Vol. 41 No. 3 Jun. 2023

[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.03.004

# 双应力同步降压与双应力交叉步 降压实验的数值模拟与应用

张志强,蔡庆秋

(上海理工大学 机械工程学院,上海 200093)

摘 要:为进一步比较可靠性工程中评估产品寿命的2种常规方法(双应力同步降压加速寿命实验和双应力交叉步降压加速寿命实验)的实验效率,课题组借助计算机仿真,并调用服从Weibull分布的产品寿命的典型算例,比较了2种实验方法的时间消耗和产品失效速率,发现在相同实验条件下双应力同步降压加速寿命实验方法提高的实验效率更显著。课题组在双应力同步降压加速寿命实验失效时间曲线的基础上,利用蒙特卡罗法研究了Weibull分布中形状参数 m对不同样本数与不同应力水平下双应力同步降压加速寿命试验的失效时间和效率的影响。结果表明:在相同形状参数下,各应力水平的失效时间曲线的趋势一致;在同一应力水平下,不同形状参数的失效时间曲线稳定相交于各样本容量的63%。这一结论也适用于其他的双应力加速寿命实验。课题组基于双应力同步降压加速寿命实验方法,建立了一种绕线联轴器加速退化模型,并推导出了一种在绕线联轴器正常工作条件下预测产品可靠性寿命的数学模型。解析结果表明该预测模型能够有效预测绕线联轴器的真实寿命。

关 键 词:可靠性评估;双应力:加速寿命实验:Weibull 分布;效率比:形状参数

中图分类号:TH123.4

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2023)03-0024-11

## Numerical Simulation and Application of Double-Stress Synchronous Step-Down Experiment and Double-Stress Cross-Step Step-Down Experiment

ZHANG Zhiqiang, CAI Qingqiu

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In orde to compare the experimental efficiency of two conventional methods for evaluating product life in reliability engineering: double stress synchronous step-down accelerated life test and the double stress cross step step-down accelerated life test, computer simulation was used, and a typical example of product life following Weibull distribution was called. According to the comparison of the time consumption and product failure rate of the two experimental methods, it was found that under the same experimental conditions, the double stress synchronous step-down accelerated life test method improved the experimental efficiency more significantly. Based on the failure time curve of double-stress synchronous step-down accelerated life test, the influence of shape parameters in Weibull distribution on failure time and efficiency of dual stress synchronous step-down accelerated life test under different sample numbers and different stress levels was studied by using Monte-Carlo method. The results show that the failure time curves of different stress levels have the same trend under the same shape parameters. Under the same stress level, the failure time curves of different shape parameters intersect stably at 63% of each sample size. This conclusion is also applicable to other double-stress accelerated life tests. An accelerated degradation model of the winding coupling was established, and a mathematical model was derived to predict the reliability life of the product under the normal working

condition of the winding coupling, based on the accelerated life experiment method of double stress synchronous depressurization. The analytical results show that the reliability life prediction model based on the accelerated life experiment data can effectively predict the real life of the winding coupling.

**Keywords:** reliability assessment; double stress; accelerated life test; Weibull distribution; efficiency ratio; shape parameter

加速寿命实验方法是针对于高可靠性产品寿命的 定量评估技术手段,是可靠性工程的重要研究问题之 一,也是这一领域最高效的解决方法之一。因此,研究 出更经济、更高效的加速寿命实验方法势在必行。对 于单个加速变量的加速寿命实验,已有许多文献将步 降应力加速寿命实验(step-down-stress accelerated life test, SDS-ALT) 与步升应力加速寿命实验(step-upstress accelerated life test, SUS-ALT) 结合起来。文献 [1]中对 SDS-ALT 的效率进行了讨论,研究得出 SDS-ALT 比 SUS-ALT 更能提高实验效率。但在实际应用 中,加速寿命实验往往涉及多个加速变量。文献[2] 中讨论了双应力同步降压加速寿命实验(double-stress synchronous step-down accelerated life test, DSSDS-ALT) 与双应力同步升压加速寿命实验(double-stress synchronous step-up accelerated life test, DSSUS-ALT), 并得出 DSSDS-ALT 效率明显高于 DSSUS-ALT 的结 论。文献[3]中讨论了双应力交叉步降压加速寿命实 验(double-stress cross-step step-down accelerated life test, DCSDS-ALT) 与双应力交叉步升压加速寿命实验 (double-stress cross-step step-up accelerated life test, DCSUS-ALT), 结果表明 DCSDS-ALT 的效率高于 DCSUS-ALT。因此,在实际工程设计中,为进一步缩减 实验时间和实验成本,有必要对 DSSDS-ALT 与 DCSDS-ALT 的效率做进一步的讨论与比较。

课题组通过对 Weibull 分布下的 DSSDS-ALT 进行蒙特卡罗数值模拟与仿真,进一步研究 Weibull 分布的形状参数、样本数和应力水平等对失效时间曲线的影响,并在此基础上,对效率更高的加速寿命实验方法应用进行研究。

## 1 加速寿命实验方法

双应力同步降压加速寿命实验:2组加速应力分别为 $S_1$ 和 $S_2$ ,每组应力包括一系列的应力水平,正常工况下应力水平和加速应力水平分别为 $^{[4]}$ :

$$S_{10} < S_{11} < S_{12} < \dots < S_{1l};$$
  
 $S_{20} < S_{21} < S_{22} < \dots < S_{2k,0}$ 

式中: $(S_{1i}, S_{2j})$ 是第1组中第i个和第2组中第j个应力水平组合; $i=1,2,\cdots,l;j=1,2,\cdots,k;(S_{1l},S_{2k})$ 是产品最高的应力水平参考值; $(S_{10},S_{20})$ 是产品正常的应力水平参考值。

双应力同步降压加速寿命实验具体步骤如下:

