

doi: 10.7690/bgzdh.2018.11.015

# 基于 Weibull 分布的机电引信贮存寿命预测

王 晓, 赵河明, 彭志凌

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

**摘要:** 为提高机电引信贮存寿命及其可靠性, 对基于 Weibull 分布的机电引信贮存寿命进行预测。通过对机电引信贮存状态、失效模式和失效机理进行分析和可靠性强化试验, 假设产品的寿命服从二参数 Weibull 分布, 构建贮存加速和可靠性模型, 给出加速试验的基本流程和设计方案, 建立数据处理数学模型和贮存寿命预测方法。该研究预估了典型机电引信的贮存寿命, 可为机电引信贮存寿命预测提供支撑。

**关键词:** 机电引信; 加速寿命试验; Weibull 分布; Newton-Raphson; 寿命预测

**中图分类号:** TJ43 **文献标志码:** A

## Storage Life Prediction of Electromechanical Fuse Based on Weibull Distribution

Wang Xiao, Zhao Heming, Peng Zhiling

(College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to improve the storage life and reliability of electromechanical fuse, predicted the storage life of electromechanical fuse based on the distribution of Weibull. Analyze the storage state, failure mode and failure mechanism of electromechanical fuses, and carry out reliability enhancement tests. Supposed the product's life obeys the 2 parameters Weibull distribution, built storage acceleration and reliability model. The basic process and design plan of accelerated test are given. A mathematical model for data processing and a storage life prediction method were established. This study estimated the storage life of typical electromechanical fuses. It can provide support for storage life prediction of electromechanical fuse.

**Keywords:** mechanical and electrical fuse; accelerated life test; Weibull distribution; Newton-Raphson; life prediction

## 0 引言

作为弹药的重要组成部分和易损部件, 引信的贮存可靠性是否达标直接影响其使用以及整个武器系统的正常使用<sup>[1]</sup>。通过加大应力缩短试验时间, 加速寿命试验可以在引信装备部队之初就给出其可靠数量指标<sup>[1]</sup>。1967年, 美罗姆航展中心首次给出了加速寿命试验的统一定义, 有利于高可靠长寿命产品的可靠性评定。1980年, W B Nelson 提出了著名的 Nelson 原理。据此, 产品在不同加速应力水平下的试验时间可以互相折算, 使步进应力试验的统计分析取得突破<sup>[2]</sup>。我国的加速寿命试验起步较晚, 但也在针对加速寿命试验的各种应力施加方式、产品服从不同寿命分布以及考虑竞争失效等不同条件下进行了研究, 取得了很多研究成果<sup>[2]</sup>。贮存寿命是引信的重要指标, 对其进行科学的定量评估是控制和监督引信质量, 保障引信服役管理决策科学, 实现引信长寿命、高可靠、高效费比的关键环节; 基于此, 笔者对基于 Weibull 分布的机电引信贮存寿命预测进行研究。

## 1 试验方案和贮存易损件的确定

机电引信的贮存寿命与温度、湿度有关。研究结果表明: 湿度引起的故障均处于非密封贮存环境<sup>[1]</sup>, 而在标准的库房或按规定存放时, 由于引信的各零件都会进行防腐处理, 装配后大部分密封性良好, 包装的密封也良好, 由湿度所引起的失效很少。笔者在高密封恒温箱内进行试验, 选取温度作为加速应力。机电引信价格高昂, 内部结构复杂的电子元件多, 测试参数多、次数多、周期长、精度高、难度较高, 试验经费高; 因此, 笔者选取的加速寿命试验方案为无替换定时结尾的步进应力加速寿命试验。

笔者选取的机电引信由惯性闭合器、电点火管、惯性保险、保险器、远距离解除保险机构、传爆序列及电路等组成。机电引信在高温环境中会产生热老化、氧化、粘性降低膨胀等, 低温会使得机电引信产品粘度增大、脆化、收缩。温度变化所产生的膨胀力和收缩力全集中于产品的易损环节, 加速了易损环节扩大使机电引信产生失效。效率高、成本低的可靠性

