



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——中国科技核心期刊

导弹整机贮存寿命加速试验建模与评估技术

张生鹏 唐宇彬 张安琪 马小兵 李宏民

Modeling and evaluation for accelerated storage life test of assembly missile equipment

ZHANG Shengpeng, TANG Yubin, ZHANG Anqi, MA Xiaobing, LI Hongmin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2024055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[空间推进系统产品贮存寿命评估之加速老化试验方法](#)

Evaluation of storage life of space propulsion system products by using accelerated aging test

航天器环境工程. 2021, 38(2): 188–192 <https://doi.org/10.12126/see.2021.02.012>

[加速寿命试验设计与评估软件ALT511及其应用（一）](#)

Accelerated life test design and evaluation software ALT511 and its application (I)

航天器环境工程. 2023, 40(5): 541–549 <https://doi.org/10.12126/see.2023050>

[加速寿命试验设计与评估软件ALT511及其应用（二）](#)

Accelerated life test design and evaluation software ALT511 and its application (II)

航天器环境工程. 2023, 40(6): 641–649 <https://doi.org/10.12126/see.2023051>

[空间站电动工具开关按钮性能退化特性加速寿命试验与可靠性评估](#)

Accelerated life test and reliability assessment for degradation characteristics of power tool switch buttons onboard China's Space Station

航天器环境工程. 2024, 41(2): 234–243 <https://doi.org/10.12126/see.2024014>

[基于湿热老化试验的航天器用丁腈橡胶贮存寿命预测](#)

Prediction of storage life of nitrile butadiene rubber for spacecraft based on hygrothermal aging test

航天器环境工程. 2022, 39(5): 539–544 <https://doi.org/10.12126/see.2022.05.014>

[两种工程化的航天器用滚动轴承加速寿命试验方法](#)

Two engineering methods for accelerated life test of aerospace rolling bearings

航天器环境工程. 2021, 38(4): 413–419 <https://doi.org/10.12126/see.2021.04.006>

导弹整机贮存寿命加速试验建模与评估技术

张生鹏^{1,2}, 唐宇彬², 张安琪², 马小兵¹, 李宏民^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191;

2. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

摘要: 针对多失效模式、多失效机理、小子样导弹整机产品贮存寿命加速试验与评估面临的难题, 提出整机贮存寿命加速试验建模方法, 通过建立基于竞争失效的整机贮存寿命模型, 综合考虑零部件产品的贮存寿命信息, 开展整机加速因子综合计算; 提出基于试验长度因子的小子样整机贮存可靠度评估方法, 通过加长试验时间达到利用小子样验证高贮存可靠度的目的。最后给出典型伺服机构加速试验案例分析, 证明方法的有效性。该方法可为开展小子样整机产品贮存寿命加速试验与寿命评估提供一种新的技术途径。

关键词: 小子样导弹整机产品; 贮存寿命; 加速试验建模; 试验长度因子; 可靠度评估

中图分类号: TB114.3; V416.6 文献标志码: A 文章编号: 1673-1379(2024)06-0742-09

DOI: [10.12126/see.2024055](https://doi.org/10.12126/see.2024055)

Modeling and evaluation for accelerated storage life test of assembly missile equipment

ZHANG Shengpeng^{1,2}, TANG Yubin², ZHANG Anqi², MA Xiaobing¹, LI Hongmin^{1,2}

(1. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Aerospace Science and Industry Defense Technology Research Testing Center, Beijing 100854, China)

Abstract: This paper addresses the challenges associated with conducting accelerated storage life tests and evaluations for assembly missile equipment that exhibits multiple failure modes and mechanisms, particularly under the constraint of small missile sample size. A novel method for modeling the accelerated storage life test of such equipment was proposed. The method involved establishing a storage life model based on competitive failures and incorporated the storage life information of individual components. An integrated approach for determining the acceleration factor of assembly missile equipment was developed. Furthermore, a method for evaluating the storage reliability of assembly missile equipment with small sample sizes was introduced, utilizing a test length factor to validate high storage reliability by prolonging the test duration. The effectiveness of the proposed method was demonstrated through a case study of a servo mechanism acceleration test. This research offers an innovative technical approach for carrying out accelerated storage life tests and evaluations on assembly missile equipment when sample sizes are limited.

