

某天线加速贮存试验与寿命评估方法研究

刘佩风, 陈津虎, 胡彦平

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: **目的** 对某天线进行加速贮存试验研究, 利用试验数据进行寿命评估, 得到产品的加速因子。**方法** 通过步降应力试验方法对某天线的12台产品进行了四个不同应力量级的高温加速贮存试验, 获得产品的退化数据。分别采取两种加速模型对试验数据进行处理, 对比确定最优评估方法。**结果** 采用基于漂移布朗运动的加速模型评估得到产品的激活能, 从而求出加速因子和贮存寿命。**结论** 步降应力试验方法能加速产品损伤的累积, 便于快速获得产品的性能退化数据, 而基于漂移布朗运动的评估方法为天线类产品的寿命评估提供了一种新的参考方法。

关键词: 天线; 加速贮存试验; 漂移布朗运动; 寿命评估

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.03.020

中图分类号: TJ07 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)03-0098-05

Accelerated Storage Testing and Life Assessment Method of Antenna

LIU Pei-feng, CHEN Jin-hu, HU Yan-ping

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: Objective To research accelerated storage of certain antenna, utilize the experimentation data to assess life and obtain accelerated factor of product. **Methods** A step-down-stress storage testing was designed for twelve products to obtain degenerated records. Two accelerating models were used to deal with these dates, and then contrast to make sure the most valuable technique. **Results** The activation energy of product could be obtained through acceleration model assessment based on drift Brownian movement. Then, the accelerated factor and storage life could be calculated. **Conclusion** The step-down-stress storage method can speed up the accumulation of product damage. It is convenient to obtain data of degeneration quickly. The evaluation based on drift Brownian movement provides a new reference for assessment of the antenna.

KEY WORDS: antenna; accelerated storage test; drift brownian movement; life assessment

某天线属于高频设备类产品, 主要用于引爆控制系统, 并发射和接收无线信号, 在导弹武器装备的使用中扮演着重要的角色^[1]。根据导弹武器“长期贮存, 一次使用”的特点^[2], 对其各组成部件的贮存期有着十分高的要求, 目前国内相关研究所相继开展了弹上电子、机电产品的加速贮存试验方法研究, 但对于天线类产品的研究仍比较少, 且没有足够的自然贮存数据作支撑。因此, 亟待研究弹上天线的加速贮存试验

与寿命评估方法。

加速贮存试验主要有恒定、步进、序进应力3种方式, 恒定、步进应力方法便于工程中的实施, 而序进应力方法需要专门的加载控制设备, 应用起来比较困难。因此, 恒定、步进应力方法成为加速贮存试验中广泛采用的试验方式。随着航天产品寿命和可靠性的不断提高, 即使采用加速的试验方法也需要很长时间, 有时只能观测到少量甚至没有失效数据。尤其在

恒定、步进应力的低应力量级阶段，试验时间很长，产品依旧没有失效数据。天线为长寿命、高可靠性产品，按恒定或步进应力方法开展试验，会导致试验时间很长却得不到想要的性能退化数据^[3-5]。基于步降应力的试验方法可加速产品损伤的累积，从而节约时间与成本^[6-7]，因此，文中采用步降应力方法对某天线开展加速贮存试验研究。

通过步降应力加速贮存试验获取某天线的贮存数据，并采用基于线性回归和漂移布朗运动^[8-12]的两种评估方法分别对退化趋势进行拟合，选出最合适的评估模型，从而计算产品的加速因子，得到产品的常温（25℃）贮存寿命。

1 步降应力加速贮存试验及数据

1.1 加速贮存试验

对某天线进行贮存 FME(C)A 分析时认为，天线驻波比大于某一值时，产品失效，而天线内部的非金属材料（如导电胶、聚氨酯泡沫塑料等）发生老化会导致该失效模式的产生。因此，采用温度应力进行加速，以 Arrhenius 模型作为加速模型，以驻波比的性能测试数据作为退化参数进行寿命评估。

试验选取 4 组加速应力水平，应力水平大小的选取结合产品所能承受的温度极限与实际贮存条件，同时确保不改变产品的失效机理^[13]。根据温度极限应力摸底试验结果确定了加速贮存最高温度应力量级为 135℃。最低温度应力量级的确定需要满足两个原则：与产品实际贮存温度相差不宜过大，以免影响外推精度；量级取值不能过低，否则会降低试验效率。由此确定最低温度应力量级为 80℃，再利用等对数间隔方法插值取整得到中间两个应力量级分别为 95℃ 和 115℃。

