

# 基于贮存剖面的弹上电子部件可靠性分析

刘晓娣<sup>1a</sup>, 李田科<sup>2</sup>, 韩建立<sup>1b</sup>

(1. 海军航空大学 a. 航空基础学院 b. 岸防兵学院, 山东 烟台 264001;  
2. 中国人民解放军 91980 部队, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 目的 提高弹上电子部件贮存可靠性预测的准确度, 提出基于贮存剖面的弹上电子部件可靠性分析方法。方法 在分析弹上电子部件贮存剖面及环境条件的基础上, 将弹上电子部件视为多阶段任务系统, 引入贝叶斯分析, 采用分阶段建模方法, 针对各阶段相关性和失效率的不同, 基于累积损伤模型, 构建弹上电子部件贮存寿命周期内的可靠性模型。结果 相比于洞库贮存、值班等单一环境条件下的可靠性预测, 基于贮存剖面综合环境下的可靠性预测结果的准确性更高, 且随着贮存时间的增长, 优势更明显。结论 该方法立足于实际贮存剖面, 分析结果更符合弹上电子部件的应用实际, 也为其他弹上部件的可靠性分析提供了一种有效途径。

**关键词:** 可靠性; 弹上电子部件; 贮存剖面; 多阶段任务系统; 贝叶斯分析; 累积损伤模型

**中图分类号:** TJ760 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)05-0082-06

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2024.05.010

## Reliability Analysis of Missile-borne Electronic Components Based on Storage Profile

LIU Xiaodi<sup>1a</sup>, LI Tianke<sup>2</sup>, HAN Jianli<sup>1b</sup>

(1. a. Aviation Foundation College, b. Coastal Defense College, Naval Aviation University, Shandong Yantai 264001, China;  
2. PLA, No.91980 Troop, Shandong Yantai 264001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose a reliability analysis method of the missile-borne electronic component based on the storage profile, in order to improve the accuracy of the storage reliability prediction of the electronic components. Based on the analysis of the storage profile and environmental conditions, the missile-borne electronic component was regarded as a phase mission system. Bayesian analysis was introduced, and the reliability model of the electronic component during the storage life cycle was constructed based on the cumulative damage model according to the different correlation and failure rate of each stage. Compared with the reliability prediction under single environmental condition such as cave storage and combat readiness duty, the reliability prediction results in the comprehensive environment based on storage profile were more accurate, and the advantage became more pronounced as the storage time increased. Based on the actual storage profile, the prediction results are more in line with the application practice of missile-borne electronic components, and an effective method for the reliability analysis of other missile-borne components is provided.

收稿日期: 2024-02-26; 修订日期: 2024-03-27

Received: 2024-02-26; Revised: 2024-03-27

基金项目: 国家自然科学基金 (51975580)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51975580)

引文格式: 刘晓娣, 李田科, 韩建立. 基于贮存剖面的弹上电子部件可靠性分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 82-87.

LIU Xiaodi, LI Tianke, HAN Jianli. Reliability Analysis of Missile-borne Electronic Components Based on Storage Profile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 82-87.

**KEY WORDS:** reliability; missile-borne electronic component; storage profile; phase mission system; Bayesian analysis; cumulative exposure model

