

弹上电子部件加速因子估计方法研究

刘晓娣, 韩建立, 姜普涛

(海军航空大学, 山东 烟台 264001)

摘要: **目的** 针对高可靠长寿命的弹上电子部件在实际贮存环境温度起伏变化的情况, 研究基于等效温度的加速因子估计方法。**方法** 首先剖析弹上电子部件失效机理, 然后基于阿伦尼斯模型, 分析加速应力与实际环境温度的对应关系, 求解实际环境等效温度, 进而估计加速因子, 最后通过某型导弹综合控制器中的时序控制电路板, 验证该方法的工程适用性。**结果** 该方法能够真实反映环境温度情况, 且与传统加权平均温度计算方法相比, 加速因子估计和加速试验时间预测更准确, 且随着实际环境温度起伏的增大, 优势更加明显。**结论** 该方法在实际贮存环境温度起伏变化的情况下, 能够有效提高加速因子估计和加速寿命试验时间预测的准确性, 为弹上电子部件加速寿命试验方案设计提供可靠依据, 对其他高可靠长寿命产品的加速因子估计也具有一定的参考价值。

关键词: 电子部件; 加速寿命试验; 加速因子; 阿伦尼斯模型; 环境温度; 等效温度

中图分类号: TJ760 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)08-0007-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.08.002

Acceleration Factor Estimation of Missile-borne Electronic Components

LIU Xiao-di, HAN Jian-li, JIANG Pu-tao

(Naval Aeronautical University, Shandong Yantai 264001, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the acceleration factor estimation method based on equivalent temperature for the high reliability and long life electronic components in the actual storage environment. Firstly, the failure mechanism of electronic equipment on the missile is analyzed. Then based on Arrhenius model, the corresponding relationship between acceleration stress and actual environment temperature is analyzed, and the equivalent temperature is solved to estimate the acceleration factor. And then the method is used to the timing controller circuit board in a missile integrated controller. The results show that compared with the traditional temperature calculation method by weighted average, this method is more accurate in the acceleration factor estimation and the acceleration test time prediction, and the advantages are more obvious with the increase of the fluctuation of actual environment temperature. This method can effectively improve the accuracy of the estimation of acceleration factor and the prediction of acceleration test time, thus providing effective support for the design of accelerated life test scheme of electronic equipment on the missile. It also has a certain reference value for the acceleration factor estimation of other high reliability and long life products.

收稿日期: 2022-03-16; 修订日期: 2022-05-13

Received: 2022-03-16; Revised: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(51975580)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51975580)

作者简介: 刘晓娣(1982—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为装备可靠性工程、装备延寿技术。

Biography: LIU Xiao-di (1982-), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: equipment reliability engineering and life extension technology.

引文格式: 刘晓娣, 韩建立. 弹上电子部件加速因子估计方法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 007-012.

LIU Xiao-di, HAN Jian-li. Research on Acceleration Factor Estimation of Missile-borne Electronic Components[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 007-012.

KEY WORDS: electronic components; accelerated life test; acceleration factor; Arrhenius model; environment temperature; equivalent temperature

导弹造价昂贵,且具有“长期贮存,一次使用”的特点。在贮存过程中,导弹会受到温度、湿度、振动、电应力等多种应力的作用,随着贮存时间的推移,存在性能退化、可靠性下降等现象。如何延长导弹的贮存使用寿命,多年来一直是各军事强国高度关注的问题^[1-3]。随着装备信息化水平的提高,电子设备在导弹武器系统中承担着越来越重要的功能任务,且相关修理报告表明^[4],导弹失效大部分集中在电子类设备。因此,开展弹上电子部件贮存寿命评估对整个导弹系统的剩余寿命预测具有重要意义。

加速寿命试验具有耗时短、费用小,且能预测导弹寿命的特点,是目前导弹贮存寿命评估研究的重要方向^[5-8]。在加速寿命试验中,加速因子用于表征加速条件下的应力水平与正常应力水平之间的时间尺度变换关系,是一个非常重要的参数。在试验方案设计中,需要根据选定的加速模型来计算加速因子,进而获得不同加速应力水平下的加速贮存试验时间。目前很多学者开展了相关研究^[9-14],其中在温度应力下,传统的加速因子估计往往是在正常应力水平为某一具体数值下基于阿伦尼斯(Arrhenius)模型开展的^[15-20]。实际上,导弹要经历库房贮存和室外吊装、转运、值班等环境条件,环境温度并非恒定不变。若将正常应力水平固定于某一数值,势必影响加速因子估计的准确性,从而降低加速寿命试验结论的可信度;若对每个温度区间分别估计,则计算相对繁琐。针对上述问题,本文在分析弹上电子部件失效机理的基础上,提出一种基于等效温度的加速因子估计方法,并通过某型导弹综合控制器中的时序控制电路板验证该方法的工程适用性。

