

微波功率放大组件加速贮存数据处理 及寿命评估

吕瑛¹, 王爱清², 闫凯^{1*}, 高素丽¹

(1.北京遥感设备研究所, 北京 100854; 2.北京机电工程总体设计部, 北京 100854)

摘要: 目的 以微波功率放大组件为研究对象, 开展加速贮存试验退化数据的处理、建模、分析, 给出组件的贮存期评估值和激活能等贮存特征参数。方法 在已完成微波功率放大组件加速贮存试验的基础上, 借鉴已有的数据建模及处理方法, 开展加速贮存数据处理及寿命评估, 应用多种退化轨迹拟合寻优、基于性能退化模型参数折算建模、多种寿命分布建模及拟合优度检验等技术, 对贮存数据进行分析处理。结果 给出了微波功率放大组件退化轨迹模型、寿命分布模型、加速因子、激活能等贮存特征参数和可靠寿命评估值。结论 描述的加速贮存试验数据处理方法, 适应性好, 具有较高的优良性, 可为类似具有退化数据的电子设备提供借鉴。

关键词: 功率放大组件; 加速贮存; 数据处理; 寿命; 加速因子; 激活能; 退化轨迹

中图分类号: TJ089

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)10-0108-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.10.013

Accelerated Storage Data Processing and Life Assessment of Microwave Power Amplification Modules

LYU Ying¹, WANG Ai-qing², YAN Kai^{1*}, GAO Su-li¹

(1. Beijing Remote Sensing Equipment Research Institute, Beijing 100854, China;

2. Beijing Overall Design Department of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: The work aims to process, model, and analyze degradation data from accelerated storage experiments with microwave power amplification modules as the research object, and provide storage characteristic parameters such as storage life assessment values and activation energy of the modules. Based on the completed accelerated storage test of microwave power amplification modules, existing data modeling and processing methods were adopted to carry out accelerated storage data processing and life assessment. Various degradation trajectory fitting optimization, performance degradation model parameter conversion modeling, multiple life distribution modeling, and goodness of fit testing techniques were applied to analyze and process the storage data. A degradation trajectory model, life distribution model, acceleration factor, activation energy and other storage characteristic parameters of microwave power amplification modules, as well as reliable life assessment values, were provided. The accelerated storage test data processing method proposed has good adaptability and high superiority, and can provide reference for similar electronic devices with degradation data.

KEY WORDS: power amplification modules; accelerated storage; data processing; life; acceleration factor; activation energy; degradation trajectory

收稿日期: 2023-08-24; 修订日期: 2023-10-12

Received: 2023-08-24; Revised: 2023-10-12

引文格式: 吕瑛, 王爱清, 闫凯, 等. 微波功率放大组件加速贮存数据处理及寿命评估[J]. 装备环境工程, 2023, 20(10): 108-117.

LYU Ying, WANG Ai-qing, YAN Kai, et al. Accelerated Storage Data Processing and Life Assessment of Microwave Power Amplification Modules[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(10): 108-117.

*通信作者 (Corresponding author)

一直以来,电子产品的贮存寿命大多采取自然贮存、抽样、鉴定试验等方法进行评估。这种采用自然贮存试验来评估产品贮存寿命的方法,尽管比较真实准确,但往往要花费十几年后才能了解产品的贮存寿命,且需投入大量的人力、物力、财力。近些年来,加速贮存试验^[1-3]技术在产品的贮存寿命评估中的应用日益广泛,但主要局限于元器件级^[4-8]、组件或者组合级产品,难以实现对复杂整机产品的贮存寿命预测^[9-12]。

近年来,随着我国军事高质量发展,大大加快了武器装备的元器件、整机的贮存延寿研究工作^[13-15]。王浩伟等^[16]综述了加速退化试验建模及数据处理方法,在假设加速因子不变的前提下,给出了某型碳膜电阻参数退化轨迹、伪寿命预测值和寿命分布模型。童雨等^[17]通过开展组件级加速贮存和仿真试验,估计出组件贮存寿命及寿命参数,并进一步研究了组件到整机级的传递规律,给出了从低层级试验得到高层级产品贮存寿命的评估方法。孙权等^[18]研究了加速退化试验的建模方法,并给出了加速因子较为规范的定义。李敏伟等^[19]系统研究了加速贮存寿命试验的设计方法。万夕干等^[20]探究了加速退化试验(ADT)的寿命评估技术及其应用。随着我国军事高质量发展,武器装备朝着“高精尖”方向发展,装备质量越来越好,装备的贮存延寿越发受到工业部门的重视。目前国内材料和器件的贮存数据虽然有一定的积累,但是难以做到能够精确地评估产品贮存寿命。

本文重点开展微波功率放大组件的贮存寿命研究。微波功率放大组件是雷达发射机的核心,通过采用固态功率合成技术,解决了传统电真空(速调管)发射机面临的使用维护不便、性能保持期短、容易打火等问题。微波功率放大组件内部主要采用微带工艺,大量使用功率芯片(如 NC11216C-3436),通过多芯片、波导功率合成,满足发射机的大输出功率要求。限于结构形式,没有采用整体密封设计,长时间贮存受外界温度、湿度的影响,可能会引起微带线氧化、镀层表面腐蚀、钎焊空洞率上升、功率芯片微波参数漂移、增益下降等问题,属于无线电整机设备的贮存薄弱环节,需要开展研究。

本文在总结前期完成的微波功率放大组件加速贮存试验数据的基础上,借鉴已有的数据建模及处理方法,开展了加速贮存数据处理及寿命评估,应用多种退化轨迹拟合寻优、基于性能退化模型参数折算建模、多种寿命分布建模及拟合优度检验等技术,给出了符合工程实际的微波功率放大组件可靠寿命评估值。

1 微波功率放大组件分析

1.1 功能及组成

微波功率放大组件用于雷达发射机中,通过多级

芯片放大、波导功率合成,将输入级的小信号进行功率放大,输出满足对外辐射要求的功率信号。固态功率模块内部主要采用微带工艺,使用功率芯片(NC11216C-3436 功率芯片)进行功率合成,其内部由波导功分合成器、微波 MMIC 放大器、高速大功率调制器组成,外形如图 1 所示。

