

# 基于概率物理模型的贮存可靠性评估方法

胡雨晴<sup>1</sup>, 吴俊娴<sup>2</sup>, 张生鹏<sup>1</sup>, 李宏民<sup>1</sup>

(1. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854;

2. 空军装备部驻北京地区第一军事代表室, 北京 100854)

**摘要:** 针对小样本高截尾试验信息贮存可靠性评估问题, 提出了基于概率物理模型的贮存可靠性评估方法。通过对概率物理模型与传统指数模型的贮存可靠性评估方法进行对比分析, 分别利用 2 种评估方法进行模型参数拟合、无失效数据可靠性评估和系统可靠性评估, 发现无论是从拟合精度, 还是小样本数据评估方面, 概率物理模型评估方法都更符合工程实际。该模型对导弹或其他类型装备的贮存可靠度评定具有较好的应用和理论价值。

**关键词:** 概率物理模型; 贮存可靠性; 退化失效; 评估方法。

中图分类号: TJ760.89; TB114.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)04-0060-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.04.010

## Storage Reliability Assessment Method Based on Probabilistic Physical Model

HU Yu-qing<sup>1</sup>, WU Jun-xian<sup>2</sup>, ZHANG Sheng-peng<sup>1</sup>, LI Hong-min<sup>1</sup>

(1. Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R & T Center, Beijing 100854, China; 2. First Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Beijing, Beijing 100854, China)

**ABSTRACT:** In order to evaluate the storage reliability of small sample high truncated test information, this paper proposes a storage reliability evaluation method based on probabilistic physics. Storage reliability evaluation methods based on the probabilistic physical model and the traditional exponential model are compared and analyzed. The evaluation methods are respectively used to perform model parameter fitting, no-failure data reliability evaluation and system reliability evaluation. It is found that the probabilistic physical model evaluation method is more in line with engineering reality in terms of fitting accuracy and small sample data evaluation. This probabilistic physical model has good application and theoretical value for the storage reliability assessment of missiles or other types of equipment.

**KEY WORDS:** probabilistic physical model; storage reliability; degradation failure; evaluation method

导弹装备具有“长期贮存, 一次使用”的特点, 为了保证导弹在使用时具有较高的安全性和可靠性, 每型导弹在设计定型阶段都有一个预先给出贮存期指标<sup>[1-2]</sup>。目前, 国内对贮存期指标的定义开展了大

量的研讨。李久祥等<sup>[3]</sup>对贮存期的定义为: “一项合格产品在规定的贮存条件下, 满足规定贮存可靠性要求的贮存寿命(时间长度), 称为可靠贮存寿命或贮存期”。陆祖建等<sup>[4]</sup>重申“导弹的贮存期是将产品出

收稿日期: 2021-11-15; 修订日期: 2022-02-01

Received: 2021-11-15; Revised: 2022-02-01

作者简介: 胡雨晴(1993—), 女, 硕士, 主要研究方向为可靠性工程。

**Biography:** HU Yu-qing (1993—), Female, Master, Research focus: reliability engineering.

引文格式: 胡雨晴, 吴俊娴, 张生鹏, 等. 基于概率物理模型的贮存可靠性评估方法[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 060-065.

HU Yu-qing, WU Jun-xian, ZHANG Sheng-peng, et al. Storage Reliability Assessment Method Based on Probabilistic Physical Model[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 060-065.

