

# 电子整机加速贮存试验结果验证方法研究

唐宇彬, 张生鹏, 徐如远, 李昊, 倪瑞政

(航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

**摘要:** **目的** 确定加速贮存试验中电子整机的加速因子, 并评估整机加速贮存试验结果的准确性。**方法** 基于零部件产品的贮存寿命信息, 建立整机贮存寿命模型, 综合计算整机加速因子。采用灰关联熵分析、距离系数分析方法, 对自然贮存与加速贮存数据的相关性进行分析和评价, 验证可加速性。最后通过对比自然及加速贮存试验数据外推寿命结果, 验证整机加速贮存试验结果的准确性。**结果** 结合某微波电子整机的自然贮存试验和加速贮存试验数据, 加速贮存试验结果相对自然贮存试验误差小于5%, 加速因子及寿命评估结果准确。**结论** 该方法可为电子整机加速开展加速贮存试验及寿命评估提供一种新的技术途径。

**关键词:** 电子产品; 加速贮存试验; 相关性分析; 灰关联熵; 距离系数; 寿命评估

中图分类号: TJ089

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)05-0034-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.05.006

## Verification Method of Accelerated Storage Test Results for Electronic Equipment

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

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

**ABSTRACT:** The work aims to determine the acceleration factor of the electronic equipment and evaluate the accuracy of the accelerated storage life test results. Based on the storage life information of component products, a storage life model was established for the electronic equipment, and the acceleration factor of the electronic equipment was comprehensively calculated. The gray relational entropy analysis and distance coefficient analysis methods were adopted to analyze and evaluate the correlation between natural storage and accelerated storage data, thus verifying the accelerability. Finally, by comparing the extrapolated life results of natural and accelerated storage life test data, the accuracy of accelerated storage life test results for the electronic equipment was verified. By integrating the data from the natural storage test and the accelerated storage life test of a certain microwave electronic equipment, the error of the accelerated storage life test results relative to the natural storage test was less than 5%, and the acceleration factor and life evaluation results were accurate. This research offers an innovative technical approach for carrying out accelerated storage life tests and evaluations on the electronic equipment.

**KEY WORDS:** electronic equipment; accelerated storage life test; correlation analysis; gray relational entropy; distance coefficient; life evaluation

收稿日期: 2025-03-28; 修订日期: 2025-05-04

Received: 2025-03-28; Revised: 2025-05-04

基金项目: 技术基础科研项目 (JSHS2022208B001)

Fund: Technical Basic Research Projects (JSHS2022208B001)

引文格式: 唐宇彬, 张生鹏, 徐如远, 等. 电子整机加速贮存试验结果验证方法研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(5): 34-41.

TANG Yubin, ZHANG Shengpeng, XU Ruyuan, et al. Verification Method of Accelerated Storage Test Results for Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(5): 34-41.

对于具有“长期贮存, 一次使用”特点的武器装备, 其设计贮存期可长达十余年。为获取其贮存寿命信息, 通常采用加速贮存试验, 提高应力水平, 缩短产品失效时间, 然后根据高应力水平下产品的寿命信息外推正常应力水平下产品的寿命<sup>[1-5]</sup>。对于整机加速贮存试验结果的评估, 主要存在 2 个方面的问题: 一是如何评估加速贮存试验中整机的加速因子; 二是如何评估整机加速因子的准确性, 即加速贮存试验结果与自然贮存结果差异性的大小。

对于整机加速因子的确定, 目前的方法主要从元器件、零部件级加速贮存试验中发展而来<sup>[6-12]</sup>。李鹏等<sup>[13]</sup>提出了基于可靠性分配的加速因子计算方法, 给出了不同失效模式下暖通空调的加速因子。段飞飞等<sup>[14]</sup>、申争光等<sup>[15]</sup>通过 GJB/Z 108A—2006《电子设备可靠性预计手册》预计了自然与加速贮存下的元器件失效率, 给出了指数分布下的整机加速因子计算方法。徐如远等<sup>[16]</sup>根据“短板理论”, 将薄弱环节的贮存寿命认定为系统的贮存寿命, 提出了基于薄弱环节的加速因子确定方法。刘晓娣等<sup>[17]</sup>提出了根据元器件不同贮存温度下失效率加权求和的弹上电子部件加速因子计算方法。Hart<sup>[18]</sup>提出了根据器件复杂度, 将零部件的加速因子加权的整机加速因子计算方法。对于整机的加速因子准确性评估, 苏承毅等<sup>[19]</sup>提出了基于退化空间矢量的评估方法, 以加速贮存退化矢量和自然贮存退化矢量的长度倍数关系作为加速因子, 以 2 个退化矢量的方向偏差评估试验真实度。吴建国等<sup>[20]</sup>基于自然贮存与加速贮存试验失效比对原理, 提出了一种复杂系统加速贮存寿命试验方法。鲁相等<sup>[21]</sup>提出了基于似然比检验原理的失效机理一致性判别方法, 确保橡胶密封件加速贮存试验评估结果的准确性。

