加速度计加速退化机理一致性边界确定方法

王前程 陈云霞 邓沣鹂 康 锐

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 以加速退化模型——Arrhenius 模型为研究对象,发现加速度计在加速试验过程中,保持加速机理不变的应力与退化轨迹斜率存在密切关系.通过针对退化轨迹模型分别为一次函数、指数函数和幂函数三种常见情况,从激活能不变角度推导出保证加速度计加速机理不变的应力-斜率公式,然后基于退化轨迹斜率区间检验提出了一种加速机理一致性条件确定方法,最后根据加速度计恒定高温标度因数稳定性退化仿真试验数据,准确得到了保持加速度计标度因数稳定性退化机理一致的应力边界,验证了该方法的可行性.

关 键 词: 加速度计; 退化机理一致性; Arrhenius 模型; 退化轨迹

中图分类号: V 241.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)11-1512-05

Approach of determining accelerated degradation mechanism consistency's boundary for accelerometers

Wang Qiancheng Chen Yunxia Deng Fengli Kang Rui

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Through analyzing the Arrhenius model in the accelerated degradation testing, it is found that there is a close relationship between the operating stress and the slope of degraded trajectory in the accelerometer accelerated testing. The degradation trajectory models such as linear function, exponential function and power function were studied. The formulas on the operating stress and the slope of degraded trajectory were inferred from the perspective that the activation energy does not change. Then a method of determining accelerated degradation mechanism consistency's boundary was offered based on the slope interval inspection of degradation trajectory. Finally, according to the constant temperature degradation simulation test data of the accelerometer scaling factor stability, the accurate temperature boundary that ensured the scaling factor stability degradation mechanism is consistent was given. The result proves that the method is feasible.

Key words: accelerometer; degradation mechanism consistency; Arrhenius model; degraded trajectory

加速退化试验常用来快速获取产品(伪)寿命信息,由加速退化试验获得的寿命信息可以用来外推其在正常条件下的寿命期或贮存期,这类试验能够节省较多的时间和费用[1-3].实施加速试验的一个重要前提就是产品在不同应力下应具有相同的失效机理,也就是说,在进行加速试验前要明确保持退化机理不变的边界应力,但是,通常在加速试验之前并不知道各种应力对应的失效机理,不能保证加速机理是否一致,严重降低了加速试验结果分析的有效性[4-5].因此,工程实际中,在加速试验进行之前通常安排少量试验或仿真试验来摸索保证加速机理一致的边界应力.

在加速试验中,机理一致检验或保证方法一般包括两个阶段:一是在正式加速试验之前,通过少量试验或仿真试验对边界应力条件的摸索试验;二是在试验完成之后,数据处理时进一步对各种应力条件下的试验数据进行一致性检验.本文研究主要针对前者,即通过仿真试验来摸索应力

收稿日期: 2011-06-21; **网络出版时间**: 2012-11-09 17:20

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121109.1720.011.html

作者简介: 王前程(1988-),男,江苏泗洪人,博士生,wangqc123@163.com.

的边界条件. 在仿真试验中,通过仿真数据产生各种应力条件下的单参数退化轨迹模型,但基于这些轨迹模型,如何确定保证机理不变的应力条件更是一个难题. 通过对国内外相关文献的调研,针对基于退化轨迹模型来进行应力边界条件的确定方法的研究尚未见到. 因此,本文针对退化轨迹模型分别为一次函数、指数函数和幂函数三种常见情况,给出基于激活能不变的加速机理一致性条件确定方法,为加速度计加速试验方案的合理设计提供科学依据,保证加速试验结果的合理性,对于加速度计多参数加速退化试验应力边界的确定,只需首先根据本方法分别确定各个参数下的边界应力,然后取最小的边界应力作为多参数加速退化试验边界应力即可.

1　机理一致性边界确定基本原理

针对某一失效机理而言,产品的温度敏感参数应具有相同类型的退化轨迹,实际应用中,通常对敏感参数 M 进行适当变形使退化轨迹呈线性,若某温度下敏感参数退化轨迹与其它轨迹不同,则在该温度下不能进行加速退化试验;当敏感参数退化轨迹相同时,并不能说明产品在这些加速应力下的失效机理一致,需要做进一步检验.

