

基于应力分解法的整机加速因子预计方法研究

董军超, 韩铭, 陈津虎

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: 提出了计算整机加速因子的新方法。将整机的失效率通过定量分析方法按照部件、失效模式和应力的顺序逐级下分, 从而得到各敏感应力的失效率, 再通过加速模型计算各失效模式在加速应力下的失效率。最终可以得到整机在加速应力下的失效率, 进而计算出整机加速因子。以典型电子产品为例, 预计了弹上计算机在温度、湿度、振动综合环境应力下的加速因子为 153.5。

关键词: 灰色关联理论; 失效率; 综合应力; 整机加速因子

中图分类号: TJ02; TB112

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)09-0014-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.09.003

Research on Prediction Method of Acceleration Factor of Complete Machine Based on Stress Decomposition Method

DONG Jun-chao, HAN Ming, CHEN Jin-hu

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: A new method for calculating the acceleration factor of complete machine is proposed in this paper. The failure rate of complete machine is divided step by step according to the sequence of components, failure modes and stresses through quantitative analysis method, so as to obtain the failure rate of each sensitive stress, and then calculate the failure rate of each failure mode under accelerated stress through acceleration model. Finally, the failure rate of complete machine under acceleration stress can be obtained, and then the acceleration factor of the whole machine can be calculated. Taking a typical electronic product as an example, the acceleration factor of the missile computer under the comprehensive environmental stress of temperature, humidity and vibration is expected to be 153.5.

KEY WORDS: grey correlation theory; failure rate; comprehensive stress; failure rate of complete machine

加速试验在验证部件寿命指标的工作中已得到了广泛的应用。目前的加速试验方法研究主要针对单失效模式的元件、组件级产品。由于研究的产品级别较低, 对整机的可靠性进行评估时, 出现两方面的问题: 一方面, 整机产品通常有多种失效模式, 不同的失效模式间可能存在相互作用的情况, 因此只研究单

失效模式, 不考虑失效模式间的相互作用对可靠性评估可能产生较大的误差; 另外一方面, 由于产品层次过低, 将试验结果通过多次向上递推后, 会出现较大的误差。因此元器件、材料级产品的试验结果对整机可靠性评估的帮助很小。相比而言, 整机级加速试验级别更高, 更能反映产品的真实寿命历程, 可信

收稿日期: 2020-06-06; 修订日期: 2020-07-21

Received: 2020-06-06; Revised: 2020-07-21

作者简介: 董军超(1990—), 男, 主要研究方向为可靠性试验与评估。

Biography: DONG Jun-chao (1990—), Male, Research focus: reliability test and evaluation.

引文格式: 董军超, 韩铭, 陈津虎. 基于应力分解法的整机加速因子预计方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(9): 014-019.

DONG Jun-chao, HAN Ming, CHEN Jin-hu. Research on prediction method of acceleration factor of complete machine based on stress decomposition method[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(9): 014-019.

度更高。

对整机的各部件分别进行可靠性试验,在时间和成本上也造成了极大的浪费^[1]。因此,对整机水平的加速试验研究是必要的。加速因子作为不同应力水平下产品可靠性参数的转换媒介,是加速试验中极为重要的参数。加速因子代表了相同产品在不同量级的应力水平下失效的快慢程度^[2]。目前,部件加速因子主要通过构建应力与寿命特征的加速模型来求解。由于整机失效机理复杂,很难构建加速模型获得其加速因子。

在理论研究方面,Seager and Fieselman^[3]研究了计算整机激活能的方法,通过阿伦尼兹模型来推测整机的加速因子。由于模型的限制,这种方法只考虑了温度应力造成的失效机理,而且没有计算部件连接件的激活能。Eduardo^[1]研究了部件与整机间的加速因子关系,为整机加速因子的研究开拓了新思路,但只考虑部件仅有一种失效模式的情况,与实际情况有较大的差别。IEC 62506^[4]直接建立应力与整机间的模型,省略了中间的繁杂结构,但在处理多应力失效模式的问题上存在着不足。