导弹是典型的“长期贮存, 一次使用”武器装备, 电子部件在导弹武器系统中承担的功能任务越来越重要, 其贮存可靠性是影响导弹武器系统战备完好性的重要因素。

目前, 围绕导弹装备可靠性已有很多研究。胡雨晴等<sup>[1]</sup>、王鑫等<sup>[2]</sup>、戴宗亮等<sup>[3]</sup>、李志强等<sup>[4]</sup>、蒋平等<sup>[5]</sup>、葛蒸蒸等<sup>[6]</sup>基于测试数据或试验数据研究了导弹相关部件的贮存可靠性。该类研究主要基于数据驱动方法构建可靠性模型, 未直接考虑导弹具体的贮存环境。在贮存期间, 导弹会经受温度、振动、湿度、盐雾等多种环境应力, 这些环境应力影响着导弹的贮存可靠性<sup>[7-9]</sup>。有调查表明, 环境造成武器装备的损坏占整个使用过程中损坏的 50%以上, 其中在贮存期的环境损坏占比为 60%<sup>[7,10]</sup>。为此, 很多学者基于贮存环境研究导弹及其部件的可靠性。肖志斌等<sup>[11]</sup>根据导弹寿命剖面阐述了舰载导弹装备的可靠性, 包括导弹的库房贮存可靠度和舰上值班可靠度等。罗俊等<sup>[12]</sup>、宋贵宝等<sup>[13]</sup>、姚军等<sup>[14]</sup>基于贮存环境因素分析, 开展加速寿命试验研究了电子产品在贮存环境下的贮存可靠性, 该研究仅关注某一贮存环境下的可靠性。鞠宏艳等<sup>[15]</sup>从材料层面研究了发动机的贮存可靠性与环境历程的关系。杨立安等<sup>[16]</sup>考虑不同环境应

力作用研究了空空导弹两阶段性能退化部件的可靠性建模。弹上电子部件在贮存期间会随导弹经历多个任务阶段, 不同任务阶段可能承受不同的环境应力。因此, 为提高可靠性分析的准确性, 需要综合考虑各个任务阶段的环境, 目前该方面的相关研究较少。

鉴于此, 本文提出了基于贮存剖面的弹上电子部件可靠性分析方法。该方法在分析弹上电子部件贮存剖面及环境条件的基础上, 将弹上电子部件视为多阶段任务系统, 引入贝叶斯分析, 采用分阶段建模方法, 针对各阶段相关性和失效率的不同, 基于累积损伤模型构建弹上电子部件贮存寿命周期内的可靠性模型。最后通过算例讨论了该方法的有效性。

## 1 贮存剖面与环境条件分析

导弹的贮存期定义为自交付之后, 至导弹发射或报废期间的整个过程。典型战术导弹的贮存剖面主要包括库房贮存、运输、值班 3 个阶段, 如图 1 所示<sup>[8,17-18]</sup>。弹上电子部件作为导弹的一部分, 其贮存剖面与导弹相一致。从某型战术导弹的典型使用信息中, 选取 1 a 的环境条件, 结合弹上电子部件自身特点进行环境条件分析<sup>[18-19]</sup>。

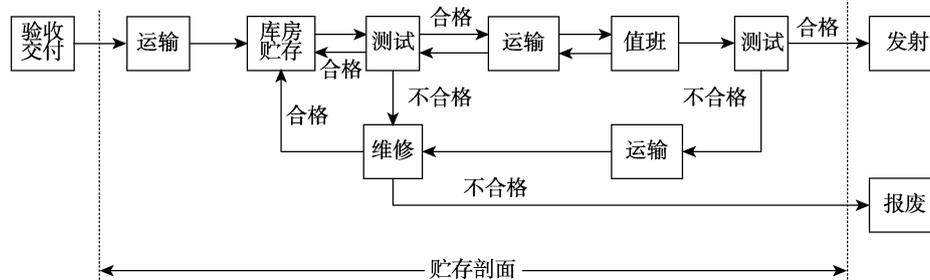


图 1 导弹典型贮存剖面

Fig.1 Typical storage profile of a missile

### 1.1 库房贮存阶段

导弹全年共有 6 个月 (约 180 d) 在库房贮存。在库房内, 温度恒定在 20 °C 左右, 导弹存放于密封且充有氮气的运输箱/筒内, 因此湿度、盐雾、霉菌的影响可不考虑。贮存期间, 导弹如需战备值班, 要进行综合测试, 所有操作均按照技术规程进行, 且时间较短, 电应力的影响在此不作考虑。因此, 库房贮存主要考虑温度的影响。

### 1.2 运输阶段

导弹运输主要为铁路运输和公路运输 2 种。长途运输通常采用铁路运输的方式, 全年累积铁路运输时间为 2 d (48 h)。短途转运和野外机动运输主要采用

公路运输的方式, 累积公路运输时间为 13 d (312 h), 运输阶段主要受振动和温度应力的影响。由于运输时间相对整个寿命期较短, 运输期间视为恒温, 运输条件符合 GJB 150.16A—2009《军用装备实验室环境试验方法: 振动试验》<sup>[20]</sup>。

