(责任编辑　杨继森)