文中提出了计算整机加速因子的新方法,整个分析类似于可靠性分配和预计的 V 字形过程。首先将整机产品的失效率通过频率分析法和灰色关联分析法按照部件、失效模式和应力的层次定量分解到整机在各应力的失效率;然后通过加速模型构建失效模式和加速应力间的关系,将各加速应力下的失效率逐级综合到整机水平。进而通过对比加速应力和正常应力下的整机失效率,得到整机加速因子。

1 理论

1.1 定义

加速因子是正常应力与加速应力下寿命特征量的比值。其定义为^[5]:假设产品在正常应力水平 S_0 的失效分布函数为 $F_0(t)$, $t_{p,0}$ 为 p 分位寿命,即 $F_0(t_{p,0})=p$ 。又设产品在加速应力水平 S_i 的失效分布函数为 $F_i(t)$, $t_{p,i}$ 为 p 分位寿命,即 $F_i(t_{p,i})=p$,则两个 p 分位寿命之比为:

$$AF = \frac{t_{p,0}}{t_{p,i}} \quad (1)$$

AF 即加速应力水平 S_i 对正常应力水平 S_0 的加速因子。

1.2 假设

1) 产品的部件及其失效模式为串联,即产品中某一失效模式发生,则产品发生故障。假设整机为一个串联系统是合理的,因为很多电子产品都具有此特性。对高可靠电子产品中存在的冗余结构,需要简化

为串联系统。部件的失效是由不同失效模式间的关系决定的。假设不同失效模式为串联,即某一失效模式发生时间为部件的失效时间。

2) 失效模式及应力的独立性,各部件间的失效模式相互独立,不同应力间不产生相互作用。整机发生的失效是由单一失效模式引起的,不引起相关失效模式发生失效。由于每种失效模式都有各自的失效率,而不同部件相同失效模式的失效率不同,因此可将不同部件的各失效模式看作是相互独立的,而且不同的应力间也是相互独立的,不考虑其相互作用的情况。

1.3 数据收集

需要收集各单元不同失效模式的平均失效率。对于一项需要验证的产品技术,器件生产方应根据其相应的失效模式对失效率进行估计。所作的预测,通常以试验结果为基础,而不是以功能部件为基础。因此,器件生产方一般能够给出某些器件主要失效模式对应的失效率。另外,电子元器件主要失效模式的失效率可以从相关的可靠性预计手册中获得。

2 基于应力分解法的整机加速因子预计

加速因子为加速试验研究中的重要参数,是两个应力水平间产品可靠性特征的转换因子。目前,部件加速因子主要通过构建应力与可靠性特征的加速模型来求解。由于整机失效机理非常复杂,很难构建加速模型获得其加速因子,因此传统的加速因子计算方法已不再适用^[6-9]。

文中提出了一种新的整机加速因子计算方法,将整机的失效率通过定量分析方法按照部件、失效模式和应力的顺序逐级下分,从而得到各敏感应力的失效率。再通过加速模型计算各失效模式在加速应力下的失效率,最终得到整机在加速应力下的失效率,从而可以计算出整机加速因子。

2.1 主要失效模式分析

首先利用定性分析方法判断产品的主要失效模式,再利用定量分析方法确定各失效模式失效率与产品失效率的定量关系。定性分析方法中最常用的是失效模式及影响分析(FMEA),且发展相对比较成熟,在此不再进行详细介绍。FMEA 适用于产品的全寿命周期,是一个系统化的工作,其重点在设计,但由于 FMEA 分析容易受到主观影响,所以在缺少失效数据的情况下使用^[7-8]。

当产品存在大量失效数据时,可以用定量的分析方法分析,目前常用的分析方法有频率分析法^[10]。假设产品有 L 种失效模式,失效模式 $d(d=1,2,\dots,L)$ 的