针对上述问题, 本文在部组件等底层产品的寿命分部信息的基础上, 开展整机贮存寿命建模, 给出了整机加速因子综合计算方法。同时, 给出了一种基于自然贮存及加速贮存试验数据的加速因子试验结果验证方法, 对比分析了加速贮存试验与自然贮存产品的退化趋势及规律, 并验证了加速因子评估的准确性。

## 1 整机加速贮存试验结果验证方法研究

基于部组件等底层产品的寿命分部信息, 建立整机可靠性模型, 获取整机的加速因子, 依此开展加速贮存试验。收集产品自然及加速退化数据, 通过灰关联熵分析法、距离系数分析法等方法判断加速贮存试验与自然贮存是否存在相同的退化趋势和规律, 验证其可加速性。最后, 通过对比自然及加速贮存试验数据外推寿命结果与基于加速因子的寿命计算结果, 验

证整机加速贮存试验结果的准确性。整机加速因子试验结果验证方法技术途径如图 1 所示。

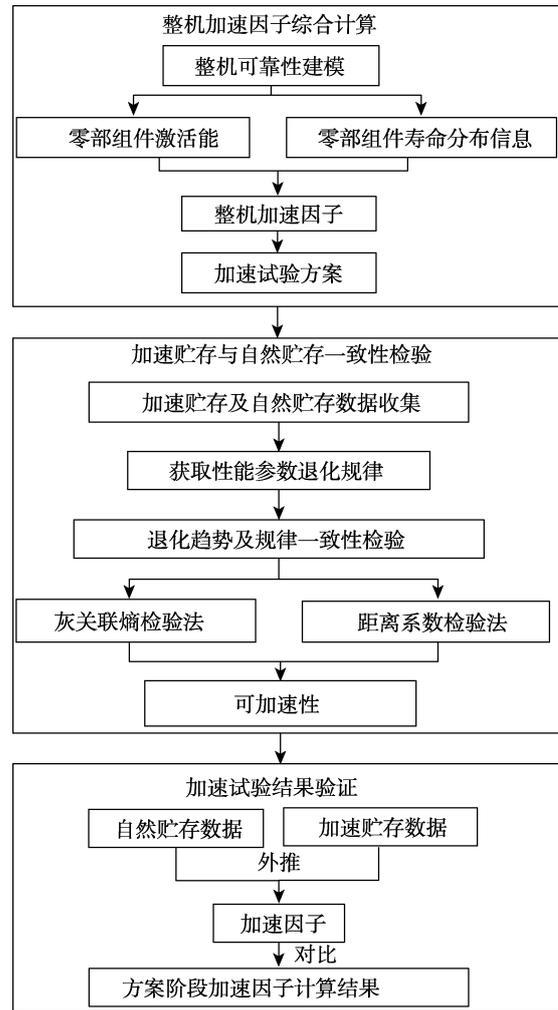


图 1 整机加速因子试验结果验证方法

Fig.1 Verification method of accelerated storage test results for the electronic equipment

### 1.1 整机加速因子综合计算方法

整机贮存寿命建模的目的是在已知零部件的贮存寿命分布及其参数的情况下, 利用底层单元信息来评估整机的贮存寿命分布及其参数。整机组成零部件的贮存失效一般为耗损型失效, 可认为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  $m_i$ 、 $\eta_i$ , 整机的贮存可靠度函数为式 (1)。

$$R(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{m_i}} = e^{-\sum_{i=1}^n \left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{m_i}} \quad (1)$$

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

贮存寿命服从威布尔分布的情况下, 加速应力水

平  $S_j$  ( $j=1, 2, \dots, k$ ) 下的加速因子  $AF_j$  见公式 (2)。

$$AF_j = \frac{\eta_0}{\eta_j} \quad (2)$$

式中:  $\eta_0$  为在基准贮存应力水平  $S_0$  下的特征寿命;  $\eta_j$  为在加速贮存应力水平  $S_j$  下的特征寿命。

已知第  $i$  个部组件在加速应力水平  $S_j$  下的加速因子为  $AF_{ij}$ 。在加速贮存应力水平  $S_j$  下, 由于失效机理不变, 部组件寿命分布形状参数  $m_i$  不变, 根据公式

(2), 部组件寿命分布特征寿命变为  $\eta_{ij} = \frac{\eta_i}{AF_{ij}}$ , 则整机在加速应力水平  $S_j$  下的可靠度函数见公式 (3)。