设加速度计在 k 个高温应力水平 $T_1<T_2<\cdots<T_i<\cdots<T_k$ 下进行加速退化仿真试验,下面给出具体检验的流程,并见图 1 所示. 本文默认仿真试验中的最小的两个加速应力 T_1 和 T_2 没有超出保持加速机理一致性的最大应力.

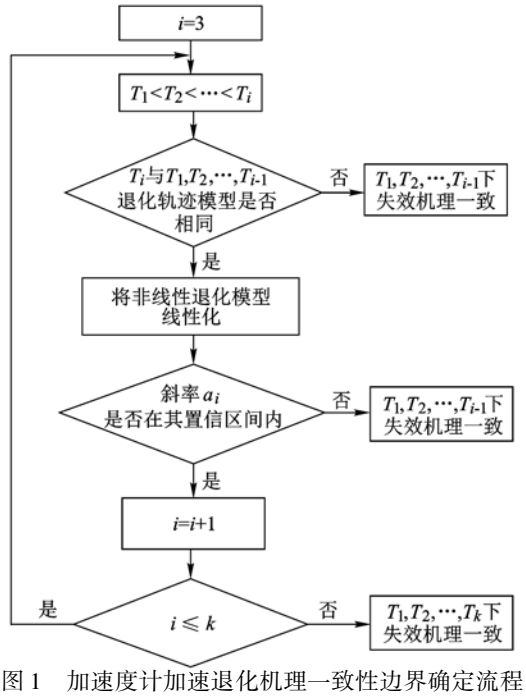

图 1　加速度计加速退化机理一致性边界确定流程

详细检验流程如下:

1) 令 $i=3$;

2) 判断应力 T_i 下的参数退化轨迹是否与应力 $T_1,T_2,\cdots,T_{i-1}$ 下的退化轨迹形状相同;

3) 若退化轨迹相同,在将非线性退化轨迹线性化后,判断应力 T_i 下的斜率 a_i 是否在其置信区间 $(\hat{a}_i-d_{n_i},\hat{a}_i+d_{n_i})$ 内;

4) 若 a_i 不能落在置信区间内,则认为在应力 $T_1,T_2,\cdots,T_{i-1}$ 下失效机理一致,保证机理一致性的边界应力为 T_{i-1},结束流程;

5) 若 a_i 可以落在置信区间内,则令 $i=i+1$,若 $i\leqslant k$,则重新执行步骤 2),否则结束流程,认为在应力 $T_1,T_2,\cdots,T_k$ 下失效机理一致,结束流程;

6) 若退化轨迹不相同,则认为在应力 T_i 下不能进行加速退化试验,并认为在应力 $T_1,T_2,\cdots,T_{i-1}$ 下失效机理一致,保证机理一致性的边界应力为 T_{i-1},结束流程.

下面首先给出保证加速机理一致的应力-斜率关系,然后给出参数退化轨迹斜率 a_i 的置信区间,最后给出加速度计单参数标度因数稳定性加速退化试验的边界应力确定方法.

2　保证机理一致的温度-斜率关系

温度是加速退化试验中常用的一种加速应力,对于只有温度一种加速应力的情况,通常选用 Arrhenius 模型描述特征寿命或退化速率与温度应力之间的关系.

Arrhenius 模型具有如下形式:

$$\partial M/\partial t = A\mathrm{e}^{-\frac{Q}{KT}} \tag{1}$$

式中,$\partial M/\partial t$ 表示温度 T 时的退化速率,M 为温度敏感参数,t 为退化时间;K 为玻耳兹曼常数,$K=8.617\times10^{-5}$ eV/K;T 为绝对温度,K;A 为常数;Q 为失效机理激活能,eV. 对于同一类产品的同一种失效模式失效机理激活能为常数,若在加速试验过程中失效激活能不变,则失效机理没有发生改变[6-7]. 因此,可以利用加速度计的同一种失效模式激活能不变条件,根据加速度计相应退化轨迹,分别检验出保证加速度计机理一致性的边界应力. 对式(1)积分得到:

$$M = At\mathrm{e}^{-\frac{Q}{KT}} + M_0 \tag{2}$$

则有

$$\ln t = \ln\frac{M-M_0}{A} + \frac{Q}{KT} \tag{3}$$

设加速度计在 k 个应力 $T_1<\cdots<T_m<\cdots<T_k$(其中 T_m 为保证失效机理一致的边界应力)下进行加速

试验,对于不同的温度 T_1 和 T_2,分别有

$$T_1:\ln t=\ln(M_{T_1}-M_{0,T_1})-\ln A+\frac{Q}{K}\frac{1}{T_1} \tag{4}$$

$$T_2:\ln t=\ln(M_{T_2}-M_{0,T_2})-\ln A+\frac{Q}{K}\frac{1}{T_2} \tag{5}$$

当退化时间 t 相等时,有

$$Q=K\frac{T_1T_2}{T_1-T_2}\ln\frac{M_{T_1}-M_{0,T_1}}{M_{T_2}-M_{0,T_2}} \tag{6}$$

由于加速退化试验只改变产品性能参数的退化速率,而不改变其失效机理,因此,当失效机理不变时,产品对应的失效激活能也不变化[7-9]. 因此,在应力 $T_3<\cdots<T_i<\cdots<T_m(i=3,4,\cdots,m)$ 下也有

$$Q=K\frac{T_1T_i}{T_1-T_i}\ln\frac{M_{T_1}-M_{0,T_1}}{M_{T_i}-M_{0,T_i}} \tag{7}$$

由式(6)、式(7)得

$$T_i=\frac{T_1T_2\ln B}{T_2\ln B+(T_1-T_2)\ln C} \tag{8}$$

其中,$B=\dfrac{M_{T_1}-M_{0,T_1}}{M_{T_2}-M_{0,T_2}}$,$C=\dfrac{M_{T_1}-M_{0,T_1}}{M_{T_i}-M_{0,T_i}}$.

常见的退化轨迹有三种:线性函数、指数函数和幂函数,下面给出退化轨迹分别为线性函数、指数函数和幂函数时保证机理不变的应力-斜率公式.

2.1 退化轨迹服从线性函数

当加速度计在加速应力水平 $T_i(i=1,2,\cdots,m)$ 下,温度敏感参数符合一次函数 $M_{T_i}=a_it+b_i$,取此退化轨迹斜率为 a_i. 由式(8)得到保持加速机理不变的应力-斜率关系:

$$T_i=\frac{T_1T_2\ln\dfrac{a_2}{a_1}}{T_2\ln\dfrac{a_2}{a_i}+T_1\ln\dfrac{a_i}{a_1}} \tag{9}$$

式中,T_i 为保持加速机理不变的应力;a_i 为应力 T_i 下的加速度计退化轨迹对应的真实斜率.

2.2 退化轨迹服从指数函数

当加速度计在加速应力 $T_i(i=1,2,\cdots,m)$ 下,温度敏感参数符合指数函数 $M_{T_i}=b_ie^{a_it}$,通过取新的温度敏感参数为:$M'_{T_i}=\ln M_{T_i}=\ln b_i+a_it$. 由于指数函数可以转换为一次函数,故取转换后的退化轨迹斜率也为 a_i,同样可以得到式(9)所示的保证加速机理不变的应力-斜率关系.

2.3 退化轨迹服从幂函数

当加速度计在加速应力水平 $T_i(i=1,2,\cdots,m)$ 下,温度敏感参数符合 $M_{T_i}=b_it^{a_i}$,取新温度敏感参数为:$M'_{T_i}=\ln M_{T_i}=\ln b_i+a_i\ln t$,新的时间 $t'=\ln t$. 由于幂函数也可以转换为一次函数,故取转换后的退化轨迹斜率为 a_i,也可以得到式(9)所示的保证加速机理不变的应力-斜率关系.

