

基于非线性退化模型的老产品单应力加速 试验加速因子评估方法

徐如远, 张生鹏, 唐宇彬, 倪瑞政, 李昊

(航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

摘要: **目的** 针对老产品单应力加速贮存试验场景下贮存寿命难以评估的问题, 开展基于非线性退化模型的加速因子评估方法研究。**方法** 基于非线性退化模型, 利用最小二乘法对产品自然贮存和加速贮存试验数据进行拟合分析, 并计算不同阶段退化速率的比值。**结果** 利用非线性退化模型不同阶段的退化速率比值实现了产品加速因子评估, 与传统线性模型结果进行对比, 加速因子、贮存试验等效贮存寿命、贮存试验外推寿命的误差分别为 9.68%、2.80%、10.84%。**结论** 该方法可有效地解决老产品单应力加速贮存试验中的加速因子评估问题, 为小子样产品寿命准确评估提供支撑。

关键词: 老产品; 小子样; 单应力; 非线性退化; 加速因子评估; 贮存寿命评估

中图分类号: TB114.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)05-0013-07

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2025.05.003

Evaluation Method of Acceleration Factors for the Single-stress Accelerated Test of Old Products Based on the Nonlinear Degradation Model

XU Ruyuan, ZHANG Shengpeng, TANG Yubin, NI Ruizheng, LI Hao

(Aerospace Science and Industry Defense Technology Research and Test Center, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: To address the problem of difficulty in evaluating the storage life under the scenario of single-stress accelerated storage tests for old products, the work aims to study the evaluation method of the acceleration factors based on the nonlinear degradation model. The natural storage and accelerated storage test data of products were fitted and analyzed with the least squares method based on the nonlinear degradation model, and the ratios of the degradation rates at different stages were calculated. The acceleration factors of the product were evaluated by the ratio of degradation rates at different stages of the nonlinear degradation model, and the results were compared with those of the traditional linear model. The errors of acceleration factors, equivalent storage life of storage test, and extrapolated storage life of storage test were 9.68%, 2.80%, and 10.84%, respectively. This method can effectively solve the problem of evaluating the acceleration factors in single-stress accelerated storage tests for old products, providing support for the accurate assessment of the life of small-sample products.

收稿日期: 2025-03-28; 修订日期: 2025-05-15

Received: 2025-03-28; Revised: 2025-05-15

基金项目: 装备预先研究共用技术项目 (50904060202)

Fund: Equipment Pre Research Shared Technology Project (50904060202)

引文格式: 徐如远, 张生鹏, 唐宇彬, 等. 基于非线性退化模型的老产品单应力加速试验加速因子评估方法[J]. 装备环境工程, 2025, 22(5): 13-19.

XU Ruyuan, ZHANG Shengpeng, TANG Yubin, et al. Evaluation Method of Acceleration Factors for the Single-stress Accelerated Test of Old Products Based on the Nonlinear Degradation Model[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(5): 13-19.

KEY WORDS: old products; small sample size; single stress; nonlinear degradation; acceleration factor evaluation; storage life evaluation

贮存寿命、使用寿命是装备可靠性的重要指标要求^[1],当装备已经达到或即将达到使用年限时,需要开展延寿维修,增加产品的使用年限^[2-4]。在装备贮存延寿工程中,主要采取对产品施加 3、4 个应力加速试验的方式获取贮存寿命数据或退化数据,并外推计算加速因子来确定装备的等效贮存寿命,并成功应用于多型装备,取得了一定的效果^[5-6]。然而随着贮存寿命评估理论和工程实践研究的不断深入,传统多应力加速贮存试验与评估方法也面临着亟待解决的问题。

1) 部分装备具有价格昂贵、试验子样少的特点,若仅可投入 1~3 个产品用于开展加速贮存试验^[7],难以满足常规多个恒定应力加速贮存试验的子样需求。

2) 阿伦尼乌斯等加速模型可能存在适用性不足的问题,电子产品、结构产品、高分子材料等类别产品差异较大。此外,老产品在不同阶段的试验数据特点也可能存在差异,现有加速模型难以有效覆盖。

