专题——加速环境试验及贮存寿命评估技术

基于薄弱环节的整机加速因子计算

徐如远[1]，袁宏杰[1]，李鹏[2]，李佩昌[2]

（1. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院，北京 100191；2. 中国舰船研究设计中心，武汉 430064）

摘要：目的 当薄弱环贮存寿命都服从指数分布或都服从形状参数相同的威布尔分布时，给出整机加速因子与薄弱环节加速因子关系的公式；若形状参数不同时，给出整机加速因子的取值范围。**方法** 将各个薄弱环节做串联系统处理，利用不同可靠度时常应力和加速应力下系统贮存寿命的关系，计算整机加速因子或给出加速因子范围。**结果** 基于不同薄弱环节数据，总结出整机加速因子或取值范围的计算方法。**结论** 针对系统存在薄弱环节并且薄弱环节寿命服从一定的分布时，可以通过该方法计算出整机加速因子或加速因子的取值范围。

关键词：贮存寿命；加速因子；薄弱环节

DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2019.03.001

中图分类号：TB114.3 **文献标识码：**A

文章编号：1672-9242(2019)03-0001-04

Whole Machine Acceleration Factor Based on Weak Links

XU Ru-yuan[1], *YUAN Hong-jie*[1], *LI Peng*[2], *LI Pei-chang*[2]

(1. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

ABSTRACT: Objective To give the formula for the relationship between the acceleration factor of the whole machine and the acceleration factor of the weak link when the storage life of the weak ring is subject to the exponential distribution or to the Weibull distribution with the same shape parameters, and give the whole machine acceleration factor value range when the shape parameters are different. **Methods** Each weak link was treated as a series system. When degrees of reliability were different, the relationship between normal stress and the storage life of the system under accelerated stress was used to calculate the entire acceleration factor or to give the range of acceleration factors. **Results** Based on the data of different weak links, the calculation method for the acceleration factor or range of the complete machine was summarized. **Conclusion** When the weak link exists in the system and the life of the weak link obeys a certain distribution, the range of the acceleration factor or acceleration factor of the complete machine could be calculated by proposed method.

KEY WORDS: storage life; accelerating factor; weak link

目前，国内外通常采用自然环境贮存试验和加速贮存寿命试验评估产品的贮存寿命[1-2]。自然环境贮存试验是在自然环境下长期贮存产品，估计产品的贮存寿命，周期较长。加速贮存寿命试验是在不改变产品失效机理的前提下，采用提高应力水平的方法，通过外推计算产品正常应力水平下的贮存寿命，可极大

收稿日期：2018-07-11；**修订日期：**2018-10-12

基金项目：国防基础科学研究计划

作者简介：徐如远（1995—），男，山东人，硕士研究生，主要研究方向为可靠性环境试验技术。

通讯作者：袁宏杰（1970—），男，北京人，博士，副教授，主要研究方向为可靠性评估与验证、环境试验设计等。

地缩短试验时间。

目前对整机产品的贮存寿命研究，常用的办法是转化法，即根据“短板理论”，分析其薄弱环节，并将薄弱环节的贮存寿命认定为系统的贮存寿命。当整机存在多个薄弱环节时，需要建立整机的可靠寿命框图，分析各个薄弱环节之间的关系，根据薄弱环节的加速因子计算整机的加速因子。

国内外曾针对该问题进行了相关研究，文献[3]提出了利用不同温度应力下单机的失效率之比作为预计的加速因子的方法，但该方法所预计出的加速因子值偏小，没有从根本上解决高可靠、长寿命产品面临的以上问题。文献[4]中提出了基于故障物理的方法，通过试验获得各个失效机理的激活能，对各个失效机理的激活能进行加权平均，进而获得集成电路系统加速因子的预计值。该方法没有给出计算各失效机理激活能加权因子的方法，使其应用范围受到限制。

文中针对整机薄弱环节的寿命分别都服从指数分布、或都服从形状参数相同的威布尔分布时，利用底层数据向上层结构综合的理论[5]，给出了整机加速因子的计算公式。当薄弱环节寿命分布的函数族不同时给出了加速因子的取值范围。

