

舰艇环境下弹药的可靠性分析*

钟强晖, 范志和, 徐剑波, 邓大新

(海军工程大学, 武汉 430033)

[摘要] 对海军弹药来说, 舰艇的复杂环境对弹药的可靠性影响比陆上仓库环境对弹药的可靠性影响大, 文中根据弹药在舰艇上储存的失效特点, 结合试验数据特点, 建立相应的数学模型和数据统计分析方法, 并给出一定置信水平下弹药在舰艇环境下的储存寿命与可靠度的关系。

[关键词] 舰艇; Weibull 分布; 置信度; 储存寿命

[中图分类号] TJ410.89; U674.7 [文献标志码] A

The Analysis of Ammunition Storage Reliability in Environment of Naval Vessel

ZHONG Qiang-hui, FAN Zhi-he, XU Jian-bo, DENG Da-xin

(Naval Engineering University, Wuhan 430033, China)

Abstract: For naval ammunition, naval vessel complex environment has more influences on naval ammunition than land depot. On the basis of ammunition failure feature in environment of naval vessel, combined with the feature of test data, a mathematic model and a method for statistical analysis is set up. The relationship between storage life and reliability under a confidence level is given.

Key words: naval vessel; Weibull distribution; confidence level; storage life

1 引言

在舰艇上由于种种条件限制, 弹药舱、初发弹药柜的储存条件远不如陆上储存条件。温度高, 湿度大, 日较差、年较差, 温湿度交变均比陆地弹药库大, 而且直接受盐雾作用。就不同地区而言, 自然气候环境也存在很大差异, 各个不同海域的舰艇部队存储环境条件也存在很大差异, 舰艇携行弹药可靠性变化呈现地区分布差异。由于存在环境力作用差异、地区分布差异以及弹药固有可靠性差异, 舰艇携行弹药储存可靠性的变化是一个复杂而实际的问题。为了提高舰艇战斗力, 保障舰艇生命力, 确保舰艇官兵生命安全, 研究舰艇部队携行弹药储存可靠性状况, 掌握其变化规律, 对于制定舰艇携行弹药质量监控规范, 科学地做好舰艇弹药技术保障工作是非常必要的。

2 建立数学模型

由于弹药的失效时间是无法准确观察到的, 当弹药在舰艇储存 t 年后, 经过试验只知道失效或仍可使用, 无法确切知道失效的准确时间, 也无法知道还能储存多少年。因此可把弹药在舰艇上储存的可靠性试验数据写成如下形式:

$$(t_i, n_i, f_i) (i = 1, 2, \dots, k)$$

式中: t_i 为舰艇贮存时间(年); n_i 为每次检测样本量(发); f_i 为 n_i 发引信中出现的失效数(发); k 为检测年份点数目。

记第 i 组的 n_i 个样品在舰艇环境下的贮存寿命依次为: $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in_i}$; 即第 i 组的第 j 个样品的储存寿命为 $X_{ij} (j = 1, 2, \dots, n_i)$; 而 $X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n_1}; X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2n_2}; X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{kn_k}$ 独立同分布, 记它们共同分布为 $F(t, \theta)$, 其中 θ 是分布参数。令:

* 收稿日期: 2006-08-17; 修回日期: 2006-09-13

作者简介: 钟强晖(1978-), 硕士研究生, 研究方向: 弹药设计理论与应用技术。

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{若 } X_{ij} \leq t_i (\text{即第 } i \text{ 组第 } j \text{ 个样品失效}) \\ 0 & \text{若 } X_{ij} > t_i (\text{即第 } i \text{ 组第 } j \text{ 个样品失效}) \end{cases}$$

