

# 模糊复合抽检贮存数据的 Bayes 融合评估方法

叶可伟, 王晗, 马小兵

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

**摘要:** **目的** 针对包含模糊样本的复合抽检型产品开展贮存寿命评估。**方法** 针对批次产品中的出厂失效数据和贮存失效数据, 开展批次数据的相容性检验。通过出厂失效样本数随机化处理, 量化贮存过程中模糊样本的不确定性。将出厂试验数据作为先验信息, 贮存过程中的出厂试验数据作为观测信息, 基于 Bayes 融合方法, 更新出厂失效概率。通过更新后的出厂失效概率, 确定模糊样本的组成, 筛选出贮存失效概率样本。针对筛选后的样本, 基于样本量加权最小二乘法, 开展贮存寿命评估。**结果** 将所提方法应用于某弹箭产品案例, 有效评估了批次出厂失效概率及其估计方差, 并给出了可靠寿命评估结果。**结论** 所提 Bayes 评估方法融合了出厂抽检数据和贮存抽检数据, 有效解决了含模糊样本的失效概率估计问题, 提高了估计的精确性, 基于样本量权重的加权最小二乘法, 考虑了样本的可信程度, 提升了方法的科学性。

**关键词:** 复合抽检; 出厂失效; 模糊样本; Bayes 融合; 样本量加权最小二乘; 贮存寿命评估

**中图分类号:** TB114

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2023)05-0057-07

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2023.05.009

## Bayes Fusion Evaluation Method for Storage Data of Composite Inspection with Fuzzy Samples

YE Ke-wei, WANG Han, MA Xiao-bing

(School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**ABSTRACT:** The work aims to evaluate the storage life of composite inspection products with fuzzy samples. The compatibility test was carried out on the ex-factory failure data and storage failure data of batch products. The uncertainty of fuzzy samples in the storage process was quantified by randomizing the number of ex-factory failure samples. With the failure data in the ex-factory inspection as prior information and the ex-factory failure data in the storage inspection as observation information, the ex-factory failure probability was updated based on Bayes fusion method. The composition of fuzzy samples was determined by the updated ex-factory failure probability, and the storage failure samples were screened out. The storage life of the products

收稿日期: 2023-04-12; 修订日期: 2023-05-04

Received: 2023-04-12; Revised: 2023-05-04

基金项目: 国家自然科学基金 (72201019, 52075020); 可靠性与环境工程技术重点实验室项目 (6142004210105); 国防技术基础项目 (JSZL2018601B004)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (72201019, 52075020); Reliability and Environmental Engineering Science & Technology Laboratory (6142004210105); Basic Technical Research Project of China (JSZL2018601B004).

作者简介: 叶可伟 (1997—), 男, 博士研究生。

Biography: YE Ke-wei (1997-), Male, Doctoral candidate.

通讯作者: 马小兵 (1978—), 男, 博士。

Corresponding author: MA Xiao-bing (1978-), Male, Doctor.

引文格式: 叶可伟, 王晗, 马小兵. 模糊复合抽检贮存数据的 Bayes 融合评估方法[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 057-063.

YE Ke-wei, WANG Han, MA Xiao-bing. Bayes Fusion Evaluation Method for Storage Data of Composite Inspection with Fuzzy Samples[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 057-063.

was evaluated based on the screened storage failure probability by the weighted least square method. The proposed method was applied to a missile product case. The ex-factory failure probability and its estimation variance were accurately estimated and the reliable life evaluation results were given. The proposed Bayes fusion method combines the ex-factory inspection data and the storage inspection data and effectively solves the failure probability estimation problem containing fuzzy samples and improves the estimation accuracy. The weighted least square method based on sample size considers the reliability of samples, which is more scientific.