12 台产品采取步降应力量级开展加速贮存试验，依次为：135，115，95，80℃，四种温度应力量级的持续时间分别为 2400，800，800，600 h。在试验过程中，为监测产品的性能退化趋势，在每个温度量级达到规定的贮存时间后进行常温下的性能测试，从而得到产品各阶段的驻波比数据。

1.2 试验数据处理

某天线 12 台产品在加速试验过程中的测试数据如图 1 所示。由于参试产品均未出现失效，因此评估中将针对该天线的驻波比测试数据进行退化分析。

从图 1 可以看出，各参试产品驻波比数据在 1800 h 前保持着整体上升的趋势，在第 1800 h 时驻波比测试数据集体跌落。这是由于测试设备和测试环境发生了变化，同时存在着坏点数据。因此这里为便于后续数据处理，并在不影响分析结果的情况下，对驻波比

测试数据进行预处理。预处理措施为：去除第 600，800，2600，3000 h 时的数据，剔除问题数据对寿命评估的影响；为使后续数据处理过程更加直观，排除测试设备和环境的影响，将 1800 h 后的数据整体平行向上移动，使其与 1800 h 前的数据衔接上。由于后续评估方法将针对退化数据的增量进行评估，此处将 1600 h 与 1800 h 间突变的退化增量忽略，故此处的整体平移不会影响后续分析结果^[14]。预处理后的驻波比数据如图 2 所示。

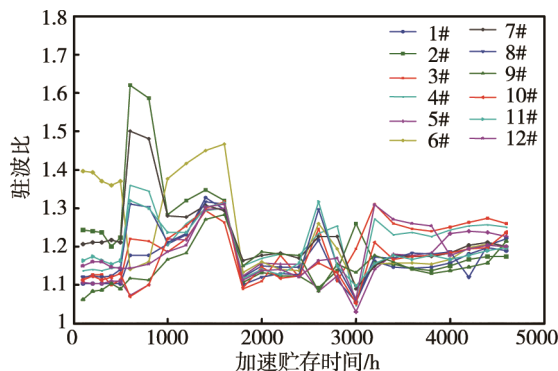


图 1 某天线驻波比测试数据

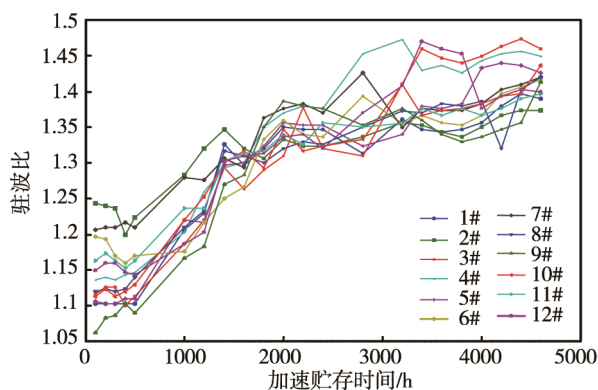


图 2 预处理后的驻波比测试数据

2 加速因子求取及贮存寿命评估方法

2.1 Arrhenius 模型

为了利用图 2 中的产品性能退化数据，外推产品在正常应力（25℃）条件下的贮存寿命，必须建立产品寿命特征与加速应力水平之间的数学关系，即加速模型。通过加速模型计算加速应力相对正常应力的加速因子，从而评估得到产品的常温贮存寿命。

选取 Arrhenius 模型作为温度应力加速模型，根据 Arrhenius 模型，产品的性能退化速率与温度应力 T 的关系表示如下：

$$d(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (1)$$

式中： $d(T)$ 为产品性能退化速率； A 为一个正常数； E_a 为激活能，eV，只与产品材料特性有关； k 为波尔兹

曼常数, $k=8.617 \times 10^5 \text{ eV/K}$; T 为绝对温度, K。

根据选定的高温应力 T_H , 计算此温度与正常温度应力水平 T_0 下的加速因子公式为:

$$A_F = \frac{d(T_H)}{d(T_0)} = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_H} \right) \right] \quad (2)$$