Keywords: small-sample assembly missile equipment; storage life; accelerated test modeling; test length factor; reliability evaluation

收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2024-12-06

基金项目: 装备预先研究共用技术项目 (编号: 50904060202)

引用格式: 张生鹏, 唐宇彬, 张安琪, 等. 导弹整机贮存寿命加速试验建模与评估技术[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(6): 742-750

ZHANG S P, TANG Y B, ZHANG A Q, et al. Modeling and evaluation for accelerated storage life test of assembly missile equipment[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(6): 742-750

0 引言

贮存寿命指标反映导弹装备在规定的贮存条件下，满足规定贮存可靠度要求的贮存时间。当前国内外开展了大量贮存寿命研究工作^[1-2]，其中实验室加速贮存试验相较于现场贮存试验具有耗时短、费用少及预测能力强的突出优点，在装备贮存寿命评估方面具有很高的工程应用价值。然而，目前加速寿命试验方法大多基于统计模型，主要适用于元器件及材料件等薄弱环节产品^[3-9]，对于导弹整机产品还没有成熟有效的加速试验方法。而整机产品贮存寿命加速试验更贴近实际工况，试验结果有望更加真实可信，因此面向整机产品开展加速试验建模与评价成为亟待解决的问题。

整机产品价格昂贵，具有小子样、多失效模式/失效机理的显著特征，难以采用常规的基于统计模型的加速试验方法。因此，整机贮存寿命加速试验往往是利用加速因子开展验证性试验^[10-13]。为获取整机加速因子，文献^[14-15]假设整机贮存寿命服从指数分布，按照实际贮存和加速贮存条件下失效率相等的原则，利用零部件的加速贮存试验信息计算得到整机的加速因子。然而实践证明，整机产品的贮存失效往往是耗损型失效，因此用指数分布来描述整机贮存寿命分布不完全恰当，给工程应用带来诸多争议及困扰。此外，当前无论是新型号的贮存期指标验证工作，还是老型号的延寿工作，对贮存寿命都有可靠度指标要求。然而由于整机试验样本量太少，目前的贮存验证试验往往只是对规定贮存年限的验证，对小子样整机的贮存可靠度指标^[16-20]尚无有效的验证方法。

针对上述问题，本文在整机贮存失效机理分析的基础上，开展基于竞争失效的整机贮存寿命建模，给出整机加速因子综合计算方法；同时，给出加严条件下的小子样整机贮存可靠度评估方法，旨在通过引入试验长度因子解决小子样条件下贮存可靠度评估的难题。

1 整机加速贮存试验模型

1.1 整机贮存失效分析

在整机层级，多种失效模式中任何一种失效模式的发生均可导致整机贮存失效。整机贮存失效的应力、失效模式及失效机理之间呈现如下关联映射关系：应力→失效机理→失效模式，如图 1 所示。

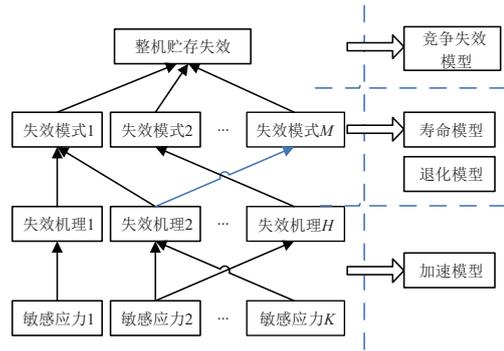


图 1 整机贮存失效分析

Fig. 1 Failure analysis for storage of assembly equipment

图 1 中，敏感应力与失效机理之间的映射关系可以用加速模型^[21-22]描述；整机失效模式失效时间的随机性和分散性可以用寿命模型/退化模型^[23-24]描述；多个失效模式的失效概率与整机失效概率之间的关系可以用竞争失效模型^[25-29]描述。

1.2 整机加速贮存试验建模

1.2.1 基本思路

在整机失效分析的基础上，整机贮存寿命加速试验建模的基本思路如图 2 所示。

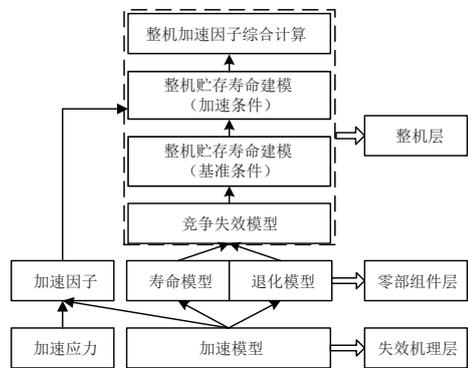


图 2 整机加速贮存试验模型建立

Fig. 2 Modeling for accelerated storage test of assembly equipment

首先，在失效机理层，根据产品在贮存剖面内的失效机理，分析敏感环境应力，确定合适的加速模型。

其次，在零部件层，根据失效的表现形式，通过分析突发型失效模式中失效时间的随机性，确定寿命模型；通过分析退化型失效模式中性能参数的退化规律，确定退化模型。

最后，在整机层面，建立基于竞争失效的整机贮存寿命模型，利用零部件的贮存寿命信息，综合计算整机加速因子。

1.2.2 整机加速试验模型基础

由图2可知,整机加速贮存试验模型建立在加速模型、寿命模型/退化模型和竞争失效模型基础之上。

1) 加速模型

根据整机在贮存剖面内的敏感环境载荷应力类型选择合适的加速模型,典型的加速模型主要包括:

(a) 温度应力加速模型

典型的温度应力加速模型是阿伦尼乌斯模型,加速因子为

$$AF_T = \exp\left[\frac{E}{k}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_A}\right)\right], \quad (1)$$

式中: E 为激活能, eV; k 为玻耳兹曼常数, 8.617×10^{-5} eV/K; T_0 为基准贮存温度应力, K; T_A 为加速温度应力, K。

(b) 温度循环应力加速模型

典型的温度循环应力加速模型是科菲-曼森模型,加速因子为

$$AF_{\Delta T} = \left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_0}\right)^{m^*}, \quad (2)$$

式中: ΔT_A 为加速温度变化范围; ΔT_0 为基准贮存温度变化范围; m^* 为材料属性和产品设计的特征常数。

(c) 振动应力加速模型

振动应力加速模型的加速因子为

$$AF_W = \left(\frac{W_1}{W_0}\right)^{n^*/2}, \quad (3)$$

式中: W_1 为加速振动试验功率谱密度; W_0 为实际运输振动功率谱密度; n^* 为待定系数。

2) 寿命模型/退化模型

产品失效主要包括两种模式——突发型失效模式和退化型失效模式。突发型失效可采用指数分布、威布尔分布及正态分布等寿命模型来描述,一般而言,偶然失效可用指数分布来描述,耗损型失效可用威布尔分布来描述。至于退化型失效,其退化过程带有随机性,因此维纳过程、伽马过程及逆高斯过程等被广泛应用于产品性能退化建模中^[21]。

3) 竞争失效模型

竞争失效模型可定义为:假设整机有 n 种失效方式,而每一种失效方式都独立作用于整机,且都

对应一定的失效时间;其中任何一种失效都会引起整机失效,在所有的失效中,最早产生的那种失效出现时将导致整机失效,即 $T = \min\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$,其中, T 为整机失效时间, T_n 为第 n 种失效出现的时间。

设 $F_i(t)$ 是 T_i 的累计失效分布函数,则整机的累计失效分布函数为

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_i(t)], \quad (4)$$

其中 $F_i(t)$ 可以是不同的分布,但要求这 n 个分布应是独立的;如它们之间不独立,即一种失效会引起另一种失效,则应考虑它们之间的相互影响,并对式(4)进行修正。

当 n 个失效方式同时起作用时,整机的可靠度为

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \prod_{i=1}^n \exp\left[-\int_0^t \lambda_i(x) dx\right] = \exp\left[-\int_0^t \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) dx\right]. \quad (5)$$

因此,应针对发现的每一种失效方式进行贮存可靠度评估以获得其贮存失效概率,然后评估获得整机的贮存失效概率。

1.2.3 整机贮存寿命建模

组成整机的零部件的长期贮存失效一般为耗损型失效,因此可假设其贮存寿命服从威布尔分布。设第 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 个零部件贮存寿命分布的形状参数和尺度参数分别为 m_i 和 η_i ,则整机的贮存可靠度为

$$R(t) = \prod_{i=1}^n \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{m_i}\right] = \exp\left[-\sum_{i=1}^n \left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{m_i}\right]. \quad (6)$$

如果各零部件的形状参数相同,即 $m_i = m$,则式(6)可表示为

$$R(t) = \exp\left[-t^m \sum_{i=1}^n \eta_i^{-m}\right]; \quad (7)$$

则整机的特征贮存寿命表达式为

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^n \eta_i^{-m}\right)^{-1/m}. \quad (8)$$

式(8)说明如果各零部件的形状参数相同,则整机贮存寿命服从形状参数为 m 、尺度参数为 $\left(\sum_{i=1}^n \eta_i^{-m}\right)^{-1/m}$ 的威布尔分布。

如果 m_i 各不相同, 可使用零部件的贮存寿命数据, 根据式 (6) 计算出不同应力水平下整机的可靠度变化曲线。同时, 可认为整机贮存寿命仍服从威布尔分布, 根据可靠度变化曲线对整机贮存寿命分布进行参数估计, 得到整机的贮存寿命分布参数:

$$R(t) = \exp \left[- \sum_{i=1}^n \left(\frac{t}{\eta_i} \right)^{m_i} \right] \rightarrow \eta_{S_0}, \eta_{S_A}, m_0 \quad (9)$$