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\left(\frac{AF_{ij}t}{\eta_i}\right)^{m_i}} = e^{-\sum_{i=1}^n \left(\frac{AF_{ij}t}{\eta_i}\right)^{m_i}} \quad (3)$$

不同部件的加速因子  $AF_{ij}$  可利用阿伦尼斯公式计算得到:

$$AF_{ij} = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_j}\right)\right] \quad (4)$$

式中:  $E_a$  为部组件激活能;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T_0$  为基准温度;  $T_j$  为加速温度。

根据式 (3) 给出的整机可靠度计算方法, 使用部组件的寿命分布参数及激活能数据可计算出不同应力水平下整机的可靠度。假设整机寿命仍服从威布尔分布, 利用上述可靠寿命计算结果对整机寿命分布重新进行参数估计, 如式 (5) 所示。

$$e^{-\sum_{i=1}^n \left(\frac{AF_{ij}t}{\eta_i}\right)^{m_i}} = e^{-\left(\frac{t}{\eta_S}\right)^{m_S}} \Rightarrow \eta_S, m_S \quad (5)$$

根据式 (2) 可得整机加速因子  $AF_{Sj}$ , 见式 (6)。

$$AF_{Sj} = \frac{\eta_{S_0}}{\eta_{S_j}} \quad (6)$$

式中:  $\eta_{S_0}$  为整机在基准贮存应力水平  $S_0$  下的特征寿命;  $\eta_{S_j}$  为整机在加速贮存应力水平  $S_j$  下的特征寿命。

## 1.2 加速贮存试验与自然贮存一致性检验方法

产品在加速贮存条件下应与自然贮存条件下具有相同的退化机理, 才具有可加速性, 因此自然贮存、加速贮存试验获取的性能参数退化规律应具有一致性。可采用灰关联熵分析、距离系数分析等方法对自然贮存与加速贮存数据的相关性进行分析和评价, 判断产品加速贮存试验与自然贮存的退化规律是否一致。

### 1.2.1 灰关联熵分析

灰关联熵分析是在灰关联度分析的基础上发展而来的方法<sup>[22-23]</sup>。通过自然贮存及加速贮存试验获取产品的性能退化数据, 使用自然贮存退化数据构建参考序列, 用加速贮存退化数据构建比较序列, 关联度计算过程如下。

设已知参考序列  $X_0(j)=\{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\}$ , 比较序列  $X_i(j)=\{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ , 则已知参考序列  $X_0$  关于比较序列  $X_i$  在第  $k$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ) 个变量的灰关联系数为:

$$r_i[x_0(k), x_i(k)] = \frac{\left| \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \right|}{\left| \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \right|} \quad (7)$$

式中:  $\rho$  为分辨系数,  $0 < \rho < 1$ ;  $|x_0(k) - x_i(k)|$  为第  $k$  个变量、第  $i$  个比较单元与参考单元对应项差的绝对值;  $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$  为两级最小差;

$\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$  为两级最大差。

灰关联熵分析将参考因素和比较因素的数据序列的关联程度用“熵”的方法进行定量分析, 用灰熵关联度表征参考序列与比较序列的相关程度。灰关联熵是离散序列均衡程度的测度, 灰关联熵越大, 说明序列越均衡。

对灰关联系数进行分布映射, 构造灰内涵序列, 使其满足灰关联熵要求:

$$R_i \rightarrow P_i \quad (8)$$

$$p_i(k) = \frac{r_i[x_0(k), x_i(k)]}{\sum_{k=1}^n r_i[x_0(k), x_i(k)]} \quad (9)$$

式中: 映射值  $p_i(k)$  称为比较序列  $X_i$  与参考序列  $X_0$  在  $k$  点的关联密度值。利用  $p_i(k)$  可构造比较序列的灰内涵序列  $X_i = \{p_i(1), p_i(2), \dots, p_i(n)\}$ ,  $p_i(k) \geq 0$ ,

且  $\sum_{k=1}^n p_i(k) = 1$ 。

比较序列  $X_i$  的灰关联熵为:

$$H_i = -\sum_{k=1}^n [p_i(k) \cdot \ln p_i(k)] \quad (10)$$

比较序列  $X_i$  的灰关联熵关联度为:

$$E_i = \frac{H_i}{H_{\max}} = \frac{-\sum_{k=1}^n [p_i(k) \cdot \ln p_i(k)]}{\ln n} \quad (11)$$

若计算出的灰关联熵关联度越接近 1, 说明加速贮存试验与自然贮存退化规律的一致性越好。一般相关系数在 0.7 以上说明一致性较好, 在 0.4~0.7 说明一致性一般, 在 0.2~0.4 说明一致性较差。