3) 全寿命周期数据未充分利用,若选用老产品开展加速贮存试验,在试验前已经有了相当年限的自然服役/贮存检测数据,可与加速数据融合支撑贮存寿命评估^[8-11]工作。

产品在正常应力和加速应力等不同环境中均开展试验的现象可称为 PATL^[12-13](Partially Accelerated Life Testing)。若产品分成 2 组,一组仅开展常规应力试验,另一组仅开展加速应力试验,则可称为 CSPALT (Constant-Stress PALT)。若产品先开展一段时间常规应力试验,再开展一段时间加速应力试验,可称为 SSPALT (Step-Stress PALT),在工程上也可描述为服役/贮存一段时间的老产品开展加速贮存试验。Goel^[14]基于产品 SSPALT 数据,利用极大似然方法开展了指数分布和均匀分布参数估计。Degroot 等^[15]

基于产品 SSPALT 数据,利用贝叶斯方法开展了指数分布参数估计。Bai 等^[16]基于 I 型传感器数据,利用极大似然方法开展了指数分布参数估计。Bai^[17]基于 I 型传感器数据,利用极大似然方法开展了对数正态分布参数估计。Abdel-Ghaly^[18]基于 I 型和 II 型传感器数据,利用极大似然方法开展了威布尔分布参数估计。Wang 等^[19]基于多型传感器数据,利用极大似然方法开展了威布尔参数估计。Dey 等^[20]和 Ahmadi 等^[21]利用极大似然估计和贝叶斯方法开展了 I 型和 II 型传感器数据的 PALT 参数估计研究。

本文针对已贮存服役一定时间的老产品开展加速贮存试验的情况,选取退化速率为性能参数退化数据特征,开展基于自然贮存和加速贮存等多阶段试验信息的产品加速因子评估方法研究,支撑贮存寿命准确评估。然后以某电子产品作为案例进行分析计算,验证本文所提方法的有效性。

1 加速因子模型构建

1.1 性能参数退化模型构建

对于大多数具有软故障(即性能退化)的产品,尤其是电子产品、材料/结构类产品(例如推进剂等),产品的性能参数指标随着时间的变化会发生退化现象,典型的产品性能退化轨迹如图 1 所示。

在图 1 中,时刻 t 为产品自然贮存试验和加速贮存试验之间的临界拐点,时刻 T 为产品加速贮存试验的结束点。在图 1a 中,产品性能参数退化曲线服从非线性模型,产品在自然贮存试验阶段 t 时刻前后的性能参数退化速率是有差异的,加速试验和自然贮存试验之间的退化速率比值也不是线性变化的。在图 1b 中,

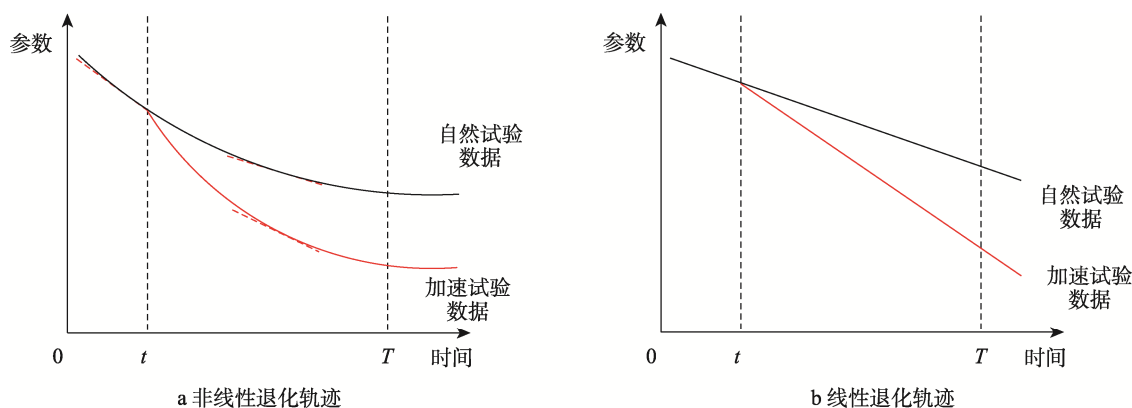


图 1 不同轨迹模型产品速率对比

Fig.1 Comparison of product ratios for different trajectory models: a) nonlinear degradation trajectory; b) linear degradation trajectory