式中: η_{S_0} 为整机在基准贮存应力 S_0 下的特征寿命; η_{S_A} 为整机在加速贮存应力 S_A 下的特征寿命。

1.3 整机加速因子综合计算

在整机贮存寿命建模的基础上, 可基于零部件的贮存寿命信息, 根据产品在基准贮存条件下与加速贮存条件下的贮存寿命特征统计相等的原则, 获得整机的加速因子。

取基准贮存环境应力为 S_0 , 加速贮存环境应力为 S_A , 以阿伦尼乌斯模型为例, 可以得到第 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 个零部件在加速应力 S_A 下的加速因子为

$$AF_i = \frac{\eta_{i,S_0}}{\eta_{i,S_A}} \quad (10)$$

式中: η_{i,S_0} 为第 i 个零部件在基准贮存应力 S_0 下的特征寿命; η_{i,S_A} 为第 i 个零部件在加速贮存应力 S_A 下的特征寿命。

如果 $m_i=m$, 依据式 (8) 及式 (10), 整机的加速因子为

$$AF = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \eta_{i,S_0}^{-m} \right)^{-1/m}}{\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{\eta_{i,S_0}}{AF_i} \right)^{-m} \right)^{-1/m}} \quad (11)$$

如果 m_i 各不相同, 可根据式 (9) 分别计算基准贮存应力和加速贮存应力下的特征寿命, 得到整机加速因子为

$$AF = \frac{\eta_{S_0}}{\eta_{S_A}} \quad (12)$$

2 整机加速贮存试验设计

2.1 整机基准贮存环境剖面制定

基准贮存环境剖面是开展整机加速贮存试验及评估的基线。导弹的基准贮存剖面涵盖从验收交付后到发射飞行前的全过程, 包括库房贮存、勤务运输及战备值班等, 如图 3 所示。

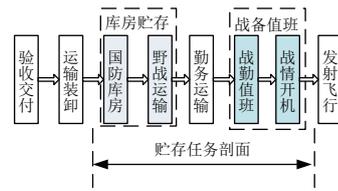


图 3 典型导弹贮存剖面

Fig. 3 Typical storage profile of a missile

通过分析贮存环境, 确定贮存剖面内的敏感环境因素, 根据其应力量级、持续时间和时序, 制定和归纳基准贮存环境剖面。整机的基准贮存环境剖面应覆盖所属零部件的主要敏感应力, 以充分验证整机的各种贮存失效模式及机理。

2.2 整机加速贮存试验剖面制定

利用 1.3 节中计算的整机加速因子, 可将基准贮存环境剖面转换为加速验证试验剖面。确定整机加速应力水平为 S_A , 将 1 年中各贮存阶段基准贮存应力水平 $S_{0j}(j=1, 2, \dots, N_S)$ 下的贮存时间通过整机加速因子折算到加速应力下的试验时间, 并累加得到

$$T = \sum_{j=1}^{N_S} \frac{t_{0j}}{AF_j} \quad (13)$$

式中: T 为等效贮存 1 年的加速试验时间, h ; N_S 为基准贮存应力水平数; t_{0j} 为 1 年中基准贮存应力水平 S_{0j} 对应的贮存时间, h ; AF_j 为加速贮存应力水平 S_A 相对于基准贮存应力水平 S_{0j} 的加速因子。

2.3 整机加速试验循环数的确定

依据加速验证试验剖面按时序施加加速应力, 开展 1 个循环加速验证试验等效贮存 1 年。考虑到产品的贮存寿命具有一定的离散性, 将贮存期乘以给定的试验长度因子作为试验验证的贮存期, 通过加长试验时间可达到利用较少的试验子样验证较高的贮存可靠度的目的。加速验证试验的剖面循环数为

$$N = Y \times s, \quad (14)$$

式中: Y 为需试验验证的贮存期, a ; s 为试验长度因子, 建议取值范围为 1.0~1.5。

3 整机贮存可靠度评估方法

3.1 成败型贮存可靠度评估方法

如果样本量允许, 可采用基于二项分布的成败

型贮存可靠度评估方法。对 n 个贮存一定年限后的整机产品, 独立进行 n 次贮存后验证试验, 用 f 表示在 n 次试验中不通过的次数, 依据《数据的统计处理和解释 二项分布可靠度单侧置信下限》(GB/T 4087—2009)^[30], 采用经典法进行区间估计, 用公式