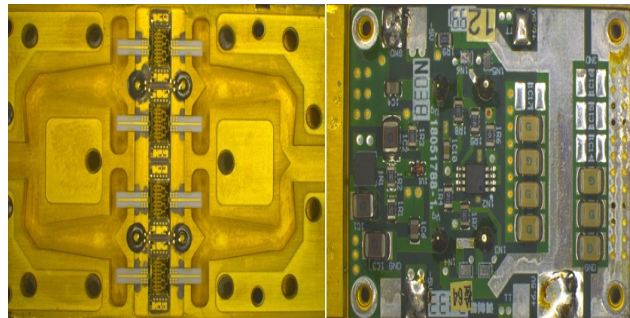


图 1 固态功率模块
Fig.1 Solid power module

1.2 贮存失效模式及机理

为获取微波功率放大组件主要的贮存失效模式,确定加速贮存试验中的监测参数,对其进行贮存失效模式影响分析,得出严酷等级为 II 类的故障模式清单,见表 1。由表 1 可知,微波功率放大组件贮存失效会引起输出功率变化,其贮存性能变化可以通过输出功率来表征,因此确定加速贮存试验中重点测试参数为输出功率。

2 试验情况

2.1 试验方案

高温会导致微波功率放大组件中电子元器件的引脚镀层氧化、器件性能参数漂移、腐蚀加速、机械裂纹扩大、有机材料的老化或龟裂、工作寿命缩短甚至烧毁。从上述失效模式和失效机理分析看出,温度对主要失效模式的成因具有激发作用,可以作为加速贮存试验的主要应力。在微波功率放大组件加速贮存试验过程中,通过进行输出功率测试,可以保证检测项目覆盖贮存失效模式。

综合考虑试验样本数、试验时间和试验简便程度,微波功率放大组件加速贮存试验采用恒定应力法。试验过程中当每一应力等级出现 2 个或以上样品失效时,该温度量级下的试验可以提前结束。

按照预估 40 倍的加速因子,当试验截尾时间取 6 000 h 时,可等效自然贮存超过 20 a。根据本次加速贮存目标值确定试验截止时间定为 6 000 h,试验中的测试时刻见表 2。根据前期开展的预试验情况,确定恒定应力试验温度值、各温度点样本数见表 3。

表1 组件严酷度等级为II类的故障模式清单
Tab.1 List of failure modes with module severity class II

故障模式代码	产品标志	功能	失效模式	失效原因或机理	失效检测方法	备注
MK5.255.081	MIC4223YMME	驱动	开路	腐蚀、引线连接不良	输出功率测试	
MK5.255.081	MIC4223YMME	驱动	短路	沾污、腐蚀	输出功率测试	
MK5.255.081	NC11216C-3436	信号放大	无输出	引线与芯片连接不良	输出功率测试	
MK5.255.081	NC11216C-3436	信号放大	短路	沾污、腐蚀	输出功率测试	
MK5.255.081	SI8499	开关	开路	金属化合物形成	输出功率测试	
MK5.255.081	SI8499	开关	短路	沾污、腐蚀	输出功率测试	
MK5.255.081	SI8499	开关	参数漂移	水分侵入	输出功率测试	
MK5.255.081	MCL4151-TR	稳压	开路	金属化合物形成	输出功率测试	
MK5.255.081	MCL4151-TR	稳压	短路	沾污、腐蚀	输出功率测试	
MK5.255.081	MCL4151-TR	稳压	参数漂移	水分侵入	输出功率测试	
MK5.255.081	LT3015EDD#TRPBF	电平转换	开路	引线连接不良	输出功率测试	
MK5.255.081	LT3015EDD#TRPBF	电平转换	短路	腐蚀	输出功率测试	
MK5.255.081	LT3015EDD#TRPBF	电平转换	退化	绝缘老化	输出功率测试	
MK5.255.081	P024F048T12AL	电平转换	开路	引线连接不良	输出功率测试	
MK5.255.081	P024F048T12AL	电平转换	短路	腐蚀	输出功率测试	
MK5.255.081	P024F048T12AL	电平转换	退化	绝缘老化	输出功率测试	
MK5.255.081	RMK2012	信号衰减	开路	材料损坏、引脚断开	输出功率测试	
MK5.255.081	RMK2012	信号衰减	参数漂移	腐蚀	输出功率测试	
MK5.255.081	GCT41G	电源滤波	开路	介质异常	输出功率测试	
MK5.255.081	GCT41G	电源滤波	短路	陶瓷裂纹、银迁移	输出功率测试	
MK5.255.081	GCT41G	电源滤波	参数漂移	水分侵入	输出功率测试	

表2 组件加速贮存测试时间
Tab.2 Accelerated storage test schedule of modules

测试节点	测试时间/h	测试节点	测试时间/h
1	300	9	3 700
2	600	10	4 200
3	900	11	4 500
4	1 200	12	4 800
5	1 700	13	5 100
6	2 200	14	5 400
7	2 700	15	5 700
8	3 200	16	6 000

表3 组件加速温度点及样本数
Tab.3 Acceleration temperature points of modules and number of samples

温度/℃	样本数	测试次数
105	3	16
90	3	16
80	3	16
70	3	16

2.2 组件试验结果

微波功率放大组件加速贮存试验完成后,开盖进行内部质量检查。通过内部质量检查可以看出,微波功率放大组件在经历加速贮存试验后,内部无明显变

色,器件外观无损伤,焊锡无熔融,无多余物,无锡须,有机材料无融化现象,如图2所示。

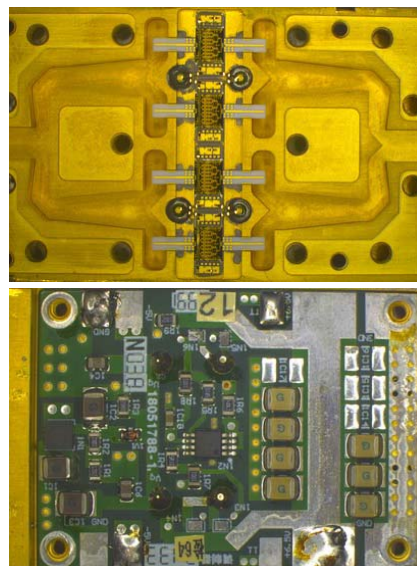


图2 微波功率放大组件内部质量检查照片
Fig.2 Photograph of internal quality inspection of microwave power amplification module

