

## 基于多应力加速退化的机载电子部件可靠性试验方法

王鹏<sup>1a,2</sup>, 田润操<sup>1b</sup>, 杜洪光<sup>1b</sup>, 丛玮<sup>1c</sup>, 张帆<sup>1a,2</sup>, 于光<sup>3</sup>, 杨吕珊<sup>4</sup>

(1. 中国民航大学 a. 科技创新研究院; b. 安全科学与工程学院; c. 电子信息与自动化学院, 天津 300300; 2. 民航航空器适航审定技术重点实验室, 天津 300300; 3. 中国南方航空股份有限公司工程技术分公司新疆分部, 乌鲁木齐 830000; 4. 中国东方航空技术有限公司武汉分公司生产技术部, 武汉 430000)

**摘要:** 可靠性试验是获取基础安全性数据的重要来源之一。考虑机载设备的实际工作环境, 多种应力共同作用导致产品失效且存在复杂的相互作用, 本文提出一种基于多应力广义耦合加速退化的可靠性试验方法, 可以直接获取用于适航符合性验证的基础安全性数据。首先, 建立考虑多应力广义耦合的非线性 Wiener 加速退化模型, 结合相关性分析确定应力耦合形式; 其次, 提出基于多应力加速退化模型的最大似然估计与参数优化方法, 解决多参数估计难题; 最后, 以某机载 LED 芯片为对象开展三应力加速退化试验, 实现寿命评估。结果表明, 相比于传统多应力加速模型, 本文所提方法更贴近实际工况, 误差控制在 1% 以内, 寿命评估精度较高, 可以有效解决基础数据缺失和不准确的现实适航问题。

**关键词:** 适航审定; 民机系统安全性评估; 基础安全性数据; 加速试验技术; 多应力耦合

**中图分类号:** V240.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2024)05-0001-08

## Reliability test method of airborne electronic components based on multi-stress accelerated degradation

WANG Peng<sup>1a,2</sup>, TIAN Runcao<sup>1b</sup>, DU Hongguang<sup>1b</sup>, CONG Wei<sup>1c</sup>, ZHANG Fan<sup>1a,2</sup>,  
YU Guang<sup>3</sup>, YANG Lyushan<sup>4</sup>

(1a. Research Institute of Science and Technology Innovation; 1b. College of Safety Science and Engineering; 1c. College of Electronic Information and Automation, CAUC, Tianjin 300300, China; 2. Key Laboratory of Airworthiness Certification Technology for Civil Aviation Aircraft, Tianjin 300300, China; 3. Xinjiang Branch of Engineering and Technology Affiliate of China Southern Airlines Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 4. Production and Technology Department of Wuhan Branch of China Eastern Airlines Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

**Abstract:** The reliability test is one of the important sources to obtain the basic safety data. Considering the actual working environment of airborne equipment, where multiple stress act together to cause product failure and there are complex interaction, a reliability test method based on accelerated degradation of multi-stress generalized coupling is proposed in this paper, which can directly obtain the basic safety data for airworthiness compliance verification. Firstly, a nonlinear Wiener accelerated degradation model considering multi-stress generalized coupling is established, and the form of stress coupling is determined by combining correlation analysis. Secondly, maximum likelihood estimation and parameter optimization method based on the multi-stress accelerated degradation model is proposed to solve the problem of multi-parameter estimation. Finally a three-stress accelerated degradation test is carried out with an airborne LED chip as the object to realize the life assessment. The results show that, compared with the traditional multi-stress accelerated model, the proposed method is closer to the actual working condition, and the error is controlled within 1%, and the accuracy of life assessment is high, which can effectively solve the real airworthiness problem of missing and inaccurate of basic data.

**Key words:** airworthiness certification; civil aircraft system safety assessment; basic safety data; accelerated test technique; multi-stress coupling

航空产品的安全性分析主要是识别产品所有的潜在风险或失效模式,并确保其能够满足适航规章的安全性需求<sup>[1-3]</sup>。然而,目前航空机载设备国产化正处于起步阶段,基础安全性数据缺失或不完备的问题日益突出,导致安全分析结果无法满足实际要求,或与实际偏差较大,因此,需要一种科学有效的方法获取适航基础安全性数据。在系统安全性评估中,基础安全性数据主要为可靠性的失效率数据,其来源较多,包括可靠性手册、外场运营数据、专家经验、可靠性试验等。

加速试验技术因其环境稳定、贴近真实使用条件等优点,一直以来都是评估可靠性、获取基础安全性数据的重要方法之一<sup>[4-5]</sup>。但随着航空产品可靠性的不断提高,传统的试验技术已不能满足实际工作要求,因此,提高应力水平、综合应力影响和结合退化现象的试验方法成为了行业关注的热点。针对综合多应力的试验技术,魏高乐等<sup>[6]</sup>提出基于多应力的综合加速退化模型。张景元等<sup>[7]</sup>基于广义多应力加速模型,利用加速退化的试验数据研究并确定了智能电表的寿命分布规律。吴晓等<sup>[8]</sup>提出基于多应力综合加速模型的民机起落架可靠性试验和评估方法。基于传统加速模型,Nogueira等<sup>[9]</sup>针对LED灯设计了三应力加速试验寿命模型。张慰等<sup>[10]</sup>建立基于反向传播人工神经网络的多应力恒定加速试验寿命预测模型。张国龙等<sup>[11]</sup>通过某型雷达功能印制电路板试验完成了所提三应力综合加速退化模型验证。查国清等<sup>[12]</sup>通过强化试验探索了关键参数应力极限条件下,针对试验数据构建退化轨迹多应力加速模型的方法。上述研究提出了适用于特定设备或元器件的双应力和三应力加速试验寿命模型,可以成功预测产品寿命的相关指标。