1 加速因子

1.1 定义

加速因子反映的是加速寿命试验中得到的寿命信息与实际使用条件的寿命信息之间的折算规律。加速寿命试验的加速因子定义如文献[6]所述：

$$AF_{i,0}=t_{R,0}/t_{R,i} \tag{1}$$

式中：$t_{R,0}$ 和 $t_{R,i}$ 表示产品在加速应力水平 S_i 与正常应力水平 S_0 下达到相同可靠度的可靠寿命；$AF_{i,0}$ 为加速应力水平 S_i 相对于正常应力水平 S_0 的加速因子。

通过公式可以发现，加速因子就是可靠寿命之比，反映了产品分别在两种应力水平下寿命过程的相对快慢程度。

根据文献[7]中的 Nelson 累积失效理论可以对加速因子的定义进行扩展。若产品在应力水平 S_i 与 S_j 下分别作用时间为 t_i 和 t_j 的累积失效概率相同，即 $F_i(t_i)=F_j(t_j)$，则加速应力水平 S_i 相对于正常应力水平 S_j 的加速因子可以表示为：

$$AF_{i,j}=t_j/t_i \tag{2}$$

从本质上来讲，这两个定义是一致的，如果对式(2)进行变换，则可以得到：

$$t_j=AF_{i,j}\cdot t_i \tag{3}$$

根据式(3)可以看出，如果产品在应力 S_i 作用下试验了时间 t_i，则在应力 S_j 作用下达到相同退化累积的等效时间 t_j 可以通过计算确定，因此通过式(3)可以对不同应力水平的试验时间进行折算。

1.2 基本假设

假设 1：产品为串联系统。此假设保证整机任何一个薄弱环节发生故障，将会引起整机故障。

假设 2：整机具有可加速性。整机在允许的高应力下的失效机理不发生改变，即保证在允许的加速应力下，产品的失效机理与正常应力条件下相同。

假设 3：统计独立性。假设整机中引起某薄弱环节失效的机理不会影响其他薄弱环节。

2 整机加速因子计算

2.1 指数分布

假设整机包含了 K 个薄弱环节，每个薄弱环节的失效率分别为 λ_i，其中 $i=1,2,...,K$，失效分布函数为指数分布。根据文献[9]可以知道，系统的可靠度为：

$$R(t)=\exp(-\sum_{i=1}^{K}\lambda_i t) \tag{4}$$

对式（4）进行变换，即可得到在可靠度 R 下，系统的寿命为：

$$t_{\mathrm{U}}=\frac{-\ln R}{\sum_{i=1}^{K}\lambda_i} \tag{5}$$

若系统中 K 个薄弱环节在高应力下的加速因子分别为 AF_i，则在高应力下，可靠度水平为 R 的情况下，整机的寿命为：

$$t_{\mathrm{S}}=\frac{-\ln R}{\sum_{i=1}^{K}AF_i\lambda_i} \tag{6}$$

因此，综合以上薄弱环节，系统的加速因子为：

$$AF=\frac{t_{\mathrm{U}}}{t_{\mathrm{S}}}=\frac{\sum_{i=1}^{K}AF_i\lambda_i}{\sum_{i=1}^{K}\lambda_i} \tag{7}$$

根据上述模型可以得出，系统的加速因子是由薄弱环节的加速因子加权平均得到的。加权系数为薄弱环节的失效率。

2.2 威布尔分布

假设整机有 K 个独立的薄弱环节，失效分布函数为威布尔分布，其中比例参数为 η_i，形状参数为 m_i，则失效率函数为;

$$\lambda_i(t)=m_i\eta_i^{-m_i}t^{m_i-1} \tag{8}$$

该系统的可靠性可以表示为：

$$R(t)=\exp(-\sum_{i=1}^{K}(\frac{t}{\eta_i})^{m_i}) \tag{9}$$

当可靠度为 R 时，系统的可靠度下寿命计算公式为：

$$-\ln R=\sum_{i=1}^{K}(\frac{T_1}{\eta_i})^{m_i} \tag{10}$$

高应力下，若 K 个薄弱环节的加速因子分别为 AF_i，则

$$-\ln R=\sum_{i=1}^{K}(\frac{T_2}{\eta_i/AF_i})^{m_i} \tag{11}$$

当高应力与低应力的可靠度相同，高应力与低应力的寿命关系为：

$$\sum_{i=1}^{K}(\frac{T_1}{\eta_i})^{m_i}=\sum_{i=1}^{K}(\frac{T_2}{\eta_i/AF_i})^{m_i} \tag{12}$$