### 1.3 值班阶段

导弹全年约有 170 d 处于野外值班状态。在该阶段, 导弹位于发射装置内, 多为野外停放, 温度年变化范围为 -10~40 °C, 最大温差为 50 °C。在值班阶段, 偶有短距离的机动运输, 为简化后续可靠性分析, 将其时长累计到运输阶段分析, 主要考虑温度循环的影响。

## 2 弹上电子部件可靠性分析

### 2.1 基本思路

弹上电子部件在以年为周期的贮存期内,经历运输、库房贮存、值班3个任务阶段,每个任务阶段承受的环境应力不同,失效率也不同,可靠性变化趋势也不同,如图2所示。由图2可知,弹上电子部件的整个贮存期是随导弹由若干任务阶段组成的,各个任务阶段在时间上呈串联关系,任一阶段失效将导致该部件失效。在此,将基于贮存剖面的弹上电子部件视为一个多阶段任务系统,引入贝叶斯分析,采用分阶段建模方法<sup>[21]</sup>构建电子部件的可靠性模型。将各个连续的阶段分别视为单阶段系统,建立单阶段的可靠性模型,并以前一阶段末系统的状态作为下一阶段系统的初态,逐阶段进行系统的任务可靠性分析。

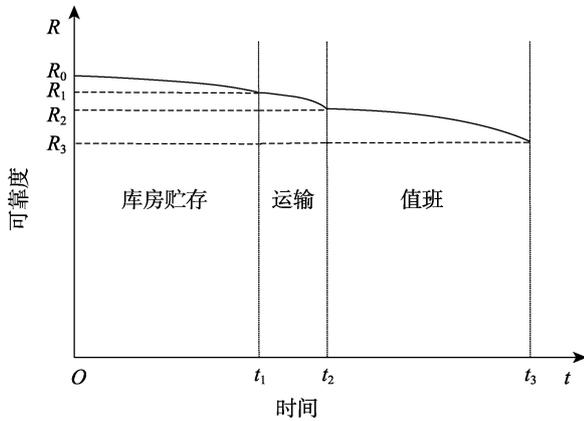


图2 贮存1a的可靠度变化  
Fig.2 Storage reliability over 1 year

### 2.2 单阶段可靠性模型

假设弹上电子部件不可修复,经历的每个阶段用事件  $X_i$  ( $i \in [1, N]$ ) 表示。根据贝叶斯链式法则以及条件独立性规则<sup>[22]</sup>,在阶段  $i$  的可靠度函数为:

$$R_i = P(X_i) = P(X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_i) = P(X_1)P(X_2 | X_1) \dots P(X_i | X_{i-1}) \quad (1)$$

式中:  $P(X_i | X_{i-1})$  为弹上电子部件在阶段  $i$  的条件可靠度,即在阶段  $i-1$  不失效的条件下,阶段  $i$  不失效的概率<sup>[23]</sup>。 $P(X_i | X_{i-1})$  的计算见式(2)。

$$P(X_i | X_{i-1}) = 1 - F_{i(i-1)}(t) \quad (2)$$

式中:  $F_{i(i-1)}(t)$  为弹上电子部件在时刻  $t$  的失效

$$F_{i(i-1)}(t) = \frac{\exp\left\{-\left[\sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{t_j - t_{j-1}}{\eta_j}\right)\right]^\beta\right\} - \exp\left\{-\left[\frac{(t - t_{i-1})}{\eta_i} + \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{t_j - t_{j-1}}{\eta_j}\right)\right]^\beta\right\}}{\exp\left\{-\left[\sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{t_j - t_{j-1}}{\eta_j}\right)\right]^\beta\right\}} \quad (10)$$