生概率为 p_d , 那么 $p_d \in (0,1)$, 且 $\sum_{v=1}^L p_v = 1$ 。有 n 个产品进行试验, 失效模式 d 造成的失效产品个数为 r_d , 则 $r_d \in [0, n]$, 且为非负数, 则 $\sum_{v=1}^L r_v = n$ 。失效数据表示为 $r = (r_1, \dots, r_{L-1}, r_L)$ 。对数据进行分析, 可得各失效模式发生概率的估计值为 $(\hat{p}_1, \dots, \hat{p}_L)$ 。

由于各失效模式发生的频率比较容易统计, 所以定量判断主要失效模式的最常用方法是频率分析法, 见式(2)。

$$\hat{p}_d = \frac{r_d}{n}, d = 1, \dots, L \quad (2)$$

2.2 基于灰色关联分析的敏感环境应力定量分析

环境因素是引起产品失效的主要因素, 而环境因素与失效模式间的关系很复杂。对产品的失效机理进行分析, 构建环境与失效模式间的模型, 用定性和定量的分析方法判断失效模式与环境应力的关系, 可以得到不同的环境应力对失效模式发生的贡献度。环境应力与故障间的定量关系可以通过灰色关联分析方法来确定。

利用环境应力量值与产品在该环境应力下产生的失效率等数据, 构建环境应力与故障间的定量关系。这些数据主要通过产品的环境与可靠性试验、性能试验、历史数据等方面获得。产品的失效率通常用平均故障间隔时间(MTTF)的倒数来表示, 失效率越高, 平均故障间隔时间越短。根据灰色关联分析方法, 可将比较序列作为环境应力量值, 将参考序列作为平均故障间隔时间。

2.2.1 确定比较序列和参考序列

在可靠性试验中, 通常对产品会施加综合应力, 每个试验下都会包括多个样本。通过对这些试验数据的搜集整理, 可以得到相应的环境应力特征数据和产品的失效数据。根据这些数据, 可以通过灰色关联分析方法对环境应力与故障关系作定量分析。

令 X_i 为第 i 个环境应力的特征, $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ 为环境应力特征 X_i 的比较序列, $x_i(k)$ 为第 i 个环境应力特征在第 k 种综合环境应力统计数据中的应力量值, $i = 1, 2, \dots, p; k = 1, 2, \dots, n$ 。各比较序列组成的矩阵 X 为:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(1) & \cdots & x_1(n) \\ \vdots & & \vdots \\ x_p(1) & \cdots & x_p(n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

令 $Y_j = (y_j(1), y_j(2), \dots, y_j(n))$ 为第 j 种故障模式的参考序列。 $y_j(k)$ 为第 j 种故障模式在第 k 种综合环境应力统计数据中的 MTTF, 式中 $j = 1, 2, \dots, q$ 。

2.2.2 序列去量纲化和正相关化

设序列的均值化算子为 D_1 , 得到:

$$X_i D_1 = (x_i(1)d_1, x_i(2)d_1, \dots, x_i(n)d_1) \quad (4)$$

$$x'_i(k) = x_i(k)d_1 = \frac{x_i(k)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(k)}, k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

采用均值化算子是为了将不同量纲的比较序列进行归一化, 使得各参数间具有可比性。

设序列的倒数化算子为 D_2 :

$$Y_j D_2 = (y_j(1)d_2, y_j(2)d_2, \dots, y_j(n)d_2) \quad (6)$$

$$y'_j(k) = y_j(k)d_2 = \frac{1}{y_j(k)}, k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

引入序列的倒数化算子的目的是使环境应力量值与平均故障时间(MTTF)的负相关转变为正相关。通常环境应力量值越大, 故障发生的次数越多, MTTF 越短, 产品的故障率越高。这样, 环境应力量值与 MTTF 的倒数成正相关的关系。

2.2.3 计算序列的差值矩阵

令 $D_{ji}(k)$ 为 X_i 和 Y_j 在 k 点的差异为:

$$D_{ji}(k) = |y'_j(k) - x'_i(k)| \quad (8)$$

那么比较序列与第 j 个失效模式的参考序列差值矩阵为:

$$D_j = \begin{bmatrix} D_{j1}(1) & \cdots & D_{jp}(1) \\ \vdots & & \vdots \\ D_{j1}(n) & \cdots & D_{jp}(n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 $j = 1, 2, \dots, q$, 则对于每个失效模式均可得到一个差值矩阵。