$$\sum_{x=0}^f C_n^x R_L(n)^{n-x} [1 - R_L(n)]^x = 1 - \gamma \quad (15)$$

计算贮存可靠度单边置信下限 R_L , 式中 γ 为置信度。当 $f=0$ 时,

$$R_L(n) = (1 - \gamma)^{1/n} \quad (16)$$

由于成败型贮存可靠度评估方法忽略了产品的贮存寿命分布所提供的信息, 所以在面对高贮存可靠度要求时, 对试验子样的要求较高。

3.2 小子样条件下贮存可靠度评估方法

在样本量不满足要求的情况下, 可从产品的贮存寿命分布特点出发, 给出小子样条件下可靠度评估方法。

设定试验长度因子为 s , 对于贮存寿命服从威布尔分布的整机产品, 其贮存 $Y \times s$ 年后的可靠度置信下限为

$$R_L(Y \times s) = \exp\left(-\frac{Y \times s}{\eta_L}\right)^m \quad (17)$$

式中 η_L 为整机贮存寿命的特征寿命置信下限。

显然, 若采用成败型验证方案, 产品贮存 $Y \times s$ 年的贮存可靠度置信下限 $R_L(n)$ 可由式 (15) 解得。

上述两种方法的计算结果应是相等的, 即

$$R_L(Y \times s) = R_L(n) \quad (18)$$

故可得到:

$$s = \frac{Y \times s}{Y} = \frac{\{-\ln[R_L(Y \times s)]\}^{\frac{1}{m}} \eta_L}{\{-\ln[R_L(Y)]\}^{\frac{1}{m}} \eta_L} = \left\{ \frac{\ln[R_L(n)]}{\ln[R_L(Y)]} \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (19)$$

对于特殊情况(无故障), 将式 (16) 代入式 (19) 可得:

$$s = \left\{ \frac{\ln[(1 - \gamma)^{1/n}]}{\ln[R_L(Y)]} \right\}^{1/m} \quad (20)$$

试验前, 可对加速贮存试验的样本量进行预估, 无故障情况下试验样本量的预估值为

$$n = \frac{\ln(1 - \gamma)}{s^m \cdot \ln[R_L(Y)]}; \quad (21)$$

试验后, 可对产品的贮存可靠度进行评估, 无故障情况下产品的贮存可靠度为

$$R_L(Y) = (1 - \gamma)^{\frac{1}{s^m \cdot n}} \quad (22)$$

4 案例分析

以某型导弹伺服机构整机为例, 项目共安排 4 台贮存到一定期限的伺服机构开展贮存期加速验证试验, 以验证其是否还有 6 年的剩余贮存寿命。

4.1 伺服机构贮存失效分析

伺服机构是一种集成式液压伺服控制系统, 主要用于控制导弹尾翼喷管按固定角度偏转, 从而实现导弹的转弯与控制。伺服机构的组成及原理如图 4 所示。在长期贮存过程中暴露出的伺服机构典型贮存失效模式及机理见表 1。

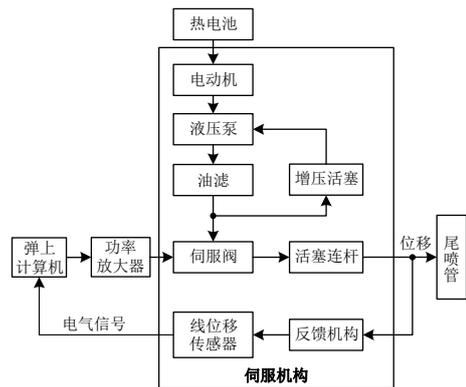


图 4 伺服机构组成及工作原理

Fig. 4 Composition and working principle of the servo mechanism

表 1 伺服机构典型贮存失效模式及机理

Table 1 Typical storage failure modes and mechanisms of the servo mechanism

部组件	失效模式	失效机理
电动机	输出力过小	绝缘老化, 内电阻压降增大
橡胶密封圈	油液泄漏	密封圈老化, 同时周期性温度循环应力作用下材料变形, 导致密封失效
伺服阀	参数零偏过大	长期应力作用导致弹簧老化蠕变, 材料应力释放等
线性位移传感器	参数漂移导致线性度超差	导电基体树脂材料老化变形

通过贮存失效分析确定伺服机构的贮存薄弱环节主要包括电动机、橡胶密封圈、伺服阀及线性位移传感器; 贮存敏感环境应力主要为温度应力及温度循环应力。选取薄弱环节部组件开展加速贮存试验, 获取的温度应力加速试验数据见表 2。

表 2 某型伺服机构贮存薄弱部组件贮存寿命试验数据

Table 2 Life test data of weak-storage components in a servo mechanism during storage

部组件	数量	寿命分布	分布参数	激活能/eV
电动机(含电连接器)	1	威布尔分布	$\eta=49.0 a; m=3.8$	0.53
密封件	增压活塞	1	威布尔分布	$\eta=21.3 a; m=4.0$
	往复阀	2		
	油缸	1		
	油箱盖部件	1		
	油滤盖板部件	1		
	导向密封部件	1		
	管接头部件	2		
堵头	14			
伺服阀	1	威布尔分布	$\eta=58.0 a; m=4.2$	0.47
线性位移传感器	1	威布尔分布	$\eta=95.6 a; m=3.3$	0.92