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-08-16

基金项目: 国防科工局技术基础项目资助

作者简介: 王 晓(1994—), 女, 陕西人, 硕士, 从事信息感知与控制技术研究。

强化试验可快速激发产品潜在缺陷，使其以故障形式表现出来。参照可靠性强化试验的试验结果，确保机电引信失效机理不变，依照机电引信贮存工作极限选取 4 个应力，初始加速温度为 80 °C，步长为 5 °C。试验设计方案如表 1 所示。

表 1 试验设计方案

项目	方案
应力水平/K	$T_1=353, T_2=358, T_3=363, T_4=368$
应力持续时间/d	$\tau_1=48, \tau_2=30, \tau_3=24, \tau_4=18$
各应力检测时间点	$t_i/k, 2t_i/k, 3t_i/k, \dots$
样本量	40

如表 2 所示，造成加速试验样机故障失效的主要因素是电路中向雷管放电的起爆电容，导致其失效的因素除了其自身原因外，还有电路中用以限制电流、短路保护和泄放电容发火能量的电阻故障。这些电气元件在温度应力作用下，加速了其性能退化的物理、化学反应。加速材料的老化会引起引线帽与电阻体脱落、电容器引线腐蚀或断裂；电容器电极与引出线绝缘、引出线与电极接触表面氧化造成低电平开路；氧化的结果是阻值增大，电路接点电阻增大、金属材料表面电阻增大；电介质材料导电杂质扩散或导电粒子迁移、电介质的电老化与热老化和其内部的电化学反应。导致了其参数改变或失效。

表 2 故障及失效分析

故障模式	故障影响	故障原因
短路/开路	电容无法聚能不能起爆电雷管，造成引信瞎火	电容器质量问题
短路	电容被击穿引信瞎火	电阻质量问题
断路	电容不充电引信瞎火	电阻质量问题
短路	点火电路不闭合引信瞎火	电阻质量问题

## 2 Weibull 分布

Weibull 分布由瑞典工程师威布尔提出，根据最薄弱环节模型或串联模型得到，能充分反映材料缺陷和应力集中源对材料疲劳寿命的影响且具有递增的失效率，尤其适用于机电类产品的磨损累计失效的分布形式<sup>[3]</sup>。二参数的威布尔分布主要用于高应力水平下的寿命试验以及材料疲劳试验。其累积失效分布函数 ( $m$  为形状参数， $\eta$  为尺度参数)：

$$F(t, \eta, m) = \begin{cases} 1 - e^{-(t/\eta)^m} & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (1)$$

分布密度函数为：

$$f(t; \eta, m) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right) \quad (m, \eta > 0) \quad (2)$$

可靠度：

$$R(t; m, \mu) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (t, m, \mu > 0) \quad (3)$$

威布尔的分布密度函数如图 1 所示：尺度参数  $\eta$  为 1，形状参数  $m$  不同时的曲线，威布尔分布密度函数形状具有多样性； $m < 1$  时的分布类似伽马分布； $m = 1$  时的曲线分布为指数分布； $m > 1$  时的分布又似正态分布、对数正态分布和极值分布。这种特性使得 Weibull 分布的应用很广泛。

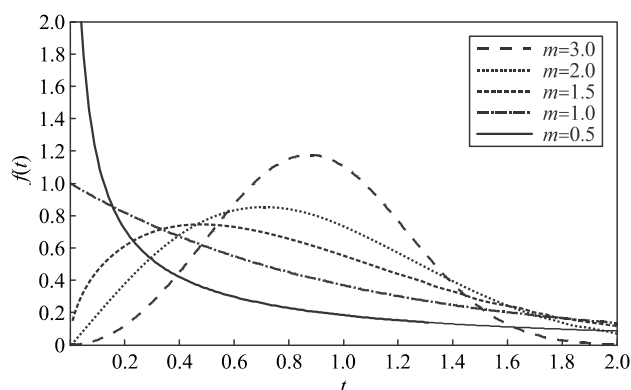


图 1 威布尔分布密度函数曲线

Weibull 分布在加速寿命试验中应用时，其参数的求解是难点，对于复杂情况下的试验模型线性估计难以达到效果。威布尔分布参数估计的极大似然方法是一种常用的方法。笔者研究的是其似然估计的求解方法。