针对结合退化过程的试验技术,许多学者通过试验方法获取退化数据,然后将其推广到寿命分析的相关研究中<sup>[13-14]</sup>。维纳过程是基于退化数据进行建模的主流方法之一,其应用最为广泛。Zhang等<sup>[15]</sup>探索了维纳退化过程中涉及的非线性、多源变异性、协变量和多元变量。张帆等<sup>[16]</sup>针对复杂机载系统中二元共载组件提出了考虑退化速率相互作用的两阶段维纳退化模型。刘小平等<sup>[17]</sup>针对基于维纳过程的退化数据建模和可靠性分析方法做了深入研究,发现目前的理论研究并没有将退化分析和多应力试验技术结合起来。基于此,本文提出一种考虑综合应力环境效应的多应力加速退化试验技术,以期有效地获取相关组件的可靠性指标,为国产机载设备提供充足、准确的基础安全性数据,从而解决数据缺失和不完备的问题。

本文提出基于多应力广义耦合加速退化试验的适航基础安全性数据获取方法,包括以下步骤:①基于产品自身实施多应力加速退化试验,获取数据进行拟合优度检验;②从试验数据和信息出发,建立特定产品的多应力广义耦合加速退化模型,结合相关性分析确定具体耦合形式;③建立多参数估计模型,代入试验数据求解模型参数;④基于失效阈值的寿命分布,外推正常工作应力下产品的寿命指标,获取该产品的基础安全性数据。

## 1 获取基础安全性数据的典型试验方法

可靠性试验方法是获取适航基础安全性数据的有效途径之一。然而,由于航空产品自身运行环境愈加复杂,如何科学合理地利用试验分析手段补充基础安全性数据,对于航空机载设备的系统安全性评估和型号审查具有重要意义。

为了确保通过试验方法获取航空产品零部件、电子元件或电子设备的基础安全性数据的有效性,主要需满足以下两条要求:

(1)确认对试验件进行一致性分析,对于不一致的试验件需要进行包括结构、材料以及制造加工工艺等方面的相似性评估;

(2)保证试验的有效性和完整性。

目前,中国民用航空局(简称民航局)提出了包括额定应力试验技术和加速应力试验技术在内的两种试验方法来获取适航基础安全性数据,从而支撑适航审定工作。

### 1.1 额定应力试验技术

额定应力下的寿命评估试验方法是通过试验模拟航空产品的真实使用环境,对其施加应力和载荷以获取产品使用过程中的失效寿命时间或性能退化数据,最后利用统计分析等数学手段评估产品可靠性的一种途径。

为了保证正常应力下通过可靠性试验获取的基础安全性数据的有效性,需要遵从民航局的审查要求<sup>[18]</sup>,因此在开展试验时要注意以下3点。

(1)确定试验样本。若无特别规定,试验样本数量至少为两件。

(2)确定试验时间。累积时间至少超过初步安全性分析时,该失效模式分配的概率指标所对应的飞行时间。

(3)确定环境应力。可靠性试验剖面应尽可能真

实地按照时序模拟产品在实际使用中经历的最主要的环境应力。

## 1.2 加速应力试验技术

加速应力试验技术的本质是在保持产品本身失效机理不变的情况下,通过加大应力来加速产品的失效和退化,然后根据加速试验的结果和理论模型外推产品的寿命信息,以此作为基础安全性数据的补充。

由于加速应力试验技术加大了原本的应力条件,这使得产品故障加速暴露。因此,在实际开展时除了需要满足正常应力的试验条件,民航局对此提出了更高要求<sup>[18]</sup>,具体如下:

(1)在进行试验前要进行失效模式机理分析,确定主要的影响因素,即加速变量;

(2)确保加速系数的有效性与合理性;

(3)确定试验的应力水平,应力水平的选取不能超过产品的极限应力,以避免带来新的失效模式;

(4)确认故障是否与目标失效模式一致,不一致的需要给出合理保守的数据处理方法。

作为一种理论发展相对成熟、试验技术愈加规范的方法,应力试验已经成为基础安全性数据中一个关键的数据源。然而,随着机载设备国产化的不断发展,新产品的研发、生产工艺的进步导致的试验周期长、经费代价高等一系列问题给传统试验方法带来了巨大的挑战。因此,为解决上述问题,本文提出了一种考虑应力间相互作用的多应力加速退化模型,可以为基础安全性数据的补充提供更为可靠和有效的输入。

## 2 综合应力加速退化试验技术

### 2.1 综合环境效应

根据 DO-160G 标准的描述,机载电子产品在实际使用中会受到各种应力的作用,应力之间存在综合环境效应。统计数据表明<sup>[19]</sup>,机载设备由于环境因素引发的故障占故障总数的 52.7%,在环境引发的故障中,由温度、振动、湿度、沙尘、盐雾、高度和温度冲击导致的故障占比分别为 41.7%、21.6%、19.0%、7.9%、4.0%、3.7%、2.1%,如图 1 所示。