产品性能参数退化曲线服从线性模型, 自然贮存试验阶段, 产品在 t 时刻前后的性能参数退化速率相同, 加速因子可根据自然和加速贮存试验之间的比值计算得到。

为了描述产品性能参数退化的非线性特征, 产品性能参数退化轨迹模型^[22]可用式 (1) 来进行描述:

$$P = P_0 + K\lambda(t) \quad (1)$$

式中: P 为产品性能参数指标; P_0 为常数, 性能参数初始值; K 为与温度有关的性能变化速率常数, d^{-1} ; $\lambda(t)$ 为与试验时间相关的函数, 当性能轨迹为非线性时, $\lambda(t)$ 可表示为 t^θ , 当性能轨迹为线性时, $\lambda(t)$ 可表示为 t 。

在加速贮存试验中, 加速因子^[23]一般定义为产品在加速应力水平与基准贮存应力水平作用下某一贮存寿命特征的比值, 即时间之比或速率之比:

$$AF = \frac{t(T_s)}{t(T_1)} = \frac{K(T_1)}{K(T_s)} \quad (2)$$

1.2 单应力加速因子评估

在研究产品性能参数退化估计模型参数估计问题时, 最小二乘估计法是较为普遍实用的方法, 假定产品性能退化轨迹为非线性, 轨迹模型的一般形式如式 (3) 所示:

$$P = P_0 + K\lambda(t) + \varepsilon \quad (3)$$

式中: K 为产品性能参数退化速率, 为待求解的参数; ε 为随机误差。

在产品自然贮存试验期间积累的性能参数退化数据为 $[t_1, s_1; t_2, s_2; \dots; t_l, s_l]$, 在加速贮存试验期间积累的性能参数退化数据为 $[t_{l+1}, s_{l+1}; t_{l+2}, s_{l+2}; \dots; t_n, s_n]$ 。若加速应力与常温应力相同, 这 2 段数据应满足产品性能参数退化轨迹模型, 如式 (4) 所示。

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ \dots \\ s_l \\ \dots \\ s_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_1 \\ s_1 \\ s_1 \\ s_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K \\ K \\ K \\ K \\ K \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda(t_1) \\ \dots \\ \lambda(t_l) \\ \dots \\ \lambda(t_n) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 \\ \dots \\ e_l \\ \dots \\ e_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

若加速应力与基准应力不同, 则需考虑产品加速贮存试验期间的加速因子影响, 式 (4) 可变化为式 (5):

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ \dots \\ s_l \\ \dots \\ s_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_1 \\ s_1 \\ s_1 \\ s_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K \\ K' \\ K' \\ K' \\ K' \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda(t_1) \\ \dots \\ \lambda(t_l) \\ \dots \\ \lambda(t_n) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 \\ \dots \\ e_l \\ \dots \\ e_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: $K' = K \cdot AF$ 。

最小二乘法^[24]的基本思想为 K 或 K' 的真值应该能够使误差向量 $Q(K)$ 达到最小, 也就是需要使它的模的平方达到最小。因此, 要求满足 $Q(K)$ 最小的 K 作为估计参数结果。

$$Q(K) = \|s - K\lambda(t)\|^2 = [s - K\lambda(t)]^T [s - K\lambda(t)] \quad (6)$$