分布。该时刻位于阶段  $i$  内,是在阶段  $i-1$  可靠条件下的条件失效分布。根据条件概率贝叶斯公式,有:

$$F_{i(i-1)}(t) = \frac{F_i(t) - F_{i-1}(t)}{1 - F_{i-1}(t)} \quad (3)$$

弹上电子部件自交付后,先后经历多个任务阶段,在阶段  $i$  的失效分布是建立在之前阶段累积损伤基础上的。由 Nelson 提出的累积损伤模型<sup>[24]</sup>可知,产品的剩余寿命仅依赖于已累积失效的部分和当前的应力水平,与累积方式无关。假定电子部件在阶段  $i-1$  以应力  $S_{i-1}$  工作时间  $t_{i-1}$  产生的累积损伤,与在阶段  $i$  以应力  $S_i$  工作时间  $t'_i$  产生的累积损伤是等效的,即:

$$F_{i-1}(t_{i-1}) = F_i(t'_i) \quad t_{i-1} \neq t'_i \quad (4)$$

因此,电子部件在阶段  $i$  内  $t$  时刻的失效分布为:

$$F_i(t) = F_i(t - t_{i-1} + t'_{i-1}) \quad t_{i-1} \leq t \leq t_i \quad (5)$$

式中:  $t_{i-1}$  和  $t_i$  分别为第  $i$  阶段的起止时间;  $t'_{i-1}$  为前  $i-1$  个任务阶段的累积损伤折算到第  $i$  阶段的等效时间。

假设弹上电子部件寿命服从两参数 Weibull 分布,即:

$$F(t) = 1 - \exp[-(t/\eta)^\beta] \quad t > 0 \quad (6)$$

式中:  $\beta$  为形状参数;  $\eta$  为尺度参数,也称特征寿命。假设电子部件在贮存期服从失效机理一致性,即  $\beta$  保持不变,仅  $\eta$  发生变化。

阶段 1:

$$F_1(t) = 1 - \exp[-(t/\eta_1)^\beta] \quad 0 < t \leq t_1 \quad (7)$$

阶段 2:

$$F_2(t) = F_2(t - t_1 + t'_1) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(t - t_1 + t_1\eta_2/\eta_1)}{\eta_2}\right]^\beta\right\}, t_1 < t \leq t_2 \quad (8)$$

式中:  $t'_1 = \frac{\eta_2}{\eta_1} t_1$ 。

以此类推,可得第  $i$  阶段的累积失效分布为:

$$F_i(t) = F_i(t - t_{i-1} + t'_{i-1}) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(t - t_{i-1} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{(t_j - t_{j-1})\eta_i}{\eta_j})}{\eta_i}\right]^\beta\right\}, t_{i-1} < t \leq t_i \quad (9)$$

式中:  $t_0 = 0$ 。

将式(9)代入式(3)可得:

将式 (10) 代入式 (2) 可得阶段  $i$  的条件可靠度为:

$$P(X_i | X_{i-1}) = \frac{\exp\left\{-\left[(t-t_{i-1})/\eta_i + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{t_j-t_{j-1}}{\eta_j}\right]^\beta\right\}}{\exp\left[-\left(\sum_{j=1}^{i-1} \frac{t_j-t_{j-1}}{\eta_j}\right)^\beta\right]} \quad (11)$$

由此可得弹上电子部件在阶段  $i$  的可靠度为:

$$R = P(X_1)P(X_2 | X_1) \cdots P(X_i | X_{i-1}) = \exp\left\{-\left[(t-t_{i-1})/\eta_i + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{t_j-t_{j-1}}{\eta_j}\right]^\beta\right\} \quad (12)$$

### 2.3 各阶段可靠性分析

参照贮存期间的任务阶段 (如图 2 所示), 明确各个阶段弹上电子产品承受的环境应力, 根据已有加速寿命试验中典型加速模型, 确定产品特征寿命与环境应力之间的关系, 根据式 (12) 确定各阶段的可靠度。