### 1.2.2 距离系数分析

距离系数分析可以实现线性及非线性变量数据之间的相关性分析<sup>[24-26]</sup>。通过自然贮存及加速贮存试验获取产品的性能退化数据, 计算自然贮存及加速贮存退化数据间的距离系数过程如下。

给定 2 个变量:  $x$  为自然贮存性能参数,  $y$  为加速贮存性能参数, 其试验观测值为随机向量  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$ ,

则 2 个变量的距离系数可以定义为:

$$d(x, y) = \frac{c(x, y)}{\sqrt{c(x, x)c(y, y)}} \quad (12)$$

距离协方差为:

$$c^2(x, y) = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j} M_{i,j} N_{i,j} \quad (13)$$

同理可以计算:

$$c^2(x, x) = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j} M_{i,j}^2 \quad (14)$$

$$c^2(y, y) = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j} N_{i,j}^2 \quad (15)$$

$$M_{i,j} = \left\| x_i - x_j \right\| - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\| x_i - x_j \right\| - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left\| x_i - x_j \right\| + \frac{1}{n^2} \sum_{i,j=1}^n \left\| x_i - x_j \right\| \quad (16)$$

$$N_{i,j} = \left\| y_i - y_j \right\| - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\| y_i - y_j \right\| - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left\| y_i - y_j \right\| + \frac{1}{n^2} \sum_{i,j=1}^n \left\| y_i - y_j \right\| \quad (17)$$

其中:  $\|X\|$ 、 $\|Y\|$  为随机向量  $X \in R^P$ 、 $Y \in R^P$  的 L2 范数。

若计算出的距离系数越接近 1, 说明加速贮存试验与自然贮存退化规律的一致性越好。一般相关系数在 0.7 以上说明一致性较好, 在 0.4~0.7 说明一致性一般, 在 0.2~0.4 说明一致性较差。

### 1.3 加速贮存试验结果验证方法

为验证整机加速因子综合计算方法的准确性, 需对产品自然及加速贮存试验得到的性能参数退化数据进行分析。典型的产品参数退化曲线如图 2 所示, 产品或设备的失效时间定义为某参数性能退化曲线到达失效阈值的时间 TTF, 在单退化参数与剩余寿命指标相对应的情况下, 产品的剩余使用寿命此时就可定义为当前时刻与失效时间之间的差值。

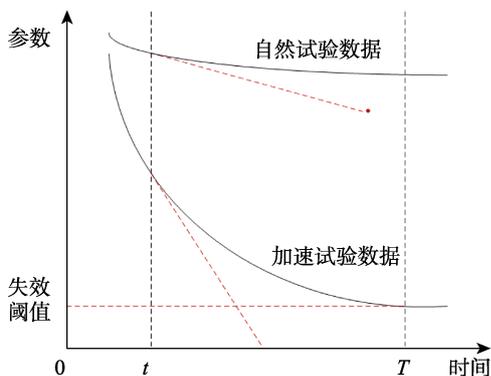


图 2 参数与寿命的关系

Fig.2 Relationship between parameters and life

加速因子反映的是加速寿命试验中得到的寿命信息与实际使用条件的寿命信息之间的折算规律, 定义如下:

$$AF = \frac{t_{R_0}}{t_{R_i}} \quad (18)$$

式中:  $t_{R_i}$ 、 $t_{R_0}$  表示产品在加速应力水平  $S_i$  和正常应力水平  $S_0$  下达到相同可靠度的可靠寿命所需时间;  $AF$  为加速应力水平相对于正常应力水平的加速因子。

退化速率是产品重要的寿命特征, 也可表示加速因子:

$$AF = \frac{\lambda_i}{\lambda_0} \quad (19)$$

式中:  $\lambda_i$ 、 $\lambda_0$  表示产品在加速应力水平  $S_i$  和正常应力水平  $S_0$  下的退化速率。

通过对比基于底层产品寿命信息综合计算得到的整机加速因子与自然及加速贮存试验数据获得的整机加速因子, 验证整机加速因子综合计算方法的准确性。

## 2 案例

某微波产品整机用于接收微波信号, 并对其进行分选、识别、处理。目前已通过贮存寿命试验 (3 台用于加速贮存试验, 1 台用于自然贮存试验) 收集了相关性能参数退化数据, 可对其开展加速贮存试验与外场贮存结果一致性检验, 验证整机加速因子试验结果的可靠性。

### 2.1 整机加速因子综合评估

某微波产品整机包括变频模块、点频源、电缆网等部分。根据中段探测装置典型部组件加速贮存试验数据分析结果, 得到产品不同参数的激活能结果, 见表 1。

表 1 某微波产品贮存薄弱部组件贮存寿命试验数据  
Tab.1 Test data for the storage life of a vulnerable component in a microwave product