Y_{ij} 有下列一些性质:

a. $\{Y_{ij} : 1 \leq j \leq n_i, 1 \leq i \leq k\}$ 相互独立;

b. $Y_{ij}, \dots, Y_{in}$ 独立同分布, $P(Y_{ij} = 1) = F(t_i, \theta), P(Y_{ij} = 0) = 1 - F(t_i, \theta)$;

c. $f_i = \sum Y_{ij}$ 服从二项分布 $B(n_i, P_i)$, 这里 $P_i = F(t_i, \theta)$ 。

由于样品各年份点的试验结果实际上是一整体, 记该总体的寿命分布为 $F(t_i, \theta)$, 则与试验数据相应的对数似然函数为:

$$L(\theta) = \sum_{i=1}^k \{f_i \ln F(t_i, \theta) + (n_i - f_i) \ln [1 - F(t_i, \theta)]\} \quad (1)$$

3 统计分析

(1) 分布函数的确定

根据有关文献和实践经验^[1], 弹药系统的失效机理符合“最弱环”模型, 因此用 Weibull 分布模型来描述最为合适。因此令:

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

(2) 分布参数的估计及可靠度分布函数
利用极大似然估计方法(MLE)求解:

$$L(\theta) = \sum_{i=1}^k \left\{ f_i \ln \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m\right] \right] + (n_i - f_i) \ln \exp\left[-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m\right] \right\}$$

令 $\partial \ln L / \partial m = 0$ 及 $\partial \ln L / \partial \eta = 0$, 可得到 MLE m, η 满足的方程为:

$$\sum_{i=1}^k \left\{ \frac{f_i}{1 - \exp\left[-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m\right]} - \frac{(n_i - f_i)}{\exp\left[-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m\right]} \right\} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m\right] \cdot \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m \cdot \ln\left(\frac{t_i}{\eta}\right) = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^k \left\{ \frac{-f_i}{1 - \exp\left[-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m\right]} + \frac{(n_i - f_i)}{\exp\left[-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m\right]} \right\} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^m\right] \cdot m \cdot \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{m-1} = 0 \quad (3)$$

这是两个超越方程, 应用迭代法求解:

把 m, η 代入 $R(t) = 1 - F(t)$, 得到可靠度分布函数 $\hat{R}(t)$, 这样对于某一时刻 t_i , 就可得到相

应的可靠度的点估计值 $R_i(t)$ 。

(3) 可靠寿命的预测

记 $R(t)$ 为弹药储存可靠度函数, R_L 为给定可靠度下限值, $1 - \alpha$ 为置信水平, 求储存年限 T , 使得:

$$P[R(T) \geq R_L] = 1 - \alpha \quad (4)$$

利用二项近似法^[2], 要求各检测点的样本量要相同, 即 $n = n_i (i = 1, 2, \dots, k)$, 由于试验数据是成败型的, 故可认为 $nR(t)$ 近似服从二项分布 $B(n, R(t))$, 记 n 次试验的失效数为 f , 根据二项分布求置信限的方法, 可知:

$$\sum_{i=1}^f \binom{n}{i} (1 - R_L)^i R_L^{n-i} \leq \partial$$

$$\text{令 } B(f) = \sum_{i=1}^f \binom{n}{i} (1 - R_L)^i R_L^{n-i}, \text{ 并记 } f^*$$

为满足 $B(f) \leq \alpha$ 的最大 f , 则:

$$B(f^*) \leq \alpha \leq B(f^* + 1)$$

$$\text{令 } f_1 = [\alpha - B(f^*)] / [B(f^* + 1) - B(f^*)] + f^* \\ R(T) = \exp[-(T/\eta)^m] = (n - f_1) / n \quad (5)$$

解此方程即可得到:

$$T = \eta \cdot \sqrt[m]{\ln\left(\frac{n}{n - f_1}\right)}$$

需要注意的是当下限 R_L 较大, 置信度 $1 - \alpha$ 也较大, 有可能不存在 f^* , 使得 $B(f^*) \leq \alpha$, 因此运用此方法时, 下限 R_L , 置信度 $1 - \alpha$ 不宜取太大。