1) 库房贮存阶段。电子部件位于导弹内部, 处于密封且充有氮气的运输箱/筒内, 主要受温度应力的影响。温度对电子部件的影响通常可以用阿伦尼斯 (Arrhenius) 模型描述:

$$\eta_k = A \exp[E_a / (kT)] \quad (13)$$

式中:  $\eta_k$  为库房阶段的特征寿命;  $A$  为与温度无关的未知常数;  $E_a$  为激活能, 与材料有关, eV;  $k$  为玻尔兹曼常数,  $k=8.62 \times 10^{-5}$  eV/K;  $T$  为热力学温度, K。

库房贮存为第 1 阶段任务, 该阶段的可靠度为:

$$R = \exp[-(t/\eta_k)^\beta], 0 < t \leq t_1 \quad (14)$$

2) 运输阶段。弹上电子部件主要受振动和温度应力的影响。振动对电子部件的影响可用幂律模型表示, 温度对电子部件的影响服从式 (13) 所示关系。综合 2 种应力效应, 根据广义艾林 (Eyring) 模型, 产品的特征寿命与振动和温度应力之间的关系可表示为:

$$\eta_y = AS^{-\alpha} \exp[E_a / (kT)] \quad (15)$$

式中:  $\eta_y$  为运输阶段的特征寿命;  $S$  为振动应力;  $A$ 、 $\alpha$  为待定系数。

运输为第 2 阶段任务, 该阶段的可靠度为:

$$R = \exp\left\{-\left[(t-t_1)/\eta_y + t_1/\eta_k\right]^\beta\right\}, t_1 < t \leq t_2 \quad (16)$$

3) 值班阶段。弹上电子部件需要经受昼夜温差产生的温度循环应力, 温度循环对产品特征寿命的影响可用 Noriss-Landzberg 模型来描述:

$$\eta_z = t_f N = \frac{t_f}{f^m} \frac{\delta}{(\Delta T)^n} \exp\left(\frac{E_a}{kT_{\max}}\right) \quad (17)$$

式中:  $\eta_z$  为值班阶段的特征寿命;  $t_f$  为温度循环的周期;  $f$  为循环频率;  $\delta$  为与材料有关的常数;  $\Delta T$  为温度变化范围;  $T_{\max}$  为最高温度。

值班为第 3 阶段任务, 该阶段的可靠度为:

$$R = \exp\left\{-\left[t_1/\eta_k + (t_2-t_1)/\eta_y + (t-t_2)/\eta_z\right]^\beta\right\}, \quad (18)$$

$$t_2 < t \leq t_3$$

由此可得弹上电子部件在 1 a 贮存期内的可靠度函数为:

$$R = \begin{cases} \exp[-(t/\eta_k)^\beta], & 0 < t \leq t_1 \\ \exp\left\{-\left[(t-t_1)/\eta_y + t_1/\eta_k\right]^\beta\right\}, & t_1 < t \leq t_2 \\ \exp\left\{-\left[t_1/\eta_k + (t_2-t_1)/\eta_y + (t-t_2)/\eta_z\right]^\beta\right\}, & t_2 < t \leq t_3 \end{cases} \quad (19)$$

在导弹寿命周期内, 弹上电子部件随导弹按照上述 3 个任务剖面循环往复, 各任务阶段为前后衔接关系。因此, 可在分析单阶段可靠性的基础上, 求得弹上电子部件在贮存期内的可靠性。

### 3 算例分析

某弹上电子部件主要由电阻、电容、三极管、集成电路等元器件组成, 其寿命服从 Weibull 分布。该部件在贮存期间会经历库房贮存、运输、值班等任务阶段。下面分别对库房贮存、值班单一任务环境和基于贮存剖面的综合环境下该部件的可靠度进行预测分析, 以检验本文方法的有效性。因实际应用中, 该部件在运输阶段的时间相对于其他任务阶段非常短, 在此不单独考虑。

1) 库房贮存环境。在库房贮存环境下, 根据该电子部件的历史测试数据及试验数据, 估计典型参数值如表 1 所示。假定库房贮存温度为 20 °C, 由式 (13) 和式 (14) 可预测其在库房贮存 10 a 的可靠度为 92.3%。