**KEY WORDS:** composite inspection; ex-factory failure; fuzzy samples; Bayes fusion; weighted least square method based on sample size; storage life evaluation

弹箭装备产品在批量生产之后,需放入仓库中贮存,部分产品可能会投入使用,或者由于质量问题需进行返厂维修。产品可能会在开始使用阶段发生早期失效<sup>[1-2]</sup>,也可能在贮存一段时间后,性能指标发生退化<sup>[3-4]</sup>,最终导致失效。为了鉴定其可靠性水平,往往需要从各阶段通过抽检的方式对弹箭产品进行贮存寿命评估。合理的评估结果能够提高贮存后产品的可用性,同时节省大量购置研发费用<sup>[5]</sup>。因此,抽检型数据的贮存寿命相关研究<sup>[6-9]</sup>受到了广泛的关注。

按抽检阶段划分,抽检试验一般包括2类。第1类方式是在出厂验收阶段通过抽检试验对各批次产品进行抽检检测,依据检测结果评估产品的出厂可靠性,该方法且仅反映了出厂验收阶段的可靠性水平。王瑞臣等<sup>[10]</sup>结合导弹设计指标,应用超几何分布研究了小样本条件下导弹的批可靠性抽检方案,用于制定导弹验收方案。宋贵宝等<sup>[11]</sup>考虑导弹批抽检连续批、批量小的特点,结合 Bayes 理论和调整型检验思想,提出了一种序贯检验后加权检验的抽样试验方案。王瑞臣等<sup>[12]</sup>制定了验收和贮存阶段潜地导弹小批量抽样检验方案,同时定性分析了抽检方案制定时需要考虑的装备检验、人员训练等因素。第2类则是在贮存阶段中对产品进行定期抽检,分析退化特征,从而评估产品的贮存寿命。该阶段的失效信息除了反映产品在贮存阶段因退化导致的失效信息,还隐含了产品的出厂失效信息。孙亮等<sup>[13]</sup>针对定期检测数据,应用多种指数分布形式,对退化过程进行了拟合,对产品的贮存可靠性进行了预测。徐廷学<sup>[14]</sup>采用威布尔描述了导弹贮存阶段的失效概率变化趋势。薛敏等<sup>[15]</sup>通过分析超期服役导弹弹药的寿命剖面,结合定检数据,提出了其贮存可靠性关系模型,并进行了验证。由于部分产品失效数据少,试验成本高,融合不同阶段的失效信息是一种有效的途径<sup>[16-18]</sup>,而 Bayes 信息融合是较为常用的手段。刘飞等<sup>[19]</sup>针对成败型数据,融合历史信息 and 专家信息,基于 Gibbs 抽样算法,获得了各贮存时段下可靠性的后验分布和区间估计。卢明章等<sup>[20]</sup>通过设计连续反复加速贮存试验,以前一试验的结果作为先验,融合序列试验信息,得到了贮存寿命的参数估计。在贮存阶段,由于产品的贮存测试条件存在

差异,除了可以准确判断为成功、出厂失效或退化失效的样本之外,还存在无法判断失效类型的模糊问题样本,常规的成败型数据评估方法无法直接评估产品寿命。

本文首先基于历史经验信息,采用均匀分布或者截断正态分布对出厂试验数据进行出厂失效概率的点估计和置信下限估计,进而运用 Bayes 方法对贮存过程中的定期抽检数据进行融合。融合过程包括2步:第1步先对出厂试验数据和定期抽检数据进行相容性检验;第2步则对满足相容性检验后的定期抽检数据进行 Bayes 融合,获取不同贮存期更新后的出厂失效概率估计。最后基于更新后的出厂失效概率,筛选出退化失效数据,采用加权最小二乘法对退化失效数据进行贮存寿命评估。

## 1 基于 Bayes 方法的出厂失效概率估计

### 1.1 出厂抽检数据失效概率的点估计和置信下限估计

假设出厂试验的待抽检样本总数为  $N$ ,其中失效个数为  $D$ ,则出厂失效概率为  $p=D/N$ 。若出厂单次抽检样本总数为  $n$ ,失效样本数为  $r_0$ ,成功样本数为  $n-r_0$ 。当  $N$  较大时,失效样本数  $X$  可用二项分布描述,即:

$$P(X=x) = C_n^x \cdot p^x (1-p)^{n-x}, x=0,1,\dots,n \quad (1)$$

则出厂失效概率  $p$  的点估计为:

$$\hat{p} = \frac{r_0}{n} \quad (2)$$

给定置信水平  $1-\alpha$ , 单次置信下限  $p_L$  由式(3)确定<sup>[21]</sup>:

$$\sum_{x=0}^{r_0} C_n^x \cdot p_L^x (1-p_L)^{n-x} = 1-\alpha \quad (3)$$

当  $N$  较小时,失效样本数  $X$  可用超几何分布描述,即:

$$P(X=x) = \frac{C_{N-p_L}^x \cdot C_{N-p_L}^{n-x}}{C_N^n}, x=0,1,\dots,n \quad (4)$$