2.2.4 确定环境应力与故障间的相关系数

在差值矩阵 $D_1 \sim D_q$ 中, 得到最小差值 $\min_j \min_i \min_k D_{ji}(k)$ 和最大差值 $\max_j \max_i \max_k D_{ji}(k)$, 可定义关联系数为:

$$\gamma(y_j(k), x_i(k)) = \frac{\min_j \min_i \min_k D_{ji}(k) + \rho \max_j \max_i \max_k D_{ji}(k)}{D_{ji}(k) + \rho \max_j \max_i \max_k D_{ji}(k)} \quad (10)$$

式中: $\gamma(y_j(k), x_i(k))$ 为环境应力比较序列 X_i 和故障参考序列 Y_j 在第 k 个综合应力条件下的关联系数; ρ 为分辨系数, 取值越小, 分辨力越大, 一般令 $\rho = 0.5$ 。

2.2.5 确定环境应力与故障的关联度

令 $\gamma(Y_j, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(y_j(k), x_i(k))$, $\gamma(Y_j, X_i)$ 满足灰色关联理论中接近性、整体性、偶对称性、规范性等 4 个公理, 则 $\gamma(Y_j, X_i)$ 为环境应力 i 与故障模式 j 的灰色关联度。可得到环境应力与失效模式间的灰色关联

度矩阵 Γ_{xy} :

$$\Gamma_{xy} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ \gamma_{q1} & \cdots & \gamma_{pq} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中： γ_{ji} 表示灰色关联度 $\gamma(Y_j, X_i)$ 。通过对比某一行中的各元素的量值 $\gamma(Y_j, X_i)$ ，可以得到各环境应力 X_i 对第 j 种故障模式 Y_j 的贡献度。将矩阵 Γ_{xy} 中各行向量归一化，可得到各环境应力对故障模式发生的相对贡献度。

2.3 整机加速因子

对多失效模式整机产品的加速因子研究需要对整机的失效机理进行分析。文中将整机失效划分为 4 个层次：应力、失效模式、部件失效、整机失效。应力与失效模式的映射关系不是简单的直线关系，一种失效模式可能由一种应力引起，也可能是由多种应力共同造成的。多种应力间可能存在着独立或相互关联的情况，但文中只考虑应力间相互独立的情况。在应力与失效模式间构建加速模型，通过加速模型可以得到应力与失效模式间的加速因子。由于考虑多种应力，所以可能出现一种失效模式构建多个加速模型，得到多个加速因子，这些加速因子通过函数关系整合成一个综合加速因子^[11-15]。

一个部件失效可能是由多个失效模式引起的，而一种失效模式也可能引起多个部件失效，文中将这种复杂关系简化。从失效率的角度考虑，相同的失效模式在不同的部件中的失效率是不同的，所以每种部件的任一失效模式都不同于其他失效模式。所有的失效模式间都是相互独立的，部件之间的关系同为竞争失效，任一部件失效都能造成整机失效，如图 1 所示。

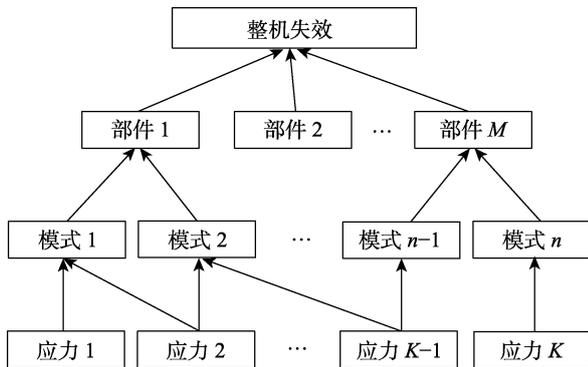


图 1 整机失效层次分析

Fig.1 Failure level analysis diagram of the whole machine

在构建四者函数关系时，以整机在加速条件下的失效率为基础。等式左侧为整机加速因子与整机的失效率的乘积，等式右侧为各失效模式在加速条件下的失效率之和。由于不同种失效模式为串联关系，又服从指数分布，所以其失效率采用相加的关系。

$$\lambda_A = AF_{\text{test}} \times \lambda = \sum_{i=1}^n \left(r_i \cdot \sum_{j=1}^{N_i} \left(\sum_{k=1}^K (AF_{ijk} \times \lambda_{ijk}) \right) \right) \quad (12)$$