表 1 贮存阶段典型参数值

参数	$A$	$E_a$	$\beta$
取值	$1.5 \times 10^{-5}$	0.6	2

2) 值班环境。在值班环境下, 根据该电子部件的历史试验数据及已有研究<sup>[25]</sup>, 估计典型参数值如表 2 所示。假定野外最大温差为 50 °C, 最高温度为 40 °C, 可预测其值班环境下贮存 10 a 的可靠度为 70.3%。

3) 基于贮存剖面的综合环境。采用如图 2 所示 1 a 的贮存剖面, 假定 1 a 内每个任务阶段的时间分别为

表2 值班阶段典型参数值  
Tab.2 Typical parameter values during combat readiness duty phase

参数	$\delta$	$m$	$n$	$E_a$	$\beta$
取值	$8 \times 10^{-4}$	0.33	1.9	0.6	2

库房贮存时间  $t_1=180$  d、运输时间  $t_2-t_1=15$  d (360 h)、值班时间  $t_3-t_2=170$  d。在运输阶段,取铁路振动量级为  $0.002 g^2/Hz$ ,公路振动量级为  $0.02 g^2/Hz$ ,环境温度为  $20^\circ C$ 。根据式(19)可预测该部件在基于贮存剖面的综合环境下贮存 10 a 的可靠度为 80.6%。

基于上述分析可知,基于贮存剖面综合环境下的可靠度介于库房贮存可靠度和值班可靠度之间。

该弹上电子部件基于贮存剖面的综合环境与库房贮存、值班环境下贮存 1 a 和贮存 10 a 的可靠度变化曲线如图 3 所示。由图 3 可见,该弹上电子部件基于贮存剖面综合环境下的可靠度低于库房贮存环境下,高于值班环境下,这与弹上电子部件的应用实际相一致。在实际应用中,若将库房贮存环境下的可靠度作为弹上电子部件的贮存可靠度,未考虑温度循环、振动等因素对产品可靠度的影响,则会使可靠度预测值偏高;若将值班环境下的可靠度作为弹上电子部件的贮存可靠度,夸大了温度循环对产品可靠度的影响,则会使可靠度预测值偏低,而且这 2 种偏差随着贮存时间的增长将会增大。

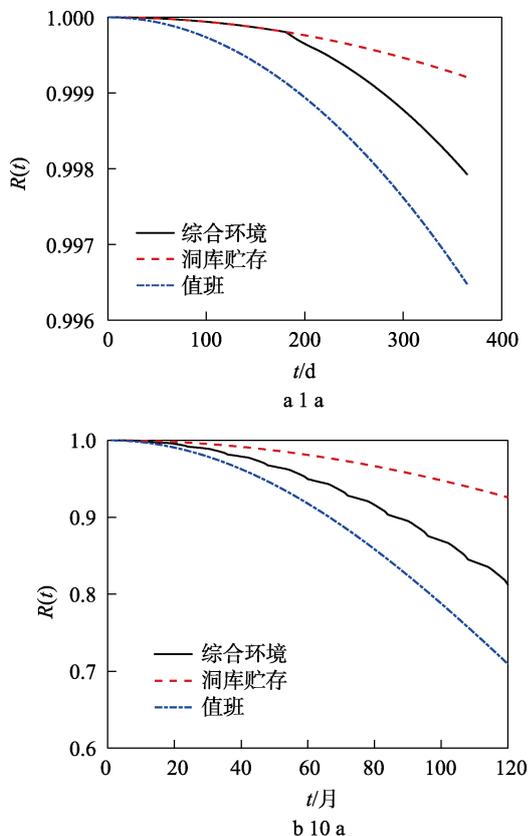


图3 贮存可靠度变化曲线  
Fig.3 Storage reliability: a) 1 year; b) 10 years

## 4 结论

为提高弹上电子部件贮存可靠性预测的准确性,本文根据贮存剖面特点,将弹上电子部件视为多阶段任务系统,研究了其可靠性规律,分析了贮存环境历程对贮存可靠性的影响。通过某弹上电子部件贮存 10 a 的可靠性分析表明,相比于库房贮存、值班等单一贮存环境,基于贮存剖面综合环境下的可靠性预测结果更符合导弹应用实际,准确性更高,且随着贮存时间增长,优势更明显。该方法为弹上电子部件可靠性分析提供了一种新途径,也可用于其他弹上部件的可靠性分析。