序号	名称	数量	寿命分布	分布参数	激活能/eV
1	点频源	1		$\eta=219.83$ a; $m=1.6$	0.490
2	变频模块	4	威布尔分布	$\eta=55.96$ a; $m=2.1$	0.415
3	电缆网	1		$\eta=108.59$ a; $m=6.69$	0.558
4	其他部组件	1		$\eta=65.22$ a; $m=2.94$	0.415

根据某微波产品整机底层部组件贮存寿命分布的形状参数及激活能, 采用 1.1 节给出的数据拟合的整机加速因子综合计算方法, 确定整机贮存寿命的分布参数及加速因子。取基准贮存温度为 25 °C, 加速贮存试验温度为 95 °C, 将零部件的贮存寿命数据代入式 (5), 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 3 所示。

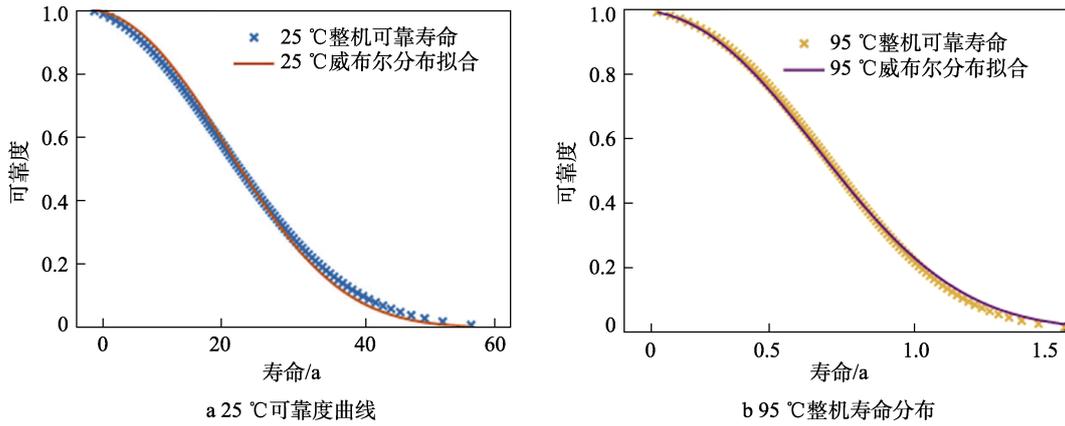


图3 某微波整机贮存可靠度曲线

Fig.3 Storage reliability curve of a certain microwave product: a) reliability curve at 25 °C; b) reliability curve at 95 °C

同时,对某微波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,可认为某微波整机贮存寿命服从威布尔分布。因此,可依据式(9)对整机贮存寿命分布参数进行估计,结果见表2。

表2 某微波整机分布参数

Tab.2 Distributed parameters of a microwave product

温度应力/°C	形状参数	特征寿命/a	相关系数	加速因子
25	2.45	27.01	0.999	/
95	2.45	0.85	0.999	31.7

### 2.2 一致性检验

某微波产品在贮存期内会经受温度等工作应力的影响。据此,采用3台微波产品整机设计并开展

加速贮存试验,同时采用1台整机在常温条件下开展自然贮存试验,并与加速贮存试验进行对比。加速及自然试验每循环环境剖面参数见表3,环境剖面如图4所示。

采用1.2小节的方法对整机产品自然及加速退化数据进行分析,验证加速贮存试验与自然贮存退化趋势及规律一致性。整机产品自然及加速贮存试验性能测试数据如图5所示。

1) 灰关联熵分析。以自然贮存样本性能测试数据作为参考序列,加速贮存样本性能测试数据作为比较序列,利用1.2.1节给出的映射方法,构造灰内涵序列,并计算相应的灰关联熵关联度,结果见表4。

2) 距离系数分析。利用1.2.2节给出的距离系数分析方法,计算自然贮存样本与加速贮存样本性能测试数据的距离系数,结果见表5。

表3 某微波产品加速及自然试验剖面参数

Tab.3 Accelerated and natural test profile parameters for a microwave product

序号	试验项目	敏感应力	持续时间/h	模拟条件/°C	加速条件/°C	加速因子	循环数	等效贮存时间/a
1	加速贮存	温度	300	25	95	31.7	11	12
2	自然贮存	温度	300/600	25	/	/	6	0.38
3	定期检测	电应力	2次/循环	/	/	1	2	/