## 3 寿命预测

### 3.1 基本假设

假设 1：在相对湿度恒定温度变化下，引信的贮存寿命  $t$  服从二参数的威布尔分布。

假设 2：在不同的应力水平下，引信的失效机理相同，在各应力下，寿命分布中的形状参数  $m$  保持不变。

假设 3：引信特征寿命  $\eta$  与施加加速温度应力  $T_i$  之间符合 Arrhenius 加速模型<sup>[4-5]</sup>：

$$\ln \eta = a + \psi(T_i) \quad (4)$$

式中： $a, b$  为待估参数； $T_i$  为绝对温度。

假设 4：引信的残余寿命仅依赖于当时已累积失效的部分和应力条件，而与累积方式无关 (Nelson 原理)<sup>[6-8]</sup>。

### 3.2 失效时间的折算

由假设 1、2、4，产品在不同加速应力水平下

的试验时间可以相互折算, 产品在应力水平  $S_i$  下, 试验  $t_i$  时间的累积失效概率  $F_i(t_i)$  等于该产品在应力水平  $S_j$  下试验  $t_{ij}$  的累积失效概率  $F_j(t_{ij})$ , 可得时间折算公式:

$$t_{ij} = \frac{t_i \eta_j}{t_j} \quad (5)$$

将 Arrhenius 加速模型式(4)代入式(5)有:

$$t_{ij} = \frac{t_i \eta_j}{\eta_i} = \frac{t_i \exp(a + b\varphi(T_j))}{\exp(a + b\varphi(T_i))} = t_i \exp(b(\varphi(T_j))) \quad (6)$$

进应力加速寿命试验在多个应力水平下累积作用的结果, 由假设 4 可得在  $T_j$  下, 产品的实际试验时间  $t_j$  应是当前应力下的试验时间, 再加上前  $j-1$  级应力下累积的试验时间, 即

$$t_j = t_{jk} + \sum_i^{j-1} t_i \exp(b(\varphi(T_j) - \varphi(T_i))) \quad (7)$$

$$L(t, m, a, b) = \frac{n!}{(n-r)!} \prod_{j=1}^{i-1} \prod_{k=1}^c \left[ \frac{m}{\eta_0} \left( \frac{\delta_{jk}(b)}{\eta_0} \right) \exp \left( - \left( \frac{\delta_{jk}(b)}{\eta_0} \right)^m \right) \right]^{r_{jk}} \left[ \exp \left( - \left( \frac{\delta_s(b)}{\eta_0} \right)^m \right) \right]^{n-r} \quad (9)$$

似然函数取对数

$$\ln L(t, m, a, b) = r_1 n m - m r_1 n \eta_0 + (m-1) \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=1}^c r_{jk} \ln(\delta_{jk}(b)) - \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=1}^c \left( \frac{\delta_{jk}(b)}{\eta_0} \right)^{m \cdot r_{jk}} - (n-r) \left[ \left( \frac{\delta_s(b)}{\eta_0} \right)^m \right] \quad (10)$$

对似然函数式求偏导:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial m} = \frac{r}{m} - r \ln \eta_0 = \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=1}^c r_{jk} \ln(\delta_{jk}(b)) - \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=1}^c \left( \frac{\delta_{jk}(b)}{\eta_0} \right)^{m r_{jk}} \ln \left( \frac{\delta_{jk}(b)}{\eta_0} \right) - (n-r) \left( \frac{\delta_s(b)}{\eta_0} \right)^m \ln \left( \frac{\delta_s(b)}{\eta_0} \right); \quad (11)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = m \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=1}^c \left( \frac{\delta_{jk}(b)}{\eta_0} \right)^{m r_{jk}} + m(n-r) \left( \frac{\delta_s(b)}{\eta_0} \right)^m - m r; \quad (12)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial b} = -m r \frac{\phi_0 \eta_0}{\eta_0} + (m-1) \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=1}^c \frac{H_{jk}}{\delta_{jk}(b)} - \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=1}^c m \left( \frac{H_{jk} \eta_0 - \delta_{jk} \eta_0 \phi_0}{\eta_0^2} \right)^{(m-1) r_{jk}} - (n-r) \left( \frac{H_s \eta_0 - \delta_s \phi_0 \eta_0}{\eta_0^2} \right) \quad (13)$$