从统计数据中可以看出,导致机载设备故障的环境因素是复杂且多变的,因此,在试验时仅考虑单一应力对机载设备的影响明显不能满足分析精度的需求,需要考虑综合多应力条件下的试验分析结果。另外,由于大多数航空产品的可靠性高,难以获取其失效寿命数据,这也将进一步影响基础安全性分析的结

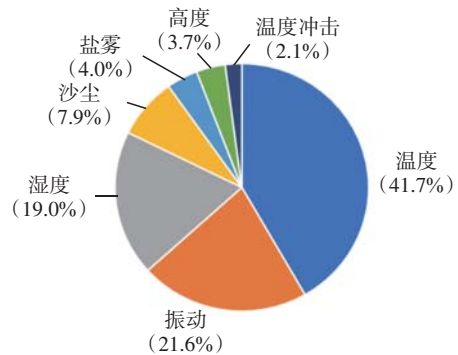


图 1 综合应力下机载设备的环境效应

Fig.1 Environmental effects of airborne equipment under comprehensive stress

果,因此,需采用过程信息丰富的退化数据来解决这一问题。

### 2.2 多应力加速退化试验模型

#### 2.2.1 试验模型的前提假设

1)多应力水平与退化率需满足一定关系

在进行综合多应力加速退化试验时,要确保施加的应力水平不超过产品可承受的最大应力。由于应力测量单位的不同,无法进行统一度量,因此需要变换应力来统一不同测量单位下应力的关系,以消除测量单位的影响<sup>[20]</sup>,产品的退化率  $\eta$  应遵循多应力加速模型,即

$$\ln \eta = f(\mathbf{S}) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{S}$ 为标准化的多应力向量, $\mathbf{S} = (S_1, S_2, \dots, S_i)$ ,其

中  $S_i$  是第  $i$  个应力  $S'_i$  的标准化形式<sup>[18]</sup>,可以表示为

$$S_i = \begin{cases} \frac{S'_i{}^{-1} - S'_{i0}{}^{-1}}{S'_{iH}{}^{-1} - S'_{i0}{}^{-1}} & \text{Arrhenius 模型} \\ \frac{\log(S'_i) - \log(S'_{i0})}{\log(S'_{iH}) - \log(S'_{i0})} & \text{逆幂律模型} \\ \frac{S'_i - S'_{i0}}{S'_{iH} - S'_{i0}} & \text{指数模型} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S'_{i0}$ 为第  $i$  个应力  $S'_i$  的正常基准应力水平; $S'_{iH}$ 为第  $i$  个应力  $S'_i$  的加速基准应力水平; $S'_i$  分别满足 Arrhenius 模型、逆幂律模型、指数模型。

2)多应力试验的应力和观测测量需满足一定条件

一般在多应力加速试验中,采用多应力恒定加速方法促进样品退化和失效,每组试验的测试器件数量、测量时间间隔和频率相同,时间间隔为固定的常数,且每个应力组合水平下的测试次数一致。

设共  $\gamma$  个应力组合,即  $\gamma$  组试验,每组有  $m_k$  个试

验单元进行多应力加速退化试验,共有  $M = \sum_{k=1}^{\gamma} m_k$  个试验单元,每个单元在  $n$  处观测数据,第  $k$  组试验下的第  $j$  个样本在  $i$  处的测量结果为  $t_{ijk}$ ,  $1 \leq k \leq \gamma$ ,  $1 \leq j \leq m_k$ ,  $1 \leq i \leq n$ 。观测退化结果为  $Y_{ijk} = Y(t_{ijk})$ , 即在第  $k$  个应力组合试验下,第  $j$  个产品样本的第  $i$  个观测数值。

3) 失效机理在应力水平的各种组合下不发生改变

试验中施加的最大应力水平不能破坏产品的失效机理,且施加的最小应力水平需要大于产品的正常工作条件要求,即在加速试验的全过程中,在设置不同加速应力的情况下,试验观测的退化增量  $\Delta Y_{ijk} = Y_{ijk} - Y_{(i-1)jk}$  在时间间隔内遵循非线性 Wiener 过程。

### 2.2.2 多应力加速模型

基于 Arrhenius 模型<sup>[21]</sup>提出一种考虑广义耦合关系的多应力加速模型,模型由单应力项和多应力广义耦合项组成。因此,根据式(2)对应力进行标准化后,多应力反应速率关系可表示为

$$\mu(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_p) = \alpha_0 \cdot \exp \left\{ \sum_{r=1}^N \alpha_r S_r + \sum_{\substack{r=1, s=2, r \neq s, r < s, \\ u=N+1, N+2, \dots, N+C_N^2}}^{C_N^2} \alpha_u \varphi_{rs} + \sum_{\substack{r=1, s=2, v=3, r \neq s \neq v, r < s < v, \\ u=N+C_N^2+1, N+C_N^2+2, \dots, N+C_N^3}}^{C_N^3} \alpha_u \varphi_{rsv} + \dots + \alpha_p \varphi_{rsv \dots N} \right\} \quad (3)$$

式中:  $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_p$  为未知参数;  $p = \sum_{k=1}^N C_N^k$  表示所有可能存在的应力单独作用和广义耦合作用的项数;  $N$  为应力数量;  $S_r$  为第  $r$  个标准化应力;  $\varphi$  为不同应力间的广义耦合关系;  $\varphi_{rs}$  为第  $r$  和第  $s$  个应力间可能存在的广义耦合关系,其余为对应数目应力可能存在的关系。