式中： AF_{test} 表示整机的加速因子； λ 表示整机在规定应力下的失效率； $AF_{\text{test}} \times \lambda$ 表示整机在加速条件下的失效率； AF_{ijk} 为在应力 k 下第 i 种部件在第 j 种失效模式的加速因子； λ_{ijk} 为在应力 k 下第 i 种部件在第 j 种失效模式的平均失效率； r_i 为 i 种部件数量； N_i 为失效模式的种类数； n 为部件数量。

3 案例分析

以某型战术导弹的控制系统为例，介绍上述整机加速因子的计算方法。某战术导弹的飞行过程为：首先垂直起飞；然后向目标方向急速转弯；在转弯完成后，进行较长时间的巡航飞行；当导弹达到预定的运行状态时，关闭发动机；弹头与弹体进行分离，弹头飞抵至任务目标。导弹的控制系统是导弹武器系统中的关键部件，它的主要功能是控制导弹平稳地按照预定轨道飞行，并引导弹头飞向目标。

导弹控制系统由电源、总线网络、弹上计算机、舵伺服机构和综合控制器组成。首先对整个系统的失效机理进行定性分析，采用 FMMESA（失效模式、机理、影响及应力分析）的分析方法。导弹控制系统故障模式分析见表 1，环境应力用不同的代号进行表示，其中温度应力、湿度应力、振动应力、电应力、冲击应力分别用代号 E1、E2、E3、E4、E5 表示。

根据历史数据和试验数据，通过频率分析法可以得到失效模式的发生概率比例。由于篇幅有限，在本案例中通过弹上计算机的失效模式 Y_8 ，对敏感环境应力进行定量分析，判断每种环境应力对失效模式的贡献度。

根据统计的试验数据可得行为序列及参考序列为：

$$X = \begin{pmatrix} 30 & 50 & 80 \\ 40 & 70 & 90 \\ 1.2 & 2.6 & 3.5 \end{pmatrix}$$

$$Y = (10^6 \quad 2.1 \times 10^5 \quad 2.9 \times 10^5)$$

对上述的行为序列及参考序列进行去量纲计算得：

$$X' = \begin{pmatrix} 0.19 & 0.31 & 0.5 \\ 0.25 & 0.35 & 0.45 \\ 0.16 & 0.36 & 0.48 \end{pmatrix}$$

$$Y = (0.02 \quad 0.41 \quad 0.57)$$

计算序列的差值矩阵：

$$D' = \begin{pmatrix} 0.17 & 0.1 & 0.07 \\ 0.23 & 0.06 & 0.12 \\ 0.14 & 0.05 & 0.09 \end{pmatrix}$$

