

基于粒子群算法的步降加速退化试验优化设计

罗 赓¹, 穆希辉², 牛跃听², 杜峰坡², 王永南¹

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 军械技术研究所, 石家庄 050003)

摘要: 针对解析方法难以得到或者不能得到步降加速退化试验最优方案的难题, 提出一种基于粒子群算法的 Monte-Carlo 仿真步降应力加速退化试验优化算法。该算法通过大量的重复模拟试验生成试验退化数据, 寻找最佳监测频率、检测次数和样本量, 以正常使用应力下的对数 p 阶分位寿命渐近方差估计最小为目标, 采用粒子群算法对退化试验数据采用极大似然估计进行统计分析, 建立了基于仿真的步降应力加速退化试验优化设计模型。基于算例, 给出了不同约束条件下的优化设计方案, 得到了该方法也满足小子样产品步降加速退化试验优化设计的结论, 并最终得到其最优试验方案。

关键词: 加速退化试验; 步降应力; 优化设计; 粒子群算法; 蒙特卡罗仿真

中图分类号: TP114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)06-0097-06

Optimization Design for Step-Down-Stress Accelerated Degradation Test Based on Particle Swarm Optimization

LUO Geng¹, MU Xi-hui², NIU Yue-ting², DU Feng-po², WANG Yong-nan¹

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Ordnance Institute of Technology, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: For the problem that an optimal scheme for step-down-stress accelerated degradation test is difficult to or cannot be obtained through analytical methods, an optimization algorithm of Monte-Carlo simulation step-down-stress accelerated degradation test (SDSADT) based on Particle Swarm Optimization (PSO) is presented. This algorithm generates test degradation data through a number of repeated simulation tests, and finds the optimal monitoring frequency, detection times and sample size. With the minimum logarithmic asymptotic variance estimation of 100pth percentile of the lifetime distribution of the product at use condition as the objective, a statistical analysis of the degradation test data is made by using Maximum Likelihood Estimation (MLE) theory based on PSO, and a model of optimization design for simulation based SDSADT is established. Based on an example, the optimal design scheme is given under different constraint conditions, with the conclusion that this method is also applicable to optimization design for SDSADT of small-subsample product, and the final optimal test scheme is obtained.

Key words: accelerated degradation test; step-down-stress; optimization design; particle swarm algorithm; Monte-Carlo simulation

0 引言

复杂机电系统是集光、机、电、软件、人于一体的复杂动态系统。其组成以及加工过程的运行都相当复杂, 若出现故障, 则可能造成重大损失, 所以研究其可

靠性问题就显得极其重要^[1]。

加速退化试验是指通过采集产品高应力下性能的退化数据, 基于采集的数据来评估产品可靠性及评定产品在正常应力下的贮存寿命^[2-3], 可以较为有效地解决寿命试验过程中失效数据少的问题。作为目前可靠性试验领域的研究热点, 文献[4]针对倒数 Weibull 分布退化率下的加速退化试验优化设计进行了研究; 文献[5]以试验费用为目标函数, 以平均寿命 MLE 的渐近方差作为约束条件, 对步进应力加速退化试验的

收稿日期: 2014-06-21

修回日期: 2014-08-22

基金项目: 中国博士后科学基金(2013M532181)

作者简介: 罗 赓(1990—), 男, 陕西咸阳人, 硕士生, 研究方向为可靠性工程。

样本量、试验时间和检测次数进行优化设计;文献[6]以费用作为约束条件,研究了步进应力加速退化试验优化设计问题。这些研究主要是通过解析法来获取最优方案,若设计变量的维数较多,其建模与分析推理会显得十分困难复杂。而且,在很多场合下解析方法难以得到或者不能得到最优方案,很不适合于工程应用。文献[7]以费用为约束条件,对混合效应模型恒定应力加速退化试验方案优化设计进行了研究;文献[8]研究了小样本条件下步降加速退化试验优化设计。这些研究均采用 Monte-Carlo 仿真方法,通过极大似然估计,将设计优化问题转换为试验数据的统计分析问题,然而直接求解极大似然估计值,方法非常复杂,同时由于 Hessian 矩阵可能是病态的(奇异阵),会导致其逆矩阵不存在,从而很难求出甚至得不到相应的估计值。