多应力耦合项不一定是单纯的应力相乘关系,需引入广义耦合效应表达。常用函数形式有指数函数和幂函数,其参数在一定范围变化时,可以拟合绝大部分统计模型,广泛用于回归分析和轨迹建模。本文建立广义耦合表达为

$$\varphi = \prod_{k_1=1}^{K_1} \exp(\omega_{k_1} S_{k_1}) \cdot \prod_{k_2=1}^{K_2} (S_{k_2})^{\omega_{k_2}} \cdot \prod_{k_3=1}^{K_3} (\omega_{k_3})^{S_{k_3}} \quad (4)$$

式中:  $\omega_{k_1}, \omega_{k_2}, \omega_{k_3}$  为常数,表示幂次;  $K_1 + K_2 + K_3$  为该耦合项中施加应力的数目。

耦合项需要结合现实工程情况和产品自身失效机理,考虑环境效应进行判定。为确定最优广义耦合多应力加速模型,需要计算不同形式耦合项与退化量的相关性,来衡量样本中两个随机变量是否线性相关。

本文采用皮尔森相关系数用来估计先验寿命数据与耦合项之间的相关性,从而确定最佳的广义耦合表达。

### 2.2.3 多应力加速退化过程

考虑到内部和外部工作环境的随机影响,随机过程模型通常被用来描述产品的性能退化过程,其中, Wiener 过程在退化建模中有着广泛的应用。本文建立考虑多应力广义耦合加速的非线性 Wiener 过程,来描述产品的不确定退化过程。该模型可以识别与应力相关的参数,结合多应力加速模型,有利于加速退化模型的开发。

定义  $Y(t)$  为产品性能在  $t$  时刻的取值,满足

$$Y(t) = Y(0) + \eta \Lambda(t) + \sigma B(\Lambda(t)) \quad (5)$$

式中:  $Y(0)$  为产品的性能初值;  $\Lambda(t)$  为关于时间  $t$  的连续非线性非减时间尺度函数,一般表达为  $\Lambda(t) = t^q$  和  $\Lambda(t) = e^{qt} - 1$ ,  $q$  为等求参数,且  $\Lambda(0) = 0$ ;  $B(\Lambda(t))$  为非线性布朗运动,用来描述退化量在时间轴上的不确定性;  $\sigma$  为非线性 Wiener 过程的退化尺度参数。

由于产品制造工艺、制造材料的差异以及工作环境的动态影响,加速应力可能同时影响随机过程的退化程度和尺度。对于一个产品,在不同工况下固然存在着不同的退化速率,但同时会影响退化扩散的尺度。为了准确描述产品在加速退化试验下的性能变化,将双参数纳入加速情形<sup>[22]</sup>。

考虑多应力加速的情况,将多应力加速广义耦合效应纳入,可得

$$Y(t) = Y(0) + \eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p) \Lambda(t) + \sigma(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p) B(\Lambda(t)) \quad (6)$$

其中,加速效应同时影响退化程度和尺度,即均值和方差

$$\eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p) = \eta_0 \exp \left\{ \sum_{r=1}^N \eta_r S_r + \sum_{\substack{r=1, s=2, r \neq s, r < s, \\ u=N+1, N+2, \dots, N+C_N^2}}^{C_N^2} \eta_u \varphi_{rs} + \sum_{\substack{r=1, s=2, v=3, r \neq s \neq v, r < s < v, \\ u=N+C_N^2+1, N+C_N^2+2, \dots, N+C_N^3}}^{C_N^3} \eta_u \varphi_{rsv} + \dots + \eta_p \varphi_{rsv \dots N} \right\} \quad (7)$$

$$\sigma(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p) = \sigma_0 \exp \left\{ \sum_{r=1}^N \sigma_r S_r + \sum_{\substack{r=1, s=2, r \neq s, r < s, \\ u=N+1, N+2, \dots, N+C_N^2}}^{C_N^2} \sigma_u \varphi_{rs} + \sum_{\substack{r=1, s=2, v=3, r \neq s \neq v, r < s < v, \\ u=N+C_N^2+1, N+C_N^2+2, \dots, N+C_N^3}}^{C_N^3} \sigma_u \varphi_{rsv} + \dots + \sigma_p \varphi_{rsv \dots N} \right\} \quad (8)$$

最终,可得考虑广义耦合的多应力非线性 Wiener

加速退化过程为

$$\Delta Y \sim N(\eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p)\Delta\Lambda(t), \sigma(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)^2\Delta\Lambda(t)) \quad (9)$$

式中,  $N(\cdot)$  表示随机变量服从正态分布。

### 2.3 模型的统计推断分析

#### 2.3.1 寿命外推

假设产品失效阈值为固定值,用  $D$  表示,则产品退化过程首次达到阈值的失效时间  $FHT^{[9]}$  定义为

$$FHT = \inf\{t : Y(t) \geq D | Y(0) < D\} \quad (10)$$

非线性 Wiener 过程的首达时间服从逆高斯分布,因此,广义耦合加速下产品寿命的概率密度函数(PDF, probability density function)、累积分布函数(CDF, cumulative distribution function)分别表示为

$$f(t) = \frac{D}{\sqrt{2\pi\Lambda^3(t) \cdot \sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)}} \times \exp\left(-\frac{(D - \eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p)\Lambda(t))^2}{2\Lambda(t) \cdot \sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)}\right) \frac{d\Lambda(t)}{dt} \quad (11)$$