- 1) 先从实验产品的总体中随机选择 n 个产品样本,然后在产品最高应力水平( $S_{1l}$ , $S_{2k}$ )下进行定数截尾恒加实验,并假设试样截断的个数为  $r_{lk}$ 。
- 2) 如果实验中出现试样破坏,则 2 个加速应力在各自应力水平上会下降 1 个水平,此时应力水平变为  $(S_{1(l-1)}, S_{2(k-1)})_{\circ}$
- 3) 对残余的  $n r_{lk}$ 个实验样本继续做定数截尾恒加实验,此时截断样本数量为  $r_{(l-1)(k-1)}$ 。 当最后一组应力水平在数值上降低至( $S_{11}$ , $S_{21}$ ),若应力水平l 和 k 不相等时,应力水平组合的最后一次下降方式为首先下降到水平1 的应力保持不变,直到另一个应力的水平下降到1,即失效试样数为  $r_{11}$ 时,停止降压实验。

双应力同步降压加速寿命实验的 2 个应力同时减小,并且加速应力水平满足  $|l-k| \le 1$ ,整个测试过程通常需由 3 步或 3 步以上,测试的应力组合 D 表示如下:

$$D = \{(S_{1l}, S_{2k}), (S_{1(l-1)}, S_{2(k-1)}), \cdots, (S_{11}, S_{21})\}$$
。  
最终加速寿命实验共得到 $r$ 个失效样本:

$$r = r_{lk} + r_{(l-1)(k-1)} + \cdots + r_{11} \le n_{\circ}$$

为了保证实验统计分析的准确性,有必要保证失效试样数量满足: $r_{ij} > 3$ 。各应力水平组合( $S_{1i}$ , $S_{2j}$ )的试样破坏时间满足:

$$t_{ij1} \leq t_{ij2} \leq \cdots \leq t_{ijr_{ii}} \circ$$

式中: $t_{ij1}$ , $t_{ij2}$ ,…, $t_{ijr_{ij}}$ 分别表示在应力水平组合( $S_{1i}$ , $S_{2j}$ ) 下的第1,2,…, $r_{ij}$ 个样本失效所用的时间。

若假设产品寿命是服从 Weibull 分布函数,则可以认为正常应力水平 $(S_{10},S_{20})$ 与加速应力水平 $(S_{1i},S_{20})$ 

 $S_{2j}$ )组合下的产品寿命均服从 Weibull 分布,则寿命分布函数为:

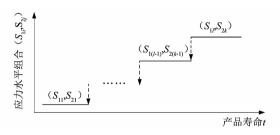
$$F_{ii}(t) = 1 - \exp \{-(t/\eta_{ii})^{m_{ij}}\}_{\circ}$$
 (1)

式中: $\eta$  为尺度参数,m 为形状参数,且  $\eta > 0$  和m > 0; t 表示产品寿命,且 t > 0;  $\eta_{ij}$ 和  $m_{ij}$ 分别表示应力水平组合( $S_{1i}$ , $S_{2j}$ )下的尺度参数和形状参数; $F_{ij}$ (t)表示应力水平组合( $S_{1i}$ , $S_{2j}$ )下 t 的概率发生函数,且  $0 \le F_{ij}$ (t)  $\le 1$ 。

产品的失效机理并不会由于加速应力水平的变化而发生改变,故用来表征失效机理的 Weibull 分布函数图像的形状参数m-旦确定,在实验中则不会发生改变,即:

$$m_{00} = m_{ii} = m_{\circ}$$

图 1 所示为双应力同步降压加速寿命试验各应力下降的具体方式;图 2 所示为双应力交叉步降压加速寿命试验各应力下降的具体方式。



## 图 1 双应力同步降压加速寿命实验的应力施加过程

Figure 1 Stress application process of double-stress synchronous step-down accelerated life test

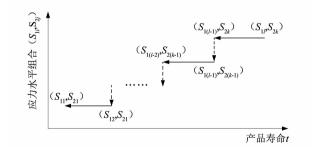


图 2 双应力交叉步降压加速寿命 实验的应力施加过程

Figure 2 Stress application process of double-stress cross-step step-down accelerated life test

### 2 Monte-Carlo 仿真

为模拟产品失效寿命数据,课题组设计了一种随

机变量统计实验,并应用了蒙特卡罗概率模拟法,以期 拟合产品寿命预测模型中的工程问题近似解<sup>[3]343</sup>。

用蒙特卡罗方法来模拟寿命服从 Weibull 分布的 双应力同步降压加速寿命实验,首先要生成服从 Weibull 分布的随机抽样定数截尾样本。根据 Weibull 定理,随机变量 X 的分布函数 F(x) 是可导的,则 r=F(x) 也是(0,1) 区间上的一类随机变量。由(1) 式,令 p=F(t) ,则 p 为(0,1) 区间上的随机变量,可得到  $t_p=F(p)$  ,因此可先令计算机在(0,1) 的区间内随机生成 n 个数,与前面实验中选择进行试验的产品样本数量一致,如  $p_1,p_2,\cdots,p_n$ ,这些数即可作为在抽样个体发生失效时对应的可靠度,代入 F(p) 中。双应力同步降压加速寿命实验从应力水平 $(S_{1l},S_{2k})$  开始,取 $\eta=\eta_{lk}$ ,已知 m,便得到双应力同步降压加速寿命实验在 Weibull 分布下的最高应力水平组合 $(S_{1l},S_{2k})$ 下的 n 个随机抽样样本[5-6]:

$$t_{p_z} = F(p_z) = \eta_{lk} (-\ln (1 - p_z))^{1/m}, z = 1, 2, \dots, n_o$$
(2)

而后将其变化为双应力同步降压加速寿命实验各 步的失效数据,详细步骤如下:

- 1) 先将所生成的样本按照从小到大的顺序进行排列,然后取前  $r(r = r_{lk} + r_{(l-1)(k-1)} + \cdots + r_{11})$  个失效时间作为失效样本,并将剩下的 n-r 个样本作为定数截尾样本。
- 2) 取前  $r_{lk}$ 个数据  $t_{w_1}(w_1 = 1, 2, \dots, r_{lk})$ 作为最高应力水平 $(S_{1l}, S_{2k})$ 下的失效数据  $t_{w_l}$ 。
- 3)接着上步取  $r_{(l-1)(k-1)}$  个数据  $t_{w_2}(w_2 = r_{lk} + 1, r_{lk} + 2, \cdots, r_{lk} + r_{(l-1)(k-1)})$  減去累计实验时间  $t_{r_{lk}}$ 并分别乘以应力  $(S_{1l}, S_{2k})$  对  $(S_{1(l-1)}, S_{2(k-1)})$  的加速因子 $\eta_{(l-1)(k-1)}/\eta_{lk}$ ,得到应力水平 $(S_{1(l-1)}, S_{2(k-1)})$ 下的失效数据  $t_{w_{(l-1)(k-1)}}\circ$

$$t_{w_{(l-1)(k-1)}} = (t_{w_2} - t_{r_{lk}}) \cdot \frac{\eta_{(l-1)(k-1)}}{\eta_{nk}}$$
 (3)

式中 $t_m$ 为第 $r_k$ 个样本失效时所用的时间。

4)接着上步取  $r_{(l-1)(k-1)}$  个数据  $t_{w_3}$  ( $w_3 = r_{lk} + r_{(l-1)(k-1)} + 1, \cdots, r_{lk} + r_{(l-1)(k-1)} + r_{(l-2)(k-2)}$ )減去累计实验时间  $t_{r_{lk}+r_{(l-1)(k-1)}}$ 并各自乘以 $(S_{1l}, S_{2k})$ 对 $(S_{1(l-2)}, S_{2(k-2)})$ 的加速因子  $\eta_{(l-2)(k-2)}/\eta_{lk}$ 从而得到应力水平

 $(S_{1(l-2)},S_{2(k-2)})$ 下的失效数据  $t_{w_{(l-2)(k-2)}}$  。

$$t_{w_{(l-2)(k-2)}} = \left(t_{w_3} - t_{r_{lk} + r_{(l-1)(k-1)}}\right) \cdot \frac{\eta_{(l-2)(k-2)}}{\eta_{lk}}_{\circ} \quad (4)$$

重复以上步骤直到算出应力水平 $(S_{11}, S_{21})$ 下的失效数据,至此取得双应力同步降压加速寿命实验每一步的失效数据  $t_{w_{11}}$ 。

对服从 Weibull 分布的双应力交叉步降压加速寿命实验失效数据的仿真可根据前面双应力同步降压加速寿命试验的实验步骤进行,为了便于比较,仍采用式(2) 生成的随机抽样样本来计算双应力交叉步降压加速寿命实验各步的失效数据。

其中除第1)步得到的失效数据为寿命数据外,其他失效数据均不是,即双应力同步降压加速寿命实验以及双应力交叉步降压加速寿命实验中在应力水平  $(S_{11},S_{2k})$ 下取得的数据为寿命数据,其他均为从应力下降到这一步起开始计算的失效时间。

## 3 数值算例

以一组双应力加速寿命实验数据为例,采用 Weibull 分布来模拟双应力同步降压加速寿命实验及 双应力交叉步降压加速寿命实验,进行了以温度 T 和 电压 U 为加速变量的双应力加速寿命实验<sup>[3]344,[7]</sup>。  $(S_{T_0}, S_{U_0})$ 为正常状态下的应力水平,其余为加速状态下的应力水平。其中:

$$T_0 = 353 \text{ K}, T_1 = 373 \text{ K}, T_2 = 388 \text{ K}, T_3 = 403 \text{ K};$$
 
$$U_0 = 100 \text{ V}, U_1 = 200 \text{ V}, U_2 = 300 \text{ V}, U_3 = 400 \text{ V},$$
 
$$U_4 = 500 \text{ V}_{\odot}$$

双应力同步降压加速寿命试验的加速应力水平变 化轨迹为:

$$(S_{T_1}, S_{U_4}) \rightarrow (S_{T_1}, S_{U_2}) \rightarrow (S_{T_1}, S_{U_2}) \rightarrow (S_{T_1}, S_{U_1})_{\circ}$$

双应力交叉步降压加速寿命试验的加速应力水平 变化轨迹为:

$$(S_{T_3}, S_{U_4}) \rightarrow (S_{T_3}, S_{U_3}) \rightarrow (S_{T_2}, S_{U_3}) \rightarrow (S_{T_2}, S_{U_2}) \rightarrow (S_{T_1}, S_{U_2}) \rightarrow (S_{T_1}, S_{U_1}) \circ$$

测试的总步数为 L = (3 + 4 + 1)/2。各截尾样本均值为:

$$r_{34} = 23$$
;  $r_{23} = 17$ ;  $r_{12} = 6$ ;  $r_{11} = 5$ 

根据上节描述的仿真模拟步骤进行蒙特卡罗仿真。其中:样本容量 n = 100,模拟进行 1 000 次,形状参数 m = 1。Weibull 分布下双应力同步降压加速寿命实验失效时间如表 1 所示,双应力交叉步降压加速寿命实验失效时间如表 2 所示。

表 1 双应力同步降压加速寿命实验仿真失效数据

Table 1 Simulation failure data of double-stress synchronous step-down accelerated life experiment

$(S_{T_i}, S_{U_j})$	$T_i/K$	$U_j/V$	$oldsymbol{\eta}_{ij}$	$r_{ij}$	失效时间/h
					0.170 3,0.188 1,0.345 5,0.363 8,0.370 5,0.434 2,0.438 1,0.509 3,0.718 4,
$(S_{T_3},S_{U_4})$	403	500	5.27	23	0.795 2,0.824 5,0.900 0,0.976 5,1.256 8,1.301 8,1.354 4,1.478 3,1.499 1,
					1.515 4,1.550 2,1.697 1,1.756 0,1.766 3
(C C )	200	400	07.00	17	0.985 6,1.946 6,4.205 5,5.654 3,6.028 8,6.512 6,7.394 6,7.842 9,7.943 0,
$(S_{T_2}, S_{U_3})$	388	400	97.98	17	11. 313 9,11. 595 9,11. 973 9,12. 615 0,12. 616 4,14. 218 9,15. 253 4,19. 101 6
$(S_{T_1}, S_{U_2})$	373	300	2 842.00	6	14. 259 9,16. 526 6,56. 613 5,91. 586 4,104. 014 2,124. 201 0
$(S_{T_1}, S_{U_1})$	373	200	17 621.00	5	136. 948 1,314. 906 7,776. 827 5,801. 971 4,803. 388 5