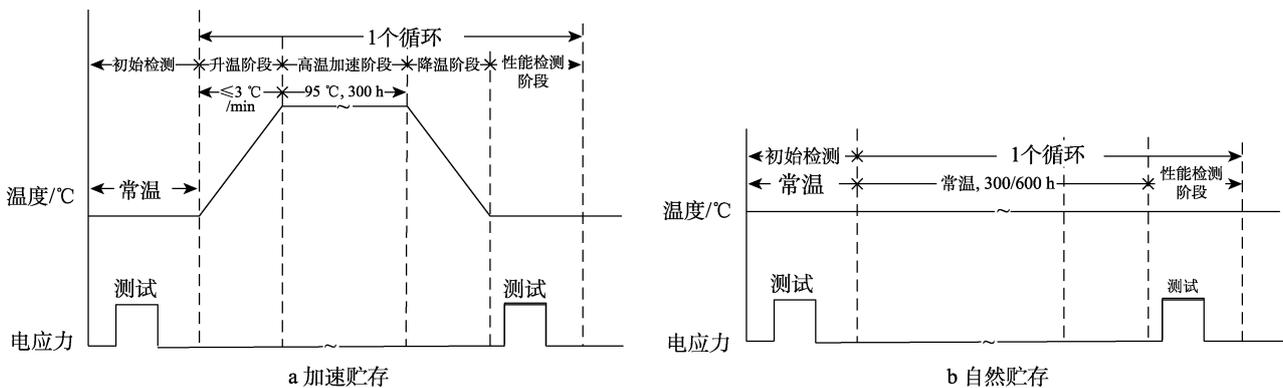


图4 某微波产品加速及自然贮存环境剖面

Fig.4 Accelerated and natural storage environmental profiles for a microwave product: a) accelerated storage; b) natural storage

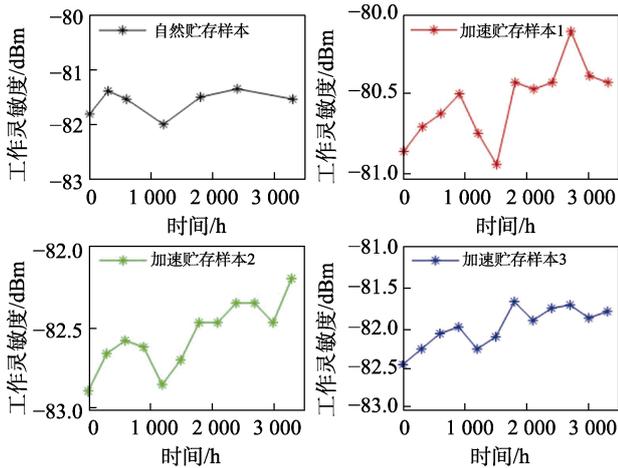


图 5 某微波产品加速及自然贮存数据  
Fig.5 Accelerated and natural storage data for a microwave product

表 4 自然与加速贮存数据灰关联熵关联度  
Tab.4 Gray relational entropy correlation degree between natural and accelerated storage data

序号	数据来源	序列类别	灰关联熵关联度
1	自然贮存样本	参考序列	/
2	加速贮存样本 1	比较序列	0.991
3	加速贮存样本 2	比较序列	0.995
4	加速贮存样本 3	比较序列	0.979

表 5 自然与加速贮存数据距离系数

Tab.5 Distance coefficient of natural and accelerated storage data

序号	数据	距离系数
1	加速贮存样本 1 与自然贮存样本	0.949
2	加速贮存样本 2 与自然贮存样本	0.942
3	加速贮存样本 3 与自然贮存样本	0.934

根据表 4 和表 5 的计算结果, 自然贮存样本与加速贮存样本性能测试数据的灰关联熵关联度与距离系数均大于 0.9, 相关性较强。因此, 自然贮存与加速贮存产品退化规律的一致性较高, 具有可加速性。