如果要求的下限 R_L 较大, 置信度 $1 - \alpha$ 也较大时, 由于样本量的限制, 无法采取二项近似法时, 可采取正态近似法^[3], 可以认为 $\hat{R}(T)$ 近似服从均值为 $R(T)$, 方差为 $\hat{R}(T)[1 - \hat{R}(T)]/n$ 的正态分布。根据正态分布求置信限的方法, 由式(4)可得到:

$$P[\hat{R}(T) - R(T)] / \sigma(T) \leq [\hat{R}(T) - R_L] / \sigma(T) \approx 1 - \alpha$$

$$\text{方差: } \sigma^2(T) = \hat{R}(T)[1 - \hat{R}(T)]/n$$

记 $u_{(1-\alpha)}$ 为标准正态分布 $1 - \alpha$ 的分位点, 则:

$$[\hat{R}(T) - R_L] / \sigma(T) = u_{(1-\alpha)} \quad (6)$$

由(6)式用数值迭代法可求得在置信水平 $1 - \alpha$ 的储存寿命 T 。

4 应用实例

某基地对某条舰艇上的 37 弹种某个批次进行试验,这个批次的弹药储存在国防仓库上约 15 年,转至舰艇储存后,每年从这个批次中抽取 30 发进行试验,共进行了 6 次,试验结果为:(1,30,0), (2,30,0), (3,30,1), (4,30,2), (5,30,3), (6,30,4)。

把试验结果代入方程(2)、(3),用牛顿迭代法求解,具体步骤:先利用图估计法,在 Weibull 概率纸上描出直线,得到图估计 $\hat{m} = 2.0, \hat{\eta} = 15$,再把这两个值作为初值进行迭代,根据迭代法利用 Matlab 软件进行编程。最后算出极大似然估计 $\hat{m} = 2.65, \hat{\eta} = 11.93$ 。由此可得可靠度函数为 $R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{11.93}\right)^{2.65}\right]$ 。

在置信度为 90%, $R_L = 80\%$ 的条件下,用二项近似法得到此弹药的储存寿命为 3.4 年。即

在置信水平为 90%,此弹药在舰艇储存 3.4 年后可靠性不低于 80%。

5 结论

对于舰艇环境下的弹药可靠性分析,针对失效的特点,建立合适的数学模型并依此组织试验或数据收集是关键。对于寿命预测,当要求的下限 R_L ,置信度 $1-\alpha$ 不大时,可采用二项近似法;而当要求的下限 R_L ,置信度 $1-\alpha$ 较大时,可采用正态近似法。

[参 考 文 献]

- [1] 郑波. 阵地弹药贮存可靠性研究技术报告[R]. 石家庄:军械技术研究所,2000.
- [2] 李明伦,李东阳,郑波. 弹药贮存可靠性[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
- [3] 戴树森. 可靠性试验及其统计分析[M]. 北京:国防工业出版社,1984.

(上接第 353 页)

大改变而同时优于传统的单用户检测器,而改进的多用户检测器则优于以上两种检测器。从图 3 和图 4 中可以看出当存在强干扰的时候,传统的检测器性能急剧下降,而文中提出的两种检测器则未受影响。

6 结论

在 UWB 多用户通信系统中,为了减少多址干扰的影响,文中提出了两种多用户检测器。经过分析和仿真可以得出文中提出的检测器计算复杂度低而且性能优于传统的单用户检测器,可以减少多址干扰的影响从而提高性能。

[参 考 文 献]

- [1] Y C Yoon and R Kohno. Optimum multi-usedetec-

tion in UWB multiple access communication systems[Z]. Proc. ICC 2002,5:812-816.

- [2] S Verdu. Multiuser detection[M]. Cambridge Univ. Press, New York, 1998.
- [3] Q Li and L A Rusch. Multiuser detection for DS-CDMA UWB in the home environment[J]. IEEE J. Select. Areas in Commun, 2002, 20(12): 1701-1711.
- [4] Nejib Boubaker and Khaled Ben Letaief. Combined multiuser successive interference cancellation and partial rate reception for UWB wireless communications[A]. 2004 IEEE 60th Vehicular Technology Conference VTC2004-Fall[C]. 2004, 2.
- [5] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.
- [6] 葛利嘉, 朱林, 等. 超宽带无线电基础[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.