表 2 双应力交叉步降压加速寿命实验仿真失效数据

Table 2 Simulation failure data of double-stress cross-step step-down accelerated life experiment

$(S_{T_i}, S_{U_j})$	$T_i/\mathrm{K}$	$U_j/{ m V}$	$oldsymbol{\eta}_{ij}$	$r_{ij}$	失效时间/h
$(S_{T_2}, S_{U_4})$	403	500	5.27	12	0. 170 3 ,0. 188 1 ,0. 345 5 ,0. 363 8 ,0. 370 5 ,0. 434 2 ,0. 438 1 ,
$(U_{T_3}, U_{U_4})$	403	300	3.21	12	0.509 3,0.718 4,0.795 2,0.824 5,0.900 0
$(S_{T_3},S_{U_3})$	403	400	14.39	11	0. 208 9, 0. 974 0, 1. 096 9, 1. 240 3, 1. 578 7, 1. 635 3, 1. 679 8, 1. 774 8, 2. 175 9, 2. 336 6, 2. 364 9
$(S_{T_2},S_{U_3})$	388	400	97.98	9	0.985 6,1.946 6,4.205 5,5.654 3,6.028 8,6.512 6,7.394 6,7.842 9,7.943 0
$(S_{T_2},S_{U_2})$	388	300	357.58	8	12. 302 0,13. 331 1,14. 710 5,17. 050 0,17. 055 3,22. 903 5,26. 678 9,40. 722 6
$(S_{T_1},S_{U_2})$	373	300	2 842.00	6	14. 259 9,16. 526 6,56. 613 5,91. 586 4,104. 014 2,124. 201 0
$(S_{T_1},S_{U_1})$	373	200	17 621.00	5	136.948 1,314.906 7,776.827 5,801.971 4,803.388 5

在相同条件下,2个实验所用的全部实验时间之比的倒数为其效率比,全部实验所用时间为实验各应力水平的最后一个失效样本失效时间之和。由表1双应力同步降压加速寿命实验仿真失效数据可知全部实验所用时间为948.4574h。由表2双应力交叉步降压加速寿命实验仿真失效数据可知全部实验所用时间为979.5200h。于是双应力同步降压加速寿命实验与双应力交叉步降压加速寿命实验的效率比等于1.0328,效率比大于1。对这一过程进行多次重复仿真,得到效率比的统计规律结果如图3所示,图中效率比平均值为1.022,说明双应力同步降压加速寿命实验效率。

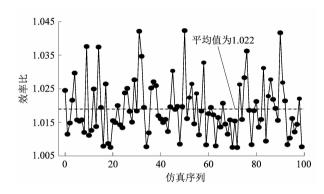


图 3 双应力同步降压加速寿命实验与双应力交叉步降压加速寿命实验效率比

igure 3 Efficiency ratio of double-stress synchronous step-down accelerated life test and double-stress cross-step step-down accelerated life test

图 3 的效率比统计规律图是在 Weibull 分布形状 参数 m=1 的情况下取得的,但可通过模拟仿真得到 在任意 m>0 的情况下,此效率比均大于 1 的结论,即 双应力同步降压加速寿命实验效率总是高于双应力交 叉步降压加速寿命实验效率。并随着 m 的增大,效率 比有向上增大的趋势。故对于高可靠性、长寿命的产品而言,双应力同步降压加速寿命实验方法是优于双应力交叉步降压加速寿命实验方法,能够进一步提高实验效率、缩短实验时间的。

下面对有更高效率的双应力同步降压加速寿命实验进行进一步的分析。Weibull 分布中的形状参数 m 会对不同应力水平条件下的实验数据产生影响。当双应力同步降压加速寿命实验满足定数截尾数时,同时

取 2 个应力水平 $(S_{T_3}, S_{U_4})$ 和 $(S_{T_2}, S_{U_3})$ (取样本数 n = 100)进行仿真分析,结果如图 4 所示。

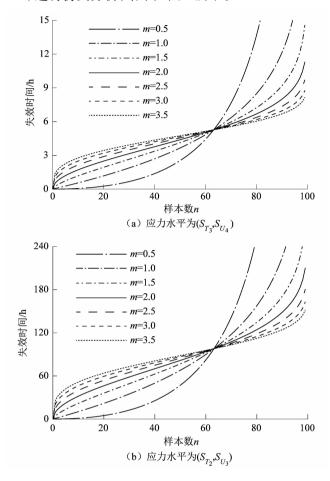


图 4 形状参数 m 与不同应力水平的关系

Figure 4 Relationship between shape parameters m and different stress levels

从图 4 可以看出不同应力水平下,相同形状参数 m 的 Weibull 分布失效时间的趋势是一致的。当反应 应力水平的温度与电压减小时,失效时间会有明显增 加,当温度与电压水平增大时,失效时间会有明显 缩短。

图 5 所示为 Weibull 分布下,不同的形状参数 m 对失效时间的影响,其中  $0.5 \le m \le 3.5^{[3]344}$ ,样本总数 n=100,应力水平为  $(S_{T_3},S_{U_4})$ 。由图 5 可以看出:当失效样本数低于 63% 时,随着形状参数 m 的增大,失效时间增加;当失效样本数超过 63% 时,随着形状参数 m 的增大,失效时间减少。同时,随着形状参数 m 的增大,失效时间减少。同时,随着形状参数的增大,数值较小的 m 的失效时间曲线开始时低于数值较大的 m ,但随着失效的试样数越来越多,数值较小的

m 的失效时间曲线逐渐比数值较大的 m 更高,并且不同数值的 m 的失效时间曲线相交于样本数的 63%。此结论在形状参数 m 取上限为无穷大,下限为 0.5 时始终成立。