则出厂失效概率  $p$  的点估计为:

$$\hat{p} = \frac{r_0}{n} \tag{5}$$

给定置信水平  $1-\alpha$ , 单次置信下限  $p_L$  由式 (6) 确定<sup>[21]</sup>:

$$\sum_{x=0}^{r_0} \frac{C_{Np_L}^x \cdot C_{N-p_L}^{n-x}}{C_N^n} = 1-\alpha \tag{6}$$

其中,  $p_L$  值也可通过 GJB 376—87<sup>[22]</sup> 查询获取。

### 1.2 模糊复合抽检数据的出厂失效概率点估计

假设某贮存期下贮存样本总数为  $M$ , 其中包括出厂失效样本数  $r_1$ , 退化失效样本数为  $r_2$ , 模糊问题样本数据为  $r_3$ , 成功样本数则为  $M-r_1-r_2-r_3$ 。若将出厂失效样本数  $r_1$  视为随机变量, 其分布采用均匀分布或截断正态分布描述, 且有  $r_1 \leq r \leq r_1+r_3$ 。

若出厂失效样本数的概率密度函数为  $f(r)$ , 则对于连续均匀分布有:

$$f(r) = \frac{1}{r_3} \tag{7}$$

考虑样本离散特性, 采用离散均匀分布:

$$p(R=r) = \frac{1}{r_3+1} \tag{8}$$

对于截断正态分布:

$$f(r) = \frac{\phi(\mu, \sigma^2; r)}{\left[ \Phi(\mu, \sigma^2; r_1+r_3) - \Phi(\mu, \sigma^2; 0) \right]} \tag{9}$$

式中:  $\phi(\cdot)$  表示标准正态概率密度函数;  $\Phi(\cdot)$  表示标准正态累积分布函数;  $\mu$  为截断正态分布母分布的均值;  $\sigma$  为截断正态分布母分布的标准差。

针对贮存期抽检数据, 按批次可分为  $K$  组, 每组样本数为  $N_i, i=1, 2, \dots, K$ 。分别统计每组出厂失效、性能退化及模糊问题导致的失效样本数, 基于出厂失效样本数据的随机化假设和全概率定理, 获取各组样本的出厂失效概率点估计  $(\hat{p}_{*1}, \hat{p}_{*2}, \dots, \hat{p}_{*K})$ , 计算公式为:

$$\hat{p}_* = \int_{r_1}^{r_1+r_3} \frac{r}{M} \cdot f(r) dr \tag{10}$$

式中:  $f(r)$  为出厂失效样本数的概率密度函数, 依分布类型可代入式(7)–(9)。

### 1.3 出厂抽检数据和各批次贮存抽检数据相容性检验

采用 Bayes 方法融合出厂试验信息和不同批次贮存抽检信息, 需要先对待融合数据进行相容性检验<sup>[23]</sup>。相容性问题一般可转化为判断 2 类数据是否来源于同一总体的问题, 因此相容性检验可采用分布一致检验的方法实现。若各批次产品出厂质量状态一致,

则各组获取的出厂失效概率应服从正态分布, 其均值与方差可根据出厂抽检试验得到的出厂失效概率的点估计和置信限估计确定。因此, 出厂试验数据和各批次贮存抽检数据相容性问题转化为  $(\hat{p}_{*1}, \hat{p}_{*2}, \dots, \hat{p}_{*K})$  是否服从给定均值和方差的正态性检验问题, 可采用统计量检验法进行判别。

首先判断出厂试验数据和批次贮存抽检数据的分布均值是否具有-致性, 建立原假设  $H_0$ : 两样本的总体均值相等。由于对总体方差一无所知, 故采用 Welch's  $T$  统计量:

$$T = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}} \tag{11}$$

自由度为:

$$f = \frac{(s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2)^2}{\frac{(s_1^2/n_1)^2}{n_1-1} + \frac{(s_2^2/n_2)^2}{n_2-1}} \tag{12}$$