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p)\Lambda(t) - D}{\sqrt{\sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)\Lambda(t)}}\right) + \exp\left(\frac{2\eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p)D}{\sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)}\right) \times \Phi\left(-\frac{D + \eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p)\Lambda(t)}{\sqrt{\sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)\Lambda(t)}}\right) \quad (12)$$

式中,  $\Phi(\cdot)$  表示标准正态分布的累积分布函数。

特殊地,当退化过程为线性时,PDF 和 CDF 分别表示为

$$f(t) = \frac{D}{\sqrt{2\pi t^3 \sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)}} \times \exp\left(-\frac{(D - \eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p)t)^2}{2t\sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)}\right) \quad (13)$$

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p)t - D}{\sqrt{\sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)t}}\right) + \exp\left(\frac{2\eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p)D}{\sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)}\right) \times \Phi\left(-\frac{D + \eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p)t}{\sqrt{\sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)t}}\right) \quad (14)$$

另外,两种常用形式下的 PDF 表示为

$$f(t) = \frac{Dqe^{qt}}{\sqrt{2\pi(e^{qt} - 1)^3 \sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)}} \times \exp\left(-\frac{(D - \eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p)(e^{qt} - 1))^2}{2(e^{qt} - 1)\sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)}\right) \quad (15)$$

$$\Lambda(t) = e^{qt} - 1$$

$$f(t) = \frac{Dqt^{q-1}}{\sqrt{2\pi t^{3q} \sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)}} \times$$

$$\exp\left(-\frac{(D - \eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p)t^q)^2}{2t^q \sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)}\right) \quad (16)$$

$$\Lambda(t) = t^q$$

#### 2.3.2 参数估计

对于在多应力加速试验中获得的试验数据,需要利用参数估计方法求解模型未知参数,实现寿命指标外推。极大似然估计(MLE, maximum likelihood estimate)法是一种参数估计方法,提供了一种利用给定观测数据评估模型参数的方法。非线性 Wiener 过程的似然函数可表示为

$$L(\mu, \sigma^2) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\sigma^2\pi\Delta\Lambda_i}} \times \exp\left(-\frac{(\Delta Y_i - \eta\Delta\Lambda_i)^2}{2\sigma^2\pi\Delta\Lambda_i}\right) \quad (17)$$

在多应力广义耦合加速模型的基础上,可获取整体 MLE 为

$$L(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p, \sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p, q) = \prod_{k=1}^{\gamma} \prod_{j=1}^{m_k} \prod_{i=1}^n \times \exp\left(-\frac{(\Delta Y_{ijk} - \eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p) \cdot \Delta t_{ijk})^2}{2\sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p) \cdot \Delta t_{ijk}}\right) \quad (18)$$

进一步,为便于求解,可得对数似然函数为

$$\ln L(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p, \sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p, q) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\gamma} m_k n \ln\left(\frac{1}{2\pi}\right) - \sum_{k=1}^{\gamma} m_k n \ln(\sigma(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p)) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\gamma} \sum_{j=1}^{m_k} \sum_{i=1}^n \ln(\Delta t_{ijk}) - \sum_{k=1}^{\gamma} \sum_{j=1}^{m_k} \sum_{i=1}^n \times \frac{(\Delta Y_{ijk} - \eta(\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p) \cdot \Delta t_{ijk})^2}{2\sigma^2(\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p) \cdot \Delta t_{ijk}} \quad (19)$$

在整体试验中,共有  $\gamma$  组试验,每组试验有  $m_k$  个试验件,每个件在试验全程观测  $n$  组数据,  $\Theta = (\eta_0, \eta_1, \dots, \eta_p, \sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_p, q)$  为待求未知参数的向量表示。在参数求解过程中,可令对数 MLE 的每个参数的偏导数为 0,构建优化模型求解。

## 3 案例分析

### 3.1 试验设计和实施

以某型号航空 LED 芯片为例验证本文提出的模型和方法。由该型号 LED 芯片技术手册中的数据可得,其日常使用环境为 25 °C, 50% RH, 日常工作电流为 350 mA, 最大工作电流为 700 mA, 最高工作温度为 120 °C。同时,当 LED 灯的光照强度下降到初始亮度的 50% 时,认为达到失效阈值。

设计三应力加速试验方案:先验退化数据信息和产品指标来自于文献[23]和真实技术手册,主要包括最大的温度应力和电应力水平。参考文献[5]的设计方法,共设计 6 组三应力加速试验,每组试验采用 5 个产品,测试时间间隔为 1 个月,共测试 10 次。试验过程如图 2 所示,施加应力水平组合如表 1 所示。