针对解析方法难以评估复杂加速试验方案优劣且直接求解极大似然估计值不可取的问题,本文提出一种可以满足小子样条件的优化设计方法,采用蒙特卡罗方法对 SDSADT 进行模拟,采用粒子群算法对试验数据进行 MLE 统计分析,以正常使用应力下的对数 p 阶分位寿命渐近方差估计最小为目标,对优化试验方案进行模拟评价。

1 模型假设

1.1 退化模型

本文以混合效应模型为前提,对基于 Monte-Carlo 仿真的 ADT 优化设计方法进行讨论,选取退化量的某一单调函数 $\varphi(\cdot)$,使其与变换时间尺度 t^α 具有线性关系,即

$$\varphi(y_{ij}(t_{ih})) = -\beta_{ij}t_{ih}^\alpha + \varepsilon_{ij}(t_{ih}) \quad (1)$$

式中: $y_{ij}(t_{ih})$ 为应力水平 S_i 下,第 j 个试样在 t_{ih} 时刻的退化量, $i=1,2,\dots,k,j=1,2,\dots,n,h=1,2,\dots,l_i,l_i$ 为应力水平 S_i 下的监测次数; β_{ij} 为应力水平 S_i 下的第 j 个样本的退化率, $\beta_{ij}^{-1} \sim \text{Weibull}(m, \eta_i)$; $\alpha > 0$ 为先验已知的固定常数; $\varepsilon_{ij}(t_{ih})$ 为测量值,其相互独立分布并且服从于标准正态分布,即 $\varepsilon_{ij}(t_{ih}) \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ 。

1.2 加速方程

特征寿命 η_i 与转换应力存在如下对数线性关系,即

$$\ln \eta_i = a + b\varphi(S_i) \quad (2)$$

式中: a 和 b 为未知参数; $\varphi(S_i)$ 为应力的函数,当 $\varphi(S_i) = \ln V$ 时为逆幂律模型,当 $\varphi(S_i) = 1000/(273 + T)$ 时为阿伦尼斯模型。

1.3 失效机理一致性

形状参数 m 表征着样品的失效机理,各应力水平下,产品失效机理不变,即 $m_0 = m_1 = m_2 = \dots = m_k = m_0$ 。

2 失效数据 Monte-Carlo 仿真

2.1 累积退化轨迹

假设 SDSADT 采用 k 个应力水平 $S_i, i=1,2,\dots,k$, 且 $S_1 > S_2 > \dots > S_k > S_0, S_0$ 为正常使用应力水平。基于满足 Nelson^[2] 累积失效假设,即产品的剩余寿命仅依赖于当时已累积的失效部分和当前所处应力,而与失效累积的方式没有关系,参照文献[9]提出的退化轨迹模型,最终得到步降加速退化试验累积退化轨迹为

$$D_j(t) = \begin{cases} D_{1j}(t) & 0 < t \leq \tau_1 \\ D_{2j}[(t - \tau_1) + s_1] & \tau_1 < t \leq \tau_2, D_{2j}(s_1) = D_{1j}(\tau_1) \\ D_{3j}[(t - \tau_2) + s_2] & \tau_2 < t \leq \tau_3, D_{3j}(s_2) = \\ \vdots & D_{2j}((\tau_2 - \tau_1) + s_1) \\ D_{ij}[(t - \tau_{i-1}) + s_{i-1}] & \tau_{i-1} < t \leq \tau_i, D_{ij}(s_{i-1}) = \\ & D_{(i-1)j}((\tau_{i-1} - \tau_{i-2}) + s_{i-2}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: τ_i 为应力折算时间点; s_i 为 S_i 下试验时间 τ_i 在 S_{i+1} 下的折算时间; $D_i(y)$ 为 S_i 下的理论退化轨迹。其中, s_{i-1} 与 τ_{i-1} 满足

$$s_{i-1} = \begin{cases} \tau_{i-1} g\left(\frac{\beta_{(i-1)j}}{\beta_{ij}}\right)^{1/\alpha} & i=2 \\ (\tau_{i-1} - \tau_{i-2} + s_{i-2}) g\left(\frac{\beta_{(i-1)j}}{\beta_{ij}}\right)^{1/\alpha} & i>2 \end{cases} \quad (4)$$