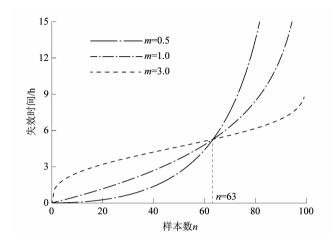


图 5 形状参数 m 与失效时间的关系 Figure 5 Relationship between shape

parameters m and failure time

上述的所有研究是在样本数 n = 100 的情况下进行的<sup>[8]</sup>,课题组将研究样本量是否会对双应力同步降压加速寿命实验的失效时间产生影响<sup>[9]</sup>。根据实际设置样本量 n = 50,150 和 200,在应力水平( $S_{T_3}, S_{U_4}$ )下进行仿真,得到的结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,取不同样本量 n 时,Weibull 分布的失效时间曲线仍然稳定相交在样本量的 63%。因此,当所选失效试样数小于样本量的 63%时,形状参数 m 越小,双应力同步降压加速寿命实验时间越短;当所选失效试样数大于样本量的 63%时,形状参数 m 越大,双应力同步降压加速寿命实验时间越短。也就是说,当形状参数 m 相对较小时,双应力同步降压加速寿命实验可以选择较小的破坏试样数进行截尾实验,有助于缩短实验时间。当形状参数 m 较大时,双应力同步降压加速寿命实验可选择较大破坏试样数进行截尾实验。这些结论也可用于其它双应力加速寿命实验。

## 4 实验

联轴器是机械传动中常用的零部件,被安装在动力传动的驱动侧和从动侧之间,具有传递旋转扭矩、补偿轴间安装误差等作用,可确保系统工作平稳、结构紧

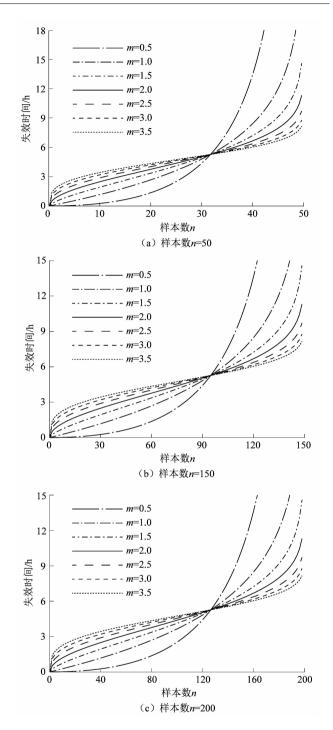


图 6 不同样本量下 Weibull 分布的失效时间 Figure 6 Failure time of Weibull distribution with different sample sizes

凑等<sup>[10]</sup>。但常由于疲劳破坏造成联轴器的性能退化,会使传动系统的附加动载荷剧增,导致传动系统发生振动、元件损坏,进而损坏整个机械传动系统。因此,提前预知联轴器在合理负载情况下的有效寿命具有重要意义。课题组基于加速寿命退化试验原理,以绕线

联轴器为例,通过采集到的产品性能退化数据,建立了 绕线联轴器的可靠性寿命模型,给正常工况下绕线联 轴器的可靠性寿命预测提供了参考模型。

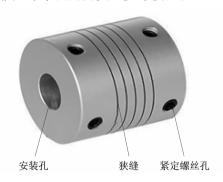


图7 绕线联轴器

Figure 7 Wound coupling

## 4.1 实验台设计

为了能够使被测绕线联轴器能在不同扭转应力下可持续工作,且得到不同应力下长时间加载后绕线联轴器的扭矩滞后量参数变化数据,实验台需要具备驱动装置和加载装置,通过驱动装置和加载装置的配合来完成被测绕线联轴器运行工况的模拟,包括对输入转速和加载转矩这2个关键参数的控制,以及对绕线联轴器扭矩滞后量参数的测量。被测绕线联轴器加速退化试验测试系统的原理如图8所示。

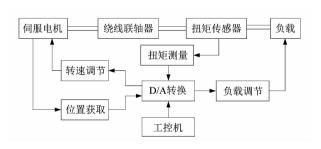


图 8 测试系统组成

Figure 8 Test system composion

加速退化试验台系统硬件部分如图 9 所示。绕线 联轴器加速疲劳寿命试验台以 GXFZ-A 型磁粉制动器 为负载装置施加扭矩,驱动端以 SGMGV 型伺服电机 作为动力装置输入转速来模拟绕线联轴器的工作状 态。与电机搭配使用的驱动器是 SGDV 型伺服驱动 器。加载端磁粉制动器与扭矩传感器之间由梅花联轴 器连接。梅花联轴器额定扭矩为 30 N·m,高于加速 寿命退化试验台系统的最大扭矩值,因此加速退化试 验台工作时,梅花联轴器对绕线联轴器(被测试验对象)造成的干扰可近似忽略。工控机负责伺服驱动器的配置,使伺服驱动器可以与交流伺服电机进行数据交换得以准确输出转速,以及实现对磁粉制动器的控制。EtherCAT 相合器和 EtherCAT I/O 端子模块可实现控制信号的反馈量与工控机之间的数据通信<sup>[11]</sup>。



图 9 测试系统实物结构组成

Figure 9 Structure of test system composition

加速试验系统测试平台主要包括控制部分、执行部分、监测部分及传动部分。实验中影响转矩加载的因素比较多,为了避免负载振荡造成待测绕线联轴器的损伤和试验台移位,实现稳定加载,课题组采用反馈控制来实现闭环控制。扭矩传感器测定的实时电流值转换得到的扭矩值反馈给工控机;工控机通过运动控制算法给驱动器发送控制指令,驱动器通过功率放大器的电流控制量控制磁粉制动器产生输出扭矩,从而达到控制目标。为了准确模拟工况,须保持磁粉制动器的负载稳定,需要对磁粉制动器的运动进行闭环控制[12]。课题组采用经典的PID控制方法,该方法适用于类似磁粉制动器非线性的控制系统,通过PID调节控制实现磁粉制动器超调量近似为0,稳态误差在极小的范围内波动。测试系统如图10所示。