其中:  $H_{jk} = \frac{\partial \delta_{jk}(b)}{\partial b} = \sum_{k=1}^{i-1} (\phi_0 - \phi_j) \mu_j t_j + \sum_{k=1}^c (\phi_0 - \phi_j) \mu_j k t_j / c$ ;

$H_s = \frac{\partial \delta_s(b)}{\partial b} = \sum_{j=1}^i (\phi_0 - \phi_j) \mu_j t_j$ 。

式(11)~式(13)组成了超越方程组, 很难求得解析解, 采用改进的 Newton-Raphson, 其迭代公式为

$$x_{k+1} = x_k - \lambda_k \left( \nabla^2 f(x_k) \right)^{-1} \nabla f(x_k) \quad (14)$$

迭代时选定初始点  $x_0 = (m, a, b)$ ,

$$\nabla f(x_k) = \left[ \frac{\partial \ln L}{\partial m}(x_k), \frac{\partial \ln L}{\partial a}(x_k), \frac{\partial \ln L}{\partial b}(x_k) \right]^T,$$

根据式(7)将步进应力加速试验的数据处理为常温 (25 °C) 应力下的等效数据, 引入常温折算因子  $\varepsilon_0 = \exp(b(\varphi(T_0) - \varphi(T_i)))$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ):

$$\delta_{jk}(b) = \sum_{j=1}^{i-1} \varepsilon_0 \cdot \tau_j + \sum_{k=1}^c \varepsilon_0 \cdot k \cdot \tau_i \div c \quad (8)$$

### 3.3 过渡参数估计

本试验为定时截尾试验方案, 即每个测试时间点失效样本为  $r_{jk}$  件, 则未失效  $n - r_{jk}$  件, 试验结束

总失效  $r = \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^c r_{jk}$ , 未失效为  $n - r$  且未失效样本截

止时间为  $\delta_s(b) = \sum_{j=1}^i \varepsilon_0 t_j$ 。以试验周期内样本为单位

列出估计参数  $m, a, b$  的似然函数。 $m$  和  $\eta$  的似然函数为

$$\nabla^2 f(x_k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial^2 m}(x) & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial m \partial a}(x) & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial m \partial b}(x) \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial m}(x) & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a^2}(x) & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial a \partial b}(x) \\ \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b \partial m}(x) & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial b \partial a}(x) & \frac{\partial^2 \ln L}{\partial^2 b}(x) \end{bmatrix}.$$

搜索方向:  $p_k = -(\nabla^2 f(x_k))^{-1} \nabla f(x_k)$ 。

传统 Newton-Raphson 法的收敛性受初始值影响较大, 针对此问题引入最优步长, 添加搜索因子, 在每一次的迭代中都要计算搜索因子, 所求似然函数的极大值, 则求最优搜索因子  $\lambda_k$  方法如下:

$f(x_k + \lambda_k p_k) = \max_{\lambda > 0} f(x_k + \lambda p_k)$ 。依据此方法在 Matlab

中编写程序<sup>[9]</sup>。经过数次迭代后最终得到估计值： $m=2.4$ ， $a=-11.641$ ， $b=6\ 121$ 。迭代过程如图 2—图 4。