2.2 仿真步骤

- 1) 由式(2)计算各应力水平下的 η_i , 抽样 $\beta_{ij}^{-1} \sim \text{Weibull}(m, \eta_i)$ 生成 β_{ij} ;
- 2) 抽样 $\varepsilon_{ij}(t_{ih}) \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ 生成 $\varepsilon_{ij}(t_{ih})$;
- 3) 计算监测时刻 $t_{ih} = f \cdot t_u \cdot l_i$, 其中 t_u 为单位时间;
- 4) 由式(1)得到退化轨迹 $y_{ij}(t_{ih})$, 其中, $i=1,2,\dots,k, j=1,2,\dots,n, h=1,2,\dots,l_i$;
- 5) 根据式(3)和式(4),将各应力下监测时刻退化数据折算到应力水平 S_1 上。

3 优化问题描述

3.1 优化目标

在满足模型假设的前提下,将正常使用应力水平下对数 p 阶分位寿命渐近方差估计作为目标函数,即

$$U = \text{avar}(\zeta_{p0}) \quad (5)$$

式中, ζ_{p0} 为正常应力水平 S_0 下对数 p 阶分位寿命。

3.2 设计变量

SDADT 试验方案的每个要素都可作为设计变量之一:1) 样本总量 n ; 2) 应力水平数 k ; 3) 应力水平

$S_i, i=1, 2, \dots, k$; 4) 监测频率 f ; 5) 监测次数 l_i , 因而试验的总时间 $T = \sum_{i=1}^k f \cdot l_i \cdot t_u, t_u$ 为单位时间。

因此, 设计变量可记为 $d = \{n, k, S_i, f, l_i, i=1, \dots, k\}$ 。工程应用中可以根据经验进行简化, 以减少寻优的搜索维数, 降低计算量。

3.3 约束条件

1) 试验总费用 C_b , 主要包括 3 部分: ① 试验样本单价 C_p ; ② 单次测量费用 C_m ; ③ 单位时间的操作费用 C_o 。可具体表示为

$$nC_p + nC_m \sum_{i=1}^k l_i + C_o f \sum_{i=1}^k l_i \leq C_b \quad (6)$$

- 2) 应力水平 S_i 需满足 $S_i > S_{i+1}, i=1, 2, \dots, k$ 。
- 3) 监测次数 l_i 需满足 $l_i < l_{i+1}, i=1, 2, \dots, k$ 。
- 4) 样本总量 n 需满足 $n \geq 5$ 。

4 优化设计方法

4.1 可行性试验方案设计

对于给定的应力水平数 k , 结合工程实际, 针对每一应力水平, 具体步骤如下所述。

1) 令 $f=1, l_i=1$, 在给定应力水平数的前提下, 由式(6)确定最大样本总量

$$n_{\max} = \left[\frac{C_b - C_o k}{C_p + C_m k} \right]_f \quad (7)$$

式中, $[n]_f$ 为不大于 n 的整数。这样便可以得到样本量的取值范围 $n \in [5, n_{\max}]$, 结合后面步骤可以得到小样本情况下的试验方案。

2) 令 $n=5, l_i=1$, 由式(6)可确定相应监测频率 f 最大值为

$$f_{\max} = \left[\frac{C_b - 5C_p - 5C_m k}{C_o k} \right]_f \quad (8)$$

3) 令 $f=1$, 采用枚举法, 求出满足要求的 l_i , 使得 $nC_p + nC_m \sum_{i=1}^k l_i + C_o f \sum_{i=1}^k l_i = C_b$, 即可得到试验方案 $\{k, f, l_i\}$ 。

- 4) 若 $f=f+1$, 转到步骤 3), 直到 $f=f_{\max}$ 。
- 5) 令 $n=n+1$, 返回步骤 2), 重复步骤 2) ~ 4)。
- 6) 选取满足要求的变量, 构造备选方案集 D 。

4.2 优化算法

由于本文中所涉及到的设计变量多、建模复杂, 因此采用直接优化方法。如图 1 所示, 基于粒子群算法的步降加速退化试验优化设计具体步骤如下所述:

- 1) 构造备选方案集 D ;
- 2) 从备选方案集 D 中选取一个试验方案 $d_l, d_l = \{n, k, S_i, f, l_i\}, i=1, \dots, k, l=1, 2, \dots, L, L$ 为预设备选方案个数;

3) 对于给定的试验方案 d_l , 利用蒙特卡罗方法模拟步降应力加速退化试验 N_{mc} 次, 得到 N_{mc} 组模拟试验退化数据 $\{y_{ij}(t_{ih})\} (i=1, 2, \dots, k, j=1, 2, \dots, n, h=1, 2, \dots, l_i) \}_N, N=1, \dots, N_{mc}$;

