

文章编号:1000-8055(2013)03-0520-05

恒定应力无失效加速寿命试验 可靠性分析方法

张勇波, 傅惠民, 王治华

(北京航空航天大学 小样本技术研究中心, 北京 100191)

摘 要: 针对工程中缺少有效方法处理加速寿命试验中出现的无失效数据的情况, 提出一种恒定应力水平下的无失效加速寿命试验可靠性分析方法. 该方法首先将各个加速应力水平下的无失效寿命试验数据转换到正常应力水平, 然后通过对正常应力水平下的无失效寿命数据进行分析, 实现产品的可靠性评估与寿命预测. 利用该方法对某型号卫星地球敏感器扰性枢轴的无失效加速寿命试验数据进行分析处理, 结果表明该方法切实可行, 能够充分利用各个加速应力水平下产品的无失效试验数据, 较好地解决了产品进行无失效加速寿命试验的可靠性评估和寿命预测问题.

关 键 词: 恒定应力; 加速寿命试验; 寿命预测; 可靠性; 卫星地球敏感器

中图分类号: V448; TB301; O211

文献标志码: A

Method for reliability analysis on constant-stress zero-failure accelerated life test

ZHANG Yong-bo, FU Hui-min, WANG Zhi-hua

(Research Center of Small Sample Technology,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100191, China)

Abstract: Given that there is not yet an effective method for dealing with the zero-failure data in the accelerated life tests among engineering projects, a method for reliability analysis on the constant-stress zero-failure accelerated life test was proposed. This method can equivalently covert the zero failure data in the accelerated stress level to the normal stress level. Then, reliability assessment and life prediction on the product under zero-failure accelerated life test condition could be achieved in the normal stress by dealing with the converted data. Based on this method, analysis was conducted on the zero-failure accelerated life test data of one kind of satellite earth sensor pintle. The result shows that this method has well solved the problem of reliability assessment and life prediction when the product is subject to zero-failure accelerated life test by fully utilizing the information.

Key words: constant-stress; accelerated life test; life prediction; reliability;
satellite earth sensor

寿命试验不但耗费大量的人力物力, 而且往往试验周期很长. 因此, 工程上常常综合采用加速

寿命试验和中止寿命试验来降低费用, 缩短产品研制时间. 在加速寿命试验的可靠性研究领域之

收稿日期: 2012-03-23

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.520_007.html

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB720000)

作者简介: 张勇波(1984—), 男, 四川隆昌人, 博士后, 从事加速试验技术、可靠性工程及复合材料失效分析等方面研究.

2 多个应力水平无失效加速寿命试验数据的可靠性分析

设一组共 n 个产品进行多个应力水平的加速寿命试验. 首先将产品分为 k 组, 每组数量为 n_k ($n_1 + n_2 + \dots + n_k = n$), 然后选取 k 个加速应力水平 ($S_1, S_2, \dots, S_k$), 每个加速应力水平都高于正常的应力水平 S_0 . 产品在每个加速应力水平下分别进行无失效加速寿命试验, 得到 k 组无失效数据, 其中 t_i^j ($i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, n_k$) 表示第 j 个应力水平下的第 i 个无失效数据. 同样, 假定该产品对数寿命特征与应力水平满足以下的线性模型

$$\ln \xi = a + b\varphi(S) \quad (11)$$

其中 ξ 为产品的寿命特征; a, b 为待定常数; $\varphi(S)$ 为应力水平 S 的已知函数.

同样, 由于无法获得产品真实的对数寿命特征随加速应力变化的曲线, 如图 2 中所示直线 ADE. 因此, 只能将各个加速应力水平下的无失效寿命试验数据转换到正常的应力水平进行可靠性分析, 其原理与单个无失效加速寿命试验数据的处理相同. 由此, 将各个加速应力水平下的无失效寿命试验数据点坐标带入式(11)可得

$$\ln t_i^j = a' + b'\varphi(S_i) \quad (12)$$

即

$$a' = \frac{\varphi(S_i) \ln t_m - \varphi(S_m) \ln t_i^j}{\varphi(S_i) - \varphi(S_m)} \quad (13)$$

$$b' = \frac{\ln t_i^j - \ln t_m}{\varphi(S_i) - \varphi(S_m)} \quad (14)$$

所以, 加速应力水平下的寿命试验数据转换到正常应力水平的等效寿命 $t_{i,0}^j$ 为

$$t_{i,0}^j = t_i^j \frac{\varphi(S_m) - \varphi(S_0)}{\varphi(S_m) - \varphi(S_i)} \cdot t_m \frac{\varphi(S_i) - \varphi(S_0)}{\varphi(S_i) - \varphi(S_m)} \quad (15)$$