微波功率放大组件加速贮存试验中,在105、90、80、70℃试验温度下均测试(3只)16次,共获取16组测试数据。试验过程中未出现失效,输出功率在合格范围内,输出功率有一定下降趋势,如图3所示。

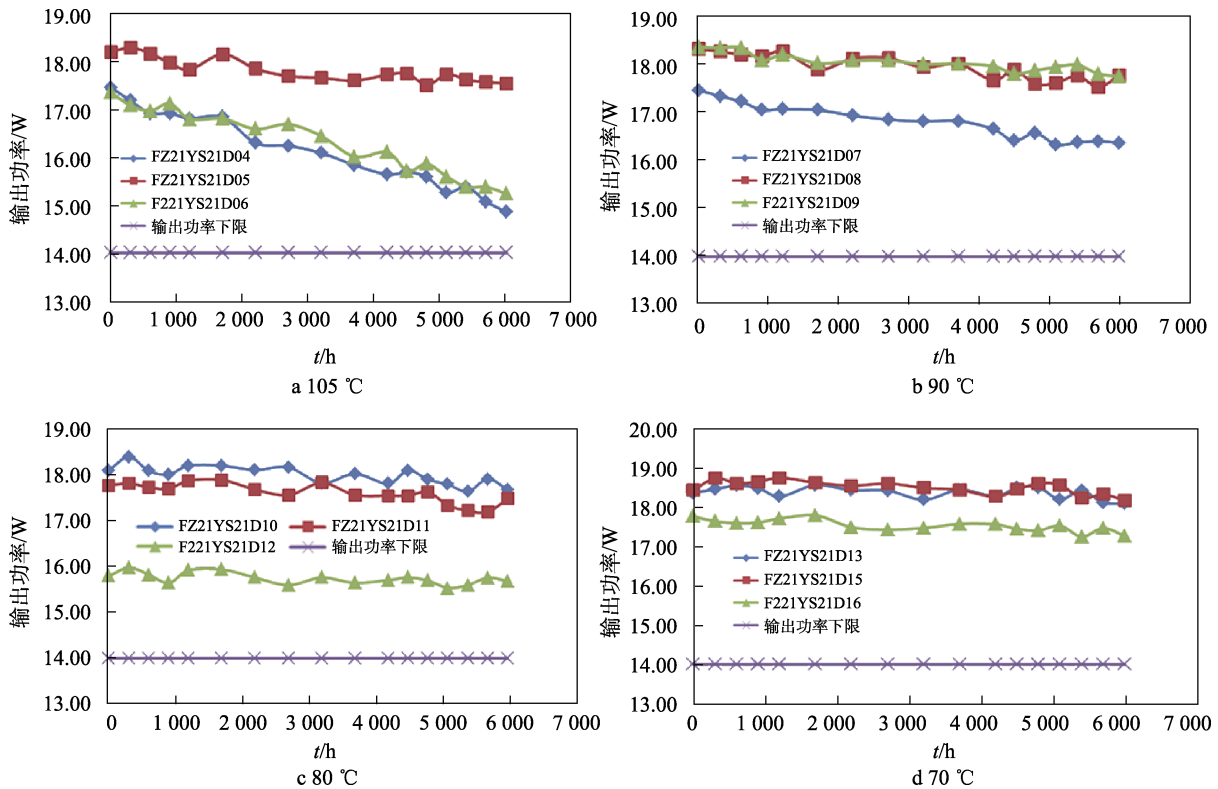


图 3 微波功率放大组件输出功率测试数据
Fig.3 Output power test data of microwave power amplification modules

3 加速贮存数据分析评估方案

3.1 总体方案

通过加速贮存试验得到的是产品测试数据, 还需要进行数据处理及评估得出加速因子、激活能以及产品的可靠性寿命。本文采用退化轨迹法得出产品伪寿命, 然后基于伪寿命分布模型估计出寿命分布参数, 进行贮存期评估, 最终得出加速因子、激活能以及产品的贮存寿命等评估结果。

对恒定应力加速退化数据建模时, 确定产品伪寿命的分布模型是非常重要的环节, 直接影响到寿命预测结果的准确性。传统基于伪寿命分布的建模方法限于每个温度点下样本容量不足, 容易出现伪寿命值最优拟合分布模型不一致的问题, 会导致无法选出合适的分布模型。

文中对试验数据的处理采用基于性能退化模型参数折算的方法, 利用性能退化模型的参数与加速应力之间的关系进行建模, 通过参数折算可获得样本在等效实际贮存条件下的伪寿命值, 相当于扩大了进行最优分布模型拟合的样本数, 从而避免了误选择产品寿命分布类型^[21-22]。总体方案如图 4 所示。

3.2 性能退化建模

产品在使用过程中, 在环境的影响下, 性能按一定规律退化。对产品使用过程中的参数进行监测, 可

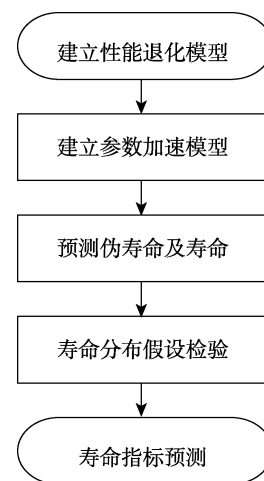


图 4 基于性能退化模型参数折算方法
Fig.4 Parameter discounting method based on the performance degradation model