4) 对每一组模拟失效试验数据进行统计分析, 计算 U_{lN} ;

5) 计算平均值

$$U_l = \frac{1}{N_{mc}} \sum_{N=1}^{N_{mc}} U_{lN} \quad (9)$$

将其作为该试验方案所对应的目标函数值 U_l ;

6) 返回步骤 2) 选取另外一个试验方案并重复步骤 3) ~ 5), 直到所有的试验方案全部已选取, 此时可得目标函数值集, 即 $\Omega = \{U_l, l=1, 2, \dots, L\}$;

7) 对步骤 6) 得到的目标函数值集进行目标直接寻优, 获取最优方案 d^* 。

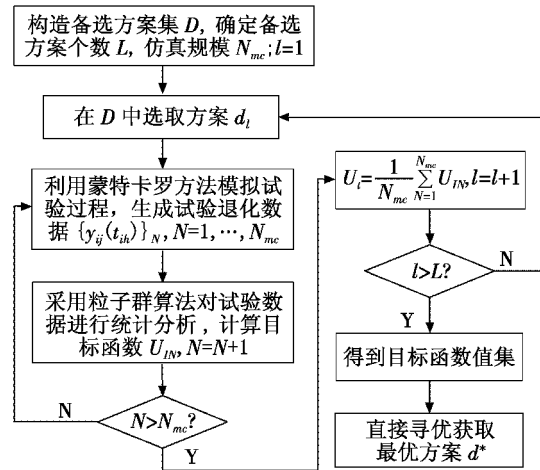


图 1 SDSADT 优化设计流程图

Fig. 1 Optimal design flow diagram for SDSADT

4.3 目标函数的计算

4.3.1 β_{ij} 的估计

根据退化试验数据 $\{y_{ij}(t_{ih})\}_{h=1}^{l_i}$, 利用最小二乘估计法估计 β_{ij} , 通过最小化

$$\chi^2(\beta_{ij}) = \sum_{h=1}^{l_i} [\varphi(y_{ij}(t_{ih})) + \beta_{ij} t_{ih}^\alpha]^2 \quad (10)$$

可得 β_{ij} 的 LSE $\hat{\beta}_{ij}$ 为

$$\hat{\beta}_{ij} = \beta_{ij} - \frac{\sum_{h=1}^{l_i} \varepsilon_{ij}(t_{ih}) t_{ih}^\alpha}{\sum_{h=1}^{l_i} t_{ih}^{2\alpha}} \quad (11)$$

4.3.2 m, a 和 b 的估计

由于 $\hat{\beta}_{ij}^{-1} \sim \text{Weibull}(m, \eta_i)$, 故可基于 $\hat{\beta}_{ij}^{-1}$ 得到 m, a 和 b 的 MLE。

其对数似然函数为: $l(m, a, b) = \sum_{i=1}^k n \cdot \ln m - \sum_{i=1}^k n \cdot$

$$m \cdot (a + b\varphi(S_i)) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (m-1) \cdot \ln \frac{1}{\beta_{ij}} - e^{-am} \sum_{i=1}^k e^{-b\varphi(S_i)m} \cdot \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{\beta_{ij}}\right)^m.$$

由对数函数 l 对参数 m, a 和 b 进行各阶偏导求解可得到局部 Fisher 信息阵为

$$F = - \begin{bmatrix} E\left(\frac{\partial^2 l}{\partial m^2}\right) & E\left(\frac{\partial^2 l}{\partial m \partial a}\right) & E\left(\frac{\partial^2 l}{\partial m \partial b}\right) \\ 0 & E\left(\frac{\partial^2 l}{\partial a^2}\right) & E\left(\frac{\partial^2 l}{\partial a \partial b}\right) \\ 0 & 0 & E\left(\frac{\partial^2 l}{\partial b^2}\right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: l 为对数似然函数; 矩阵各项为 l 的二次偏导在模型参数 m, a 和 b 采用粒子群算法取估计值时的值 \hat{m}, \hat{a} 和 \hat{b} 。

4.3.3 粒子群优化算法(PSO)