$Q(K)$ 可以展开为:

$$Q(K) = s's - 2s'K\lambda(t) + \lambda'(t)K'K\lambda(t) \quad (7)$$

利用矩阵微商公式 (8), 可以得出式 (9):

$$\frac{\partial s'K\lambda(t)}{\partial \lambda(t)} = \lambda'(t)s, \quad \frac{\partial K'\lambda'(t)\lambda(t)K}{\partial K} = 2\lambda'(t)\lambda(t)K \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q(K)}{\partial K} = -2\lambda'(t)s + 2\lambda'(t)\lambda(t)K \quad (9)$$

令式 (9) 为 0, 可得:

$$\lambda'(t)\lambda(t)K = \lambda'(t)s \quad (10)$$

式 (10) 称为正则方程, 作为特殊的线性回归模型, 因为 $\text{rank}(\lambda(t)) = p$, 则 $\text{rank}(\lambda(t)) = p$ 可逆, 可以直接求得上述正则方程的解, 从而进一步可得模型的最小二乘估计:

$$\hat{K} = (\lambda'(t)\lambda(t))^{-1} \lambda'(t)s \quad (11)$$

2 算例验证

某放大器是装备控制系统重要中间装置, 主要接收各控制信号, 进行综合、放大, 输出功率信号驱动伺服机构工作。前期已累计自然贮存 13 a (累计 4 745 d), 并在返回后开展了 250 d/90 °C 的单应力加速贮存试验。结合放大器薄弱环节分析结果, 以及贮存寿命特征参数识别情况, “输出电流” 参数在自然贮存和加速贮存等阶段退化较快。“输出电流” 参数阈值为 (-10 ± 0.2) mA, 其中 “-” 表示电流流动方向。通过贮存试验获取了 “输出电流” 参数数据, 如图 2 所示。

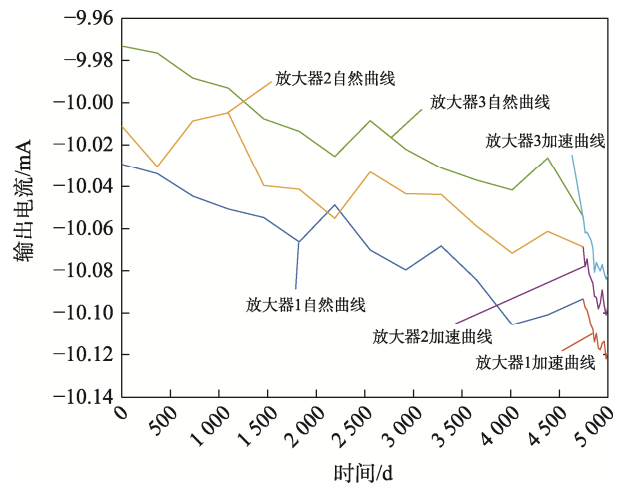


图 2 放大器自然和加速贮存试验性能参数退化情况
Fig.2 Performance parameter degradation of the amplifier in natural and accelerated storage tests

考虑非线性特性, 利用式 (12) 对产品自然贮存阶段性能退化数据进行拟合, 得到的拟合曲线如图 3 所示, 参数拟合结果见表 1。

$$P = P_0 + Kt^\theta \quad (12)$$

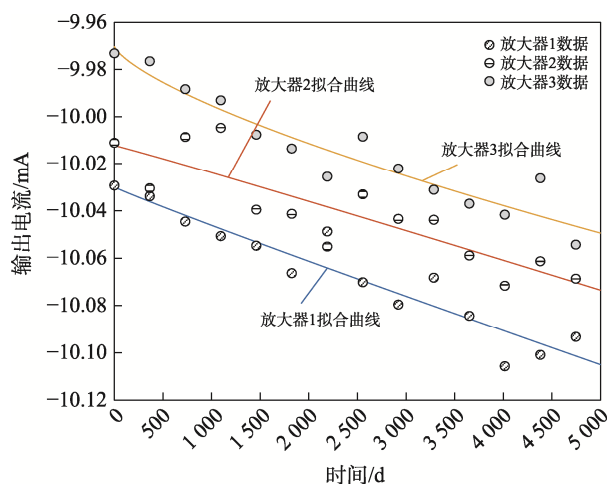


图3 放大器自然贮存性能参数拟合结果
Fig.3 Fitting results of the performance parameters of the amplifier in natural storage