厂之日作为计时起点, 在规定的贮存、保管、维护(包括按技术条件规定的更换备件、排除故障)和使用条件下, 与一个较高可靠性指标相对应的寿命时间”。可以看出, 导弹装备无论是新型号的贮存期指标或老型号的延寿工作中都必须有贮存可靠性指标要求<sup>[5]</sup>。如何通过高效、切实可行的可靠性试验综合评估方法对高可靠、长寿命的导弹装备贮存可靠性进行验证和量化评估, 为导弹装备贮存可靠性设计、定型、使用维护提供依据, 已成为亟待解决的工程问题<sup>[6]</sup>。

目前, 传统的导弹装备贮存可靠性评估方法大多以寿命信息作为统计分析对象, 假定产品寿命分布服从指数分布、威布尔分布、对数正态分布等经典寿命分布模型, 分析过程中不关注产品在使用过程中的微观变化, 不区分产品的失效机理。这种分析方式比较适合贮存可靠性指标比较低的产品, 但是随着科技的发展, 使用材料以及设计、制造技术的不断提高与改善, 导弹装备的可靠性越来越高, 贮存寿命的指标要求也越来越长。然而, 在实际工程应用中, 由于试验费用、试验设备等各方面因素的限制, 试验样本量一般较少, 且试验时间有限, 在相对较短的试验时间内无法获取足够的失效数据, 传统的可靠性统计试验方法难以满足装备实践的需求, 小样本高截尾产品贮存可靠性评估问题亟需解决<sup>[7]</sup>。

针对导弹装备贮存可靠度评估小样本高截尾问题, 国内外均开展了大量的研究。研究手段可以分为 2 类: 一类是利用信息融合的手段, 扩大试验样本量, 从而进行贮存可靠性评估<sup>[8]</sup>, 此类方法对数据搜集规范要求较高, 工程上应用难度较大; 另一类是利用产品的退化数据进行贮存可靠性评估<sup>[9-11]</sup>, 此类方法仅适用于能够搜集到退化数据的产品, 不具备普适性。因此, 本文提出利用概率物理方法进行装备贮存可靠性评估, 有效解决试验信息小样本高截尾问题, 具有更高的工程应用价值。

概率物理方法相关理论研究始于 20 世纪 70 年代的苏联时期, 该方法中引入了一类新的寿命分布(DM、DN 分布), 用以描述退化(疲劳、耗损、老化等)失效过程的统计规律性。本文针对小样本高截尾产品试验信息的贮存可靠性评估问题, 提出了基于概率物理方法的贮存可靠性评估方法, 给出了概率物理模型 DM、DN 分布寿命分布及模型参数评估方法。通过算例说明与传统的评估方法相比, 概率物理模型对于贮存可靠性评估问题存在诸多优势。首先, 对于退化型失效产品, 该模型其故障分布概率密度曲线与产品实际故障分布趋势线拟合的非常贴近; 其次, 该模型适合小样本、高截尾、零失效的情况; 另外, 进行系统可靠性评估时, 该模型能够有效规避传统指数模型评估结果过于保守问题, 给出更符合工程实际的系统可靠性评估结果。

## 1 概率物理模型基本理论

本节给出概率物理方法中 DM 分布和 DN 分布<sup>[12-14]</sup>的分布函数和概率密度函数, 其中 DM 分布适用于电子产品, DN 分布适用于机电产品。

### 1.1 DM 分布

DM 寿命分布的分布函数为:

$$F(t) = DM(t, \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) \quad (1)$$

式中:  $\Phi(\cdot)$  是标准正态分布的分布函数;  $\mu$  是位置参数;  $\nu$  是形状参数。

DM 寿命分布的概率密度函数为:

$$f(t) = \frac{t+\mu}{2\nu t\sqrt{2\pi\mu t}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\nu^2\mu t}\right] \quad (2)$$

对服从 DM 分布的寿命总体, 其平均无故障工作时间为:

$$T_{cp} = \mu(1+\nu^2/2) \quad (3)$$

### 1.2 DN 分布

DN 寿命分布的分布函数为:

$$F(t) = DN(t, \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \Phi\left(-\frac{t+\mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) \quad (4)$$

DN 寿命分布的概率密度函数为:

$$f(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{\nu t\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\nu^2\mu t}\right] \quad (5)$$