PSO 算法的基本思想^[10]为: 对于一群随机粒子, 首先对其进行初始化, 而后通过迭代搜索最优解。在迭代搜索的过程中, 粒子根据局部最优解和全局最优解自主地对自己的速度和位置进行动态更新, 最终得到其最优解。在 PSO 算法中, 随机粒子通过下式来调整自己的位置与新的速度。

$$v_{i,j}(t+1) = wv_{i,j}(t) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2 r_2 [p_{g,j} - x_{i,j}(t)] \quad (13)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \quad j=1, 2, \dots, d \quad (14)$$

式中: $v_{i,j}$ 为第 i 个粒子在第 j 维搜索空间上的速度; $x_{i,j}$ 为第 i 个粒子在第 j 维搜索空间上的位置; w 为惯性权重系数; c_1 和 c_2 为学习因子, 此处均为正; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 的满足均匀分布的随机数。

运用粒子群优化算法进行 m, a 和 b 的 MLE 估计过程如下所述。

1) 根据对数似然函数, 用 M 文件编写器编写适应度函数。

```
function F = fitness(x)
```

```
F = 0;
```

```
for i = 1: k
```

```
    for j = 1: n
```

```
        F = F + lg((x1/exp(x2 + x3 * s(i))) * (((beta(i,j)/exp(x2 + x3 * s(i))) ^ (x1 - 1) * exp(-((beta(i,j)/exp(x2 + x3 * s(i))) ^ x1
```

```
end
```

```
end
```

其中: x_1, x_2 和 x_3 分别代表 m, a 和 b ; $\text{beta}(i, j)$ 表示 $\hat{\beta}_{ij}^{-1}$ 。

2) 调用粒子群算法优化适应度函数。

调用粒子群算法主函数 PSO.m, 其中有如下关键

代码: $\text{function}[x_m, f_v] = \text{PSO}(\text{fitness}, N, c_1, c_2, w, M, D)$ 。其中: x_m 为目标函数取最小值时的自变量值; f_v 为目标函数最小值; D 为自变量的个数; M 为最大迭代次数; w 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子; N 为粒子数目; fitness 为待优化的目标函数。

4.3.4 渐近方差估计

试样的寿命 ζ 可定义为退化量 y 穿过临界水平 G 所对应的时间。 ζ 可表示为

$$\zeta = \left[\frac{-\varphi(G)}{\beta} \right]^{1/\alpha} \quad (15)$$

由于 $\beta^{-1} \sim \text{Weibull}(m, \eta)$, 故 $\zeta \sim \text{Weibull}(\alpha m, [-\eta \cdot \varphi(G)]^{1/\alpha})$ 。于是使用应力水平 S_0 下产品 p 分位寿命 ζ_{p0} 可表示为

$$\zeta_{p0} = \left[\exp(a + b\varphi(S_0)) \cdot (-\varphi(D)) \right]^{1/\alpha} \cdot \left[-\ln(1-p) \right]^{1/(\alpha m)} \quad (16)$$

结合加速模型, 得到正常应力水平 S_0 下对数 P 阶分位寿命估计, 即

$$\ln \zeta_{p0} = \frac{1}{\alpha} \left\{ a + b\varphi(S_0) + \ln(-\varphi(D)) + \frac{\ln[-\ln(1-P)]}{m} \right\} \quad (17)$$

进而得到其渐近方差估计, 即

$$\text{avar}(\zeta_{p0}) = \mathbf{V} \mathbf{F}^{-1} \mathbf{V}^T \quad (18)$$

式中,

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\alpha} \frac{\ln[-\ln(1-P)]}{m^2} & \frac{1}{\alpha} & \frac{\varphi(S_0)}{\alpha} \end{bmatrix}.$$

5 算例分析

算例来自文献[6]。发光二极管的寿命定义为标准化退化量达到失效阈值 $G=0.5$ 的时间, 其寿命受温度的影响。其正常温度水平为 $T_0=278$ K, 由该产品的失效机理, 确定最低温度水平 $T_{\min}=298$ K, 最高温度水平 $T_{\max}=378$ K; 假设退化率服从逆 Weibull 分布; 费用参数分别为 $C_p=55$ 元/个, $C_m=1.3$ 元/次, $C_o=1.9$ 元/单位时间, $P=0.05$ 。样品的先验信息如下所述。

1) 退化轨迹为

$$1 - \frac{1}{y_{ij}(t_{ih})} = -\beta_{ij} t_{ih}^\alpha + \varepsilon_{ij}(t_{ih}) \quad (19)$$