#### 4.2 实验数据与处理

加速退化试验的基础思想是选择比产品正常使用 应力偏大的应力作为加速应力,所选的应力应不改变 产品的正常失效机理,这样的方案会对产品的性能退 化速率起到加速的效果。由于绕线联轴器的失效机理 不能被忽略,所以最终加速寿命退化试验的加速应力

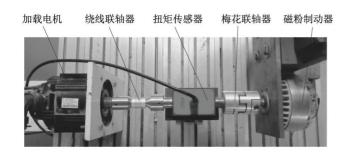


图 10 测试系统 Figure 10 Test system

变量选择了交变载荷与转速。在这个基础上,扭转刚 度可以被视为判断绕线联轴器可靠性是否达标的 依据。

绕线联轴器的有效使用寿命很高,且性能退化缓 慢,结合时间和经济成本,课题组在所有应力水平作用 下,分别选择了5个绕线联轴器依次进行了双应力同 步降压加速寿命试验。在划分应力水平前先要确定正 常工况的应力水平,绕线联轴器正常工作扭矩值为 0.75 N·m, 当扭矩值大于 3.00 N·m 时绕线联轴器 的实际扭转刚度将在数值上突破许用扭转刚度,导致 绕线联轴器的实际失效寿命被缩短。为了避免扭矩输 入值对实验结果产生负反馈效应,扭矩变化趋势下的 最低应力水平应当在数值上高于 0.75 N·m,最高应 力水平在数值上应当在小于上限的情况下尽可能大。 基于上述条件,课题组选取 1.50 和 3.00 N·m 作为 扭矩变化趋势下的最低和最高应力水平。为节省时间 以及降低经济成本,加载的扭矩分别选择了1.50,2.20 和 3.00 N·m; 电机转速对应选择了 3 000,3 600 和 4 500 r · min<sup>-1</sup>

绕线联轴器是一种可靠性相对较高的产品。由于 其性能退化较慢,因此需要人为设定截尾时间。考虑 到多种因素,本实验最终确定在最大应力试验条件下, 只要绕线联轴器的扭矩滞后量突破 40°这个阈值,即 绕线联轴器外表面沿轴向的直线在扭转中变形角度超过 40°,就判定试验为失效并停止。以该时间作为加速退化试验下的截尾时间,在试验过程中,间隔相同时间监测并记录一次性能退化测量值。

在对绕线联轴器实施双应力同步降压试验时,以绕线联轴器扭矩的滞后量参数作为绕线联轴器的性能退化参数,随机抽取 5 个试验样本,双应力同步降压应力水平选择 3 组,分别为:  $(S_{N_1},S_{R_1})$ ,  $(S_{N_2},S_{R_2})$ 和 $(S_{N_3},S_{R_3})$ 。

其中: $N_1 = 3.00 \text{ N} \cdot \text{m}, R_1 = 4500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}; N_2 = 2.20 \text{ N} \cdot \text{m}, R_2 = 3600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}; N_3 = 1.50 \text{ N} \cdot \text{m}, R_3 = 3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}_{\circ}$ 

进一步考虑到数据统计分析时的精度要求,定数截 尾实验应保证50%以上的样品失效,因此双应力同步降 压加速寿命试验应采用不对称截尾数设计<sup>[13]</sup>,即:

$$r_3 > 0.5r; r_3 > r_2 > r_{10}$$
 (5)

根据式(5), 当加载应力水平为( $S_{N_1}$ ,  $S_{R_1}$ ), ( $S_{N_2}$ ,  $S_{R_2}$ )和( $S_{N_3}$ ,  $S_{R_3}$ )时,试验数据采集次数分别为 9, 4 和 4。

15 个随机样本在 3 组应力水平 $(S_{N_1}, S_{R_1})$ , $(S_{N_2}, S_{R_2})$ 和 $(S_{N_3}, S_{R_3})$ 下完成加速退化试验后,绕线联轴器实物图变化结果如图 11 所示。观察对比发现,在相同工作寿命的情况下,绕线联轴器性能退化效果随着承受的载荷值的增加明显增加,实物图中的表现为狭缝

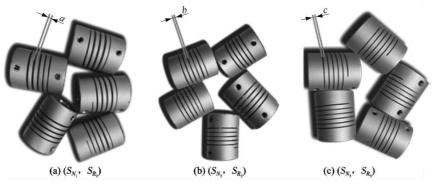


图 11 3组应力水平下的狭缝

Figure 11 Slits under 3 sets of stress levels

增大,c > b > a。( $S_{N_1}$ , $S_{R_1}$ )载荷下狭缝变形最大,说明在此载荷应力下绕线联轴器性能退化快,而( $S_{N_3}$ , $S_{R_3}$ )载荷应力下狭缝变形效果并不明显。

样本在各应力水平下进行加速退化试验后,将其扭矩滞后量参数的变化整理并绘制出样本的性能退化量-工作寿命关系曲线,其结果如图 12 所示。其中每条线为一个绕线联轴器,结果显示当加速应力为( $S_{N_1}$ , $S_{R_1}$ )时,绕线联轴器的扭矩滞后量降低到 40°的工作时间要比应力水平为( $S_{N_3}$ , $S_{R_3}$ )和应力水平为( $S_{N_2}$ , $S_{R_2}$ )时快得多;其次,几种不同性能退化曲线的退化趋势基本相同。

通过借助伪失效寿命的概念,可解决产品实际寿命较长和不方便进行加速试验的问题。所谓伪失效寿命,并非是产品的实际使用时间,而是人为设定的使用寿命。当产品性能劣化到人为设定使用寿命时,产品被认定为"伪失效"。试验中对绕线联轴器设定了一个失效阈值,在产品性能退化到设定阈值时,产品被视为"失效",试验停止。最后,根据过应力下获得的产品性能退化数据,预测产品在正常工作条件下的寿命[14]。