式中:  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  为 2 组检验样本的均值;  $s_1, s_2$  为 2 组检验样本的标准差;  $n_1, n_2$  为样本的容量。

给定置信度  $1-\alpha$ , 若统计量满足  $|T| \geq t_{\alpha/2}(f)$ , 则拒绝原假设, 即两样本总体均值不等; 否则接受原假设。两正态总体的方差齐性检验可采用  $F$  统计量进行检验, 建立原假设  $H_0$ : 两样本的总体方差相等, 计算  $F$  统计量:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \tag{13}$$

给定置信度  $1-\alpha$ , 若统计量满足  $F \geq F_{\alpha/2}(n_1-1, n_2-1)$  或  $F \leq F_{1-\alpha/2}(n_1-1, n_2-1)$ , 则拒绝原假设, 即两样本总体方差不等; 否则接受原假设。若均值检验和方差检验未全部通过, 则将少数不满足相容性检验的样本剔除, 剩余批次样本可用于下一步的信息融合。

### 1.4 融合出厂抽检数据和贮存抽检数据的出厂失效概率估计

考虑到出厂抽检失效数据和贮存抽检失效数据中均包含出厂失效概率信息。首先选取出厂抽检失效数据作为先验信息, 采用截断正态分布作为出厂失效概率  $p$  的先验分布, 即:

$$\varphi(p) = \frac{\phi(\hat{p}, \hat{\sigma}_p^2; p)}{\Phi(\hat{p}, \hat{\sigma}_p^2; 0) - \Phi(\hat{p}, \hat{\sigma}_p^2; 1)} \tag{14}$$

式中:  $\hat{p}$  表示出厂抽检数据失效概率的均值估计;  $\hat{\sigma}_p^2$  表示失效概率的方差估计。

以各批次贮存抽检数据为观测信息, 对失效概率进行 Bayes 更新<sup>[24]</sup>, 可得:

$$\varphi(p|\Theta) \propto f(\Theta|p) \cdot \varphi(p) = \int_{r_1}^{r_1+r_2} C_n^r p^r (1-p)^{n-r} \cdot \frac{\phi(\hat{p}, \hat{\sigma}_p^2, p)}{\Phi(\hat{p}, \hat{\sigma}_p^2, 0) - \Phi(\hat{p}, \hat{\sigma}_p^2, 1)} \cdot f(r) dr \quad (15)$$

式中：Θ表示批次贮存抽检数据。

## 2 基于加权最小二乘法的贮存寿命评估方法

### 2.1 贮存失效概率的点估计

由于贮存过程中的失效样本包括出厂失效样本和贮存失效样本，而模糊问题样本实际上由上述2种样本组成，在获取出厂失效样本失效概率的后验估计后，可得到各批次产品模糊问题样本中出厂失效样本组成，进一步筛选获取退化失效样本数，即：

$$r_2^* = r_2 + \max\{r_3 - \lfloor \hat{p}_* N_i + 0.5 \rfloor, 0\} \quad (16)$$

式中：⌊·⌋表示向下取整。因此，贮存失效概率估计为：

$$p_i^* = \frac{r_2^*}{N_i - \hat{p}_* N_i} \quad (17)$$

### 2.2 基于批次样本量的加权最小二乘法

若贮存抽检试验包含Z组贮存年限，失效数据为(t<sub>j</sub>, p<sub>j</sub>), j=1, 2, ..., Z。可据历史数据确定合适的寿命分布类型进行描述。以两参数威布尔分布为例，其寿命分布函数形式为：