此时系统加速因子可以表示为：

$$AF=\frac{T_1}{T_2} \tag{13}$$

对式(13)进行变换得：

$$T_1=AF\cdot T_2 \tag{14}$$

则式（12）可以变换为：

$$\sum_{i=1}^{K}(\frac{AF\cdot T_2}{\eta_i})^{m_i}=\sum_{i=1}^{K}(\frac{T_2}{\eta_i/AF_i})^{m_i} \tag{15}$$

$$\left(\frac{T_2}{\eta_1}\right)^{m_1}(AF^{m_1}-AF_1^{m_1})+\left(\frac{T_2}{\eta_2}\right)^{m_2}(AF^{m_2}-AF_2^{m_2})+\ldots+\left(\frac{T_2}{\eta_k}\right)^{m_k}(AF^{m_k}-AF_k^{m_k})=0 \tag{16}$$

式中：参数 T_2,η_i,m_i,AF_i,AF 均大于 0。

为使等式成立，则可以得出 AF 的取值范围为：

$$\min(AF_i)<AF<\max(AF_i)$$

根据式(11)可知，取不同的可靠度值，计算出的寿命 T_2 也会不同。当取高的可靠度值时，计算的寿命 T_2 减少。为使等式成立，整机加速因子 AF 会因为取的可靠度不同，在 $(\min(AF_i),\max(AF))$ 之间发生变化。

如果形状参数相同，则系统在 t 时刻的可靠度为：

$$R(t)=\exp(-\sum_{i=1}^{K}(\frac{t}{\eta_i})^{m})=\exp(-t^{m}\sum_{i=1}^{K}(\eta_i)^{-m}) \tag{17}$$

此时系统的加速因子可以表示为：

$$AF=\frac{T_1}{T_2}=(\frac{\sum_{i=1}^{K}(\eta_i/AF_i)^{-m}}{\sum_{i=1}^{K}(\eta_i)^{-m}})^{-m} \tag{18}$$

3　仿真算例

假设某整机产品具有 6 个薄弱环节，对其进行加速寿命试验，得到一系列寿命数据。根据加速试验数据得到的不同薄弱环节在高应力和正常应力下的寿命分布函数及加速因子见表 1。

表 1 中，W 代表威布尔分布，E 代表指数分布，参数单位为“年”。整机产品在正常应力下的失效概率密度如图 1 所示。

表 1　薄弱环节的寿命分布

薄弱环节	正常应力下的寿命分布	高应力下的寿命分布	加速因子
1	W(4.0，15)	W(4.0，0.75)	AF_1=20
2	W(3.0，25)	W(3.0，1)	AF_2=25
3	W(2.0，20)	W(2.0，0.67)	AF_3=30
4	W(3.5，15)	W(3.5，0.75)	AF_4=20
5	W(3.0，15)	W(3.0，0.6)	AF_5=25
6	E(0.02)	E(0.02*35)	AF_6=35