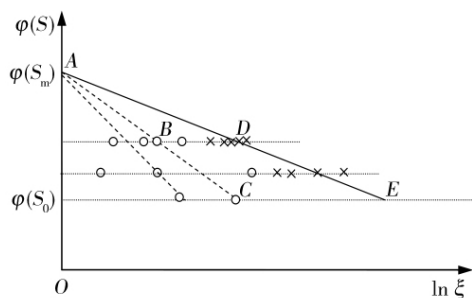


图 2 多个应力水平无失效加速寿命试验示意图

Fig. 2 Schematic of zero-failure accelerated life test with several stress levels

若产品寿命服从指数分布

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad (16)$$

可以通过式(15)与文献[10]推导得到, 在正常应力水平 S_0 下, 产品给定可靠 R 的置信水平为 γ 的可靠寿命置信下限 $t_{R,low}$ 为

$$t_{R,low} = \frac{\ln R}{\ln(1-\gamma)} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_k} t_{i,0}^j \quad (17)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, n_k$, 且 $n_1 + n_2 + \dots + n_k = n$.

同样, 对于给定寿命 t , 产品置信水平为 γ 的可靠度 R 的单侧置信下限 R_{low} 可由下式给出

$$R_{low} = \exp\left[t \ln(1-\gamma) / \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_k} t_{i,0}^j\right] \quad (18)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, n_k$, 且 $n_1 + n_2 + \dots + n_k = n$.

若产品寿命服从两参数 Weibull 分布, 即

$$F(N) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (19)$$

式中 α 为形状参数, β 为尺度参数. 则其在正常应力水平下, 置信水平为 γ 的给定可靠度 R 的寿命置信下限 $t_{R,low}$, 及给定寿命 t 的可靠度置信下限 R_{low} 分别为

$$t_{R,low} = \left[\frac{\ln R}{\ln(1-\gamma)} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_k} (t_{i,0}^j)^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (20)$$

$$R_{low} = \exp\left[t^\alpha \ln(1-\gamma) / \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_k} (t_{i,0}^j)^\alpha\right] \quad (21)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, n_k$, 且 $n_1 + n_2 + \dots + n_k = n$.

3 应用实例

某卫星地球敏感器以 5 Hz 的频率实现对地扫描, 其在轨工作 n 年的摆动循环次数 N 可以通过下式进行计算

$$N = 5 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 \times n$$

该地球敏感器扰性枢轴的无失效加速寿命试验数据如表 1 所示.

其中 $S_0 = 0.1 N$ 表示正常应力水平, $S_1 = 3 N$ 表示加速应力水平, 极限加速应力水平 $S_m = 27 N$, $t_m = 1/4$. 并且, 地球敏感器扰性枢轴的对数寿命特征与加速应力之间满足以下模型:

$$\ln \xi = a + bS$$

现求该卫星地球敏感器扰性枢轴正常工作 15 年的置信水平为 $\gamma = 0.6$ 的可靠度单侧置信下限; 以及同样的置信水平下, 当给定可靠度为 $R = 0.97$

时,卫星地球敏感器扰性枢轴正常工作的寿命置信下限。

表1 地球敏感器无失效寿命试验数据
Table1 Zero-failure accelerated life test data of earth sensor

序号	循环次数/次	
i	$S_0/10^8$	$S_1/10^8$
1		>4.73
2		>4.73
3	>20.5	
4	>3.15	
5	>3.15	

首先,利用本文上述方法将加速应力水平下的无失效寿命试验数据转换到正常的应力水平。由表1所示,在加速应力水平下有2个无失效寿命试验数据。因此,根据式(15)可以求得无失效寿命试验数据 $t_{1,0}, t_{2,0}$ 为

$$t_{1,0} = t_{2,0} = t_1 \frac{S_m - S_0}{S_m - S_i} \cdot t_m \frac{S_i - S_0}{S_i - S_m} =$$

$$(4.73 \times 10^8)^{\frac{25.77-0.1}{25.77-3}} \left(\frac{1}{4}\right)^{\frac{3-0.1}{3-25.77}} =$$

$$6.57 \times 10^9$$

由于该卫星地球敏感器扰性枢轴寿命遵循两参数Weibull分布,且材料为马氏体不锈钢。因此,其寿命分布的形状参数下限 α 取2.2。由此,可通过式(20)求得,对于给定的使用寿命 $t = 15$ 年,其可靠度 R 的置信水平 $\gamma = 0.6$ 的单侧置信下限为

$$R_{\text{low}} = \exp\left[t^a \ln(1-\gamma) / \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_k} (t_{i,0}^j)^a\right] =$$

$$0.955$$

同样,由式(21)可以求得对于给定可靠度 $R = 0.97$,其置信水平 $\gamma = 0.6$ 的条件下的可靠寿命单侧置信下限为

$$t_{R,\text{low}} = \left[\frac{\ln R}{\ln(1-\gamma)} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_k} (t_{i,0}^j)^a \right]^{1/a} = 12.3 \text{ 年}$$