2.4 小 结

通过上述分析可知,加速度计在 k 个应力 $T_1<T_2<\cdots<T_i<\cdots<T_k(i=1,2,\cdots,m)$ 下进行加速试验时,若其温度敏感参数退化轨迹可以转化为直线形式,则能够给出式(9)所示的保证加速机理不变的应力-斜率关系. 又由于 a_1 和 a_2 未知,用其估计值 $\hat{a}_1$ 和 $\hat{a}_2$ 分别代替真值,这样,由式(9)可得

$$\ln a_i=\frac{\left(\dfrac{1}{T_2}-\dfrac{1}{T_i}\right)\ln\hat{a}_1-\left(\dfrac{1}{T_1}-\dfrac{1}{T_i}\right)\ln\hat{a}_2}{\dfrac{1}{T_2}-\dfrac{1}{T_1}} \tag{10}$$

3 退化轨迹斜率的置信区间

设来自退化轨迹 $y_i=a_ix_i+b$ 的样本分别为 (x_{ij},y_{ij}),其中,$1\leqslant i\leqslant k$ 且为整数,$j=1,2,\cdots,n_i$,x_{ij} 为敏感参数新的退化时间 t_{ij},y_{ij} 为第 i 个加速应力水平 T_i 下第 j 个新的敏感参数值 M_{ij},当线性回归效果显著时,函数 $y_i=a_ix_i+b$ 的斜率 a_i 的 $(1-\alpha)$ 置信区间为

$$(\hat{a}_i-d_{n_i},\hat{a}_i+d_{n_i}) \tag{11}$$

其中

$$\hat{a}_i=\frac{l_{x_iy_i}}{l_{x_ix_i}} \tag{12}$$

$$d_{n_i}=t_{\frac{\alpha}{2}}(n_i-2)\sqrt{\frac{\hat{a}_i^2(1-r_i^2)}{r_i^2(n_i-2)}} \tag{13}$$

其中,$t_{\frac{\alpha}{2}}(n_i-2)$ 为上分位数.

$$l_{x_iy_i}=\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij}-\bar{x}_i)(y_{ij}-\bar{y}_i) \tag{14}$$

$$l_{x_ix_i}=\sum_{j=1}^{n_i}(x_{ij}-\bar{x}_i)^2 \tag{15}$$

$$l_{y_iy_i}=\sum_{j=1}^{n_i}(y_{ij}-\bar{y}_i)^2 \tag{16}$$

$$\bar{x}_i=\frac{1}{n_i}\sum_{j=1}^{n_i}x_{ij} \tag{17}$$

$$\bar{y}_i=\frac{1}{n_i}\sum_{j=1}^{n_i}y_{ij} \tag{18}$$

$$r_i=\sqrt{\frac{l_{x_iy_i}^2}{l_{x_ix_i}l_{y_iy_i}}} \tag{19}$$

当变量 x_i 和 y_i 相互独立时,式(14)中 $l_{x_iy_i}$ 为0;式(15)、式(16)中 $l_{x_ix_i}$ 和 $l_{y_iy_i}$ 分别表示变量 x_i 和 y_i 的样本离差平方和,$l_{x_ix_i}$ 和 $l_{y_iy_i}$ 越大说明 x_i 和 y_i 的数值变动越大,即越分散;式(17)、式(18)中 $\bar{x}_i$ 和 $\bar{y}_i$ 分别表示变量 x_i 和 y_i 的样本平均数;式(19)中 r_i 为线性相关系数,表示变量 x_i 和 y_i 之间的线性相关的密切程度,$|r_i|\leqslant 1$,$|r_i|$ 越小,则回归的效果越差,x_i 和 y_i 之间的线性相关性就越不显著,反之则越显著[10].

4　应用实例

根据对石英挠性加速度计调研可知,标度因数稳定性和零偏稳定性是两个重要的温度敏感参数,本文以确定加速度计单参数标度因数稳定性加速退化机理一致性边界应力为例,零偏稳定性边界应力确定方法与标度因数稳定性一样. 在对影响石英挠性加速度计标度因数稳定性的机理分析基础上,全面调研分析加速度计结构、组成、材料以及装配关系,确定加速度计建模部件、结构尺寸、材料属性及部件连接关系,利用有限元仿真的方法建立加速度计有限元模型并进行应力分析及损伤分析,然后,根据前 3 节确定的检验方法得到保证加速度计标度因数稳定性退化机理一致性的边界应力条件.