得到产品在时间维度上的性能退化数据, 通过相关方法对性能退化数据进行拟合, 可以得出单个产品的性能退化轨迹。组件级产品的性能退化轨迹模型基于退化表征量与时间的关系来拟合表征产品的退化过程, 如图 5 所示。

基于退化轨迹的建模方法是产品在相同的退化模型基础上, 对其进行退化数据拟合。由于样本差异性, 每个样本拟合得到不同的模型参数值。一般地, 产品的退化轨迹函数有直线型、指数型、幂律型等。

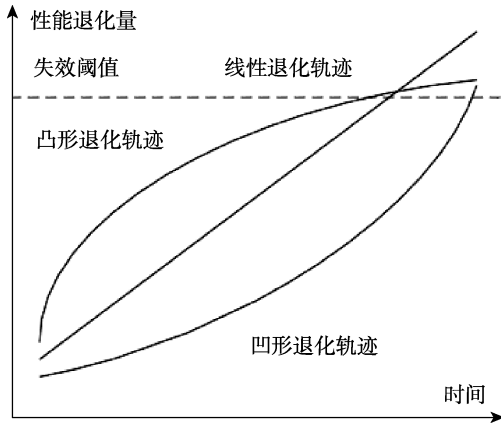


图5 性能退化轨迹类型

Fig.5 Types of performance degradation trajectories

1) 直线模型。只有1个自变量，且自变量和因变量之间具有线性相关关系，这样的模型称为一元线性模型，其数学方程式为：

$$y_{ji} = a_j t_{ji} + b_j \quad (1)$$

式中： y_{ji} 表示性能退化参数； t_{ji} 为试验时间； a_j 、 b_j 为退化模型参数。由于退化轨迹是单个试验样品在某一应力水平下性能参数随时间变化的轨迹，所以 m 个样本有 m 条性能退化轨迹。

式(1)中参数的最小二乘估计为^[21-22]：

$$\begin{cases} \hat{a}_j = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{ji} - \bar{t}_j)(y_{ji} - \bar{y}_j)}{\sum_{i=1}^n (t_{ji} - \bar{t}_j)^2} \\ \hat{b}_j = \bar{y}_j - \hat{a}_j \bar{t}_j \end{cases} \quad (2)$$

2) 指数模型。取产品参数变化量 $\Delta y_{ji} = y_{ji} - y_{j0}$ ，则指数模型的数学方程式为：

$$\Delta y_{ji} = a_j \exp(b_j t_{ji}) \quad (3)$$

对其作对数变换，得：

$$\ln(\Delta y_{ji}) = b_j t_{ji} + \ln(a_j) \quad (4)$$

令 $y'_{ji} = \ln(\Delta y_{ji})$ 、 $a'_j = \ln(a_j)$ ，则式(4)变为一元线性方程，可转化为线性模型求解。

3) 幂律模型。取产品参数变化量 $\Delta y_{ji} = y_{ji} - y_{j0}$ ，则幂律模型的数学方程式为：

$$\Delta y_{ji} = a_j (t_{ji})^{b_j} \quad (5)$$

对其作对数变换，得：

$$\ln(\Delta y_{ji}) = b_j \ln(t_{ji}) + \ln(a_j) \quad (6)$$

令 $y'_{ji} = \ln(\Delta y_{ji})$ ， $t'_{ji} = \ln(t_{ji})$ ， $a'_j = \ln(a_j)$ ，则式(6)变为一元线性方程，可转化为线性模型求解。

上述模型拟合程度优劣由决定系数 R^2 来度量，它表示预测和回归变量的相关程度，计算公式见式(7)。

$$R_j^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{ji} - \hat{y}_{ji})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2} \quad (7)$$

式中： y_{ji} 表示第 j 个产品实际测试值； \hat{y}_{ji} 表示回归预测值； \bar{y}_j 表示第 j 个产品测试均值。 R^2 的取值范围在0~1， R^2 越高，表示回归预测偏差越小，预测的准确性越高。

若组件在 t_i 时间测试正常，则表明产品寿命大于该测试时间，可以拟合得出参数变化趋势函数 $\theta_j = f(t)$ 。根据上述参数变化趋势函数，可以设想当未来测试参数超出失效阈值 θ_f 的时间，如图6中阴影部分对应的横坐标即为组件寿命 $t_L = t(\theta = \theta_f)$ 。

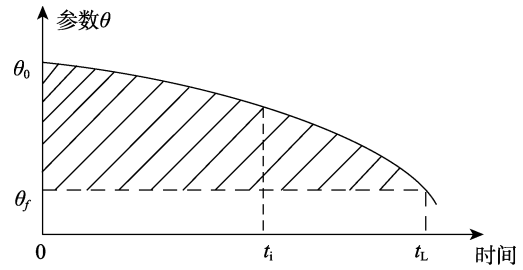


图6 产品寿命预测示意图

Fig.6 Schematic diagram of product life prediction

3.3 温度加速模型

组件从出厂经过贮存、运输、使用到失效的全寿命周期，始终在进行缓慢的物理化学变化。实践证明，温度升高，元器件退化的物理化学反应加快，加速失效过程。阿伦尼斯模型表明，温度应力与化学反应速率之间的联系，为加速贮存试验提供了理论依据。

本文中以温度作为加速应力，故采用阿伦尼斯模型^[23]，其一般方程式为：

$$\frac{dM}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a}{k_0 T}\right) \quad (8)$$

加速因子计算公式为：

$$A = \frac{t_u}{t_e} = \exp\left[\frac{E_a}{k_0} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_e}\right)\right] \quad (9)$$

式中： $\frac{dM}{dt}$ 为化学反应速率； A 为常数； E_a 为激活能，eV； k_0 为波尔兹曼常数， $k_0=8.617 \times 10^{-5}$ eV/K。

当元器件在 t_0 时刻处于正常状态数 M_0 ， t_1 时刻处于失效状态数 M_1 ，如果温度与时间无关，则积分式(9)得：

$$\ln t = \ln \frac{M_1 - M_0}{A} + \frac{E_a}{k_0 T} = b + \frac{k}{T} \quad (10)$$