对服从 DN 分布的寿命总体, 其平均无故障工作时间为:

$$T_{cp} = \mu \quad (6)$$

## 2 试验数据的参数估计

### 2.1 完全样本参数估计

#### 2.1.1 DM 分布参数的点估计

根据文献[15], DM 分布参数的极大似然估计由式(7)和(8)中解出:

$$\hat{\mu} = G + Q - \sqrt{Q^2 - SG + G^2} \quad (7)$$

$$\hat{\nu} = \sqrt{\frac{\hat{\mu}}{G} + \frac{S}{\hat{\mu}} - 2} \quad (8)$$

式中:  $S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$ ,  $G = N \left[ \sum_{i=1}^N t_i^{-1} \right]^{-1}$ ,

$$Q = N \left[ 2 \sum_{i=1}^N (\hat{\mu} + t_i)^{-1} \right]^{-1}。$$

DM 分布参数的矩估计为:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{3} [4S - \sqrt{S^2 + 3D}] \tag{9}$$

$$\hat{\nu} = \sqrt{\frac{2(\sqrt{S^2 + 3D} - S)}{4S - \sqrt{S^2 + 3D}}} \tag{10}$$

$$\text{式中: } D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - S)^2.$$

当样本量  $N \rightarrow \infty$  时, 极大似然估计与矩估计相同; 当  $N > 20$  时, 二者的差异不大; 而当样本量较小时, 极大似然估计优于矩估计。

### 2.1.2 DN 分布参数的点估计

根据文献[15], DN 分布参数的极大似然估计由式 (11) 和 (12) 中解出。

$$\hat{\mu} = S \tag{11}$$

$$\hat{\nu} = \sqrt{\frac{S}{G}} - 1 \tag{12}$$

$$\text{式中: } S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad G = N \left[ \sum_{i=1}^N t_i^{-1} \right]^{-1}.$$

DN 分布参数的矩估计为:

$$\hat{\mu} = S \tag{13}$$

$$\hat{\nu} = \frac{\sqrt{D}}{S} \tag{14}$$

$$\text{式中: } D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - S)^2.$$

当样本量  $N \rightarrow \infty$  时, 极大似然估计与矩估计相同; 当  $N > 20$  时, 二者的差异不大; 而当样本量较小时, 极大似然估计优于矩估计。

根据式 (1) 和 (4), 从分布形式上来看, DN 分布为逆高斯分布, 退化数据服从维纳过程的产品, 在给定失效阈值的情况下, 首达时分布服从逆高斯分布, 可见该分布能够反映产品的退化失效过程。根据式 (7) — (14), 相比于 DM 分布, DN 分布的位置参数与统计数据均值更吻合, 形状参数与统计数据的离散程度更吻合。因此, 本文以 DN 分布模型为例, 讨论在小样本情况下, 基于概率物理方法进行贮存寿命评估的优越性。

## 2.2 有故障情况下参数估计

假定试验中提供  $N$  个元器件, 在试验时间  $t_r$  中, 有  $r$  个元器件故障。假定, 故障前工作时间服从 DN 分布 ( $\nu=1$ ), 可得到产品故障前平均工作时间 (MTTF)  $t_0$  的表达式:

$$\Phi\left(\frac{t_r - t_0}{\sqrt{t_r t_0}}\right) + \exp(2)\Phi\left(-\frac{t_r + t_0}{\sqrt{t_r t_0}}\right) = \frac{r}{N} \tag{15}$$

产品故障前平均工作时间 (MTTF)  $t_0$  的估计值:

$$t_0 = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{t_i}{x(i/N; \nu)} \tag{16}$$