4.2 伺服机构温度应力加速因子综合计算

伺服机构底层部组件贮存寿命分布的形状参数 m_i 各不相同, 因此需要采用数据拟合的方式确定整机贮存寿命的分布参数。

取基准贮存温度为 21 °C, 加速贮存试验温度为 65 °C, 将零部件的贮存寿命数据代入式 (6), 可计算出整机在基准贮存温度及加速贮存温度下的可靠度变化规律, 如图 5 所示。

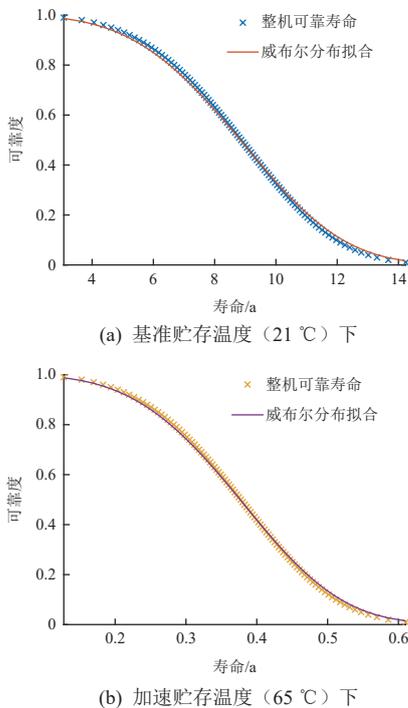


图 5 伺服机构整机贮存可靠度曲线

Fig. 5 Reliability curve for the storage of servo mechanism

同时, 对伺服机构整机寿命分布进行拟合优度检验, 线性化后相关系数均大于 0.99, 可认为伺服机构整机贮存寿命服从威布尔分布。因此, 可依据式 (9) 估计整机贮存寿命分布参数, 结果见表 3。

表 3 伺服机构寿命分布参数

Table 3 Life distribution parameters of the servo mechanism

温度应力/°C	形状参数	特征寿命/a	相关系数	加速因子
21	3.74	9.75	0.996	—
65	3.74	0.42	0.998	23.5

4.3 伺服机构加速贮存试验设计

4.3.1 伺服机构基准贮存环境剖面

伺服机构在贮存期内经受恒定温度、温度循环等环境应力以及电应力(包括电压、负载)等工作应力的影响。其基准贮存环境剖面如图 6 所示。

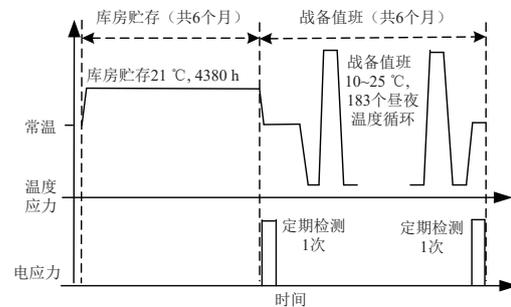


图 6 某型伺服机构基准贮存环境剖面(1年)

Fig. 6 Reference storage environment profile of a servo mechanism (one year)

4.3.2 伺服机构加速贮存应力条件

1) 温度加速应力及持续时间

根据以往型号的贮存延寿工程经验, 以不改变产品失效模式及机理为原则, 本示例中选取加速温度应力水平为 65 °C, 根据高温应力加速模型计算得到加速因子为 23.5, 即等效贮存 1 年的温度应力加速试验时间为 372 h。

2) 温度循环加速应力

根据产品环境试验及例行试验条件, 确定温度循环加速应力为-20~65 °C, 温度变化率 ≤ 3 °C/min, 温度保持时间为至少 2 h。根据温度循环加速模

型,参考历史数据取 $m^*=1.4$,计算得到加速因子为11.3,即等效贮存1年的温度循环加速试验循环数为16。

3) 电应力

考虑到定期检测及电应力施加时间较短,本示例中不进行电应力加速,采取模拟应力条件施加。

4.3.3 伺服机构加速贮存试验剖面制定

确定了加速验证试验剖面的各环境参数后,可得到伺服机构加速试验剖面参数(见表4)。根据各加速应力的时序关系,最大程度地模拟产品实际状态,绘制伺服机构等效贮存1年的加速试验剖面,如图7所示。