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (18)$$

式中：m为形状参数；η为尺度参数。将其线性化后，可得：

$$\ln t_j = \ln \eta + \frac{1}{m} \ln \ln(1 - p_j)^{-1} \quad (19)$$

令 y<sub>j</sub> = ln t<sub>j</sub>, x<sub>j</sub> = ln ln(1 - p<sub>j</sub>)<sup>-1</sup>, μ = ln η, σ = β<sup>-1</sup>, 则

$$y_j = \mu + \sigma x_j + \varepsilon_j \quad (20)$$

式中：μ为线性化后的拟合截距；σ为线性化后的拟合斜率；ε<sub>j</sub>为拟合误差。

式(20)可采用最小二乘法进行参数估计。对于定

期抽检数据，由于不同贮存年限的抽检样本容量不一致，则不同贮存年限下失效概率的估计误差不同。当失效概率样本点的不确定性差异性较大时，加权最小二乘法要优于普通最小二乘法<sup>[25]</sup>。一般认为，样本容量与失效概率的估计误差成反比。因此，考虑采用加权最小二乘法进行贮存寿命评估，取样本容量为权重：

$$\omega_j = n_j t_j / \sum_{j=1}^Z n_j t_j \quad (21)$$

式中：n<sub>j</sub>为贮存年限t<sub>j</sub>下的样本容量。参数μ和σ的最小二乘估计为：

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{j=1}^Z \omega_j x_j^2 \sum_{j=1}^Z \omega_j y_j - \sum_{j=1}^Z \omega_j x_j \sum_{j=1}^Z \omega_j x_j y_j}{\sum_{j=1}^k \omega_j x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^k \omega_j x_j\right)^2} \quad (22)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\sum_{j=1}^Z \omega_j x_j y_j - \sum_{j=1}^Z \omega_j x_j \sum_{j=1}^Z \omega_j y_j}{\sum_{j=1}^Z \omega_j x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^Z \omega_j x_j\right)^2} \quad (23)$$

式中：x̄ = ∑<sub>j=1</sub><sup>Z</sup> x<sub>j</sub> ; ȳ = ∑<sub>j=1</sub><sup>Z</sup> y<sub>j</sub>。

根据参数关系即可求得分布参数估计(η̂, m̂)，则可靠度为R时的贮存寿命为：

$$t_R = \hat{\eta} (\ln R^{-1})^{\frac{1}{\hat{m}}} \quad (24)$$

## 3 案例

某产品出厂试验和贮存数据均为抽检型数据，分别对应表1和表2。其中，出厂抽检试验仅记录了失效数据，贮存抽检试验记录了各组出厂失效样本、贮存失效样本和模糊问题样本。出厂试验和贮存均包含3批，分别为批次A、B、C。针对出厂抽检数据，各批次待抽检样本数均为300个，数量较多，因此采用二项分布进行描述，各组出厂失效概率点估计可据式(2)算得。针对出厂抽检数据，采用均匀分布刻画失效样本随机性，各组出厂失效概率点估计可通过联立式(7)和式(10)算得。取置信水平1-α=0.95，对出厂抽检数据和贮存抽检数据开展相容性检验，结果见表3。

表1 出厂失效数据  
Tab.1 Ex-factory failure data

样本组号	抽检试验样本数	失效样本数	样本组号	抽检试验样本数	失效样本数
A0-1	10	0	B0-3	10	1
A0-2	10	1	C0-1	10	0
A0-3	10	1	C0-2	10	1
A0-4	10	1	C0-3	10	1
B0-1	10	0	C0-4	10	0
B0-2	10	1			

表 2 贮存失效数据  
Tab.2 Storage failure data

样本组号	贮存年限	各组样本总数	出厂失效样本数	贮存失效样本数	模糊问题样本数
A1	5	50	3	2	0
A2-1	6	50	2	3	2
A2-2	6	50	5	3	2
A3	7	50	2	5	3
A4	8	50	4	5	0
B1	5	50	3	2	2
B2	6	50	1	2	2
B3	7	50	4	5	1
B4	8	50	2	11	2
C1	5	50	2	4	0
C2	7	50	1	3	0
C3	8	50	3	8	3
C4-1	10	50	1	15	0
C4-2	10	50	3	13	3
C4-3	10	50	4	17	2

表 3 相容性检验结果  
Tab.3 Results of compatibility test

批次	均值检验			方差齐性检验	
	$T$ 统计量	自由度	拒绝域	$F$ 统计量	拒绝域
批次 A	0.11	4.44	$ T  > 2.57$	4.03	$F < 0.07$ 或 $F > 9.98$
批次 B	0.03	2.49	$ T  > 3.18$	6.78	$F < 0.03$ 或 $F > 16.00$
批次 C	0.30	5.16	$ T  > 2.45$	2.38	$F < 0.07$ 或 $F > 7.76$