式中:  $x(i/N; \nu) = \frac{t_i}{t_0}$ 。相对的已工作时间, 根据

$F_i = \frac{i}{N}$  和变差系数  $\nu$  确定 (查表可得)。

## 2.3 无故障情况下参数估计

假定试验中提供  $N$  个元器件进行试验, 试验时间为  $t_u$ , 试验期间器件无故障。假定故障前工作时间服从 DN 分布 ( $\nu=0.8, \bar{\nu}=1$ ), 根据 Clopper-Pearson 公式, 有:

$$P(t_u) = (1 - \gamma)^{1/N} \tag{17}$$

式中:  $\gamma$  为产品的单边置信度。

可得到产品故障前平均工作时间  $t_0$  的表达式为:

$$P(t_u) = \Phi\left(\frac{t_u - t_0}{\bar{\nu}\sqrt{t_u t_0}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\bar{\nu}^2}\right)\Phi\left(-\frac{t_u + t_0}{\sqrt{t_u t_0}}\right) \tag{18}$$

产品故障前平均工作时间的单边置信下限  $T_L$  的表达式:

$$T_L = \frac{t_u}{x[1 - P(t_u); \bar{\nu}]} = t_u k_1(P, \bar{\nu}) \tag{19}$$

式中:  $k_1(P, \bar{\nu})$  为修正系数, 可通过查表得到。

## 3 概率物理模型与指数分布模型对比分析

本文利用 DN 分布和指数分布分别在试验寿命数据拟合评估、小样本无失效数据可靠性评估及串联系统可靠性评估方面进行对比分析, 说明在进行贮存可靠性评估时, 概率物理方法存在的诸多优势。

### 3.1 试验寿命数据可靠性评估

根据文献[15], 某电珠试验数据见表 1。试验样本量为 111 个, 收集样本寿命数据, 最小试验数据为 1.17 h, 最大试验数据为 20.32 h。将试验数据分成 10 组, 组距取整数 2, 统计结果如图 2 所示。样本均值  $S$  为 6.608 7, 调和平均数  $G$  为 4.229, 方差  $D$  为 20.582。

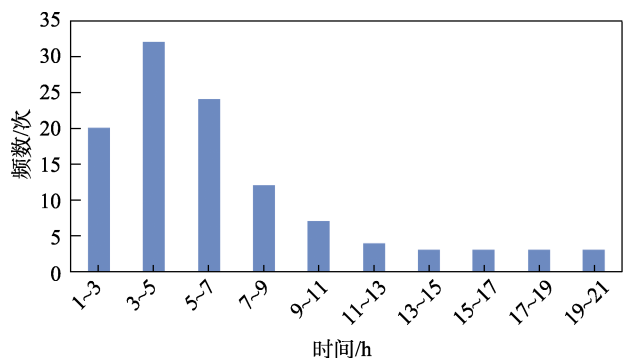


图 1 电珠样本疲劳寿命数据  
Fig.1 Fatigue life data of the ball samples

表 1 电珠样本疲劳寿命数据  
Tab.1 Fatigue life data of the ball samples

组号	时间/h	疲劳寿命观测值/h																频数	频率/%
1	1~3	1.17	1.21	1.24	1.31	1.39	1.55	1.65	1.67	1.74	1.77	2	2.09	2.33	2.34	2.4	2.46	20	18.02
		2.49	2.66	2.67	2.73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2	3~5	3.14	3.3	3.42	3.55	3.6	3.65	3.68	3.76	3.77	3.81	3.99	3.99	4.1	4.12	4.22	4.25	32	28.83
		4.33	4.33	4.35	4.43	4.45	4.48	4.52	4.59	4.64	4.68	4.77	4.8	4.88	4.95	4.99	4.99		
3	5~7	5.01	5.03	5.16	5.22	5.3	5.33	5.41	5.52	5.53	5.54	5.56	5.71	5.96	5.99	5.99	6.22	24	21.62
		6.24	6.25	6.31	6.55	6.7	6.94	6.96	6.99	—	—	—	—	—	—	—	—		
4	7~9	7.22	7.4	7.56	7.81	7.85	7.86	7.92	7.99	8.31	8.32	8.69	8.93	—	—	—	—	12	10.81
5	9~11	9.07	9.5	9.73	9.86	10.32	10.63	10.77	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	6.3
6	11~13	11.12	11.73	12.15	12.59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	3.6
7	13~15	13.18	14.23	14.58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	2.7
8	15~17	15.50	16.57	16.98	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	2.7
9	17~19	17.43	18.27	18.61	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	2.7
10	19~21	19.81	19.94	20.32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	2.7
合计																		111	100

