

# 步进应力加速寿命试验数据处理方法在产品定寿试验中的应用

谭勇<sup>1,2</sup>, 周堃<sup>1,2</sup>, 罗天元<sup>1,2</sup>, 赵方超<sup>1,2</sup>, 周彩元<sup>1,2</sup>, 刘伟<sup>1,2</sup>

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.国防科技工业自然环境试验研究中心, 重庆 400039)

**摘要:** 目的 理顺步进应力加速寿命试验数据处理方法, 促进步进应力加速寿命试验的广泛应用。方法 通过产品寿命分布类型估计、试验数据转换、回归模型建立, 模型参数估计等步骤, 评估产品在正常应力水平下的寿命指标达到情况。结果 利用某产品试验数据对步进应力加速寿命试验数据处理方法进行了应用。结论 建立了试验数据处理方法步骤, 针对步进应力加速寿命试验的设计提出了建议。

**关键词:** 步进应力; 加速试验; 数据处理; 定寿

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.01.008

**中图分类号:** TJ07      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)01-0030-04

## Application of Data Processing Method for Step-up Stress Accelerated Life Test in Product Life Testing

TAN Yong<sup>1,2</sup>, ZHOU Kun<sup>1,2</sup>, LUO Tian-yuan<sup>1,2</sup>, ZHAO Fang-chao<sup>1,2</sup>, ZHOU Cai-yuan<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>

(1.Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China; 2.Natural Environmental Test and Research Center of Science, Technology and Industry for National Defense, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT: Objective** To straighten out data processing method of step-up stress accelerated life test and promote extensive application of step-up stress accelerated life test. **Methods** The life expectancy of the product under normal stress level was estimated according to estimation of product life distribution, conversion of test data, establishment of regression model, estimation of model parameter and other steps. **Results** The data processing method of step-up stress accelerated life test was applied according to test data of a product. **Conclusion** Steps for processing method of test data are established and suggestions on design of step-up stress accelerated life test are proposed.

**KEY WORDS:** step-stress; accelerated testing; data analysis; determine life

产品的寿命是评价其使用性能的重要指标, 直接关系到用户的使用/维护成本, 为了准确、快速地评价产品寿命, 目前通常采用加速寿命试验方法进行产品定寿。加速寿命试验是在合理的工程及统计假设基础上, 采用加大工作应力或环境应力的方法快速暴露产品故障, 在不改变故障机理的条件下, 用加严的应力条件在短时间内得到产品的寿命信息, 并外推至产品正常条件下的寿命。加速寿命试验的类型很多, 按

照应力施加方式的不同, 一般分为恒定应力加速寿命试验(恒加试验)、步进应力加速寿命试验(步加试验)、序进应力加速寿命试验(序加试验)三种基本类型<sup>[1]</sup>。

从 20 世纪 60 年代开始, 研究者们就对加速寿命试验数据处理方法开展了研究。目前恒加试验的数据处理方法比较成熟, 并形成了相应的标准。步加试验数据处理也取得了一定的突破, 在 Nelson 提出的累

积损伤模型<sup>[2]</sup>基础上，我国茆诗松<sup>[3]</sup>、葛广平<sup>[4]</sup>等学者研究了不同分布类型下步加试验数据处理方法。序加试验数据处理方法难度较大，当前取得的研究成果相对较少，还未能成熟运用。因此，恒加试验和步加试验应用比较广泛，但步加试验对试验时间和样品数量需求更低，试验效率较高，已经成为产品定寿试验的应用趋势。

## 1 步加试验数据处理方法

### 1.1 试验数据统计及基本假设

产品的寿命一般指从产品制造到功能失效至不能正常使用的时间阶段，往往采用产品出现一项或几项关键功能故障作为评价产品失效的依据。因此，在步加试验中首先需根据产品的技术状态选取表征参数，确定检测周期、合格判据、统计原则等试验数据检测依据，开展试验样品性能检测，统计性能参数、时间及对应的试验应力水平。

对获取的数据进行处理时需要满足三个基本假设：第一，在不同应力水平下产品的失效机理一致；第二，产品的特征寿命与应力水平之间存在一个确切的函数关系，即加速模型；第三，不同应力水平下产品的寿命服从同一分布类型。

### 1.2 确定产品寿命分布类型

确定产品的寿命分布类型对于试验数据处理中选取恰当的统计模型有着重要的意义，但要准确判断产品的寿命分布类型比较困难，目前比较常用的方法有两种。其中一种方法是通过失效物理分析及经验判断，来证实该产品近似地符合于某种分布类型。某些产品根据实践经验确定服从的分布类型见表 1。