式中: $\alpha=0.65$; $\varepsilon_{ij}(t_{ih}) \sim N(0, 1.9782 \times 10^{-3})$; $\beta_{ij}^{-1} \sim \text{Weibull}(m, \eta_i)$, $m=8.3379$ 且与应力水平无关。

2) 加速模型为

$$\ln \eta_i = a + b\varphi(S_i) \quad (20)$$

式中: 加速方程选择 Arrhenius 方程, $a=0.7338672$; $b=1918.1624087$; $\varphi(S_i) = 1000/(273+T)$ 。

现在对其进行优化设计: 首先, 为了简化优化问

题,假定这些转换应力水平呈平均分布,即 $\varphi(S_i) = 1000 / (273 + T_{\max} - (i - 1)(T_{\max} - T_{\min}) / (k - 1))$ 。然后令 $C_b = 600$ 元,应力水平数 k 分别取 2 和 3,可得试验方案如表 1 所示。

表 1 不同应力水平数仿真方案

Table 1 Optimal SDSALT plan for different stresses

k	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$T_3/^\circ\text{C}$
2	105	25	—
3	105	65	25

按照本文提供的优化方法进行优化设计,具体结果如表 2 所示。

表 2 不同应力水平数优化结果

Table 2 Optimal SDSALT result for different stresses

k	f	l_1	l_2	l_3	n	$avar(\zeta_{p0})$
2	1	1	14	—	8	20×10^4
3	1	1	2	26	7	0.9003×10^4

从表 2 中可以看出,在试验总费用一定的条件下,目标函数的值与样本量均随着应力水平数的增加而减小。实际上当 $C_b = 600, k$ 为 2 或 3 时,最大样本量 n_{\max} 都是 10,试验已属于小子样情况。从表中的计算结果得到最优方案就是小子样情况下的优化设计的结果,后面的仿真结果也证实了这一点。但考虑到样本量不能小于 5,因而应力水平数不宜过多。

令 $k = 3$,试验总费用 C_b 分别取 400 元,500 元和 600 元,可得试验方案如表 3 所示。

表 3 不同试验总费用仿真方案

Table 3 Optimal SDSALT plan for different budgets

$C_b/\text{元}$	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$T_3/^\circ\text{C}$
400	105	65	25
500	105	65	25
600	105	65	25

按照本文提供的优化方法进行优化设计,具体结果如表 4 所示。

表 4 不同试验总费用优化结果

Table 4 Optimal SDSALT result for different budgets

$C_b/\text{元}$	f	l_1	l_2	l_3	n	$avar(\zeta_{p0})$
400	1	2	4	10	5	1.3054×10^4
500	1	1	4	6	6	0.9307×10^4
600	1	1	2	26	7	0.9003×10^4

从表 4 可以看出,在应力水平数一定的条件下,目标函数的值随着试验总费用的增加而减小,样本量随着试验总费用的增大而增大。如果试样样本为贵重件时,应考虑限制试验总费用来限制试样的数量。

令应力水平数 $k = 3, C_b = 600$ 元,取不同的应力水平组合,可得试验方案如表 5 所示,按照本文提供的优化方法进行优化设计,具体结果如表 6 所示。

表 5 不同应力水平组合仿真方案

Table 5 Optimal SDSALT plan for different stress combinations

$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$T_3/^\circ\text{C}$
85	65	45
95	65	35
105	65	25

表 6 不同应力水平组合优化结果

Table 6 Optimal SDSALT result for different stress combinations

f	l_1	l_2	l_3	n	$avar(\zeta_{p0})$
1	1	3	5	9	1.1495×10^4
1	2	4	9	8	1.1115×10^4
1	1	2	26	7	0.9003×10^4

从表 6 可以看出,在试验总费用和应力水平数一定的条件下,目标函数的值随着最高最低应力水平跨度的增大而减小。

$$\text{最终优化的试验方案为 } d = \left. \begin{array}{l} T = [105^\circ\text{C}, 65^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}] \\ C_b = 600 \\ l = [1, 2, 26] \\ f = 1 \\ n = 7 \end{array} \right\}$$