指数分布失效率  $\lambda$  的点估计为:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{S} = \frac{1}{6.6087} = 0.1513 \quad (20)$$

DM 分布位置参数  $\mu$ , 形状参数  $\nu$  的点估计为:

$$\hat{\mu} = G + Q - \sqrt{Q^2 - SG + G^2} = 5.2866 \quad (21)$$

$$\hat{\nu} = \sqrt{\frac{\hat{\mu}}{G} + \frac{S}{\hat{\mu}}} - 2 = 0.7072 \quad (22)$$

DN 分布位置参数  $\mu$ , 形状参数  $\nu$  的点估计为:

$$\hat{\mu} = S = 6.6087 \quad (23)$$

$$\hat{\nu} = \sqrt{\frac{S}{G}} - 1 = 0.7501 \quad (24)$$

根据 3 种寿命分布的概率密度函数可得到评估出的概率密度曲线, 如图 2 所示。

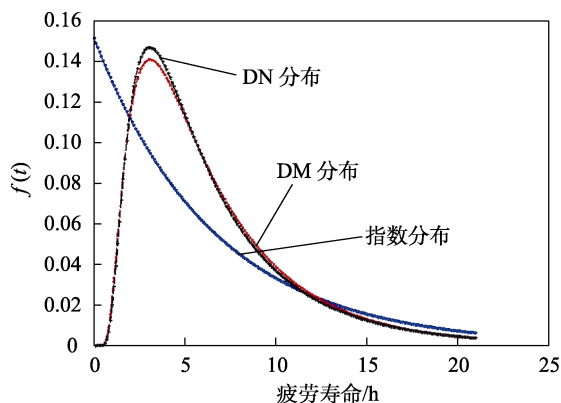


图 2 分布函数评估结果概率密度曲线  
Fig.2 Probability density curve of distribution function evaluation results

根据图 1 和图 2 可以看出, 对于此类存在退化型失效的产品, DN 和 DM 分布的拟合结果明显优于指数分布, DN 和 DM 本身拟合结果差别不大。在实际

工程使用中, 很多产品由于长期贮存致使产品性能退化, 从而导致产品失效, 因此 DN 和 DM 分布更适用于退化型失效产品的贮存可靠性评估。另外, 概率物理模型是在产品故障分布规律的基础上建立的。相对于传统评估模型, 仅利用数理统计拟合的故障分布模型, 概率物理模型在描述产品可靠性特征时更具有专业性。该模型的位置参数与统计数据的平均值一致, 而形状参数与表示统计数据离散程度的变异系数一致, 故障物理模型的故障分布概率密度曲线与产品实际故障分布趋势线拟合的非常贴近, 能够较好地反映产品老化破坏特征。在进行产品贮存可靠性评估时, 可以有效地代替传统严格的指数分布、威布尔分布、对数正态分布等。

### 3.2 小样本无失效数据可靠性评估

假设某型号电子产品在定型阶段仅投入 1 台被试品进行试验, 试验时间为  $t=2\ 000\ h$ , 样本无失效, 分别采用指数分布和 DN 分布对产品 MTBF 的单边置信下限进行评估 (单侧置信度  $\gamma=0.7$ )。

假设产品的寿命分布服从指数分布, 根据 GJB 899, 产品可靠性指标 MTBF 的单侧置信下限  $T_L$  为:

$$T_L = \frac{2t}{\chi_{1-c}^2(2r_1 + 2)} = 1\ 661.198\ 6 \quad (25)$$

式中:  $t$  为产品加权后的总有效试验或使用时间;  $r_1$  为  $t$  时间内产品发生的责任故障总数;  $c$  为单侧置信度 70%;  $\chi_{1-c}^2(2r_1 + 2)$  是自由度为  $(2r_1 + 2)$  的  $\chi^2$  分布的  $1 - c$  分位数。