表 1 常用产品寿命分布类型对照

分布类型	适用的产品
指数分布	具有恒定失效率的部件，无余度的复杂系统等
威布尔分布	某些电容器、滚珠轴承、继电器、开关、断路器、电子管等
对数正态分布	电机绝缘绕组、半导体器件、硅晶体管、锗晶体管等
正态分布	飞机轮胎磨损及某些机械产品

另一种方法是通过产品研制/使用/试验过程中收集的故障数据，利用数理统计方法来判断产品的寿命分布类型。将收集到的数据样本求出其最大值  $L_a$  和最小值  $S_m$ ，利用经验公式 (1) 将  $n$  个数据分为  $k$  组，按式 (2) 计算组距  $\Delta t$ ，按式 (3) 统计落入各组的频数  $\Delta r_i$  和频率  $\omega_i$ 。

$$k=1+3.3 \lg n \tag{1}$$

$$\Delta t = \frac{L_a - S_m}{k} \tag{2}$$

$$\omega_i = \frac{\Delta r_i}{n} \tag{3}$$

建立频数和频率直方图，根据直方图的形状初步判断数据样本总体服从的分布类型，从而推断产品寿命分布类型。

### 1.3 试验数据折算

步加试验数据处理的关键是从试验数据中分离出每个应力水平下的产品寿命信息，即将应力水平  $S_i$  下的试验时间  $\tau_i$  折算到应力水平  $S_j$  的试验时间  $\tau_{ij}$ 。根据产品不同的寿命分布类型折算方法也不相同，具体如式 (4) 所示。

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \frac{\lambda_i}{\lambda_j} \tau_i, i \neq j \text{ 指数分布} \\ \frac{\eta_i}{\eta_j} \tau_i, i \neq j \text{ 威布尔分布} \\ \exp\{\mu_j - \mu_i\} \tau_i, i \neq j \text{ 对数正态分布} \end{cases} \tag{4}$$

式中： $\lambda$ ， $\eta$ ， $\mu$  分别为各自对应分布类型的分布参数。此时，应力水平  $S_i$  下的实际试验时间为：

$$t_{ij} + \sum_{l=1}^{i-1} \tau_{li}, i=2, \dots, k, t_{ij} \text{ 为步加试验中每个试验样品在当前应力状态下的试验时间转换为恒加试验后的时间。}$$

### 1.4 建立加速模型

加速寿命试验的基本原理是利用高应力水平下的特征寿命来外推正常应力水平下的特征寿命，其中的关键是建立特征寿命与应力水平之间的关系，即加速模型。常见的加速模型见表 2<sup>[5]</sup>。

表 2 常见的加速模型

序号	名称	公式	加速应力	说明
1	阿伦尼斯 (Arrhenius) 模型	$L = Ae^{E/KT}$	温度	公式中 $L$ 代表特征寿命， $N$ 代表循环寿命， $E$ 是激活能， $K$ 是波尔兹曼常数， $T$ 是绝对温度， $H$ 是相对湿度， $S$ 是非热应力， $A$ ， $B$ ， $n$ ， $\beta$ 是常数。
2	逆幂律模型	$L = AS - n$	非热应力	
3	艾林 (Eyring) 模型	$L = (A/T)e^{E/KT}$	温度	
4	Peck 模型	$L = AS - ne^{E/KT}$	温度、非热应力	
5	温湿度模型	$L = Ae^{(E/KT+B/H)}$	温度、湿度	

6	指数加速模型	$L=Ae^{(-BS)}$	电压等
7	Coffin-Manson模型	$N=A(1/\Delta T)^\beta$	温度循环

### 1.5 正常应力状态下产品特征寿命估计

在得到步加试验数据和恒加试验数据的折算关系之后,可以利用恒加试验数据处理方法估计正常应力状态下产品的特征寿命,不同的分布类型处理方法存在差异,基本步骤为:1)统计试验总时间。需完全统计所有样本的试验时间之和,样品失效后的试验时间不应作为试验时间统计。2)估计各应力水平  $S_i$  下的特征寿命  $L_i$ 。3)利用建立的加速模型与各应力水平下的特征寿命进行线性回归分析,获取加速模型参数,代入正常应力参数计算正常应力水平下产品特征寿命。4)采用相关系数等方法检验加速模型的显著性,对正常应力水平下产品特征寿命进行点估计或区间估计。