图 2 LED 芯片的加速退化试验

Fig.2 Accelerated degradation test of LED chip

表 1 三应力加速试验的应力水平设置

Tab.1 Stress level settings for triple stress accelerated test

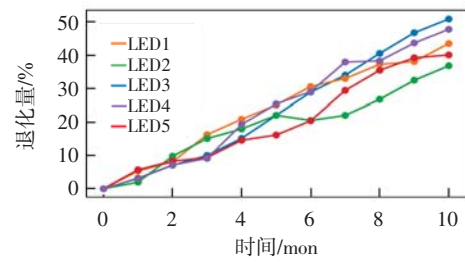
| 试验编号 | 应力水平组合                  |             |                    |
|------|-------------------------|-------------|--------------------|
|      | 温度 $S_1/^\circ\text{C}$ | 湿度 $S_2/\%$ | 电流 $S_3/\text{mA}$ |
| 1    | 110                     | 80          | 450                |
| 2    | 110                     | 80          | 650                |
| 3    | 50                      | 80          | 550                |
| 4    | 50                      | 95          | 450                |
| 5    | 80                      | 95          | 650                |
| 6    | 80                      | 95          | 550                |

综上,在三应力加速试验中,共投入 30 件产品,按评估方案分为 6 组,分别统计每组 5 个被测器件的退化数据。试验 LED 芯片的真实退化数据统计结果如图 3 所示。图中,不同颜色表明不同被测器件的亮度变化百分比,可以看出试验 2 所采用的应力组合更易促进产品退化。

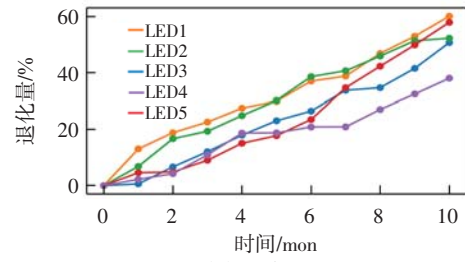
### 3.2 数据分析和建模

经轨迹的对比计算,选择幂函数时均方根误差(RMSE, root mean square error)为 6.191 5,选择指数函数时 RMSE 为 6.193 6,选择幂函数时的 RMSE 最小,因此可知产品的整体退化轨迹更满足幂函数。

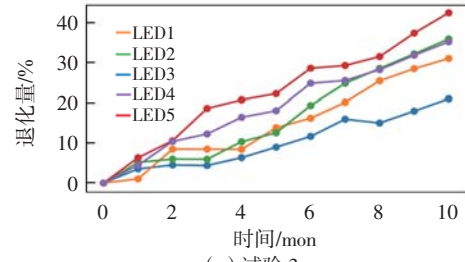
另外,需要进行数据的假设检验以证明数据可以用于分析和统计推断。经夏皮洛-威尔克(Shapiro-Wilk)正态性检验后,数据整体的概率值为 0.898 2,远大于 0.05,因此接受原假设。另外,数据均匀分布在 probability-probability 图(简称 P-P 图)的对角线周围,表明该组数据呈正态分布,满足 Wiener 过程,如图 4 所示。综上所述,可以进一步开展数据分析。



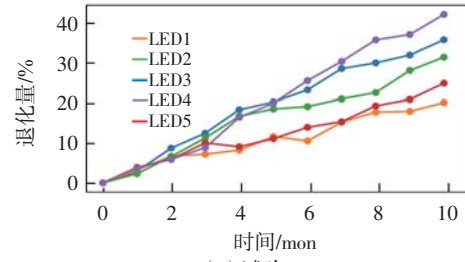
(a) 试验 1



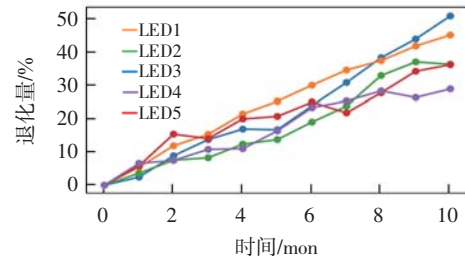
(b) 试验 2



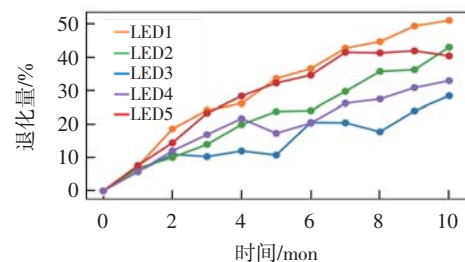
(c) 试验 3



(d) 试验 4



(e) 试验 5



(f) 试验 6

图 3 6 组 LED 芯片的加速退化试验数据

Fig.3 Accelerated degradation test data of 6 groups of LED chips

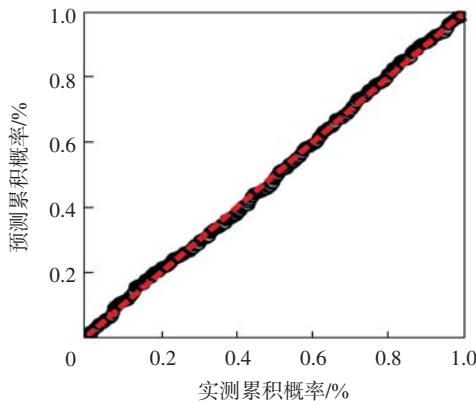


图 4 退化数据的 P-P 图

Fig.4 P-P plot of degradation data

接下来需要判断应力间的广义耦合关系。经综合环境效应分析,LED 芯片在实际工作中,温度、湿度、自身负载因素对寿命的影响占 70%以上。

其中,温度和电流负载会共同加速促进发光材料的老化,温度和湿度会加速造成电路的氧化腐蚀,以上耦合效应均会促进产品退化行为,但是湿度和电负载一般不会产生相互作用<sup>[24]</sup>。因此建立该产品的三应力广义耦合加速退化模型,即

$$\Delta Y \sim N\left(\eta_0 e^{\eta_1 S_1 + \eta_2 S_2 + \eta_3 S_3 + \eta_4 \varphi_{12} + \eta_5 \varphi_{23}} \Delta \Lambda(t), \left(\sigma_0 e^{\sigma_1 S_1 + \sigma_2 S_2 + \sigma_3 S_3 + \sigma_4 \varphi_{12} + \sigma_5 \varphi_{23}}\right)^2 \Delta \Lambda(t)\right) \quad (20)$$