### 2.3 整机加速贮存试验结果验证

某微波产品的工作灵敏度  $P$  随贮存时间  $t$  的增加有逐渐增大的趋势, 存在一定的退化规律, 且满足线

性退化轨迹模型, 如式 (20) 所示。对退化轨迹模型参数进行估计, 获取整机退化速率及初始性能参数估计结果如图 6 和表 6 所示。

$$P = P_0 + at \tag{20}$$

式中:  $P_0$  为初始工作灵敏度;  $a$  为退化速率。

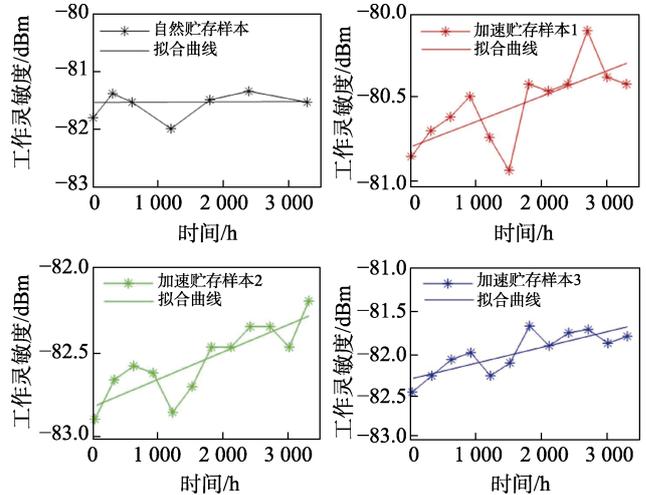


图 6 工作灵敏度随贮存时间退化曲线  
Fig.6 Work sensitivity degradation curve with storage time

表 6 工作灵敏度随贮存时间退化曲线参数  
Tab.6 Parameters of the degradation curve for work sensitivity with storage time

温度/°C	产品	回归参数	
		退化速率 $a$	初始工作灵敏度 $P_0$
25	自然贮存样本	$4.91 \times 10^{-6}$	-81.535 2
	加速贮存样本 1	$1.47 \times 10^{-4}$	-80.772 6
95	加速贮存样本 2	$1.59 \times 10^{-4}$	-82.802 9
	加速贮存样本 3	$1.82 \times 10^{-4}$	-82.281 8

根据式 (18), 加速因子为加速应力水平下与正常应力水平下产品退化速率之比。95 °C 下产品的退化速率取 3 个试样的均值, 对产品加速因子进行计算, 某微波产品整机加速因子及对应的等效贮存年限见表 7。根据表 7 计算结果, 通过整机加速因子综合计算方法获得的加速因子相对于通过自然及加速贮存试验数据获得的整机加速因子误差小于 5%, 整机加速因子综合计算及寿命评估结果准确。

表 7 某微波产品整机加速贮存试验效果

Tab.7 Accelerated storage test effect for a microwave product

序号	基准贮存温度	加速贮存温度	加速因子计算方法	加速因子	加速贮存时间/h	等效贮存时间/a
1	25°C	95°C	整机加速因子综合计算方法	31.68	3 319	12
2			基于自然及加速贮存试验数据	33.10	3 319	12.54
误差/%				4.48	/	4.48

## 3 结论

针对如何确定加速贮存试验中整机的加速因子

及如何评估整机的加速因子准确性问题, 通过本文的研究得出如下几点结论:

- 1) 针对如何确定加速贮存试验中整机的加速因

子的问题,基于部组件等底层产品的寿命分部信息,建立整机可靠性模型,获取整机的加速因子,依此开展加速贮存试验。

2) 针对如何评估整机的加速因子准确性需求,提出了基于灰关联熵分析、距离系数分析等加速贮存试验与自然贮存退化规律一致性检验方法,同时给出了一种基于自然贮存及加速贮存试验数据的加速贮存试验结果验证方法。