式中： t 为元器件寿命； T 为热力学温度。

若令 $y=\ln t, x=1/T$, 上述公式同样具有 $y=kx+b$ 的线性形式, 同理可用最小二乘法求解。当获取上述公式中的参数估计值后, 可以求出加速因子和激活能。利用试验温度下可靠度为 0.5、0.9 的寿命评估值, 求出常温下 2 个可靠寿命, 就可以作出常温下的可靠寿命曲线, 从而获得任意可靠度下的寿命。

3.4 参数的加速模型

不失一般性, 设退化轨迹函数为幂律型, 则:

$$g(t_{ijk}; \theta) = g(t_{ijk}; a, b) = a \cdot t_{ijk}^b \quad (11)$$

式中: a, b 为未知参数; $\theta=(a, b)$ 。对于加速退化试验中的每一个产品, 可通过其测量值 (y_{ji}, t_{ji}) , 得到退化轨迹函数的参数估计值 $\hat{\theta}_{jk}$, 方法见 3.2 节。

根据 Pieruschka (皮尔什卡) 假定, 产品改变应力水平仅仅改变模型中的参数。据此, 可推断参数 a 应该随着应力变化而改变, 参数 b 决定着产品退化路径的形状, 应该保持不变。假设加速应力为温度 T , 选择 Arrhenius 方程作为加速模型, 则可设:

$$a(T) = \exp(\gamma_1 - \gamma_2 / T), b(T) = b \quad (12)$$

式中: γ_1, γ_2 为待定系数。

加速因子一个较为规范的定义: 当产品在不同的应力水平下具有相等的平均退化量 d 时, 将其退化时间的比值定义为应力水平之间的加速因子, 见式 (13)。

$$A_{k,h} = t_{d,h} / t_{d,k} \quad (13)$$

式中: $A_{k,h}$ 为应力 T_k 相对于应力 T_h 的加速因子; $t_{d,k}, t_{d,h}$ 分别为产品在 T_k, T_h 下的平均退化量达到 d 的时间。平均退化量可分别由 $g_k(t; a_k, b_k)$ 和 $g_h(t; a_h, b_h)$ 表示, 当平均退化量都为 d 时, 则有:

$$d = a_k (t_{d,k})^{b_k} = a_h (t_{d,h})^{b_h} \quad (14)$$

将式 (14) 代入式 (13), 则有:

$$A_{k,h} = \left(\frac{d}{a_h} \right)^{\frac{1}{b_h}} / \left(\frac{d}{a_k} \right)^{\frac{1}{b_k}} \quad (15)$$

如要保证 $A_{k,h}$ 为与 d 无关的常数, 则需要满足:

$$b_k = b_h, a_k / a_h = (A_{k,h})^{b_k} \quad (16)$$

由式 (16) 可知, 参数 b 不随着应力改变而变化, 参数 a 与加速应力相关, 描述了产品在不同应力水平下的退化速率, 故参数 a, b 与温度 T 的关系可表示为式 (13) 中形式。

由各产品的参数估计值 $\hat{\theta}_{jk} = (a_{jk}, b_{jk})$, 通过最小二乘法得到待定系数的估计值 $\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2$ 。设 a_{jk} 与 b_{jk} 在工作应力水平下的折算值分别表示为 a_{h0}, b_{h0} ($h=1, 2, \dots, N$), N 为产品总数, 则 a_{h0} 可由式 (17) 解出。

$$\frac{a_{jk}}{a_{h0}} = \exp \left[\hat{\gamma}_2 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_k} \right) \right] \quad (17)$$

参数 b 值与加速应力无关, 在各应力水平下应保持不变, b_{h0} 取为 b_{jk} 的平均值。由参数折算值 $\hat{\theta}_{h0} = (a_{h0}, b_{h0})$ 和失效阈值 D , 可计算出各产品在工作应力水平下的伪寿命值 ξ_{h0} 。

3.5 寿命分布模型及参数估计

通过性能退化模型对一组产品的寿命逐个进行预测计算, 这些寿命值具有一定的分布, 可以利用这些数据拟合出这组产品的寿命分布模型, 从而得出一定可靠度下的组件总体寿命, 寿命分析示意图如图 7 所示。通过性能测试数据, 可以拟合出每个样本的退化轨迹方程, 由此可以外推得到产品在正常工作条件下的性能退化模型。通过该性能退化模型, 很容易得出该性能从初始值 θ_0 到达失效阈值 θ_f 的时间。该时间就是产品该性能值在某特定应力下的失效时间, 即贮存寿命。依次得出各个样本的外推失效数据, 采用传统的方法, 通过分布假设检验和参数估计, 得到产品的寿命分布, 从而得出可靠寿命评估结果。一般的寿命分布有 Norm (正态) 分布、Lognorm (对数正态) 分布、Weibull (威布尔) 分布、Gamma (伽马) 分布、Expon (指数) 分布等 5 种, 分别拟合出产品的 5 种分布模型, 然后通过图形符合性检验、拟合优度检验选择最佳模型进行贮存寿命评估。

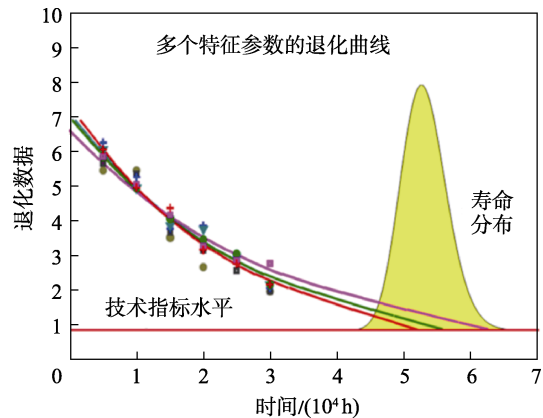


图 7 组件贮存寿命评估
Fig.7 Assessment of module storage life

3.6 分布的假设检验

Kolmogorov-Smirnov 检验 (柯尔莫哥洛夫-斯米尔洛夫检验, 亦称 Ks 检验) 是一种连续的一维概率分布均等性的非参数检验, 可以对样本是否服从指定的分布模型进行假设检验, 且可用于确定与样本最优拟合的分布模型, 还能根据 Ks 值来选择最佳分布模型。Ks 统计量的计算见式 (24)、(25) [24-25]。

$$Ks = \max_x |F_n(x) - F(x)| \quad (24)$$

或:

$$Ks = \max_{1 \leq i \leq N} \left[F(Y_i) - \frac{i-1}{N}, \frac{i}{N} - F(Y_i) \right] \quad (25)$$