表4 伺服机构加速试验剖面参数

Table 4 Parameters of the servo mechanism acceleration test profile

贮存阶段	基准贮存环境剖面			加速验证试验剖面		
	敏感应力	持续时间	模拟条件	加速条件	加速因子	加速时间
库房贮存	温度	4380 h	21 °C	65 °C	23.5	186 h
	温度	4380 h	21 °C	65 °C	23.5	186 h
战备值班	温度循环	183个循环	温差15 °C	-20~65 °C	11.3	16个循环
	电应力	2次/年	—	—	1	2次

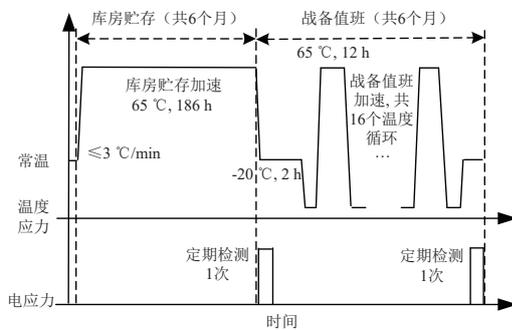


图7 伺服机构加速验证试验剖面(等效贮存1年)

Fig. 7 Acceleration verification test profile of the servo mechanism (equivalent storage for one year)

4.3.4 伺服机构加速贮存试验循环的确定

对整机产品施加加速贮存试验剖面中的加速应力,开展1个加速贮存试验剖面循环等效产品实际贮存1年。取试验长度因子 s 为1.5,根据式(14)可计算出为验证伺服机构6年的贮存期,需累计开展9个循环的加速贮存试验。

4.4 试验结果及伺服机构贮存可靠度评估

按照加速贮存试验条件,伺服机构整机累计开展9个加速贮存试验循环之后,未发生贮存相关故障。

采用小子样条件下的贮存可靠度评估方法,根据贮存寿命建模结果,伺服机构的贮存寿命服从威布尔分布,形状参数 $m=3.74$;取置信度 $\gamma=0.7$,可据式(22)计算得到伺服机构的贮存可靠度 $R_L=0.924$ 。

5 结束语

本文探讨了具有多种失效模式和多失效机理的整机产品在贮存寿命加速因子综合计算及贮存

寿命评估方面的问题。提出了一种基于竞争失效的贮存寿命建模方法,通过充分利用底层零部件的寿命信息,进行整机加速因子综合计算,为开展整机贮存寿命加速试验奠定了基础;提出了基于试验长度因子的小子样贮存可靠度评估方法,通过加长试验时间达到了利用小子样验证高贮存可靠度的目的,解决了整机产品贮存可靠性评估的难题。最后,以某型伺服机构整机为验证对象,给出了加速因子综合计算、加速贮存试验设计及贮存可靠度评估的案例,验证了所提出方法的可行性。

需要说明的是,本文在整机贮存寿命建模过程中,未考虑工艺及连接部分对整机贮存寿命的影响,在后续研究中需重点关注。

参考文献 (References)

- [1] 王浩伟,滕克难,吕卫民. 导弹贮存延寿试验关键技术及研究进展[J]. 含能材料, 2019, 27(12): 1004-1016
WANG H W, TENG K N, LÜ W M. Review on key technologies for missile storage and life extension test[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(12): 1004-1016
- [2] LIU Z, LIU X. Storage reliability assessment for the stored equipment under periodical inspection[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(6): 1-7
- [3] 张阳,杜剑. 石英加速度计贮存延寿试验薄弱环节的辨识[J]. 空间电子技术, 2021, 18(1): 80-86
ZHANG Y, DU J. Identification for weak links on storage life of quartz accelerometer[J]. Space Electronic Technology, 2021, 18(1): 80-86
- [4] 宫晓春,秦玉灵,赵薇,等. 某型金属减振器的加速贮存