## 2 步加试验数据处理方法应用

某产品设计贮存寿命为5年(贮存温度为20℃),为了评估其设计指标达到情况,对该产品进行了定寿试验。综合考虑试验周期、样品数量等试验方案的可行性,采用步加试验方案评估该产品的贮存寿命指标。在设计步加试验方案之前,对该产品进行了贮存环境因素分析及预试验,对出现的故障开展失效机理分析,掌握了温度是影响该产品寿命的主要环境因素。根据该产品研制过程中的故障信息以及经验判断,该产品寿命服从指数分布类型。基于掌握的信息开展步加试验方案设计及实施,试验方案及试验获取的数据结果见表3。

表3 某产品步加试验方案及试验结果

步骤	应力水平 $S_i$	温度/℃	试验总时间 $\tau_i$ /天	样品数量 $n_i$	检测周期(2天)失效数			累积失效总数 $R_i$	
step1	$S_1$	50	8	60	0	1	0	1	2
step2	$S_2$	60	16	58	2	0	1	1	6
step3	$S_3$	70	24	54	1	2	2	1	12
step4	$S_4$	80	32	48	3	1	0	2	18
step5	$S_5$	90	40	42	2	1	3	1	25

针对表3计算每个试验步骤的失效率,通过失效率计算步加试验与恒加试验的折算系数。由于该产品寿命服从指数分布类型,因此,每个应力水平对应的试验总时间采用式(5)进行转换,计算试验总时间时,应细化到每个检测周期的试验时间。样本量及失效数采用式(6)和(7)进行转换,采用式(8)估计不同应力水平下平均寿命极大似然值  $\hat{L}_i$ ,转换后的数据见表4。

$$t_i = \sum_{j=1}^{R_i} t_{ij} + (n_i - R_i)\tau_i \tag{5}$$

$$N_i = n - R_{i-1} - 1 \tag{6}$$

$$r_i = R_i - 1 \tag{7}$$

$$\hat{L}_i = \frac{T_i}{r_i} \tag{8}$$

表4 某产品步加试验与恒加试验数据转换情况

序号	应力水平 $S_i$	温度/℃	试验总时间 $\tau_i$ /天	样品量 $n_i$	失效数 $r_i$	不同应力水平平均寿命极大似然估计 $\hat{L}_i$
1	$S_1$	50	396	59	1	396
2	$S_2$	60	686	57	5	137
3	$S_3$	70	817	53	11	74
4	$S_4$	80	1073	47	17	63
5	$S_5$	90	1094	41	24	45

此时,步加试验数据处理方法转换为五种恒定应力的加速寿命试验数据处理方法。由于温度是影响该产品寿命的主要环境因素,因此加速模型选用阿伦尼斯模型,见式(9)。

$$L = Ae^{E/KT} \tag{9}$$

将式(9)两端取对数,得到  $\ln L = \ln A + E/KT$ ,

令  $a = \ln A$ ,  $b = E/K$ ,将式(9)变换为一元线性回归模型,见式(10)。

$$\ln L_i = a + b/T_i \tag{10}$$

对一元线性回归模型参数  $a$  和  $b$  采用最小二乘估计,求得  $a = -13$ ,  $b = 6045$ ,因此该产品的加速寿命模型见式(11)。

$$L_i = e^{-13 + 6045/T_i} \tag{11}$$

采用加速寿命模型拟合的各应力水平下产品特征寿命与试验获取的特征寿命估计值对比如图1所示。采用相关系数检验法对加速寿命模型进行检验,相关系数  $r = 0.95$ ,可见该加速模型与试验结果显著相关。取该产品贮存状态的正常应力水平(温度为20℃),代入加速寿命模型(11),估计贮存状态下产品寿命为5.54年,满足设计贮存寿命5年的指标要求。

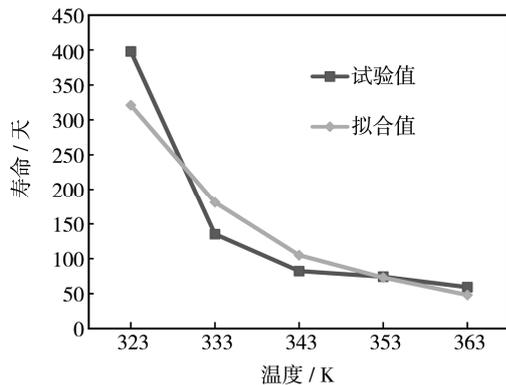


图1 特征寿命对比

### 3 结论

步加试验数据处理的核心是将步加试验结果转换为恒加试验结果,然后利用适当的加速模型建立回归模型,通过数值处理方法求解回归模型参数获取产品的加速寿命模型,从而估计产品在正常应力水平下的特征寿命。文中利用该思路对某产品的步加试验数据进行了处理,得到的结果与产品设计指标相符,但在数据处理过程中由于试验数据不足、试验时间估计精度不够等问题引入了一些分析误差。为了使步加试验数据处理更加准确,现针对步加试验方案设计提出以下几点建议。