由表 3 可得, 批次 A、B、C 的出厂抽检数据和贮存抽检数据均满足相容性检验, 因此可以基于 Bayes 融合方法融合 2 部分信息, 以获取精度更高的出厂失效概率估计。各批次的出厂失效概率更新过程如图 1 所示。

由图 1 可知, 随着批次更新, 出厂失效概率的分布更集中, 分散性更小, 即具有更小的估计方差。将更新后出厂失效概率代入式(16)和式(17), 可确定各批次各组数据的模糊样本组成, 进一步更新

各贮存期下的贮存失效概率。以不考虑模糊样本情况作为对比, 基于加权最小二乘法进行参数估计和贮存寿命评估, 拟合结果如图 2 所示。参数估计结果以及可靠度分别为 0.80、0.90 和 0.95 时的寿命评估结果见表 4。根据表 4, 不考虑模糊样本下的寿命评估结果要大于本文基于 Bayes 融合处理模糊样本的寿命评估结果, 因此仅采用确定样本进行寿命评估忽略了模糊样本信息, 可能导致隐藏的风险。

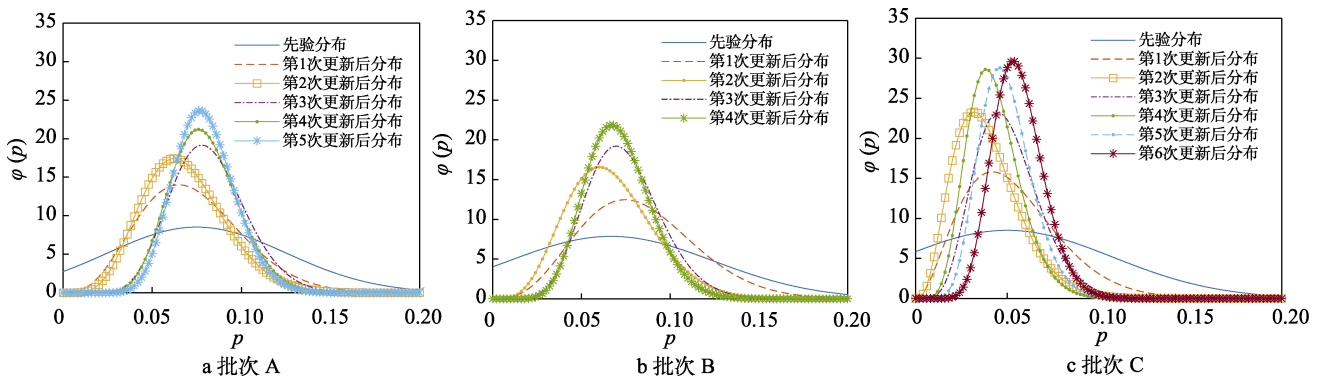


图 1 出厂失效概率更新结果

Fig.1 Updated results of ex-factory failure probability: a) batch A; b) batch B; c) batch C

表4 贮存评估结果  
Tab.4 Evaluation results of storage life

方法	形状参数	尺度参数	可靠寿命		
			R=0.80	R=0.90	R=0.95
加权最小二乘法 (不考虑模糊样本)	3.283 3	13.909 2	8.808 5	7.008 7	5.628 9
加权最小二乘法 (Bayes 融合方法)	3.153 1	13.492 4	8.384 9	6.609 0	5.260 1