- 验证试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 82-87
- GONG X C, QIN Y L, ZHAO W, et al. Research on accelerated storage validation test method of a certain type metal damper[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(4): 82-87
- [5] 张世艳, 刘俊, 黄波, 等. 惯性器件加速贮存环境性能变化规律及失效机理[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 76-80
- ZHANG S Y, LIU J, HUANG B, et al. Performance change law and failure mechanism of inertial devices in accelerated storage environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 76-80
- [6] NELSON W B. Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analyses[M]. New York: John Wiley & Sons, 2015: 200-210
- [7] NELSON W. Accelerated life testing: step-stress models and data analysis[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2016, 29(2): 103-108
- [8] GUO X H, YUAN X J, LIU G Y, et al. Storage life prediction of rubber products based on step stress accelerated aging and intelligent algorithm[J]. Polymers, 2023, 15(1): 157-166
- [9] LI W H, ZHOU L L, LU W D. Reliability analysis of the sealed relay based on degradation data[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(3): 362-366
- [10] 张生鹏, 李宏民, 赵鹏飞. 导弹装备贮存寿命加速试验技术体系探讨[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 92-96
- ZHANG S P, LI H M, ZHAO P F. Accelerated testing technology system for storage life of missile equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 92-96
- [11] 盖炳良, 滕克难, 王浩伟, 等. 整机级装备贮存延寿试验技术[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(1): 169-174
- GAI B L, TENG K N, WANG H W, et al. Overview of storage life extension testing for assembly level equipment[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(1): 169-174
- [12] 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
- [13] ZHANG C. Mechanical component lifetime estimation based on accelerated life testing with singularity extrapolation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 29(2): 10-12
- [14] 申争光, 范景春, 董静宇, 等. 弹上设备加速寿命试验中加速因子估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(8): 1948-1952
- SHEN Z G, FAN J C, DONG J Y, et al. Research on acceleration factor estimation method of accelerated life test of missile-borne equipment[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(8): 1948-1952
- [15] 苏承毅, 牟春晖, 何江, 等. 整机级加速贮存试验加速因子与真实度评估方法[J]. 战术导弹技术, 2015(1): 37-41
- SU C Y, MOU C H, HE J, et al. Acceleration factor and fidelity assessment of system level accelerated aging test[J]. Tactical Missile Technology, 2015(1): 37-41
- [16] 赵晓东, 穆希辉. 无失效数据下计算装置贮存寿命评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 272-278
- ZHAO X D, MU X H. Evaluation method for storage life of computing devices under zero-failure data[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(1): 272-278
- [17] 张雷雷, 刘曦, 刘旭琳, 等. 无失效数据下弹上机电产品加速贮存寿命评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(7): 2287-2294
- ZHANG L L, LIU X, LIU X L, et al. Accelerated storage life assessment method under zero-failure data for electromechanical products of missile[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(7): 2287-2294
- [18] LI X S. The evaluation of storage life when disordered data appear in accelerated performance degradation tests[C]//2015 International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering. Phuket Island, 2015: 579-581
- [19] PAN G Z, LUO Q, WANG Y H, et al. Research on an acceleration factor estimation method for accelerated life testing of high precision quartz flexible accelerometer[C]//9th International Conference on Information Technology in Medicine and Education. Hangzhou, 2018: 943-947
- [20] 荣吉利, 白美, 刘志全. 加严条件下火工机构可靠性评估方法[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(2): 117-120
- RONG J L, BAI M, LIU Z Q. Reliability assessment of pyrotechnical devices under rigorous conditions[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(2): 117-120
- [21] 祝学军, 管飞, 王洪波, 等. 战术弹道导弹贮存工程基础[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2016: 10-21
- [22] 李晓阳, 姜同敏. 加速寿命试验中多应力加速模型综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(5): 828-831
- LI X Y, JIANG T M. Review of multiple-stress models in accelerated life testing[J]. Systems Engineering and

- Electronics, 2007, 29(5): 828-831
- [23] CRK V. Reliability assessment from degradation data[C]//Annual Reliability and Maintainability Symposium: International Symposium on Product Quality and Integrity. Los Angeles, 2000: 155-161
- [24] 王浩伟, 滕克难. 基于加速退化数据的可靠性评估技术综述[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(12): 2877-2885
WANG H W, TENG K N. Review of reliability evaluation technology based on accelerated degradation data[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(12): 2877-2885
- [25] ZHANG X P, SHANG J Z, CHEN X, et al. Statistical inference of accelerated life testing with dependent competing failures based on Copula Theory[J]. [IEEE Transactions on Reliability](#), 2014, 63(3): 764-780
- [26] WU M, SHI Y M, ZHANG C F. Statistical analysis of dependent competing risks model in accelerated life testing under progressively hybrid censoring using copula function[J]. Communications in Statistics-Simulation and Computation, 2017, 46(5): 4004-4017
- [27] ZHOU Y C, LU Z Z, SHI Y, et al. The copula-based method for statistical analysis of step-stress accelerated life test with dependent competing failure modes[J]. [Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O: Journal of Risk and Reliability](#), 2019, 233(3): 401-418
- [28] CHEN Y X, ZHANG Q, CAI Z Y, et al. Storage reliability assessment model based on competition failure of multi-components in missile[J]. [Journal of Systems Engineering and Electronics](#), 2017, 28(3): 606-616
- [29] CHE H, ZENG S, GUO J, et al. Reliability modeling for dependent competing failure process with mutually dependent degradation process and shock process[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 180: 168-178
- [30] 数据的统计处理和解释 二项分布可靠度单侧置信下限: GB/T 4087—2009[S]

(编辑: 张艳艳)