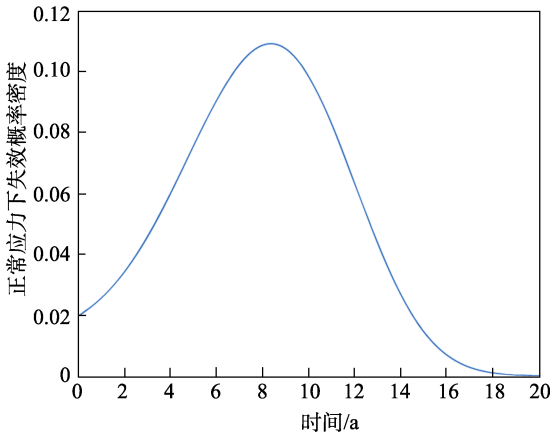

图 1　正常应力下整机失效概率密度

整机产品在高应力下的失效概率密度如图 2 所示。

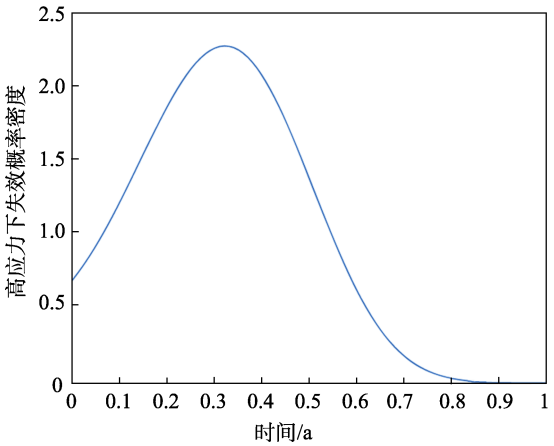

图 2　高应力下整机失效概率密度

通过计算仿真可得到在不同可靠度下整机加速因子的变化趋势如图 3 所示。

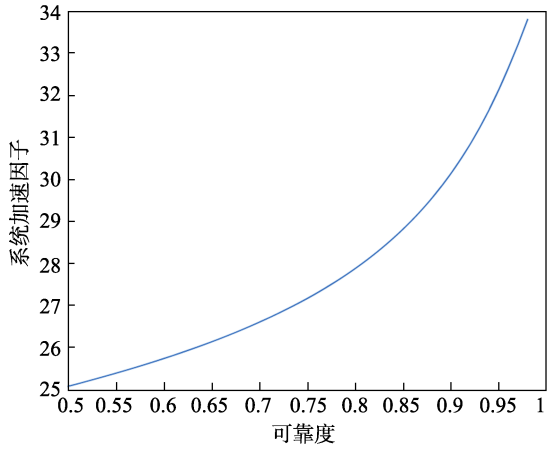

图 3　不同可靠度下整机加速因子变化趋势

4　结语

当薄弱环节贮存寿命都服从指数分布或都服从形状参数相同的威布尔分布时，整机加速因子与薄弱环节加速因子有确定的公式。

当薄弱环节的寿命分布服从形状参数不同的威布尔分布或分布的函数族不同时，理论推导及仿真表明，整机加速因子随可靠度的取值而变化。因此，应用整机产品进行加速试验，很难通过统计的方法用高应力下的寿命数据外推整机正常应力下的寿命。整机加速贮存试验的目的在于验证整机的薄弱环节，考核薄弱环节间的相互影响，验证薄弱环节的模型参数，给出工程上的判断。

参考文献：

[1] 王亮，吕卫民，滕克难. 基于测试数据的长期贮存装备实时健康状态评估[J]. 系统工程与电子技术，2013, 35(6): 1212-1217.

[2] 谢勇，苑秉成，谢辉. 贮存状态下鱼雷故障发生时间估计方法[J]. 系统工程与电子技术，2013, 35(9): 2016-2020.

[3] 侯先荣. 极小子样高可靠(长寿命)电子设备的可靠性验证[J]. 航天电子对抗, 1994(3): 55-60.

[4] MARK W, BERNSTEIN J B. Microelectronic Reliability: Physics-of-Failure Based Modeling and Lifetime Evaluation[R]. California: California Institute of Technology, 2008.

[5] 曾声奎，赵廷第. 系统可靠性设计与分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2002.

[6] 茆诗松，王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[7] 张春华. 步降应力加速寿命试验的理论和方法[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.

[8] GJB 299C—2006, 电子设备可靠性预计手册[S].

[9] 赵宇，杨军，马小兵. 可靠性数据分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.

[10] GJB/Z 108A—2006, 电子设备非工作状态可靠性预计手册[S].