4 结 论

1) 工程中往往综合采用加速寿命试验和截尾寿命试验来降低费用,缩短产品研制时间。但是,目前传统的加速寿命试验分析方法很难处理试验数据无失效数据的情况。

2) 提出一种恒定应力无失效加速寿命试验可靠性分析方法,可以利用无失效加速寿命试验

数据对产品进行可靠性分析。

3) 本文方法能够充分利用产品在各个加速应力水平下的寿命信息,并将其转换到正常的应力水平,从而在正常应力水平下实现产品的可靠性评估与寿命预测。

4) 通过具体工程应用表明,本文方法切实可行,很好地解决了无失效加速寿命试验数据分析与处理的问题。

参考文献:

- [1] 茆诗松,王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [2] Nelson W. Accelerated testing: statistical models, test plans and data analyses[M]. New York: John Wiley & Sons,1990.
- [3] 茆诗松. 威布尔分布下的恒加速试验的图分析法[J]. 质量与可靠性,2003(5):14-18.
- [4] 江晓武. 恒应力寿命试验截尾模型参数的最佳估计[J]. 数学的实践与认识,2005,35(12):38-77.
JIANG Xiaowu. The parametric best estimations of cut tail's models in life testing by the constant-stress [J]. Mathematics in Practice and Theory,2005,35(12):38-77. (in Chinese)
- [5] 孙利民,张志华. Weibull 分布下恒定应力加速寿命的试验分析[J]. 江苏理工大学学报:自然科学版,2000,21(4):78-81.
SUN Limin, ZHANG Zhihua. Statistical analysis of twin-stress accelerated life test under Weibull distribution [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition,2000,21(4):78-81. (in Chinese)
- [6] 张志华. 恒定应力加速寿命试验的非参数统计方法[J]. 海军工程大学学报,2001,13(2):12-16.
ZHANG Zhihua. Nonparametric approach of accelerated life testing[J]. Journal of Naval University of Engineering,2001,13(2):12-16. (in Chinese)
- [7] Wang W, Kececioglu D B. Fitting the Weibull log-linear model to accelerated life test data[J]. IEEE Transactions on Reliability,2000,49(2):217-223.
- [8] 程细玉,吴绍敏. Weibull 分布场合恒加速寿命试验统计分析[J]. 华侨大学学报:自然科学版,1998,19(4):334-338.
CHENG Xiyu, WU Shaomin. Statistic analysis for Weibull distribution accelerated life test [J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science Edition, 1998, 19(4): 334-338. (in Chinese)
- [9] 傅惠民,张勇波. Weibull 分布定时无失效数据可靠性分析方法[J]. 航空动力学报,2010,25(12):2807-2810.
FU Huimin, ZHANG Yongbo. Method of reliability analysis for time truncated zero-failure data based on Weibull distribution [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(12):2807-2810. (in Chinese)
- [10] 傅惠民,王凭慧. 无失效数据的可靠性评估和寿命预测

- [J]. 机械强度, 2004, 36(3): 260-264.
- FU Huimin, WANG Pinghui. Reliability assessment and life prediction for zero-failure data[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 36(3): 260-264. (in Chinese)
- [11] 郑德强, 张正平, 李海波, 等. Weibull 分布下恒定应力加速寿命试验分组数据的统计分析[J]. 强度与环境, 2008, 35(6): 40-44.
- ZHEN Deqiang, ZHANG Zhengpin, LI Haibo, et al. Statistical analysis of constant-stress accelerated life testing under Weibull distribution based on grouped data[J]. Structure & Environment Engineering, 2008, 35(6): 40-44. (in Chinese)
- [12] 湛远礼, 罗红. 恒定应力加速寿命试验模型及应用: 威布尔分布[J]. 自动化与仪器仪表, 2009(6): 48-50, 54.
- ZHANG Yuanli, LUO Hong. Constant stress accelerated life test model and its application: Weibull distribution[J]. Automation & Instrumentation, 2009(6): 48-50, 54. (in Chinese).
- [13] 张春华, 陈循, 李岳. 一种新的 Weibull 分布恒定应力加速寿命试验分析方法[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(2): 81-84.
- ZHANG Chunhua, CHEN Xun, LI Yue. Analysis for constant-stress accelerated life testing data under Weibull life distribution[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2002, 24(2): 81-84. (in Chinese)
- [14] 高伟, 赵选民. 混合指数分布恒定应力加速寿命试验的统计分析[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(8): 913-916.
- GAO Wei, ZHAO Xuanmin. Statistical analysis of constant stress accelerated life testing of mixture exponential distribution[J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(8): 913-916. (in Chinese)
- [15] 陈娟, 王占林, 王少萍. 气缸恒定应力加速寿命试验谱的研究[J]. 液压与气动, 2006(7): 11-13.
- CHEN Juan, WANG Zhanlin, WANG Shaopin. Research on accelerate life test spectrum for pneumatic cylinders[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2006(7): 11-13 (in Chinese).