### 参考文献:

- [1] 胡雨晴, 吴俊娟, 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): 60-65.  
HU Y Q, WU J X, ZHANG S P, et al. Storage Reliability Assessment Method Based on Probabilistic Physical Model[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 60-65.
- [2] 王鑫, 陈金豹, 杨卓鹏, 等. 基于概率风险评估的导弹武器系统可靠性建模与分析[J]. 战术导弹技术, 2020(6): 112-119.  
WANG X, CHEN J B, YANG Z P, et al. Reliability Modeling and Analysis of Missile Weapon System Based on PRA[J]. Tactical Missile Technology, 2020(6): 112-119.
- [3] 戴宗亮, 李小兵, 吴博文, 等. 基于改进 GM(1, 1)模型的导弹贮存可靠性预测方法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(1): 102-105.  
DAI Z L, LI X B, WU B W, et al. Forecasting Method of Certain Missile Storage Reliability Based on an Improvement of Grey Model[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(1): 102-105.
- [4] 李志强, 徐廷学, 顾钧元, 等. 融合不确定信息的某型导弹控制系统可靠性分析方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(12): 2869-2876.  
LI Z Q, XU T X, GU J Y, et al. Reliability Analysis of a Missile Control System by Fusing Uncertain Information[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(12): 2869-2876.
- [5] 蒋平, 邢云燕, 王博, 等. 导弹定期维修条件下的贮存可靠性预测方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2020(2): 99-104.  
JIANG P, XING Y Y, WANG B, et al. Storage Reliability Prediction Method for Missiles Undergoing Periodic Maintenance[J]. Missiles and Space Vehicles, 2020(2): 99-104.
- [6] 葛蒸蒸, 王悦庭, 赵文晖, 等. 多元加速退化数据评估弹上产品贮存可靠性[J]. 现代防御技术, 2018, 46(2): 130-136.  
GE Z Z, WANG Y T, ZHAO W H, et al. Evaluating