进一步进行耦合关系的相关性分析,表 2 给出了耦合形式的相关性结果,两个随机变量相关性越强,皮尔森系数越接近于 1,经分析可得最优相关性的耦合形式为  $S_1^2 S_2^2$  和  $S_1 \times \exp(S_3)$ ,可以看出相比传统的简单耦合,考虑广义耦合的耦合项与寿命相关性更强,更符合现实情况。

表 2 耦合形式的相关性分析

Tab.2 Correlation analysis of coupled forms

| 参数耦合项 | $\eta$   |          | $\sigma$ |          |
|-------|----------|----------|----------|----------|
|       | $S_{12}$ | $S_{13}$ | $S_{12}$ | $S_{13}$ |
| 广义耦合  | 0.846 6  | 0.999 1  | 0.838 3  | 0.998 9  |
| 传统耦合  | 0.834 6  | 0.983 3  | 0.827 2  | 0.987 0  |

### 3.3 参数估计和寿命外推

进行模型的统计推断,可得每组试验的参数估计结果,如表 3 所示。

进一步,基于退化的统计推断结果,进行加速模型的整体 MLE 求解,可获得同时考虑退化均值和方差加速的 3 种模型的参数估计结果,如表 4 所示。

最后,可外推 LED 芯片在日常使用下的寿命指标,给出不同模型的可靠性评估结果,并对比可靠性

表 3 6 组试验的 Wiener 过程统计推断结果

Tab.3 Statistical inference results of Wiener process for 6 group experiments

| 试验编号 | $\eta$  | $\sigma$ | $q$     |
|------|---------|----------|---------|
| 1    | 3.963 7 | 2.661 7  | 1.006 5 |
| 2    | 5.111 4 | 3.513 6  | 1.168 1 |
| 3    | 3.170 5 | 2.125 1  | 1.055 5 |
| 4    | 3.031 3 | 2.038 7  | 0.967 3 |
| 5    | 4.380 9 | 3.002 3  | 1.147 9 |
| 6    | 3.968 2 | 2.698 6  | 0.985 4 |

表 4 不同模型的整体 MLE 结果

Tab.4 Overall MLE results of different models

| 退化率      | 广义耦合    | 传统耦合     | 不考虑耦合   | 退化尺度参数     | 广义耦合    | 传统耦合     | 不考虑耦合   |
|----------|---------|----------|---------|------------|---------|----------|---------|
| $\eta_0$ | 0.900 9 | 0.602 9  | 0.537 4 | $\sigma_0$ | 0.515 8 | 0.164 7  | 0.080 4 |
| $\eta_1$ | 0.085 3 | 0.575 5  | 0.425 8 | $\sigma_1$ | 0.012 4 | 0.586 0  | 0.431 0 |
| $\eta_2$ | 0.036 3 | 0.267 5  | 0.274 2 | $\sigma_2$ | 0.037 7 | 0.306 0  | 0.321 2 |
| $\eta_3$ | 0.094 3 | 0.222 0  | 0.366 7 | $\sigma_3$ | 0.074 9 | 0.225 1  | 0.395 2 |
| $\eta_4$ | 0.152 3 | -0.233 3 | —       | $\sigma_4$ | 0.196 4 | -0.253 4 | —       |
| $\eta_5$ | 0.162 9 | 0.206 1  | —       | $\sigma_5$ | 0.191 6 | 0.242 4  | —       |

预计中的历史寿命。外推日常工况的寿命评估结果如图 5 所示,从表 4 和图 5 可以看出考虑广义耦合作用的失效累积分布与真实寿命数据最拟合,其中中位寿命的真值为 19.82 mon。

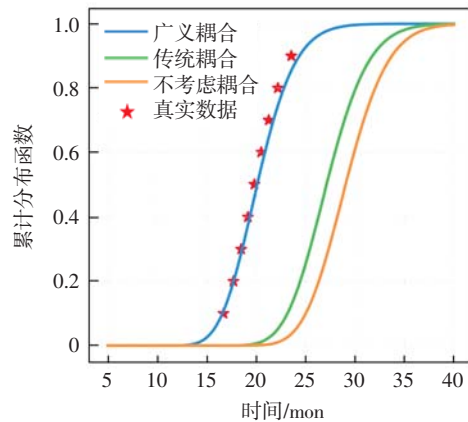


图 5 外推日常工况的寿命评估结果

Fig.5 Extrapolated life assessment results of daily working conditions

为获取 LED 芯片的适航基础安全性数据,需要推断不同方法下的中位寿命,如表 5 所示。可以看出广义耦合模型外推的中位寿命的相对误差较小,更接近中位寿命的真值,更贴合产品实际工作环境。