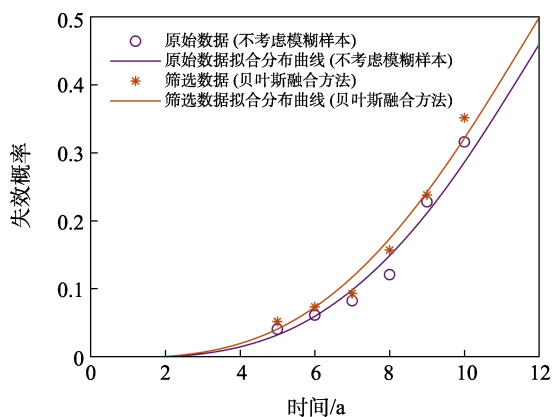


图2 贮存寿命拟合曲线  
Fig.2 Fitting curve of storage life

## 4 结论

1) 基于随机化方法处理模糊样本问题, 利用 Bayes 方法融合出厂抽检失效信息和贮存抽检失效信息, 评估出厂失效概率, 估计结果具有估计方差小、鲁棒性高的特点。

2) 根据所估计的出厂失效概率, 确定模糊样本组成, 更新贮存失效概率, 基于样本量权重下的加权最小二乘法开展贮存寿命评估。该方法利用了模糊样本信息, 有效解决了含模糊样本的贮存寿命评估问题, 具有可解释性。

### 参考文献:

[1] 史玉琴, 周婕, 徐居明, 等. 空空导弹新研元器件可靠性保证方法研究[J]. 航空兵器, 2014, 21(2): 61-64.  
SHI Yu-qin, ZHOU Jie, XU Ju-ming, et al. Research on Methods for Emerging Research Components Reliability Assurance of Air-to-Air Missile[J]. Aero Weaponry, 2014, 21(2): 61-64.

[2] 李潇. 某型空空导弹可靠性摸底试验规划与验证[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2019, 37(1): 8-12.  
LI Xiao. Reliability Preexposure Test Plan and Verification of an Air-to-Air Missile[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2019, 37(1): 8-12.

[3] 刘震宇, 马小兵, 赵宇. 非恒定温度场合弹上性能退化型部件贮存可靠性评估[J]. 航空学报, 2012, 33(9): 1671-1678.  
LIU Zhen-yu, MA Xiao-bing, ZHAO Yu. Storage Reli-

ability Assessment for Missile Component with Degradation Failure Mode in a Temperature Varying Environment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(9): 1671-1678.

[4] 董军超, 王凤金, 朱重阳. 基于多失效模式的弹上舱段结构件贮存寿命验证方法[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 80-85.  
DONG Jun-chao, WANG Feng-jin, ZHU Chong-yang. Missile Cabin Storage Life Verification and Assessment Method Based on Multiple Failure Modes[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 80-85.

[5] 张仕念, 何敬东, 颜诗源, 等. 导弹贮存延寿的技术途径及关键技术[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 37-41.  
ZHANG Shi-nian, HE Jing-dong, YAN Shi-yuan, et al. Basic Approaches and Key Techniques for Missile Storage Life Extension[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 37-41.

[6] 张金春, 刘超. 定期检测对导弹武器系统贮存可靠性的影响分析[J]. 战术导弹技术, 2008(1): 44-48.  
ZHANG Jin-chun, LIU Chao. Analysis of the Influence of Periodic Check on Reliability of Missile Weapon System[J]. Tactical Missile Technology, 2008(1): 44-48.

[7] 徐真红. 武器系统的贮存寿命预测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
XU Zhen-hong. Storage Life Prediction Methods Research of Weapons System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[8] 刘天放, 王义冬, 张伟锋, 等. 基于成败型数据的导弹贮存可靠性试验方法研究[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(8): 120-123.  
LIU Tian-fang, WANG Yi-dong, ZHANG Wei-feng, et al. Test Method for Missile Storage Reliability Based on Success or Failure Data[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34(8): 120-123.

[9] 刘洪宇. 基于模糊理论的导弹贮存使用环境分析[J]. 装备环境工程, 2020, 17(12): 95-100.  
LIU Hong-yu. Analysis of Missile Storage/Use Environment Based on Fuzzy Theory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(12): 95-100.

[10] 王瑞臣, 徐文焱, 李建林. 导弹可靠性抽检方案[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(3): 121-124.  
WANG Rui-chen, XU Wen-yan, LI Jian-lin. Research on the Reliability Acceptable Method of Missiles[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(3): 121-124.

[11] 宋贵宝, 刘泽坤, 罗亚民, 等. 调整型 Bayes 序贯验后加权战术导弹批抽检方法[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(6): 24-28.