- Product Storage Reliability Based on Multiple Accelerated Degradation Data[J]. *Modern Defence Technology*, 2018, 46(2): 130-136.
- [7] 张仕念, 吴勋, 颜诗源, 等. 贮存使用环境对导弹性能的影响机理[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(5): 17-22.  
ZHANG S N, WU X, YAN S Y, et al. Influencing Mechanism of Storage /Use Environment on Missile Performance[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(5): 17-22.
- [8] 周军, 薛伟, 周康宁. 贮存环境对导弹可靠性影响研究[J]. *中国设备工程*, 2024(2): 221-223.  
ZHOU J, XUE W, ZHOU K N. Study on the Influence of Storage Environment on Missile Reliability[J]. *China Plant Engineering*, 2024(2): 221-223.
- [9] 刘艳, 陈江攀, 刘艺, 等. 导弹装备自然环境试验现状及建议[J]. *现代防御技术*, 2021, 49(4): 86-90.  
LIU Y, CHEN J P, LIU Y, et al. The Present Situation and Suggestion of Missile Equipment Natural Environmental Test[J]. *Modern Defence Technology*, 2021, 49(4): 86-90.
- [10] 文邦伟, 胥泽奇. 外军装备环境适应性典型案例[J]. *装备环境工程*, 2005, 2(3): 83-87.  
WEN B W, XU Z Q. The Typical Cases of Environmental Worthiness of Foreign Materiel[J]. *Metal Forming Technology*, 2005, 2(3): 83-87.
- [11] 肖志斌, 王家鑫, 杨学印, 等. 舰载导弹装备可靠性及贮存试验验证体系研究[J]. *强度与环境*, 2016, 43(3): 52-58.  
XIAO Z B, WANG J X, YANG X Y, et al. Reliability and Storage Test Systems of Ship-Borne Short-Range Missiles[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2016, 43(3): 52-58.
- [12] 罗俊, 代天君, 刘华辉, 等. 半导体器件贮存可靠性快速评价方法[J]. *微电子学*, 2015, 45(3): 387-390.  
LUO J, DAI T J, LIU H H, et al. Storage Reliability Assessment of Semiconductor Devices Based on Accelerated Life Test[J]. *Microelectronics*, 2015, 45(3): 387-390.
- [13] 宋贵宝, 崔加鑫. 导弹加速寿命试验及可靠性评估[J]. *舰船电子工程*, 2016, 36(2): 27-30.  
SONG G B, CUI J X. Accelerated Life Test and Reliability Evaluation of Missile[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2016, 36(2): 27-30.
- [14] 姚军, 韩娜, 傅玲莉. 加速贮存寿命试验及可靠性评估[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(3): 71-75.  
YAO J, HAN N, FU L L. Accelerate Storage Life Test and Reliability Evaluation[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(3): 71-75.
- [15] 鞠宏艳, 贾东明, 秦鹏举, 等. 基于环境历程的固体火箭发动机贮存可靠性计算方法[J]. *固体火箭技术*, 2023, 46(2): 179-185.  
JU H Y, JIA D M, QIN P J, et al. Calculation Method of Storage Reliability of Solid Rocket Motor Based on Environmental History[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2023, 46(2): 179-185.
- [16] 杨立安, 张国豪, 朱仲波. 空空导弹两阶段性能退化部件可靠性建模[J]. *装备制造技术*, 2018(7): 211-215.  
YANG L A, ZHANG G H, ZHU Z B. Reliability Modeling of Two Stage Performance Degradation Components for Air-to-Air Missile[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2018(7): 211-215.
- [17] 吕卫民, 胡冬, 谢劲松. 基于失效物理的电路板寿命预测案例研究[J]. *电子科技大学学报*, 2013, 42(4): 635-640.  
LYU W M, HU D, XIE J S. Case Study on Prognostics Technique Based on PoF to Predict Life of PCB[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, 42(4): 635-640.
- [18] GJB 10786—2022, 战术导弹贮存加速试验方法[S].  
GJB 10786—2022, Tactical Missile Storage Accelerated Test Method Method[S].
- [19] 秦强, 张生鹏. 综合环境条件下电子装备贮存寿命加速试验方法研究[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(3): 81-87.  
QIN Q, ZHANG S P. Accelerated Storage Test of Electric Equipment under Integrated Environmental Stresses[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(3): 81-87.
- [20] GJB 150.16A—2009, 军用装备实验室环境试验方法: 振动试验[S].  
GJB 150.16A—2009, Laboratory Environmental Test Method for Military Equipment: Vibration Test[S].
- [21] 闫华, 王魁, 刘子林, 等. 基于 Markov 方法的多阶段任务系统可靠性分析综述[J]. *兵器装备工程学报*, 2016, 37(6): 92-96.  
YAN H, WANG K, LIU Z L, et al. Reliability Analysis of Phased-Mission System Using Markov Approach[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016, 37(6): 92-96.
- [22] 胡启国, 何金银. 基于累积损伤模型的多阶段系统可靠性分析路集组合法[J]. *西北工业大学学报*, 2018, 36(5): 995-1003.  
HU Q G, HE J Y. Path Sets Combination Method for Reliability Analysis of Phased-Mission Systems Based on Cumulative Exposure Model[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2018, 36(5): 995-1003.
- [23] 陈丽. 考虑人因失误的多阶段任务系统可靠性分析方法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.  
CHEN L. Research on Reliability Analysis Method of Multi-Stage Mission System Considering Human Error[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [24] NELSON W. Accelerated Life Testing - Step-Stress Models and Data Analyses[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1980, R-29(2): 103-108.
- [25] 于宗乐. 温度循环载荷条件下电子设备多失效模式加速试验技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.  
YU Z L. Research on Accelerated Test Technology of Electronic Equipment with Multiple Failure Modes under Temperature Cyclic Loading[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.