假设产品寿命分布服从 DN 分布, 可靠性指标 MTBF 的单侧置信下限  $T_L$  为:

$$P(t_u) = (1 - \gamma)^{1/N} = 0.3 \quad (26)$$

查表可得  $x(1 - P, \bar{\nu}) = x(0.7, 1) = 1.085\ 1$ ,

$$T_L = \frac{t_u}{x[1 - P(t_u); \bar{v}]} = t_u k_1(P, \bar{v}) = 2\ 170.2 \quad (27)$$

从评估结果可以看出, 当假设产品寿命分布服从指数分布时, 必须进行 1.2 倍贮存寿命指标的试验时间才能够验证产品满足指标要求。基于指数分布进行可靠性指标评估结果过于保守, 不符合工程实际。采用 DN 分布进行寿命评估, 验证相同的贮存寿命指标时, 可采用较短的试验时间, 更能够达到工程效果和目的。

### 3.3 系统可靠性评估

假设系统由  $N$  个单元串联构成, 第  $i(i=1, 2, \dots, N)$  个单元的寿命为  $T_i$ 。假设第  $i$  个单元的寿命服从指数分布, 则系统的寿命  $T_s^E$  为:

$$T_s^E = \left( \sum_{i=1}^N \lambda_i \right)^{-1} = \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{T_i} \right)^{-1} \quad (28)$$

若第  $i$  个单元的寿命服从 DN 分布, 系统的寿命  $T_s^{DN}$  为:

$$T_s^{DN} = \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{T_i^2} \right)^{-2} \quad (29)$$

假设某电子产品由  $N=1\ 000$  个元器件组成, 每个元器件的寿命为  $T_i=10^8$ 。若元器件的寿命分布服从指数分布时, 根据式 (28),  $T_s^E=10^5$ ; 若元器件的寿命分布服从 DN 分布时, 根据式 (29),  $T_s^{DN}=3.16 \times 10^6$ 。

假设某电子产品由  $N=10^6$  个元器件组成, 每个元器件的寿命为  $T_i=10^8$ 。若元器件的寿命分布服从指数分布时, 根据式 (28),  $T_s^E=100$ ; 假设元器件的寿命分布服从 DN 分布时, 根据式 (29),  $T_s^{DN}=10^5$ 。

从串联系统的评估结果来看, 相较于指数分布, 概率物理分布具有明显的弱衰减性, 系统的寿命评估结果受器件数量的影响较小, 更符合工程实际。

## 4 结论

本文针对小样本寿命信息的贮存可靠性试验评估问题, 提出了基于概率物理方法的贮存可靠性评估方法, 引入了一类新的寿命分布 (DM、DN 分布), 用以描述退化 (疲劳、耗损、老化等) 失效过程的统计规律性, 通过与传统可靠性评估方法指数分布进行对比分析, 发现概率物理方法具有以下诸多优势:

1) 对于退化型失效产品, 该模型的故障分布概率密度曲线与产品实际故障分布趋势线拟合得非常贴近, 能够很好地反映产品老化破坏特征, 其位置参数与统计数据的平均值一致, 而形状参数与表示统计数据离散程度的变异系数一致。