- SONG Gui-bao, LIU Ze-kun, LUO Ya-min, et al. Sampling Method of Tactics Missile Batch Based on Adjusting Attribute Bayesian Sequential Posterior Odd Test[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(6): 24-28.
- [12] 王瑞臣, 史文森, 杨海波. 潜地导弹抽检方案与试验研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(3): 136-138.  
WANG Rui-chen, SHI Wen-sen, YANG Hai-bo. Research on the Reliability Acceptable Method and Experiment for SLBM[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(3): 136-138.
- [13] 孙亮, 徐廷学, 代莹. 基于定期检测的导弹贮存可靠性预测模型[J]. 战术导弹技术, 2004(4): 16-19.  
SUN Liang, XU Ting-xue, DAI Ying. Models of Storage Reliability Prediction Based on Periodical Test for Missiles[J]. Tactical Missile Technology, 2004(4): 16-19.
- [14] 徐廷学. 基于定期检测的导弹贮存可靠性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(1): 248-250.  
XU Ting-xue. Study on Storage Reliability Based on Periodical Test for Missiles[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(1): 248-250.
- [15] 薛敏, 赵建忠, 席建峰, 等. 精确制导弹药延寿阶段贮存可靠性预测模型研究[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(3): 120-123.  
XUE Min, ZHAO Jian-zhong, XI Jian-feng, et al. Study on Prediction Model of Storage Reliability at Life Prolonging Stage of Precision Guided Ammunitions[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(3): 120-123.
- [16] 吴建国, 田军挺, 李凌江, 等. 基于多源信息融合分析的导弹贮存寿命评估方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(2): 255-260.  
WU Jian-guo, TIAN Jun-ting, LI Ling-jiang, et al. Assessment Method of Missile Storage Life Based on Multi-Information Fusion Analysis[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2017, 32(2): 255-260.
- [17] 韦金芬, 宋保维, 毛昭勇. 多阶段实验数据融合的 Bayes 可靠性评定模型[J]. 计算机工程, 2012, 38(9): 265-267.  
WEI Jin-fen, SONG Bao-wei, MAO Zhao-yong. Bayes Reliability Evaluation Model of Multistage Experimental Data Fusion[J]. Computer Engineering, 2012, 38(9): 265-267.
- [18] 王凯. 导弹武器系统贮存环境监测及贮存可靠性评定方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.  
WANG Kai. Missile Weapon System Environmental Monitoring and Storage Reliability Assessment Methods[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012.
- [19] 刘飞, 窦毅芳, 张为华. 基于成败试验的导弹贮存可靠性 Bayes 分析模型[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 102-107.  
LIU Fei, DOU Yi-fang, ZHANG Wei-hua. Bayesian Model for Missile Storage Reliability Analysis Based on Success-Failure Test[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 102-107.
- [20] 卢明章, 宋永军, 赵海军. 基于 Bayes 的导弹加速贮存试验参数估计[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 25-29.  
LU Ming-zhang, SONG Yong-jun, ZHAO Hai-jun. Estimation of Parameters for Missile Accelerated Storage Life Tests Based on Bayes Theory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(8): 25-29.
- [21] 李根成, 姜同敏. 导弹战斗部任务可靠性评估方法分析[J]. 火炸药学报, 2006, 29(4): 6-9.  
LI Gen-cheng, JIANG Tong-min. Analyzing Several Evaluation Methods for Mission Reliability of Missile Warhead[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(4): 6-9.
- [22] GJB 376—87, 火工品可靠性评估方法[S].  
GJB 376—87, Assessment Method of Reliability of Initiating Devices[S].
- [23] 唐雪梅. 小样本场合下相容性检验方法[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(10): 66-68.  
TANG Xue-mei. Consistency Test Methods in Small Sample Situation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(10): 66-68.
- [24] COWLES M K. Applied Bayesian Statistics: With R and OpenBUGS Examples[M]. New York, NY: Springer New York, 2013.
- [25] BRÜGGEMANN L, MORGENSTERN P, WENNRICH R. Comparison of Regression Techniques for Linear Calibration[J]. Accreditation and Quality Assurance, 2005, 10(7): 344-351.

责任编辑: 刘世忠