表 1 导弹控制系统的 FMMESA
Tab.1 FMMESA of missile control system

部件	失效模式	故障机理	发生率比	失效率	主要环境
电源	弹上计算机无供电 Y1	连线断裂等	0.07	7×10^{-6}	E1, E2, E3, E5
	综合控制器无供电 Y2	连线断裂等	0.08	8×10^{-6}	E1, E2, E3, E5
	舵伺服机构无供电 Y3	连线断裂等	0.06	6×10^{-6}	E1, E2, E3, E5
总线网络	弹上计算机总线通信故障 Y4	总线断裂等	0.12	1.2×10^{-5}	E1, E3, E4, E5
	控制器总线通信故障 Y5	总线断裂等	0.15	1.5×10^{-5}	E1, E3, E4, E5
	舵伺服机构总线通信故障 Y6	总线断裂等	0.06	6×10^{-6}	E1, E3, E4, E5
弹上计算机	无输出 Y7	电路短路	0.08	8×10^{-6}	E1, E2, E3, E4, E5
	指令输出错误 Y8	软硬件故障	0.05	5×10^{-6}	E1, E2, E3
舵伺服机构	舵 1 卡死 Y9	腐蚀、解锁失效等	0.09	9×10^{-6}	E3, E4, E5
	舵 2 卡死 Y10	腐蚀、解锁失效等	0.07	7×10^{-6}	E3, E4, E5
综合控制器	无输出 Y11	内部电路断路	0.11	1.1×10^{-5}	E1, E2, E3, E4, E5
	输出脉冲错误 Y12	软硬件故障	0.06	6×10^{-6}	E1, E2, E3, E4, E5

计算环境应力与故障的相关系数:

根据公式 $\gamma(y(k), x_i(k)) =$

$$\frac{\min_i \min_k D_i(k) + \rho \max_i \max_k D_i(k)}{D_i(k) + \rho \max_i \max_k D_i(k)}$$

计算可得:

$$\gamma' = \begin{pmatrix} 0.579 & 0.32 & 0.892 \\ 0.478 & 0.943 & 0.702 \\ 0.647 & 1 & 0.805 \end{pmatrix}$$

计算环境应力与故障的关联度:

$$\gamma = (0.28 \quad 0.33 \quad 0.39)$$

由此可以得出, 温度应力、湿度应力、振动应力对故障模式 Y_8 的贡献率分别为: 0.28、0.33、0.39。

通过此方法可以得到相关应力对各故障模式的贡献率。通过频率分析法, 可以得到不同失效率间的比值关系。在整机失效率已知的情况下, 可以计算得到各失效模式的失效率。通过灰色关联分析方法, 可以得到各失效模式在不同环境下的失效率。

导弹控制系统的失效率为 10^{-4} , 通过频率分析法得到各失效模式的失效率见表 1。由上述计算可知, 失效模式 Y_8 在温度、湿度、振动条件下的失效率分别为 1.4×10^{-6} 、 1.65×10^{-6} 、 1.95×10^{-6} 。

导弹控制系统的部分使用环境和加速环境指标: 使用温度为 25°C , 加速温度为 80°C ; 使用相对湿度为 50%, 加速相对湿度 80%; 使用随机振动 $1.5 \text{ g}^2/\text{Hz}$, 加速随机振动为 $3 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 。

结合上述数据和加速模型计算公式(式(13)), 可得各应力对相关失效模式的加速因子。

$$\lambda_A = A_{\text{test}} \times \lambda = \sum_{i=1}^n \left(r_i \cdot \sum_{j=1}^{N_i} \left(\sum_{k=1}^K (A_{ijk} \times \lambda_{ijk}) \right) \right) \quad (13)$$

计算可得整机的加速因子为 153.5。

4 结语

文中提出了基于应力分解法的整机加速因子预计方法。整个分析类似于可靠性分配和预计的 V 字形过程, 首先将整机产品的失效率按照部件、失效模式和应力的层次定量分解到整机在各应力的失效率。然后通过加速模型, 构建失效模式和加速应力间的关系, 将各应力下的失效率逐级综合到整机水平。在整个过程中主要有两个难点, 第一个是将部件的失效率定量分配到各失效模式, 文中提出了频数分析等 3 种方法; 第二个是构建失效模式与各应力间的定量关系, 文中提出了灰色关联分析法, 确定了各应力对某一失效模式发生的贡献度。

文中只考虑了单应力的情况, 还可进一步研究多应力相互作用的情况对整机加速因子的影响。由于整机结构复杂、部件多样化, 不同失效模式间加速因子的关系可能不是文中假设的简单相加, 而相同失效模式中还包含着不同的失效机理, 各应力间的关系不是完全的相乘关系, 这些问题都需要更深入的研究。另外, 元器件、整机失效等基础信息收集相对匮乏, 目前我国在导弹贮存领域收集产品失效信息较多, 但在很多领域还亟待开展。