加速试验的应力水平为  $S_{\omega}$ , 若样品在失效模式 d 下的退化量随时间变化的函数表达式为 $D_{d\omega\Phi_{\alpha}}(t)$ ,则可以得到退化量的测量值为:

$$y_{d\omega\phi_{\alpha}}(t_{\phi_{\alpha}}) = D_{d\omega\phi_{\alpha}}(t_{\phi_{\alpha}}) + \varepsilon_{d\omega\phi_{\alpha}}(t_{\phi_{\alpha}}) \, . \tag{6}$$

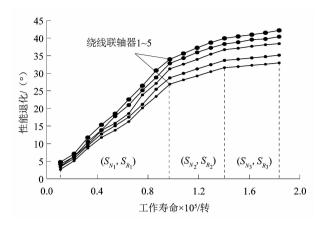


图 12 双应力同步降压退化试验 绕线联轴器性能退化曲线

Figure 12 Performance degradation curves of winding coupling in double-stress synchronous step-down degradation test

式中: $y_{d\omega\Phi_{\alpha}}(t_{\Phi_{\alpha}})$ 表示应力水平  $S_{\omega}$  下第  $\Phi(\Phi=1,\dots,\Phi_{\alpha})$ 次测量时间  $t_{\Phi_{\alpha}}$ 的测量值; $\varepsilon_{d\omega\Phi_{\alpha}}(t_{\Phi_{\alpha}})$ 表示相应的测量误差。

对样本回归模型采用最小二乘法原理进行估计, 其结果如表3所示。

为求解 15 个样本的退化轨迹模型结果,失效阈值  $D_f = 40^\circ$ 被分别代入了 15 个退化轨迹方程中。求解得到的每个试样模拟失效寿命结果如表 4 所示。

表 3 15 个试验样本退化模型未知参数

Table 3 Unknown parameters of degradation model of 15 test samples

编号ω	模型数 $lpha_{d\omega\Phi_lpha}$	模型系数 $eta_{d\omega\Phi_lpha}$	退化模型
1	-0.032 60	0.004 040	D(t) = 0.03260 + 0.004040t
2	-0.027 40	0. 003 610	D(t) = -0.02740 + 0.003610t
3	0.017 48	0. 003 571	D(t) = 0.01748 + 0.003571t
4	-0.026 25	0. 003 414	D(t) = -0.02625 + 0.003414t
5	0.034 70	0. 004 534	D(t) = 0.03470 + 0.004534t
6	-0.068 00	0. 012 540	$D(t) = -0.068\ 00 + 0.012\ 540t$
7	-0.089 50	0. 008 730	D(t) = -0.08950 + 0.008730t
8	-0.05470	0. 009 870	D(t) = -0.05470 + 0.009870t
9	-0.105 20	0. 011 920	D(t) = -0.10520 + 0.011920t
10	-0.024 20	0. 013 240	$D(t) = -0.024\ 20 + 0.013\ 240t$
11	0. 290 40	0. 031 660	D(t) = 0.29040 + 0.031660t
12	0. 362 20	0. 027 680	D(t) = 0.36220 + 0.027680t
13	0.474 80	0. 030 500	D(t) = 0.47480 + 0.030500t
14	0.555 00	0. 028 790	$D(t) = 0.555\ 00 + 0.028\ 790t$
15	0.05660	0. 034 240	D(t) = 0.05660 + 0.034240t

#### 表 4 双应力同步降压试验中性能退化轨迹方程及伪失效寿命

Table 4 Performance degradation trajectory equation and pseudo failure life in double-stress synchronous step-down degradation test

应力水平	编号ω	伪失效寿命函数	伪失效寿命 $T_{\omega}/r$
$(S_{N_1}, S_{R_1})$	1	$T = 0.580053 + 29.59455 \times D(t)$	118 436. 20
	2	$T = 2.362510 + 43.36337 \times D(t)$	123 689. 70
	3	$T = 5.584738 + 26.76753 \times D(t)$	137 606. 30
	4	$T = -9.630660 + 34.84321 \times D(t)$	138 409. 80
	5	$T = 15.612460 + 29.94909 \times D(t)$	121 357. 60
$(S_{N_2}, S_{R_2})$	6	$T = 88. \ 189 \ 660 + 95. \ 785 \ 44 \times D(t)$	391 960. 70
	7	$T = 53.373150 + 87.67555 \times D(t)$	376 406. 30
	8	$T = 76.280013 + 89.59755 \times D(t)$	386 707. 10
	9	$T = -16.778400 + 113.59760 \times D(t)$	452 712. 70
	10	$T = 32.590480 + 95.23810 \times D(t)$	384 211. 40
$(S_{N_3}, S_{R_3})$	11	$T = -266.189000 + 238.94860 \times D(t)$	929 175. 60
	12	$T = -153.467\ 000 + 249.568\ 50 \times D(t)$	983 707. 60
	13	$T = -87.548700 + 239.55594 \times D(t)$	950 307. 61
	14	$T = -1.447220 + 283.76840 \times D(t)$	1 134 929. 00
	15	$T = -124.857\ 000 + 237.642\ 60 \times D(t)$	938 084. 60

伪失效寿命服从 Weibull 分布,其分布函数:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right)_0 \tag{7}$$

参数估计方法一般采用最佳线性无偏估计来求解 分布参数 m 和 η 的点估计, m 和 η 分别为形状参数与 尺度参数, 其参数求解的步骤为: 对伪失效寿命数据进 行排序, 然后对排序后的数据取对数, 得到对应的极值 分布:

$$x_1 \leqslant x_2 \leqslant \cdots \leqslant x_i \leqslant \cdots \leqslant x_n \circ$$

其中  $x_i = \ln t_i$ 。

对得到的数据进行参数估计,估计的公式如下:

$$\hat{\alpha} = \sum_{j=1}^{n} D(n, n, j) x_{j} = \sum_{j=1}^{n} D(n, n, j) \ln t_{j};$$

$$\hat{\sigma} = \sum_{j=1}^{n} C(n, n, j) x_{j} = \sum_{j=1}^{n} C(n, n, j) \ln t_{j};$$
(8)