表1 放大器自然贮存性能退化模型参数拟合结果
Tab.1 Parameter fitting results of the performance degradation model for the amplifier in natural storage

序号	产品名称	模型参数		
		P_0	K	θ
1	放大器 1	-10.03	-2.22×10^{-5}	0.95
2	放大器 2	-10.01	-9.22×10^{-6}	1.03
3	放大器 3	-9.97	-1.87×10^{-4}	0.71

由于参数 θ 对模型参数计算的影响比较大, 因此取3个产品自然贮存试验数据参数 θ 拟合结果的平均值固定为模型参数, 来对另外2个参数进行求解。因此, 放大器自然贮存试验拟合修正曲线和参数修正结果如图4和表2所示。

引入加速因子, 对加速贮存试验时间进行等效放大, 并利用最小二乘法寻找最合适的加速因子, 使得曲线拟合误差最小, 可得到放大器加速贮存试验性能参数退化数据拟合曲线和参数估计结果, 如图5和表3

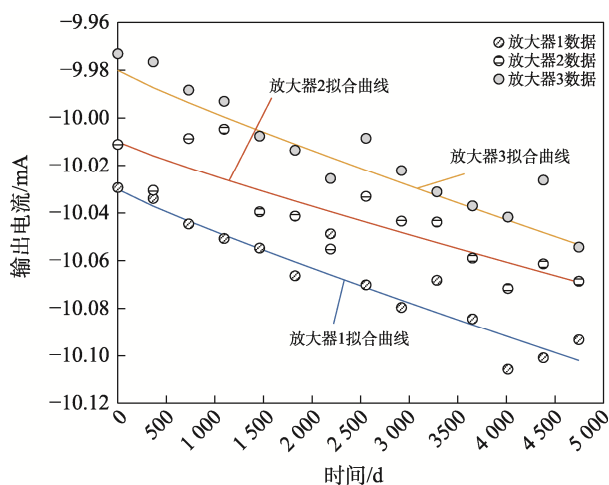


图4 放大器自然贮存性能参数拟合修正结果
Fig.4 Performance fitting and correction results of the amplifier in natural storage

表2 放大器自然贮存性能退化模型参数拟合修正结果
Tab.2 Parameter fitting and correction results of the performance degradation model for the amplifier in natural storage

序号	产品名称	模型参数		
		P_0	K	θ
1	放大器 1	-10.03	-3.54×10^{-5}	0.90
2	放大器 2	-10.01	-2.90×10^{-5}	0.90
3	放大器 3	-9.98	-3.60×10^{-5}	0.90

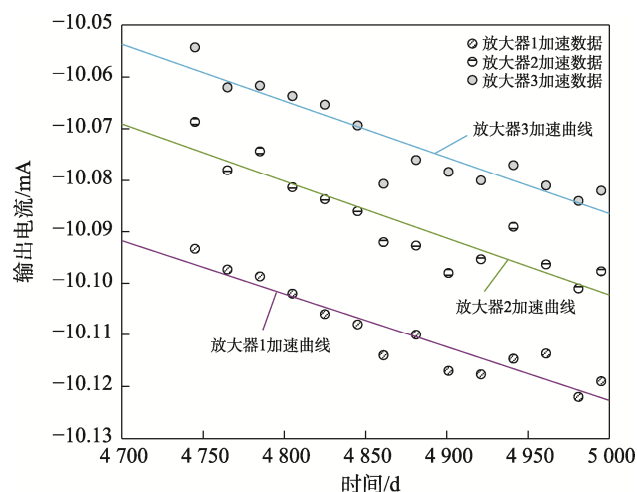


图5 放大器加速贮存性能参数拟合结果
Fig.5 Performance parameter fitting results of the amplifier in accelerated storage