其最优方案在给定的约束下 $n = 7$,属于小子样条件得到的最优方案,从而论证了该方法满足小子样产品步降加速退化试验优化设计,为其工程应用奠定了一定基础。

6 总结

本文针对步降应力加速退化试验进行了讨论,提出了在费用约束条件下基于 Monte-Carlo 仿真的优化设计方法,分析了不同应力水平数、不同试验费用约束以及不同的应力水平组合条件下的最优试验方案,得到了最终优化的试验方案,证明了该方法满足小子样产品步降加速退化试验优化设计,补充和完善了加速退化试验优化设计理论框架,增强了试验的效率,证明了此方法的可行性与正确性,为其工程应用的需求奠定了良好的基础,但是在本次研究中,水平应力数只选择了两个,以此数据推算其变化规律,与实际情况有一定差距。

参考文献

- [1] 贺国光,周良生. 基于可靠性单元的网络系统可靠性简化算法[J]. 机械设计,2008(7):62-65. (HE G G, ZHOU L S. Simplified algorithm on reliability of network system based on reliability units[J]. Journal of Machine Design, 2008(7):62-65.)

- [2] NELSON W B. Accelerated testing: Statistical methods, test plans, and data analysis [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1990:91-94.
- [3] MEEKER W Q, ESCOBAR L A, LU J C. Accelerated degradation tests: Modeling and analysis [J]. Technometrics, 1998, 40(2) :89-99.
- [4] YU H F. Designing an accelerated degradation experiment with a reciprocal Weibull degradation rate [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2006, 136(1) :282-297.
- [5] TANG L C, YANG G Y, XIE M. Planning of step-stress accelerated degradation test [C]//RAMS, Los Angeles, USA, 2004 :278-292.
- [6] LIAO C M, TSENG S T. Optimal design for step-stress accelerated degradation tests [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2006, 55(1) :59-66.
- [7] 汪亚顺,张春华,陈循,等. 仿真基混合效应模型加速退化试验方案优化设计研究 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (12) : 108-114. (WANG Y S, ZHANG C H, CHEN X, et al. Simulation-based optimal design for accelerated degradation tests with mixed-effects model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (12) : 108-114.)
- [8] 潘刚,梁玉英,孟军,等. 小样本条件下步降加速退化试验优化设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2013(5) :91-94. (PAN G, LIANG Y Y, MENG J, et al. Optimization design of step-down-stress accelerated degradation test on condition of small sample [J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(5) :91-94.)
- [9] NELSON W B. Graphical analysis of accelerated test with a mix of failure modes [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1975, 23(3) :230-237.
- [10] 董胜,韩意,陶山山,等. Weibull 分布参数的粒子群算法估计 [J]. 中国海洋大学学报, 2012(6) :120-125. (DONG S, HAN Y, TAO S S, et al. Parameters estimation for Weibull distribution with particle swarm optimization [J]. Periodical of Ocean University of China, 2012 (6) :120-125.)
- (上接第 85 页)
- [11] ZHENG G Q, ZHENG Y. Radar netting technology & its development [C]//Proceedings of IEEE CIE International Conference on Radar, 2011:933-937.
- [12] GU B, HE C. Simulation for hierarchical structure and distributed radar netting [C]//The 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), IEEE, 2012:1-4.
- [13] 中国民用航空局. 中国民用航空 ADS-B 实施方案规划 [R]. 北京:中国民用航空局, 2012. (Civil Aviation Administration of China. Civil aviation of China ADS-B implementation planning [R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2012.)
- [14] 王春阳,宫健,冯坤菊,等. 基于粒子群算法的多基地雷达优化布站方法 [J]. 现代防御技术, 2010, 38(2) : 104-107. (WANG C Y, GONG J, FENG K J, et al. Multi-static radar optimal disposition approach based on particle swarm optimization [J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(2) :104-107.)
- [15] CHLUDZINSKI B J, DRUMM A C, ELDER T R, et al. Lincoln laboratory 1030/1090 MHz monitoring [R]. ATC-390. Lexington: MIT Lincoln Laboratory, 2011.
- [16] PANKEN A D, HARMAN W H, ROSE C E, et al. Measurements of the 1030 and 1090 MHz environments at JFK international airport [R]. Spring Field: Lincoln Laboratory, 2012.
- [17] BOCI E, SARKANI S, MAZZUCHI T A. Optimizing ADS-B RF coverage [C]//Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, IEEE, 2009 :1-10.

本刊国内邮发代号为 36 - 693 欢迎订阅