式中： $F_n(x)$ 为经验分布函数； $F(x)$ 为估计参数后的累积分布函数； N 为检验样本的个数。当利用 Ks 统计量进行假设检验时，设显著性水平为 0.05，如果得到统计量的 $p > 0.05$ ，则可以得出伪寿命值服从指定分布模型的结论，否则认为伪寿命值不符合指定分布模型。

4 微波功率放大组件试验数据分析评估

4.1 退化轨迹拟合

按照有退化趋势的数据分析方法对发射机功率模块测试数据进行处理。对全部样本测试值用最小二乘法进行拟合，得出退化轨迹方程，分别计算决定系数 R^2 的平均值，进行拟合度校验，结果见表 4。

表 4 微波功率放大组件试验数据拟合度结果
Tab.4 Microwave power amplification module test data fitting results

拟合方式	幂函数	指数函数	线性
模型	$y=ax^b+c$	$y=a \cdot \exp(bx)+c$	$y=ax+b$
平均 R^2	0.895	0.893	0.889

从拟合度计算结果看出，采用幂函数拟合功率模块输出功率退化轨迹较为合适，拟合的幂函数参数值见表 5。

表 5 拟合的幂函数参数值
Tab.5 Values of fitted power function parameters

编号	a	b	c
MK04	-3.297	0.87	17.43
MK05	-0.850	0.90	18.18
MK06	-3.633	1.47	17.18
MK07	-1.316	0.82	17.28
MK08	-1.021	1.31	18.20
MK09	-0.738	0.81	18.31
MK10	-0.771	1.38	18.22
MK11	-1.046	1.30	17.94
MK12	-0.184	1.33	15.80
MK13	-0.166	1.23	18.41
MK15	-0.372	1.14	18.61
MK16	-0.636	1.13	17.76

相对于基准环境温度 25 ℃，通过最小二乘法解得 $(\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2) = (19.24, 6.989.78)$ ，然后可计算出折算系数： $B_{1,0}=0.007, B_{2,0}=0.015, B_{3,0}=0.026, B_{4,0}=0.046$ 。

加速因子计算公式为：

$$A_{h0} = \left(\frac{a_h}{a_0} \right)^{1/b} = \left(\frac{1}{B_{h0}} \right)^{1/b} = \exp \left[\frac{E_a}{k_0} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_h} \right) \right] \quad (26)$$

通过式 (26)，可计算得出激活能 $E_a=0.60$ eV，各试验温度下功率模块加速因子见表 6。

表 6 各试验温度下功率模块加速因子
Tab.6 Acceleration factors for power modules at each test temperature

序号	温度/模型参数/℃	加速因子
1	105	77.3
2	90	39.6
3	80	24.5
4	70	14.8

通过折算系数，进一步可得退化轨迹参数折算值 a_{h0} ，取平均 b 值为 1.14，计算常温下对应的伪寿命预测值 ζ_{h0} ，见表 7。

表 7 功率模块退化轨迹信息
Tab.7 Power module degradation trajectory information

编号	a_{h0}	ζ_{h0}/a
MK04	-0.023 13	80.6
MK05	-0.005 96	313.5
MK06	-0.025 49	72.2
MK07	-0.019 81	92.3
MK08	-0.015 37	140.7
MK09	-0.011 11	187.8
MK10	-0.020 02	106.4
MK11	-0.027 15	75.7
MK12	-0.004 78	181.2
MK13	-0.007 67	260.8
MK15	-0.017 19	130.4
MK16	-0.029 39	70.4

4.2 寿命分布拟合及检验

作出上述寿命累积分布图，并使用 Ks 统计量对 ζ_{h0} 进行最优拟合检验，得到 Ks 值，见图 8 和表 8。可以看出， ζ_{h0} 最优服从 Lognorm 分布，可选择 Lognorm 分布作为产品贮存寿命分布模型。

按照上述 Weibull 分布及参数值，得到发射机功率模块贮存可靠性模型：

$$R(t) = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(t - \mu)}{\sigma} \right] = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(t - 125.69)}{0.49} \right] \quad (27)$$

可计算得出 25 ℃下，功率模块贮存中位寿命评估值 $t_{0.5}=125.69$ a，可靠度 0.9 下的贮存寿命为 $t_{0.5}=67.1$ a。贮存可靠度曲线见图 9。