表 5 不同方法下的中位寿命

Tab.5 Median lifetime under different methods

| 模型    | 中位寿命/mon | 相对误差    |
|-------|----------|---------|
| 广义耦合  | 19.627 9 | 0.008 3 |
| 传统耦合  | 26.744 0 | 0.373 8 |
| 不考虑耦合 | 28.617 3 | 0.470 0 |

## 4 结语

本文提出一种基于多应力加速退化的机载电子部件可靠性试验方法,可以直接快速获取国产机载设备底层零部件的基础安全性数据,主要工作如下:

(1)基于传统加速应力模型,推导出多应力耦合加速作用下退化量与应力水平的关系,其中退化行为的建模采用了非线性 Wiener 过程;

(2)结合先验信息构建广义耦合项,采用相关性分析确定加速模型的具体形式,结合最大似然估计,提出服从非线性 Wiener 退化过程的产品在多应力加速试验后的参数估计和求解方法;

(3)以某型机载 LED 芯片为例,设计三应力加速试验,对方法的正确性和有效性开展验证。经验证,与传统多应力模型相比,该方法更贴近于实际工作环境,且误差控制在 1%以内,有效解决了国产新研机载电子设备的底层部件级基础安全性数据缺失并无法准确获取的问题,可以支持系统安全性评估和适航符合性验证的工作。

未来可以进一步关注试验中存在的不确定性和模型参数的随机性。例如,可以关注在多应力试验中,产品的失效机理和退化是否与实际使用一致。还可以考虑不同的多应力试验设计,例如阶梯应力和渐进应力的试验方案设计等。

## 参考文献:

- [1] 肖女娥, 阎芳, 王鹏. 基于安全论证的民机机载系统安全性评估[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(12): 72-77.
- [2] 马赞, 阎芳, 赵长啸, 等. 民用飞机适航安全性数据追溯性分析与建模[J]. 电讯技术, 2017, 57(9): 1064-1070.
- [3] 张帆, 王睿璇, 肖国松, 等. 基于 HUD 导引功能的审定要求分析[J]. 中国民航大学学报, 2021, 39(2): 42-46.
- [4] 张帆, 田润操, 王鹏, 等. 考虑广义耦合的多应力加速寿命评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(10): 3350-3361.
- [5] LIN K S, CHEN Y X, XU D. Reliability assessment model considering heterogeneous population in a multiple stresses accelerated test [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 165: 134-143.
- [6] 魏高乐, 陈志军. 基于多应力综合加速模型的产品可靠性评估方法[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(2): 24-29.
- [7] 张景元, 何玉珠, 崔唯佳. 基于多应力退化模型的智能电表可靠寿命预估[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(8): 1662-1669.
- [8] 吴晓, 苏茂根, 彭超峰. 民机起落架恢复任务的可靠性试验方案研究[J]. 中国民航大学学报, 2023, 41(1): 7-11.
- [9] NOGUEIRA E, ORLANDO V, OCHOA J, et al. Accelerated life test of high luminosity blue LEDs[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 64(9): 631-634.
- [10] 张慰, 李晓阳, 姜同敏, 等. 基于 BP 神经网络的多应力加速寿命试验预测方法[J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1691-1696.
- [11] 张国龙, 蔡金燕, 梁玉英, 等. 电子装备多应力加速退化试验技术及可靠性评估方法研究[J]. 航空学报, 2013, 34(12): 2815-2822.
- [12] 查国清, 黄小凯, 康锐. 基于多应力加速试验方法的智能电表寿命评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(12): 2217-2224.
- [13] ZHANG F, DU H G, TIAN R C, et al. Inverse Gaussian degradation modeling and reliability assessment considering unobservable heterogeneity[J]. IEEE Access, 2024, 12: 94367-94379.
- [14] TIAN R C, ZHANG F, DU H G, et al. Optimization design method for multi-stress accelerated degradation test based on Tweedie exponential dispersion process[J]. Applied Mathematical Modelling, 2024, 135: 684-707.
- [15] ZHANG Z X, SI X S, HU C H, et al. Degradation data analysis and remaining useful life estimation: a review on Wiener-process-based methods[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 271(3): 775-796.
- [16] 张帆, 程伯哈, 王鹏, 等. 二元共载系统退化相关的两阶段退化模型及可靠性分析[J]. 航空学报, 2024, 45(7): 191-207.
- [17] 刘小平, 崔德军, 吴振宇, 等. 具有随机效应维纳过程的步进应力加速退化试验优化设计[J]. 控制与决策, 2019, 34(12): 2558-2566.
- [18] 修忠信. 民用飞机系统安全性设计与评估技术概论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
- [19] RTCA. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment: RTCA/DO-160G[S]. Washington DC: RTCA, 2010.
- [20] NELSON W. Accelerated life testing-step-stress models and data analyses[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1980, 29(2): 103-108.
- [21] LAWLESS J F. Statistical models and methods for lifetime data[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002.
- [22] LIU Y, WANG Y S, FAN Z W, et al. A new universal multi-stress acceleration model and multi-parameter estimation method based on particle swarm optimization[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2020, 234(6): 764-778.
- [23] YAN W A, XU X F, BIGAUD D, et al. Optimal design of step-stress accelerated degradation tests based on the Tweedie exponential dispersion process[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 230: 108917.
- [24] ZHANG X X, YANG J, KONG X F. A new statistical inference method for multi-stress accelerated life testing based on random variable transformation[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 100: 379-393.

(责任编辑:刘雅婷)