4.1　标度因数稳定性退化轨迹参数估计

标度因数稳定性 K_i 记为

$$K_i = |(K_1^i - K_1^1)/K_1^1| \tag{20}$$

其中 $K_1^i(i=1,2,\cdots,6)$ 为同一温度下的第 i 个标度因数. 根据加速度计标度因数仿真结果结合式(20)可得加速度计标度因数稳定性退化数据,数据结果如表 1 所示.

表 1　不同温度下标度因数稳定性退化数据　$\times 10^{-6}$

t/天	T/K					
	298	333	343	353	363	373
0	0	0	0	0	0	0
12	154.8	221	235.5	251.8	282.6	843.6
47	170.6	243.2	260	276.3	311.4	888.1
190	186	264.5	283.7	302.3	341.5	922.3
474	196.7	279.8	299.5	318.6	358.1	934.2
730	201.4	286.4	305.9	326.7	367	934.7

图 2 给出了加速度计在各热应力下标度因数稳定性随时间变化的增量曲线,由图 2 可知,大多数加速度计的标度因数稳定性的变化速度随时间增加逐渐减小,其退化轨迹可以选用幂函数来描述,即:

$$y = bt^a \tag{21}$$

式中,y 为时刻 t 下的标度因数稳定性;b 为变化速率;a 为修正常数,且应有 $0<a<1$. 对式(21)两边同时取对数得到如下线性表达式:

$$\ln y = \hat{a}\ln t + \ln\hat{b} = \hat{a}\ln t + \hat{c} \tag{22}$$

表 2 给出了标度因数稳定性退化轨迹信息.

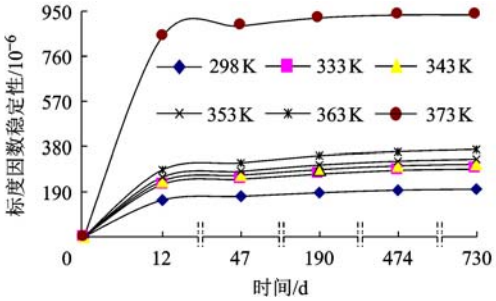

图 2　各热应力下标度因数稳定性增量曲线

表 2　标度因数稳定性退化轨迹信息

T/K	$\hat{a}_i$	$\hat{c}_i$	r_i
298	0.063 91	−8.927 83	0.998 48
333	0.062 88	−8.569 23	0.998 60
343	0.063 65	−8.506 13	0.997 38
353	0.063 33	−8.440 88	0.998 89
363	0.063 45	−8.323 45	0.996 74
373	0.025 26	−7.131 77	0.953 82

从表 2 可以看出,各应力下退化轨迹的线性相关系数 r_i 均较大,接近于 1,表明式(22)的线性拟合效果较显著,进一步说明了标度因数稳定性数据符合幂函数模型.

4.2　保持机理一致性的边界热应力检验

由于该加速度计正常工作温度为 328 K,因此本文假设该加速度计在 298 K 和 333 K 下标度因数稳定性退化机理一致是可行的,根据表 2 和第 3 节退化轨迹斜率的区间确定方法给出如下一致性判定表格,见表 3,本文 α 取 0.1.

表 3　加速度计加速退化机理一致性判定表格

T/K	343	353	363	373
$\hat{a}_i$	0.063 65	0.063 33	0.063 45	0.025 26
a_i	0.062 62	0.062 39	0.062 16	0.061 95
d_{n_i}	0.004 43	0.002 86	0.004 93	0.007 55
$\hat{a}_i - d_{n_i}$	0.059 22	0.060 47	0.058 52	0.017 71
$\hat{a}_i + d_{n_i}$	0.068 08	0.066 19	0.068 38	0.032 81
机理是否一致	是	是	是	否

通过该方法可知该加速度计在 373 K 时退化机理改变,因此,根据加速退化试验应力水平设计规格,对于该加速度计标度因数稳定性退化试验应力水平可设为 333 K,343 K,353 K 和 363 K. 根据后期的加速度计标度因数真实加速退化试验数据,利用巴特利特方法对加速度计伪寿命进行分布参数齐性检验,得出该加速度计在 373 K 时伪寿命分布参数非齐性,而在 333 K,343 K,353 K 和

363 K 时参数齐性,因此也可得出该加速度计在 373 K 时退化机理改变,从另一方面验证了本方法的准确性和可行性.

5 结 论

1) 本文根据三种常见参数退化模型,给出了加速度计加速退化机理一致性边界确定方法,该方法可以有效地保证加速度计在低于 T_m 的应力水平下开展加速试验是安全的.