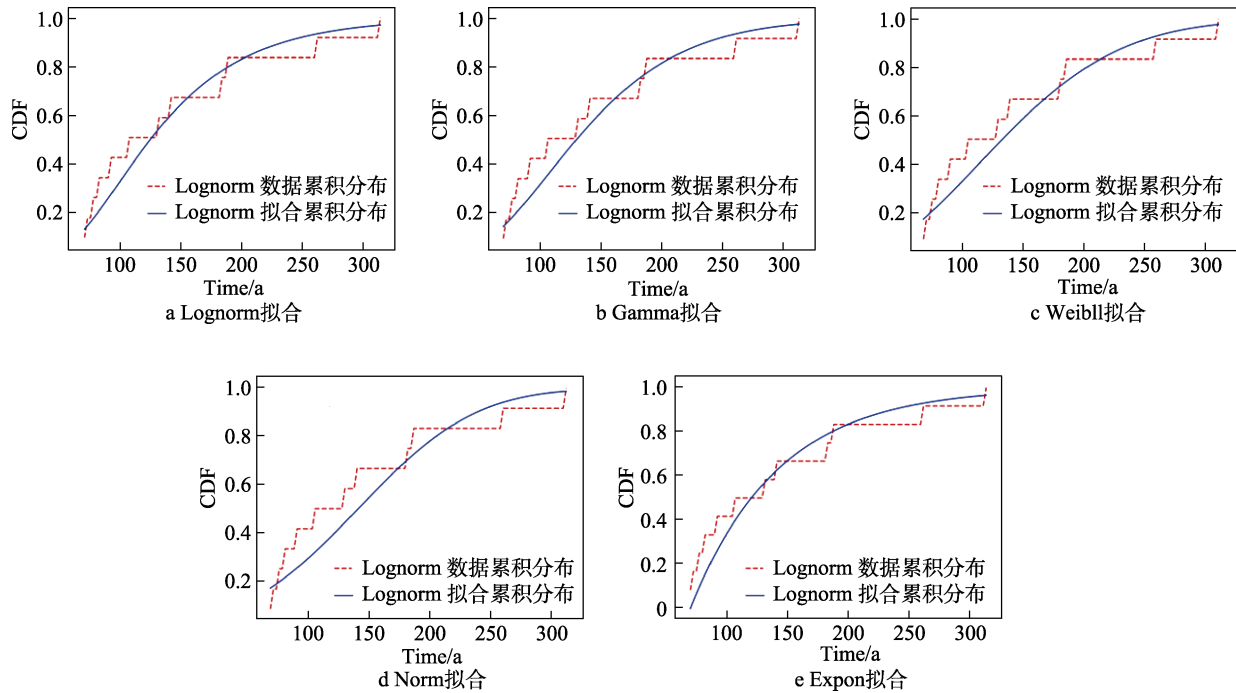


图 8 寿命累积分布

Fig.8 Cumulative life span distribution: a) Lognorm fitting; b) Gamma fitting; c) Weibll fitting; d) Norm fitting; e) Expon fitting

表 8 ζ_{h0} 在各分布模型下的 Ks 值
Tab.8 Ks values for ζ_{h0} under each distribution model

排序	模型名称	估计参数	Ks 值	p	通过检验
0	Lognorm	(0.49, 0.0, 125.69)	0.152	0.907	Yes
1	Gamma	(4.11, 0, 34.74)	0.160	0.874	Yes
2	Weibull	(2.03, 0, 162.20)	0.168	0.835	Yes
3	Norm	(142.67, 75.93)	0.184	0.750	Yes
4	Expon	(70.4, 72.27)	0.202	0.643	Yes

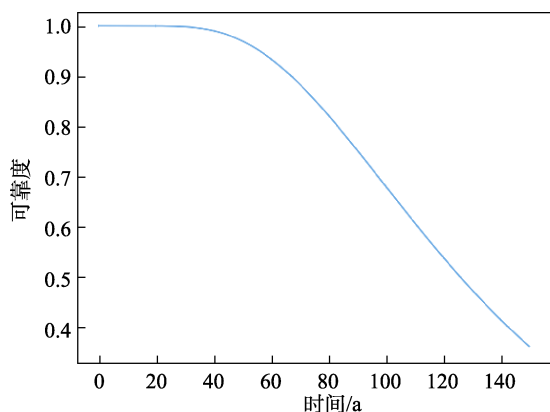


图 9 发射机功率模块贮存可靠性曲线

Fig.9 Transmitter power module storage reliability curve

5 结语

本文在总结微波功率放大组件加速贮存试验数据的基础上, 开展了加速贮存数据处理及寿命评估, 应用多种退化轨迹拟合寻优、基于性能退化模型参数折算建模、多种寿命分布建模及拟合优度检

验等技术, 给出了符合工程预期的微波功率放大组件可靠寿命评估值。本文中的加速贮存数据处理方法和模型可为电子组件的贮存退化数据处理提供参考。

参考文献:

- [1] 李久祥. 导弹贮存试验获取最佳效益的途径[J]. 质量与可靠性, 2002(2): 34-36.
LI Jiu-xiang. Ways to Get the Best Benefit from Missile Storage Test[J]. Quality and Reliability, 2002(2): 34-36.
- [2] 陆祖建, 朱三可, 齐俊臣. 论导弹贮存延寿研究的五个结合[J]. 质量与可靠性, 2002(5): 36-39.
LU Zu-jian, ZHU San-ke, QI Jun-chen. On Five Combinations of Missile Storage Life Extension Research[J]. Quality and Reliability, 2002(5): 36-39.
- [3] 李海波, 张正平, 黄波, 等. 导弹贮存试验技术与贮存可靠性评估方法研究[J]. 质量与可靠性, 2006(6): 20-23.
LI Hai-bo, ZHANG Zheng-ping, HUANG Bo, et al. Research on Missile Storage Test Technology and Storage