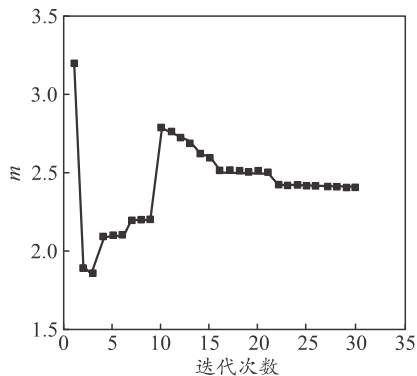


图 2 参数  $m$  的迭代过程

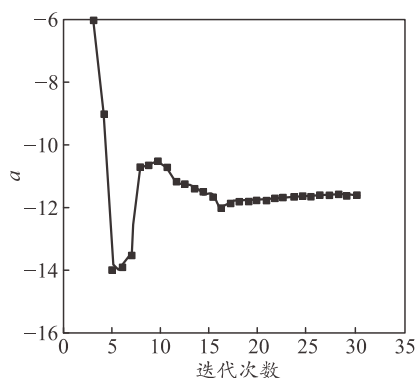


图 3 参数  $a$  的迭代过程

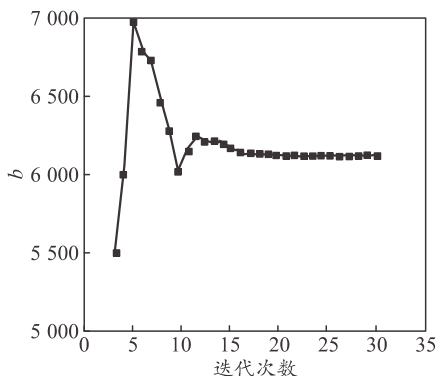


图 4 参数  $b$  的迭代过程

### 3.4 特征寿命估计

由求得的参数估计值，算出常温 25 °C 下的特征寿命为 20.07 a。

### 3.5 贮存寿命的预测

机电引信的可靠度为  $R(t)$ ， $R_L(t)$  为可靠度下限， $\alpha$  为置信度。对于机电引信的贮存，首要考虑的是寿命的置信下限  $R_L(t)$ ，此处采用正态近似<sup>[10]</sup>：认为  $\hat{R}(t)$  近似服从均值为  $R(t)$ ，方差为  $D[\hat{R}(t)] = R(t) [1 - R(t)] / n$

的正态分布。 $n$  为各时刻的样本量的均值。

$$p(\hat{R}(t) - R(t)) / \sqrt{D(\hat{R}(t))} (\hat{R}(t) - R_L) / \sqrt{D(\hat{R}(t))} \quad (15)$$

对于威布尔分布的  $D(\hat{R}(t))$  有近似公式：

$$D[\hat{R}(t)] = [\hat{R}(t) \times \text{Ln} \hat{R}(t)]^2 \{1.109 - 0.514 \times \text{Ln}[-\text{Ln} \hat{R}(t)] + 0.608 [\text{Ln}(-\text{Ln} \hat{R}(t))]^2\} / n_0 \quad (16)$$

对于标准正态分布置信度  $\alpha$  的上侧分位点  $\mu_\alpha$  有以下公式：

$$\mu_\alpha = [\hat{R}(t) - R_L] / \sqrt{D(\hat{R}(t))} \quad (17)$$

可推出：

$$R_L = \hat{R}(t) - \mu_\alpha \sqrt{D(\hat{R}(t))} \quad (18)$$

依照上述公式可以求得不同置信度与不同可靠度时的机电引信贮存寿命。例如，当  $\alpha$  为 90%，可靠度为 0.8 时，引信所对应的贮存时间  $t=12.4$  a。

## 4 结论

笔者基于试验数据确定了寿命分布中的未知参数，进而计算出各种可靠性特征值，预测了该机电引信常温 25 °C，置信度 90%，可靠度 0.8 时的贮存寿命，可为确定装备在贮存期内维护和检修间隔、战备完好率以及确定后勤保障费用提供依据。

## 参考文献：

- [1] 李明伦, 李东阳, 郑波. 弹药储存可靠性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 8.
- [2] 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.
- [3] 李进, 黄敏, 赵宇. 威布尔分布的极大似然估计的精度分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(8): 930-932.
- [4] 茆诗松. 加速寿命试验的加速模型[J]. 质量与可靠性, 2003(2): 15-17.
- [5] 黄婷婷, 姜同敏. 加速寿命试验中统计加速模型综述[J]. 装备环境工程, 2010, 7(4): 57-61.
- [6] 郑卫武, 郑海鹰. 步进应力加速寿命的试验及检验[J]. 温州大学学报(自然科学版), 2012, 33(6): 13-18.
- [7] 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): 7-11.
- [8] 戴树森, 费鹤良, 王玲玲, 等. 可靠性试验及其统计分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 44-66.
- [9] 张德丰. MATLAB R2015b 数值计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 25-62.
- [10] 霍格. 数理统计学导论[M]. 王忠玉, 卜长江, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014: 46-98.