表3 放大器加速贮存性能退化模型参数拟合修正结果
Tab.3 Parameter fitting and correction results of the performance degradation model for the amplifier in accelerated storage

序号	产品名称	模型参数		
		P_0	K	θ
1	放大器 1	-9.55	-2.68×10^{-4}	0.90
2	放大器 2	-9.49	-2.87×10^{-4}	0.90
3	放大器 3	-9.48	-2.84×10^{-4}	0.90

所示。对放大器自然贮存和加速退化参数进行对比分析, 获取加速温度对常温的等效加速因子^[25-26], 结果见表4。根据加速因子, 计算得到贮存试验时间等效的贮存寿命见表5。

利用不同退化轨迹模型计算得到的加速因子和性能退化轨迹模型对放大器的贮存寿命进行外推评估, 计算外推到性能参数阈值对应的贮存寿命结果见表6, 拟合外推示意图如图6所示。根据获取的贮存试验信息, 对加速因子、贮存试验等效贮存寿命、贮存试验外推贮存寿命进行分析, 对比2种模型的评估结果差异, 结果见表7。

按照传统线性轨迹退化模型计算得到的加速因子为7.62, 非线性轨迹退化模型计算得到的加速因子为8.36, 超出线性轨迹模型加速因子结果9.68%; 线性轨迹退化模型计算得到的贮存试验等效贮存寿命

表 4 不同模型产品加速因子对比
Tab.4 Comparison of acceleration factors of products for different models

序号	模型类别	自然贮存试验退化速率	自然贮存试验退化速率均值	90 ℃加速贮存试验退化速率	90 ℃加速贮存试验退化速率均值	加速因子
1	非线性轨迹	-3.54×10^{-5}	-3.35×10^{-5}	-2.68×10^{-4}	-2.80×10^{-4}	8.36
2		-2.94×10^{-5}		-2.87×10^{-4}		
3		-3.60×10^{-5}		-2.84×10^{-4}		
4	线性轨迹	1.50×10^{-5}	1.41×10^{-5}	-1.03×10^{-4}	-1.08×10^{-4}	7.62
5		1.23×10^{-5}		-1.11×10^{-4}		
6		1.52×10^{-5}		-1.09×10^{-4}		

表 5 贮存试验时间等效的贮存寿命结果
Tab.5 Equivalent storage life results of storage test time

序号	模型类别	自然贮存年限/a	加速贮存试验时间/d	加速因子	加速贮存试验等效时间/a	等效贮存寿命/a
1	非线性轨迹	13	250	8.36	5.73	18.73
2	线性轨迹	13	250	7.62	5.22	18.22

表 6 放大器贮存寿命外推评估结果
Tab.6 Extrapolation evaluation results of amplifier storage life

序号	产品名称	自然贮存年限/a	线性轨迹外推贮存寿命		非线性轨迹外推贮存寿命	
			加速贮存外推寿命/a	总寿命/a	加速贮存外推寿命/a	总寿命/a
1	放大器 1	13	17.73	30.73	21.63	34.63
2	放大器 2	13	20.71	33.71	24.71	37.71
3	放大器 3	13	23.51	36.51	27.91	40.91
均值			33.65		37.74	