2.2 基于漂移布朗运动和线性回归的加速模型评估

通过观察产品性能参数的退化过程, 会发现退化参数与时间的关系并不是一个光滑的曲线, 而是粗糙的、波动的^[15]。这是由以下两点原因产生的: 产品个体之间的差异, 这种差异来源于生产过程中; 外部噪声, 来源于产品的工作环境、测量设备等。因此, 产品的性能退化过程其实是一个随机过程。随机过程可以采用布朗运动来进行描述, 布朗运动是最基本、最简单同时又是最重要的一种随机过程, 它是迄今了解得最清楚、性质最丰富的随机过程之一。

采用漂移布朗运动对产品的退化过程可描述为:

$$y(t) = y_0 + \sigma B(t) + d(t - t_0) \quad (3)$$

式中: $y(t)$ 为产品性能; y_0 为漂移布朗运动的起始点, 产品性能在 t_0 时刻的初始值; d 为漂移系数; σ 为扩散系数, $\sigma > 0$, σ 描述了产品生产过程中不一致性与不稳定性、设备的测量能力及误差以及外部噪声等随机因素对产品的影响, 在加速试验中不随应力而改变; $B(t)$ 为标准布朗运动。 $B(t)$ 是一个关于时间 t 的随机过程, 它具有以下性质: $B(0)=0$; 独立的增量; 稳定增量和正态性, 对于 $0 \leq t_1 \leq t_2$, 有 $B(t_2) - B(t_1) \sim N(0, t_2 - t_1)$; $B(t)$ 是关于时间 t 的连续函数。

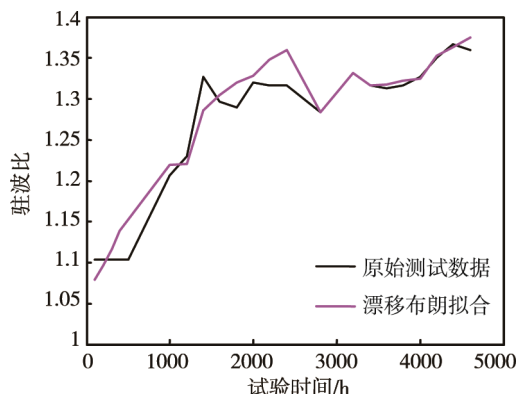
与传统线性回归相比, 漂移布朗运动方程可以更好地描述产品在性能退化过程中的随机性, 取三组数据进行对比分析, 得到退化趋势拟合对比情况见图 3—图 5, 拟合结果精度对比见表 1。

从图 3—图 5 与表 1 可以看出, 采用漂移布朗运动对产品的性能退化趋势拟合时, 产品在退化过程中的随机过程得到了更好的描述, 且其拟合精度略高于线性回归拟合。故采用式 (3) 的漂移布朗运动方程对产品的退化进行描述。

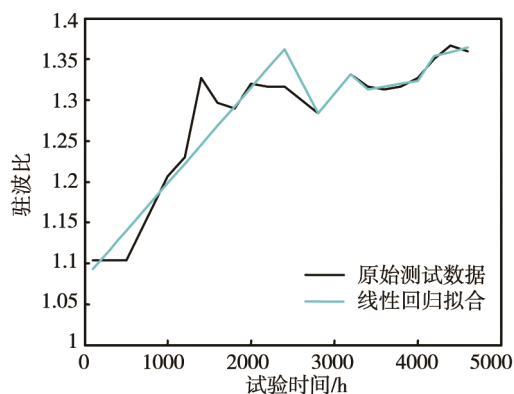
在式 (3) 中, 漂移系数 d 是产品性能退化率。它是一个与温度应力有关的函数, 从而可将加速模型与随机过程相结合。这里采用 Arrhenius 模型, 即:

$$d(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (4)$$

由于漂移布朗运动具有独立增量性, 在退化过程中表现为: 非重叠的时间间隔 Δt 内的退化增量相互独立。由于布朗运动本身属于一种正态过程, 因此退化增量 $(y_i - y_{i-1})$ 服从均值为 $d(T) \cdot \Delta t$ 、方差为 $\sigma^2 \cdot \Delta t$ 的正态分布。则其概率密度函数为:

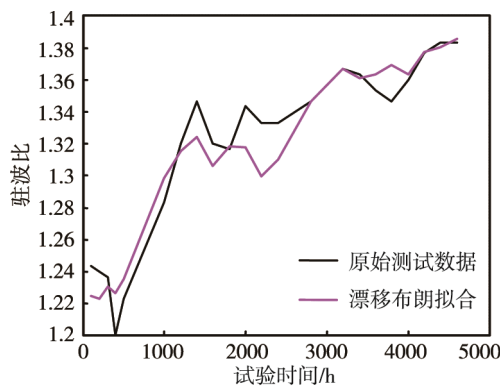


a 漂移布朗拟合

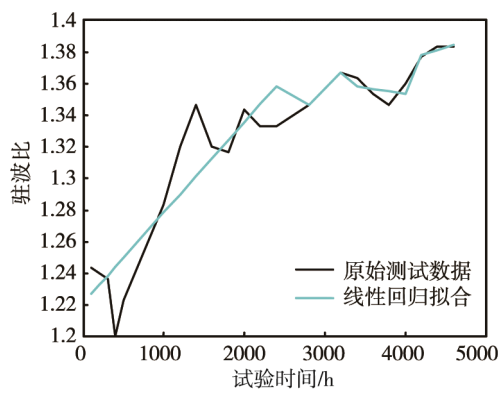


b 线性回归拟合

图 3 1#产品退化趋势拟合对比



a 漂移布朗拟合



b 线性回归拟合

图 4 2#产品退化趋势拟合对比

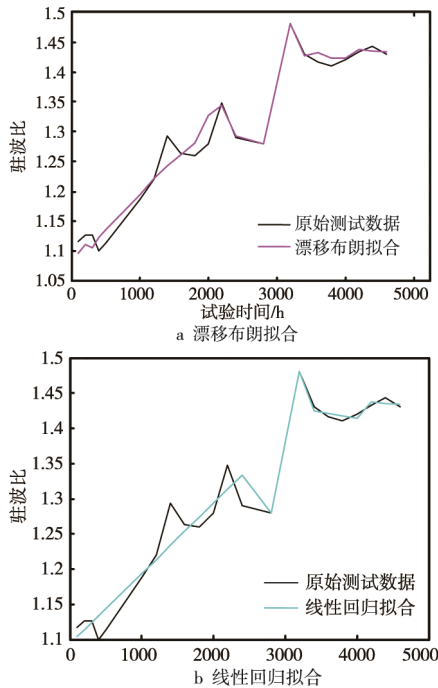


图 5 3#产品退化趋势拟合对比

表 1 拟合结果均方根误差 (RMSE) 对比

产品编号	漂移布朗拟合	线性回归拟合
1#	0.0219	0.0239
2#	0.0157	0.0180
3#	0.0190	0.0211

$$f_{i,i-1} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \sigma^2 \cdot \Delta t}} \exp \left\{ -\frac{[(y_i - y_{i-1}) - d(T) \cdot \Delta t]^2}{2\sigma^2 \cdot \Delta t} \right\} \quad (5)$$

设有 n 个产品, 进行 K 个应力水平的温度步进应力加速退化试验。试验中按照时间间隔 Δt 对产品检测, 每个应力水平的性能检测次数为 M_l , 共检测 M 次。每次进行检测的时间为 t_{lij} (其中 $l=1, 2, \dots, K; i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, M_l$), 检测到的性能数据为 y_{lij} 。

则步退应力加速退化试验的极大似然函数为:

$$L^\infty \prod_{l=1}^K \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{M_l} \frac{1}{\sqrt{2\pi \sigma^2 \cdot \Delta t}} \exp \left\{ -\frac{[(y_{lih} - y_{li(j-1)}) - d(T_l) \cdot \Delta t]^2}{2\sigma^2 \cdot \Delta t} \right\} \quad (6)$$

其对数似然函数为:

$$\ln L^\infty - \frac{1}{2} \sum_{l=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{M_l} \left\{ \left[\ln(2\pi \cdot \Delta t) + \ln(\sigma^2) \right] + \frac{\left[(y_{lij} - y_{li(j-1)}) - \Delta t \cdot A \exp\left(-\frac{E_a}{k} \cdot \frac{1}{T_l}\right) \right]^2}{\sigma^2 \cdot \Delta t} \right\} \quad (7)$$