2) 本文通过对加速度计单参数可线性化退化轨迹研究,得出了保证加速机理一致的应力-斜率关系如文中式(9)所示,为分析加速度计在加速退化情况下所受应力与其性能参数退化轨迹的关系提供了一定的借鉴意义.

3) 由于仿真试验的应力水平数往往不止两个,而且前两个加速应力往往较低,其中 T_1 取为常温,T_2 比其工作温度稍大,可以确保前两个应力不会超出保证机理一致的边界应力,因此文中默认最小的两个加速应力没有超出保证加速机理一致性的最大应力在工程实际中是可行的.

4) 对于多参数加速退化试验边界应力的确定,只需分别对各个参数利用本方法进行边界应力的确定,然后取最小的边界应力作为最终的加速退化试验边界应力即可.

5) 由于本文是通过仿真试验方法确定了保持加速机理一致性的边界应力,节省了真实摸索试验的样本和经费.

参考文献 (References)

[1] Michele Boulanger Carey, Reed H Koenig. Reliability assessment based on accelerated degradation a case study[J]. IEEE Transaction on Reliability, 1991, 40(5): 499-506

[2] William Q Meeker, Michael Hamada. Statistical tools for the rapid development & evaluation of high-reliability products[J]. IEEE Transaction on Reliability, 1995, 44(2): 187-198

[3] Meeker W Q, Escobar L A, Lu J C. Accelerated degradation tests: modeling and analysis[J]. Technometrics, 1998, 40(2): 89-99

[4] 李秀宇. 快速评价半导体器件可靠性的新方法[D]. 北京:北京工业大学电子信息与控制工程学院,2007
Li Xiuyu. A new method of rapid evaluation of the reliability of semiconductor devices[D]. Beijing: College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, 2007(in Chinese)

[5] 姜仁元,张兴唐,杨亦春. 温度应力下功能退化型加速寿命试验问题研究[J]. 南京理工大学学报,2000,24(6):523-527
Jiang Renyuan, Zhang Xingtang, Yang Yichun. Study on accelerated life test of function degenerating type by temperature stress[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2000, 24(6): 523-527(in Chinese)

[6] 林震,姜同敏,程永生,等. 阿伦尼斯模型研究[J]. 电子器件可靠性与环境试验,2005,23(6):12-14
Lin Zhen, Jiang Tongmin, Cheng Yongsheng, et al. Study on Arrhenius relationship[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2005, 23(6): 12-14(in Chinese)

[7] 郭春生,谢雪松,马卫东,等. 加速试验中失效机理一致性的判别方法[J]. 半导体学报,2006,27(3):560-563
Guo Chunsheng, Xie Xuesong, Ma Weidong, et al. A failure-mechanism identification method in accelerated testing[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(3): 560-563(in Chinese)

[8] 王召斌,任万滨,翟国富. 加速退化试验与加速寿命试验技术综述[J]. 低压电器,2010,9:1-6
Wang Zhaobin, Ren Wanbin, Zhai Guofu. Review of accelerated degradation testing and accelerated life testing[J]. Low Voltage Apparatus, 2010, 9: 1-6(in Chinese)

[9] 郑德强,张正平,李海波,等. 加速退化试验技术研究、应用与发展[J]. 装备环境工程,2011,8(2):100-104
Zheng Deqiang, Zhang Zhengping, Li Haibo, et al. Research, application and development of accelerated degradation test technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 100-104(in Chinese)

[10] 韩於羹. 应用数理统计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006:165-168
Han Yugeng. Application of mathematical statistics[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006: 165-168(in Chinese)

(编 辑:娄 嘉)