式中:D(n,n,j),C(n,n,j)分别是利用完全样本(n,n)求解极值分布参数  $\alpha,\sigma$  后的方差系数。

根据上面的极值分布参数点估计  $\hat{\alpha}$  和  $\hat{\sigma}$ ,即可求解出 Weibull 分布参数的点估计:

$$\hat{m} = \frac{g(n,n)}{\hat{\sigma}}; 
\hat{\eta} = \exp(\hat{\alpha}),$$
(9)

式中:g(n,n)是完全样本映射的m的估计值的修偏系数。

计算得到伪失效寿命服从该 Weibull 分布的参数估计值结果如表 5 所示, $\eta_{lk}$ 表示尺度参数, $\eta_{lk}$ 会随应力不同而改变。

表 5 各应力水平伪失效寿命 Weibull 分布参数估计值
Table 5 Parameter estimates of Weibull distribution of pseudo failure life at various stress levels

应力水平	$\hat{m}$	$\hat{\boldsymbol{\eta}}_{lk}$
$(S_{N_1}, S_{R_1})$	11. 30	10 566
$(S_{N_2}, S_{R_2})$	13.03	4 269
$(S_{N_3}, S_{R_3})$	11.64	1 332

在得到分布参数估计值后进行加速模型拟合,得 正常使用载荷下产品失效寿命分布参数为:

$$\hat{m} = 11.99; \hat{\eta}_{(0,0)} = 297630_{\circ}$$

因此,伪失效寿命服从 Weibull 分布时,绕线联轴器在正常使用应力作用下在给定时间 t 的可靠度函数 R(t) 的点估计为:

$$\hat{R}(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\hat{\eta}_{(0,0)}}\right)^{\overline{m}}\right) = \exp\left(-\left(\frac{t}{297630}\right)^{11.99}\right) \circ \tag{10}$$

对于绕线联轴器这类高寿命的产品,工程应用中更关心的是对应的高可靠度时的可靠寿命,由图 13 得到在可靠度 R(t)=0.9 时,对应的可靠寿命值为  $2.5\times10^7$  r<sub>o</sub>

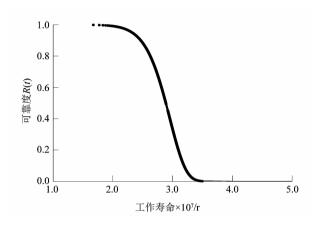


图 13 双应力同步降压退化试验绕线 联轴器的可靠性曲线

Figure 13 Reliability curve of winding coupling in double-stress synchronous step-down degradation test

## 5 结语

课题组对 Weibull 分布下形状参数 *m* = 1 时的双应力同步降压加速寿命实验和双应力交叉步降压加速寿命实验进行了数值模拟仿真,得到的失效时间结果表明双应力同步降压加速寿命实验的效率。讨论了 Weibull 分布在不同形状参数 *m* 下的失效时间曲线,结果表明各失效时间曲线稳定相交于样本数的 63%。当形状参数 *m* 相对较小时,双应力同步降压加速寿命实验可以选择较小的破坏试样数进行截尾实验,有助于缩短实验时间;当形状参数 *m* 较大时,双应力同步降压加速寿命实验可选择较大破坏试样数进行截尾实验。在此基础上,课题组采用效率更高的双应力同步降压加速寿命实验方法,对绕线联轴器的可靠性进行评估,可预测到绕线联轴器在正常工况下,可靠度为 0.9 时工作

寿命为  $2.5 \times 10^7$  r。因此,通过本试验的研究分析,得到作用于机械传动系统中的绕线联轴器的更换周期为  $2.5 \times 10^7$  r。此试验方法也可应用于其他联轴器的可靠性评估。

### 参考文献:

- [1] 徐晓岭,王蓉华,於嵩,等.对数正态分布步加试验和步降试验的 效率比较分析[J].机械工程学报,2009,45(4):56.
- [2] KOU H X, AN Z W, SUN D M. Comparison analysis of efficiency between double-synchronous step-down-stress and step-up-stress accelerated life tests [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2017, 22(3);361.
- [3] 王玉明,蔡金燕. 双应力交叉步降加速寿命试验的数值模拟[J]. 计算机仿真,2008,25(12):342-345.
- [4] 孙天宇,师义民,谢奇. Weibull 分布下双应力交叉步加试验的可靠性分析[J]. 机械强度,2013,35(3):253-257. DOI:10. 16579/j. issn. 1001. 9669. 2013. 03. 001.
- [5] 温熙森,张春华,陈循.步降应力加速寿命试验:上篇 方法篇 [J]. 兵工学报,2005,26(5):661-665.
- [6] 金星,洪延姫. 系统可靠性评定方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:925.
- [7] 寇海霞,安宗文,刘波. 双应力同步步降加速寿命试验方法[J]. 电子科技大学学报,2016,45(2):316-320.
- [8] 李庆伟,王东东. Weibull 分布参数对双应力降阶加速寿命试验的影响研究[J]. 中国地质大学学报(自然科学版),2018,37(1):1-7.
- [9] LI Z D. Reliability test and evaluation of weibull distribution [J].
  Quality and Reliability, 2003, 105 (3): 26 33.
- [10] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 5卷. 北京: 机械工业出版社. 2004·15.3-15.108.
- [11] Beckhoff Automation. BECKHOFF New Automation Technology

  Ethercat [EB/OL]. [2022-08-02]. https://www.beckhoff.com.cn/
  zh-cn/products/i-o/ethercat-terminals/el4xxx-analog-output/.
- [12] 袁宇凤,任芳,杨兆建.磁粉制动器数学建模与控制方法研究 [J]. 机械设计与制造,2018(7):13-15.
- [13] 陈文华, 贺青川, 潘骏, 等. 机械产品可靠性试验技术研究现状与展望[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1):72-82.
- [14] HARTER H L, MOORE A H. An evaluation of exponential and Weibull test plans [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1976, R-25 (2):100-104.