2) 该方法适合小样本、高截尾、零失效的情况。

在验证相同的可靠性指标时, 该方法所需要的样本数量及试验时间明显低于指数分布, 且计算方法简单。

3) 当利用该模型进行串联系统可靠性评估时, 评估结果较指数分布模型具有明显的弱衰减性, 受元器件串联数量影响较小, 更符合工程实际。

### 参考文献:

- [1] 陈津虎, 朱曦全, 胡彦平, 等. 航天电子产品加速贮存试验技术综述[J]. 强度与环境, 2015, 42(5): 11-18.  
CHEN Jin-hu, ZHU Xi-quan, HU Yan-ping, et al. Summarization on Space Electronic Products Accelerated Storage Test Technology[J]. Structure & Environment Engineering, 2015, 42(5): 11-18.
- [2] 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: 5-29.  
MENG Tao, ZHANG Shi-nian, YI Dang-xiang. Introduction to Missile Storage and Life Extension Technology[M]. Beijing: China Aerospace Publishing Hous, 2013: 5-29.
- [3] 李久祥, 刘春和. 装备贮存延寿技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007.  
LI Jiu-xiang, LIU Chun-he. Equipment Storage and Life Extension Technology[M]. Beijing: China Aerospace Publishing Hous, 2007.
- [4] 陆祖建, 颜诗源, 张仕念, 等. 可修产品的贮存可靠度[J]. 质量与可靠性, 2013(6): 4-6.  
LU Zu-jian, YAN Shi-yuan, ZHANG Shi-nian, et al. Storage Reliability of Repairable Products[J]. Quality and Reliability, 2013(6): 4-6.
- [5] 刘雪峰, 李新俊, 张仕念, 等. 延长导弹贮存期提高贮存可靠度的基本途径[C]//第十三届全国可靠性物理学术讨论会论文集. 玉山: [出版者不详], 2009.  
LIU Xue-feng, LI Xin-jun, ZHANG Shi-nian, et al. The Basic Way to Prolong the Storage Period and Improve the Storage Reliability of Missiles[C]//Proceedings of the 13th National Symposium on Reliability Physics. Yushan: [s. n.], 2009.
- [6] 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.
- [7] 杨宝琨, 康兴无. 基于小样本数据的惯性平台系统贮存可靠度的预测方法[J]. 航天控制, 2015, 33(5): 90-95.  
YANG Bao-kun, KANG Xing-wu. Inertial Platform System Storage Reliability Prediction Method Based on Small Sample Data[J]. Aerospace Control, 2015, 33(5): 90-95.
- [8] 郑庆利, 段化军. 导弹贮存可靠性小子样评估方法研究[J]. 科学与信息化, 2018(6): 116-118.  
ZHENG Qing-li, DUAN Hua-jun. Study on Small Sample

- Evaluation Method of Missile Storage Reliability[J]. Science and Informatization, 2018(6): 116-118.
- [9] 石远豪, 阚飞, 陈泽平, 等. 一种电子设备贮存可靠度预测方法: CN109739671A[P]. 2019-05-10.  
SHI Yuan-hao, KAN Fei, CHEN Ze-ping, et al A Prediction Method of Storage Reliability of Electronic Equipment: CN109739671A[P]. 2019-05-10.
- [10] 罗湘勇, 黄小凯. 基于多机理竞争退化的导弹贮存可靠性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5): 701-705.  
LUO Xiang-yong, HUANG Xiao-kai. Storage Reliability Analysis of Missile Based on Multi-Mechanism Competition Degradation Method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(5): 701-705.
- [11] 赵婉, 杨静. 基于性能退化数据评价火工品贮存可靠性的方法[J]. 含能材料, 2012, 20(4): 406-408.  
ZHAO Wan, YANG Jing. Evaluation on Storage Reliability of Pyrotechnics Based on Performance Degradation Data[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2012, 20(4): 406-408.
- [12] СТРЕЛЬНИКОВ В П. Новая Технология Исследования Надежности[J]. Математические Машины и Системы, 1997(2): 78.
- [13] СТРЕЛЬНИКОВ В П. Новая Технология Исследования Надежности Машин и Аппаратуры[J]. Математические Машины и Системы, 2007(3): 227-238.
- [14] ГОСТ 27.005—97. Надежность в Технике. Модели Отказов. Основные Оложения[S].
- [15] 沈延臣. 物理概率方法预估贮存寿命研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
SHEN Yan-chen. Estimation of Storage Life with Physical Probability Methods[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

责任编辑: 刘世忠