3) 以某微波整机为例,给出了整机加速因子综合计算、加速贮存试验与自然贮存一致性检验及加速贮存试验结果验证的案例,对本文提出的方法进行了验证。

#### 参考文献:

- [1] 朱曦全,陶贵明,苏光,等. 固体火箭贮存延寿试验方法[J]. 强度与环境, 2023, 50(6): 79-89.  
ZHU X Q, TAO G M, SU G, et al. Test Method for Storage Life Extension of Solid Rockets[J]. Structure & Environment Engineering, 2023, 50(6): 79-89.
- [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] 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.
- [4] 安理会,罗康,符江锋,等. 航空燃油齿轮泵加速寿命试验与加速退化试验研究进展及展望[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2025, 38(1): 41-55.  
AN L H, LUO K, FU J F, et al. Research Progress and Prospects of Accelerated Life Testing and Accelerated Degradation Testing for Aviation Fuel Gear Pump[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2025, 38(1): 41-55.
- [5] 王云艺,郭劲言,王朝,等. 电主轴恒定多应力加速退化试验优化设计[J]. 制造技术与机床, 2025(3): 187-193.  
WANG Y Y, GUO J Y, WANG C, et al. Optimal Design of Constant-Stress Accelerated Degradation Test with Multiple Stresses for Motorized Spindle[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2025(3): 187-193.
- [6] 施成. 加速可靠性试验方法研究[J]. 环境技术, 2023, 41(11): 30-34.  
SHI C. Accelerated Reliability Test Method Research[J]. Environmental Technology, 2023, 41(11): 30-34.
- [7] 赵艳涛,张文伟,姚军. 基于退化量分布与退化轨迹的两种加速退化数据贮存寿命评估方法对比[J]. 环境技术, 2011, 29(4): 29-32.  
ZHAO Y T, ZHANG W W, YAO J. The Contrast between Two Storage Life Estimate Methods of Accelerated Degradation Data Based on Degradation Amount Distribution and Degradation Trail[J]. Environmental Technology, 2011, 29(4): 29-32.
- [8] 罗赓,穆希辉,杨振海,等. 某装备系统机电产品贮存可靠性评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(4): 176-180.  
LUO G, MU X H, YANG Z H, et al. Study on Estimating Method for Storage Reliability of Electromechanical Products in Equipment System[J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(4): 176-180.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 向刚,苗静,邱丰. 航天电子产品贮存期评估方法研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(1): 1-5.  
XIANG G, MIAO J, QIU F. Research on Evaluating the Storage Period of Aerospace Electronics Products[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(1): 1-5.
- [12] 程远方,李荣,王广昊,等. 航空装备电子部组件整机贮存延寿评估方法研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(15): 41-44.  
CHENG Y F, LI R, WANG G H, et al. Evaluation Method of Whole Machine Storage Life Extension of Electronic Components of Aviation Equipment[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(15): 41-44.
- [13] 李鹏,李传日,李桃. 基于可靠性分配的整机加速因子计算方法研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(3): 53-57.  
LI P, LI C R, LI T. Research on the Calculation Method of Overall Acceleration Factor Based on Reliability Allocation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(3): 53-57.
- [14] 段飞飞,苏振李,王田宇,等. 整机加速贮存试验与寿命快速评价方案设计[J]. 中国工程机械学报, 2024, 22(4): 556-560.  
DUAN F F, SU Z L, WANG T Y, et al. Design of Accelerated Storage Test and Rapid Life Evaluation Scheme for Whole Machine[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2024, 22(4): 556-560.
- [15] 申争光,苑景春,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, YUAN J C, DONG J Y, et al. Research on Acceleration Factor Estimation Method of Accelerated Life Test of Missile-Borne Equipment[J]. Systems Engi-

- neering and Electronics, 2015, 37(8): 1948-1952.
- [16] 徐如远, 袁宏杰, 李鹏, 等. 基于薄弱环节的整机加速因子计算[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 1-4.  
XU R Y, YUAN H J, LI P, et al. Whole Machine Acceleration Factor Based on Weak Links[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 1-4.
- [17] 刘晓娣, 韩建立, 姜普涛. 弹上电子部件加速因子估计方法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 7-12.  
LIU X D, HAN J L, JIANG P T. Acceleration Factor Estimation of Missile-Borne Electronic Components[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 7-12.
- [18] HART L. Reliability of an Electronic Assembly: A Case History[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1987, R-36(4): 385-389.
- [19] 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.
- [20] 吴建国, 冯国林, 洪亮, 等. 基于失效比对的复杂系统加速贮存寿命试验方法研究[J]. 强度与环境, 2016, 43(3): 59-64.  
WU J G, FENG G L, HONG L, et al. Study on Complex System Accelerated Storage Life Test Based on Failure Comparison Method[J]. Structure & Environment Engineering, 2016, 43(3): 59-64.
- [21] 鲁相, 汪亚顺, 陈循, 等. 基于似然比检验的橡胶密封件加速试验机理一致性判别方法[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(2): 144-149.  
LU X, WANG Y S, CHEN X, et al. Identification Method of Mechanism Consistency for Rubber Seals Accelerated Testing Based on Likelihood Ratio Test[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(2): 144-149.
- [22] 宣兆龙, 易建政, 吴建华. 灰色模糊理论在弹药安全管理系统评价中的应用[J]. 军械工程学院学报, 2005, 17(2): 4-6.  
XUAN Z L, YI J Z, WU J H. Application of Fuzzy-Grey Theory in Security Assessment of System Managing Ammunition[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2005, 17(2): 4-6.
- [23] 杨清熙, 杜博文, 宣兆龙, 等. 弹药贮存环境主要影响因素灰关联熵分析方法[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(7): 86-89.  
YANG Q X, DU B W, XUAN Z L, et al. Analytical Method for Main Influence Factors of Ammunition Storage Environment Based on Grey Correlation Entropy[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(7): 86-89.
- [24] 闫铭. 基于距离相关的超高维数据交互作用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.  
YAN M. Research on the Interaction of Ultra-High Dimensional Data Based on Distance Correlation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [25] 张璐. 基于距离相关系数的分层聚类法[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
ZHANG L. Hierarchical Clustering Method Based on Distance Correlation Coefficient[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [26] 李亚锦. 基于相关关系识别的预警算法与应用[D]. 济南: 山东大学, 2015.  
LI Y J. Early Warning Algorithm Based on Correlation Recognition and Its Application[D]. Jinan: Shandong University, 2015.