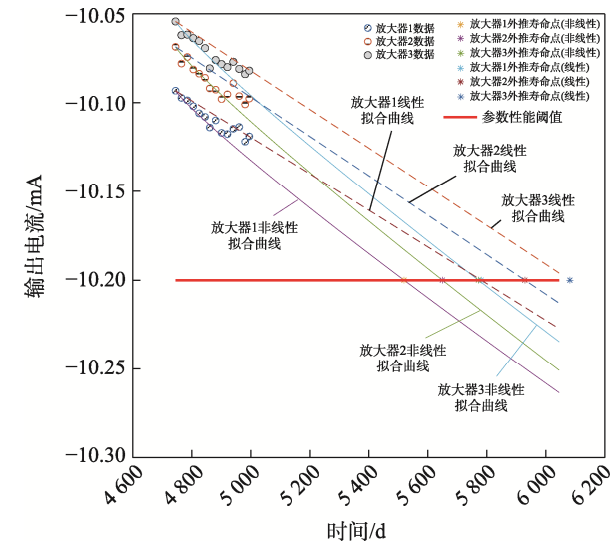


图 6 放大器拟合外推贮存寿命结果
Fig.6 Fitting extrapolation storage life result of the amplifier

表 7 基于不同模型的放大器贮存寿命评估结果差异对比
Tab.7 Comparison of differences in amplifier storage life evaluation results based on different models

序号	模型类别	加速因子	贮存试验等效贮存寿命结果/a	贮存试验外推寿命结果/a
1	非线性轨迹	8.36	18.73	33.65
2	线性轨迹	7.62	18.22	37.74
误差/%		9.68	2.80	10.84

结果为 18.22 a, 非线性轨迹退化模型计算得到的贮存试验等效贮存寿命结果为 18.73 a, 超出线性轨迹模型贮存寿命结果 2.80%; 线性轨迹退化模型计算得到的贮存试验外推寿命结果为 37.74 a, 非线性轨迹退化模型计算得到的贮存试验外推寿命结果为 33.65 a, 低于线性轨迹模型外推贮存寿命结果 10.84%。综上, 非线性轨迹退化模型从贮存试验等效贮存寿命结果、贮存试验外推寿命结果等 2 个方面都更接近于预期的贮存期评估目标, 因此利用非线性轨迹退化模型进行数据统计分析可取得更好的结果。

3 结论

本文结合某电子产品自然贮存和加速贮存试验数据, 开展了老产品单应力加速贮存试验数据分析与加速因子评估方法研究, 并得出以下结论。

- 1) 产品服役/贮存阶段应重视对性能参数退化的测量与分析工作, 相关数据可支撑贮存寿命评估。
- 2) 在单应力加速贮存试验场景下, 加速模型不适用, 可考虑利用退化轨迹模型参数对比的方式计算加速因子, 并在样本量大的情况下充分考虑样本差异带来的分散性影响。
- 3) 相比于线性模型, 非线性退化模型能够描述产品不同的退化趋势, 具有更强的普适性, 计算得到的加速因子评估结果更真实可信。

参考文献:

- [1] 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 S N, HE J D, YAN S Y, et al. Basic Approaches and Key Techniques for Missile Storage Life Extension[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 37-41.
- [2] 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, LYU W M. Review on Key Technologies for Missile Storage and Life-Extension Test[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(12): 1004-1016.
- [3] 张生鹏, 李宏民, 赵朋飞. 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.
- [4] 李久祥. 装备贮存延寿技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007.
LI J X. Equipment Storage and Life Extension Technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2007.
- [5] 李晓阳, 姜同敏. 基于加速退化模型的卫星组件寿命与可靠性评估方法[J]. 航空学报, 2007, 28(S1): 100-103.
LI X Y, JIANG T M. Constant-Stress Accelerated Degradation Testing of Satellite Assemblies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(S1): 100-103.
- [6] 徐如远, 张生鹏, 王韶光, 等. 基于性能参数退化的发动机推进剂加速退化试验建模[J]. 装备环境工程, 2022, 19(4): 14-21.
XU R Y, ZHANG S P, WANG S G, et al. Modeling of Accelerated Degradation Test of Engine Propellant Based on Performance Parameter Degradation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(4): 14-21.
- [7] 王蓓. 某型号导弹整机加速贮存延寿研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
WANG B. Study on Accelerated Storage and Life Extension of a Certain Missile[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [8] 谭源源. 装备贮存寿命整机加速试验技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
TAN Y Y. Research on Accelerated Test Technology of Equipment Storage Life[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [9] 王立志, 姜同敏, 李晓阳, 等. 融合加速试验及外场使用信息的寿命评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(7): 947-951.
WANG L Z, JIANG T M, LI X Y, et al. Lifetime Evaluation Method with Integrated Accelerated Testing and Field Information[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(7): 947-951.
- [10] 蔡忠义, 陈云翔, 项华春, 等. 融合先验加速退化与外场退化信息的可靠性评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(4): 970-976.
CAI Z Y, CHEN Y X, XIANG H C, et al. Reliability Assessment Method with Integrated Prior Accelerated Degradation and Field Degradation Data[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(4): 970-976.
- [11] 殷泽凯, 唐家银, 何平. 恒加双应力型相对熵信息融合可靠性评估模型[J]. 机械强度, 2021, 43(4): 841-848.
YIN Z K, TANG J Y, HE P. Reliability Assessment Model Based on Relative Entropy Information Fusion with Double Constant Accelerating Stresses[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(4): 841-848.
- [12] DEGROOT M H, GOEL P K. Bayesian Estimation and Optimal Designs in Partially Accelerated Life Testing[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1979, 26(2): 223-235.
- [13] MUKHOPADHYAY C, BASU A P. Bayesian Analysis of Incomplete Time and Cause of Failure Data[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 1997, 59(1): 79-100.
- [14] GOEL P K. Some Estimation Problems in The Study of Tampered Random Variables[D]. Commonwealth of Pennsylvania: Carnegie-Mellon University, 1971.
- [15] DEGROOT M H, GOEL P K. Bayesian Estimation and Optimal Designs in Partially Accelerated Life Testing[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1979, 26(2): 223-235.
- [16] BAI D S, CHUNG S W. Optimal Design of Partially Accelerated Life Tests for the Exponential Distribution under Type-I Censoring[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1992, 41(3): 400-406.
- [17] BAI D S, CHUNG S W, CHUN Y R. Optimal Design of Partially Accelerated Life Tests for the Lognormal Distribution under Type-I Censoring[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1993, 40: 85-92.
- [18] The Maximum Likelihood Estimates in Step Partially Accelerated Life Tests for the Weibull Distribution Parameters in Censored Data[J]. Communications in Statistics-Theory and Methods, 2002, 31: 551-573.
- [19] WANG F K, CHENG Y F, LU W L. Partially Accelerated Life Tests for the Weibull Distribution under Multiply Censored Data[J]. Communications in Statistics - Simulation and Computation, 2012, 41(9): 1667-1678.
- [20] DEY S, WANG L, NASSAR M. Inference on Nadarajah-Haghighi Distribution with Constant Stress Partially Accelerated Life Tests under Progressive Type-II Censoring[J]. Journal of Applied Statistics, 2022, 49(11): 2891-2912.
- [21] ALI H AHMADINI A, MASHWANI W K, SHERWANI R A K, et al. Estimation of Constant Stress Partially Accelerated Life Test for Fréchet Distribution with Type-I Censoring[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 9957944.
- [22] 邓爱民, 陈循, 张春华, 等. 基于性能退化数据的可靠性评估[J]. 宇航学报, 2006, 27(3): 546-552.
DENG A M, CHEN X, ZHANG C H, et al. Reliability Assessment Based on Performance Degradation Data[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 546-552.

- [23] 茆诗松, 王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
MAO S S, WANG L L. Accelerated Life-Span Test[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [24] 王媛. 线性回归模型的二阶最小二乘估计[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
WANG Y. Second-Order Least Squares Estimation of Linear Regression Model[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [25] 马同玲, 党晓勇, 庞明磊. 基于加速老化和自然贮存数据的氟硅橡胶制品贮存寿命预估[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 65-69.
MA T L, DANG X Y, PANG M L. Storage Life Prediction of Fluorine Rubber Products Based on Accelerated Aging and Natural Storage Data[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 65-69.
- [26] 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, MU 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.