参考文献:

- [1] EBEL G H. Reliability physics in electronics: A historical view[J]. IEEE transactions on reliability, 1998, 47(3): SP379-SP389.
- [2] SEYED H M M. A practical contribution to quantitative accelerated testing of multi-failure mode products under multiple stresses[D]. Quebec: Laval University, 2009.
- [3] YU Zong-yue, REN Zhi-qian, TAO Jun-yong, et al. Accelerated testing with multiple failure modes under several temperature conditions[J]. Mathematical problems in

- engineering, 2014, 2014: 1-8.
- [4] MOURA E C. A method to estimate the acceleration factor for subassemblies[J]. IEEE transactions on reliability, 1992, 41(3): 396-399.
- [5] SHI Jie, ZHANG Lu, LIU Yan, et al. Variable accelerated factor lifetime test and evaluation system for fuse[C]//Proceedings of 2011 international conference on electronics and optoelectronics. Dalian: IEEE, 2011.
- [6] TRAPP R D, GRABER R R, FARMER W D, et al. An approach for assessing missile system dormant reliability[R]. Albuquerque, N M: BDM Corp, 1981.
- [7] 李鹏, 李传日, 李桃. 基于可靠性分配的整机加速因子计算方法研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(3): 53-57.
LI Peng, LI Chuan-ri, LI Tao. Research on the calculation method of overall acceleration factor based on reliability allocation[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(3): 53-57.
- [8] SEAGER J D, FIESELMAN C D. A method to predict an average activation energy for subassemblies[J]. IEEE transactions on reliability, 1988, 37(5): 458-461.
- [9] IEC 62506-1, Methods for product accelerated testing[S].
- [10] TAN Yuan-yuan. Research on assembly level accelerated testing for storage life assessment of equipment[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [11] NELSON W B. Accelerated testing: Statistical models, test plans, and data analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- [12] YANG Kai, XUE Jia-nan. Continuous state reliability analysis[C]//Proceedings of 1996 annual reliability and maintainability symposium. Las Vegas, NV: IEEE, 1996.
- [13] LUO Wei, ZHANG Chun-hua, CHEN Xun, et al. Accelerated reliability demonstration under competing failure modes[J]. Reliability engineering & system safety, 2015, 136: 75-84.
- [14] ESCOBAR L A, MEEKER W Q. A review of accelerated test models[J]. Statistical science, 2006, 21(4): 552-577.
- [15] KRASICH M. Accelerated reliability demonstration and assurance test design[C]//2010 Proceedings annual reliability and maintainability symposium (RAMS). San Jose, CA: IEEE, 2010.
- [16] 胡定, 于潇, 郑永泉, 等. 基于 FMEA 法的预评估失效模式分析及改进方法[J]. 气象研究与应用, 2015, 36(2): 100-102.
HU Ding, YU Xiao, ZHENG Yong-quan, et al. Pre-assessment and improved method of a failure mode analysis based on FMEA method[J]. Journal of meteorological research and application, 2015, 36(2): 100-102.
- [17] 王小林, 郭驰名, 程志君, 等. 基于灰色系统理论与 Bootstrap 方法环境因子的确定[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2010, 28(2): 22-27.
WANG Xiao-lin, GUO Chi-ming, CHENG Zhi-jun, et al. Estimating environmental factors based on grey system theory and bootstrap method[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2010, 28(2): 22-27.
- [18] 苏承毅, 牟春晖, 何江, 等. 整机级加速贮存试验加速因子与真实度评估方法[J]. 战术导弹技术, 2015(1): 37-41.
SU Cheng-yi, MU Chun-hui, HE Jiang, et al. Acceleration factor and fidelity assessment of system level accelerated aging test[J]. Tactical missile technology, 2015(1): 37-41.
- [19] GAO Xin-yu. Research on failure modeling technology in testability virtual evaluation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [20] ZHANG Yong. Research on key technologies of virtual testability verification test for equipments[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.