1) 产品的寿命分布类型决定了数据处理方法的选取,将会直接影响处理结果的准确性。在步加试验方案设计前尽可能收集产品在研制或使用过程中故障数据,估计产品寿命分布类型。若无法收集故障数据,可在步加试验前设计预试验获取一定的故障数据,并参考类似产品的寿命分布类型,估计该产品寿命分布形式。

2) 检测间隔时间影响试验总时间的估计,进而影响恒加试验条件下产品的特征寿命的估计。在试验总时间一定的条件下,检测次数越多试验数据处理结果越准确。在步加试验中,最理想的样品检测方式为不间断连续检测,但对技术、费用的要求较高,使得步进试验方案的实施可行性降低。因此,在进行样品检测周期设计时,应参考产品寿命分布类型,建议指数分布型产品开始检测间隔时间短,后续逐渐加长;正态分布型产品开始检测间隔时间长,后续逐渐缩短。在统计试验总时间时,建议采用保守型数据统计方式,即对于样品失效前的检测间隔时间不记入试验总时间,以减小产品寿命评估风险。

3) 对于检测损耗型样品在每个周期的检测样品数量尽可能多,并且在计算产品每个阶段的失效率时建议采用全概率分析方法,以减少用于样本评估样本总体带来的统计误差。

4) 为了提高回归模型参数估计精度,建议步进试验应力水平数量至少不低于4个。最高应力水平不应超过产品破坏极限;最低应力水平可通过开展预试验,由产品失效或退化速率确定,在最低应力水平下产品出现的故障数量不应小于2个。

5) 对于加速寿命试验获取的产品加速寿命模型,建议开展产品使用试验或长贮试验进行验证。

### 参考文献:

- [1] 赵宇. 可靠性数据分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [2] NELSON W B. Accelerated Life Testing-step-stress Models and Data Analysis[J]. IEEE Trans on Reliability, 1980, 29(2): 103—108.
- [3] 茆诗松. 指数分布场合下步进应力加速寿命试验的统计分析[J]. 应用数学学报, 1985(3): 311—316.
- [4] 葛广平, 马海训. Weibull 分布场合下步进应力加速寿命试验的统计分析[J]. 数理统计与应用概率, 1992(2): 7—11.
- [5] 陈兵, 李星. 加速寿命试验技术在国内外工程应用研究[J]. 强度与环境, 2010, 37(6): 31—38.
- [6] 李迪凡, 封先河, 刘聪. 某型导弹尾翼弹簧贮存寿命评估[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 1—3.
- [7] 王亚辉, 李晓钢. 基于步进应力的火工品加速贮存试验研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 38—40.
- [8] 李颖, 肖敏, 杨万均. 某弹药包装筒用改性 ABS 塑料贮存寿命评估研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 5—7.
- [9] 高萌, 王金柱, 何学广. 基于可靠性统计分析法的制导弹药储存寿命评估[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 110—113.
- [10] 张仕念, 何敬东, 颜诗源. 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.
- [11] 李久祥. 整机加速贮存寿命试验研究[J]. 质量与可靠性, 2004(4): 14—17.
- [12] NELSON W B, MEEKER W Q. Theory for Optimum Censored Accelerated Life Testing for Weibull and Extreme Value Distributions[J]. Technometrics, 1978, 20(2): 171—177.
- [13] NELSON W B, KIELPINSKI T J. Theory for Optimum Censored Accelerated Life Testing for Normal and Lognormal Distributions[J]. Technometrics, 1976 18(1): 105—114.
- [14] 刘瑞元, 茆诗松. 步进应力加速寿命试验的最优设计[J]. 应用概率统计, 2000(1): 24—27.
- [15] 陈文华. Weibull 寿命型产品可靠性加速验证试验方法[J]. 浙江大学学报, 2001, 35(1): 5—8.
- [16] 宣卫芳. 装备与自然环境试验[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- [17] 程侃. 寿命分布类型与可靠性数学理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.