- Reliability Evaluation Method[J]. *Quality and Reliability*, 2006(6): 20-23.
- [4] 王登强, 杨梓敬, 刘小庆, 等. 延长聚合物发光二极管工作寿命的研究进展[J]. *合成材料老化与应用*, 2019, 48(5): 115-121.
WANG Deng-qiang, YANG Zi-xin, LIU Xiao-qing, et al. Research Progress in Improving the Lifetime of Polymer Light-Emitting Diodes[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2019, 48(5): 115-121.
- [5] 石颀, 孔维相, 袁晨翔, 等. 基于统计检验的光电耦合器寿命预测模型研究[J]. *电子元件与材料*, 2020, 39(4): 68-74.
SHI Jie, KONG Wei-xiang, YUAN Chen-xiang, et al. Research on Life Prediction Model of Optocoupler Based on Normal Test[J]. *Electronic Components and Materials*, 2020, 39(4): 68-74.
- [6] 胡卫东, 覃玉惠. 铝电解电容器纹波加速寿命试验探讨[J]. *环境技术*, 2018, 36(2): 9-12.
HU Wei-dong, QIN Yu-hui. Discussion on Accelerated Life Test of Ripple Current of Aluminum Electrolytic Capacitor[J]. *Environmental Technology*, 2018, 36(2): 9-12.
- [7] 肖坤, 顾晓辉, 彭琛. 基于恒定应力加速退化试验的某引信用 O 型橡胶密封圈可靠性评估[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(16): 62-69.
XIAO Kun, GU Xiao-hui, PENG Chen. Reliability Evaluation of the O-Type Rubber Sealing Ring for Fuse Based on Constant Stress Accelerated Degradation Testing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(16): 62-69.
- [8] 牛跃听, 穆希辉, 姜志保, 等. 自然贮存环境下某型加速度计贮存寿命评估[J]. *中国惯性技术学报*, 2014, 22(4): 552-556.
NIU Yue-ting, MU Xi-hui, JIANG Zhi-bao, et al. Storage Life Assessment of an Accelerometer under Natural Storage Environment[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(4): 552-556.
- [9] 张建平, 王琛, 李文彬, 等. 对数正态分布下基于 LSM 航空陀螺电机寿命预测[J]. *机械设计*, 2016, 33(9): 92-95.
ZHANG Jian-ping, WANG Chen, LI Wen-bin, et al. Life Prediction of Aircraft Gyro Motor Based on LSM under Lognormal Distribution[J]. *Journal of Machine Design*, 2016, 33(9): 92-95.
- [10] 丁少娜, 冯诚, 陈毓, 等. 基于性能退化数据分析的训练装备精度保持性评估[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(3): 30-34.
DING Shao-na, FENG Cheng, CHEN Yu, et al. Assessment of Precision Retention of Training Equipment Based on Performance Degradation Data Analysis[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(3): 30-34.
- [11] 王奉涛, 刘晓飞, 邓刚, 等. 基于长短期记忆网络的滚动轴承寿命预测方法[J]. *振动测试与诊断*, 2020, 40(2): 303-309.
WANG Feng-tao, LIU Xiao-fei, DENG Gang, et al. Remaining Useful Life Prediction Method for Rolling Bearing Based on the Long Short-Term Memory Network[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(2): 303-309.
- [12] 陈津虎, 朱曦全, 胡彦平, 等. 航天电子产品加速贮存试验技术综述[J]. *强度与环境*, 2015, 42(5): 11-18.
CHEN Jin-hu, ZHU Xi-quan, HU Yan-ping, et al. Summarization on Space Electronic Products Accelerated Storage Test Technology[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2015, 42(5): 11-18.
- [13] 张春华, 温熙森, 陈循. 加速寿命试验技术综述[J]. *兵工学报*, 2004, 25(4): 485-490.
ZHANG Chun-hua, WEN Xi-sen, CHEN Xun. A Comprehensive Review of Accelerated Life Testing[J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(4): 485-490.
- [14] 陈兵, 李星. 加速寿命试验技术在国内外的工程应用研究[J]. *强度与环境*, 2010, 37(6): 31-38.
CHEN Bing, LI Xing. Research of Accelerated Life Testing Technology Application at Home and Abroad[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2010, 37(6): 31-38.
- [15] 王宇, 王欣汝, 黄进永, 等. 通用电子产品全寿命周期可靠性分析方法[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2017, 35(1): 40-44.
WANG Yu, WANG Xin-ru, HUANG Jin-yong, et al. A Reliability Analysis Method of General Electronic Products during Life Cycle[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2017, 35(1): 40-44.
- [16] 王浩伟. 加速退化数据建模与统计分析方法及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
WANG Hao-wei. Accelerated Degradation Data Modeling and statistical analysis method and Its Engineering Application[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [17] 童雨, 戴瀛, 荣双龙. 基于多元退化机理的弹上雷达导引头状态转移规律及贮存寿命预测技术研究[R]. 北京: 国防科技报告, 2022.
TONG Yu, DAI Ying, RONG Shuang-long. Research on the State Transfer Law and Storage Life Prediction Technology of Missile Radar Seeker Based on Multiple Degradation Mechanisms[R]. Beijing: National Defense Technology Report, 2022.
- [18] 孙权, 冯静, 潘正强. 基于性能退化的长寿命产品寿命预测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
SUN Quan, FENG Jing, PAN Zheng-qiang. Life Prediction Technology of Long-Life Products Based on Per-

- formance Degradation[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [19] 李敏伟, 傅耘, 王丽, 等. 加速贮存寿命试验设计方法研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 58-63.
LI Min-wei, FU Wei, WANG Li, et al. Research on the Design Method of Accelerated Storage Life Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 58-63.
- [20] 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, 30(3): 65-68.
WAN Xi-gan, GONG Jing-jing. Research on Reliability Evaluation Technology Application from ADT[J]. Aerospace Shanghai, 2013, 30(3): 65-68.
- [21] 周林, 赵杰, 冯广飞. 装备故障预测与健康管理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
ZHOU Lin, ZHAO Jie, FENG Guang-fei. Equipment Fault Prediction and Health Management Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [22] 贺国芳. 可靠性数据处理与寿命评估[M]. 北京: 航空兵器编辑部, 1984.
HE Guo-fang. Reliability Data Processing and Life Assessment[M]. Beijing: Aviation Weapons Editorial Department, 1984.
- [23] 陈循, 张春华, 汪亚顺, 谭源源. 加速寿命试验技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, WANG Ya-shun, et al. Accelerated Life Testing Technology And Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [24] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 55-61.
SHENG Zhou, XIE Shi-qian, PAN Cheng-yi. Probability and Mathematical Statistics[M]. 3rd Ed. Beijing: Higher Education Press, 2001: 55-61.
- [25] 吕瑛, 王振宇, 赵岩, 等. 电子元器件加速退化寿命评估方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 230-234.
LYU Ying, WANG Zhen-yu, ZHAO Yan, et al. Study on Accelerated Degradation Life Assessment Method of Electronic Components[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(11): 230-234.

责任编辑: 刘世忠