对各参数求偏导数, 令其等于 0, 就可求出每个参数的极大似然估计值。则 Arrhenius 模型中的参数 E_a 与 A 的极大似然估计可通过式 (8) 进行计算:

$$\left\{ \begin{aligned} A &= \frac{\sum_{l=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{M_l} (y_{lij} - y_{li(j-1)}) e^{-\frac{E_a}{k} \cdot \frac{1}{T_l}}}{\sum_{l=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{M_l} \Delta t \cdot e^{-\frac{E_a}{k} \cdot \frac{1}{T_l}}} \\ A &= \frac{\sum_{l=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{M_l} (y_{lij} - y_{li(j-1)}) e^{-\frac{E_a}{k} \cdot \frac{1}{T_l}} \frac{1}{T_l}}{\sum_{l=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{M_l} \Delta t \cdot e^{-\frac{E_a}{k} \cdot \frac{1}{T_l}} \frac{1}{T_l}} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

解上述方程组即可得到加速模型参数 E_a 与 A , 计算结果为 $E_a=0.4097$ eV, $A=7.53$ 。

根据式 (2) 得到引控天线性能退化率的加速模型为:

$$d(T) = 7.53 e^{-\frac{0.4097}{8.617 \times 10^{-5} T}} \quad (9)$$

并计算得到引控天线驻波比的退化率见表 2。

$$A_F = \frac{d(T_H)}{d(T_0)} = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_H} \right) \right] = \exp \left[\frac{0.4097}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_H} \right) \right] \quad (10)$$

则产品在各加速温度应力下相对常温 (25 °C) 下的加速因子和激活能见表 3。

表 2 驻波比性能退化率

序号	加速应力/°C	性能退化率/ ($\times 10^{-5} \text{h}^{-1}$)
1	135	6.56
2	115	3.60
3	95	1.85
4	80	1.07

表 3 加速模型参数及加速因子 (相对于 25 °C)

序号	加速应力/°C	加速因子	激活能/eV
1	135	73.78	0.4097
2	115	40.47	
3	95	20.79	
4	80	12.01	

根据式 (2), 利用激活能 E_a 进一步计算加速因子, 从而可将试验时间折算到正常应力条件下的自然贮存时间, 得到产品在正常应力 (25 °C) 下已等效贮存 26.6 a。

3 结论

通过步降应力试验方法进行加速贮存试验, 获得

了某天线在不同老化温度下的性能退化数据,数据拟合及寿命评估结果表明:步降应力加速贮存试验方法是获得天线产品性能退化规律的一种有效方法;该天线在加速老化过程中的性能退化服从一定的规律,利用漂移布朗运动可求得产品的加速因子;利用加速因子将加速贮存试验时间转化为常温贮存时间,进而得到该天线在常温(25℃)下的已等效贮存年限。

参考文献:

- [1] 唐世荣,黎民,胡军,等.天馈一体化短波天线的仿真和试验研究[J].军事通信技术,2015,36(3):48-50.
- [2] 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(2):27-30.
- [3] 陈津虎,陈皓,胡彦平,等.基于步退应力加速寿命试验的静环组件贮存寿命评估[J].导弹与航天运载技术,2015(2):85-87.
- [4] 李久祥.装备贮存延寿技术[M].北京:中国宇航出版社,2006.
- [5] 邓爱民.高可靠长寿命产品可靠性技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006.
- [6] 邓爱民,陈循,张春华,等.加速退化试验技术综述[J].兵工学报,2007,28(8):1002-1007.
- [7] 徐广,王蓉华.步降应力加速寿命试验的效率分析[J].上海师范大学学报(自然科学版),2008,37(5):468-475.
- [8] 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(增刊):100-103.
- [9] 马静,苑丹丹,晁代宏,等.基于漂移布朗运动的光纤陀螺加速贮存寿命评估[J].中国惯性技术学报,2010,18(6):756-760.
- [10] 赵明,尹常京,张作刚.基于带漂移布朗运动的航材故障预测模型[J].装备环境工程,2013,10(2):113-115.
- [11] 张正新,胡昌华,高迎彬,等.多阶段随机退化设备剩余寿命预测方法[J].系统工程学报,2017,32(1):1-7.
- [12] 沈嵘,高军.一类步进应力加速退化数据的处理[J].电子产品可靠性与环境试验,2015,33(4):46-49.
- [13] 孟涛等.导弹贮存延寿技术概论[M].北京:中国宇航出版社,2013.
- [14] 费业泰.误差理论与数据处理[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [15] 万夕干,龚晶晶.基于加速退化试验的寿命与可靠性评估技术应用研究[J].上海航天,2013,3(30):65-68.