1 弹上电子部件失效机理与加速试验模型

1.1 失效机理分析

弹上电子部件贮存失效主要有电性能故障、阻尼器软化变形和金属件锈蚀3种模式,其中电性能故障主要与电子元器件失效或故障有关,其危害最大,直接影响设备的性能^[1]。弹上电子部件中的元器件主要有电阻、电容、三极管、二极管、集成电路等,在受到温度、湿度、振动等各种应力作用下,各类元器件会出现失效。如电阻可能会出现开路、短路或阻值漂移等,三极管可能会出现开路、短路和放大倍数下降等。根据弹上电子设备随导弹的正常贮存环境分析,温度应力是引起弹上电子部件失效的主要因素,且通常认为电子部件在

不同温度应力下失效机理保持不变^[21-22]。因此,本文选取温度作为加速寿命试验的应力类型,采用恒定应力施加方式。在贮存条件下,可依据GJB/Z 108A—2006《电子设备非工作状态可靠性预计手册》^[23]预计各种元器件的失效率。

1.2 加速试验模型

温度应力是电子产品加速寿命试验中最常见的加速应力。目前,国内外针对温度应力开展的加速寿命研究中,广泛采用阿伦尼斯模型来估计产品的寿命,其表达式为:

$$L = A \exp \left[\frac{E_a}{kT} \right] \quad (1)$$

式中: L 为产品的特征寿命; A 为与温度无关的未知常数; E_a 为活化能, eV; k 为玻尔兹曼常数, $k=8.62 \times 10^{-5}$ eV/K; T 为热力学温度, K。

2 弹上电子部件加速因子估计方法

2.1 加速因子定义

加速因子反映了加速应力水平下产品的寿命信息与实际使用寿命的折算规律,其具体定义如下所述^[24]。

若产品在加速应力水平 S_i 与正常应力水平 S_0 下可以达到相同可靠度的可靠寿命分别为 L_i 和 L_0 , 则:

$$AF_{i,0} = \frac{L_0}{L_i} \quad (2)$$

式中: $AF_{i,0}$ 表示加速应力水平 S_i 相对于正常应力水平 S_0 的加速因子。

可靠寿命指产品达到规定可靠度时的工作或贮存时间,因此,式(2)也可表示为^[15]:

$$AF_{i,0} = \frac{t_0}{t_i} \quad (3)$$

式中: t_i 和 t_0 产品分别表示在加速应力水平 S_i 与正常应力水平 S_0 下达到相同可靠度水平时所需的时间。

根据加速因子的定义,可得基于阿伦尼斯模型的温度加速因子:

$$AF_{i,0} = \frac{t_0}{t_i} = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_i} \right) \right] \quad (4)$$

式中: T_i 为加速寿命试验温度; T_0 为正常贮存温度。由式(4)可见,参数 T_i 和 T_0 的选取直接决定温度加速因子,是影响加速寿命试验设计的一个关键因素。

2.2 基于等效温度的加速因子估计

1) 等效温度。弹上电子部件的实际贮存环境温度并非恒定不变, 在加速因子估计中, 如果采用某一温度值作为正常贮存温度, 并不能代表真实的贮存环境。因此, 需要对环境温度进行等效。

在 1 个周期内, 对导弹贮存环境的温度数据进行统计处理, 可得到环境温度剖面。设在周期 t 内实际有 N 个温度点, 分别记为 $T_{01}, T_{02}, \dots, T_{0N}$, 各温度点持

续的时间长度分别为 t_1, t_2, \dots, t_N , 且 $\sum_{j=1}^N t_j = t$ 。

由式 (4) 可得, 相对于实际温度应力 T_{0j} , 在加速温度应力 T_i 下的加速因子为:

$$AF_{i,0j} = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{0j}} - \frac{1}{T_i} \right) \right] \quad (5)$$

在加速温度应力 T_i 下, 达到实际温度应力 T_{0j} 作用时间 t_j 后的可靠度, 对应的试验时间为:

$$\tau_j = \frac{t_j}{AF_{i,0j}} = t_j \exp \left[-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{0j}} - \frac{1}{T_i} \right) \right] \quad (6)$$

则在周期 t 内需要总的试验时间为:

$$\tau = \sum_{j=1}^N \tau_j = \sum_{j=1}^N t_j \exp \left[-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{0j}} - \frac{1}{T_i} \right) \right] \quad (7)$$

若实际环境温度可以用一个等效温度 T'_0 来表示, 根据式 (4) 可得, 在加速温度应力 T_i 下, 在周期 t 内需要总的试验时间也可表示为:

$$\tau = t \exp \left[-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T'_0} - \frac{1}{T_i} \right) \right] \quad (8)$$

由式 (7) 和式 (8) 整理后得:

$$T'_0 = -\frac{E_a}{k} \left[\ln \frac{1}{t} \sum_{j=1}^N t_j \exp \left(-\frac{E_a}{kT_{0j}} \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

由式 (9) 可见, 等效温度 T'_0 不仅与各温度点及其持续时间有关, 还与受试对象的活化能 E_a 有关^[25-26]。因此, 在计算基于阿伦尼斯模型的温度加速因子时, 不能简单采用工作温度范围的中位数或温度的时间平均值。

2) 加速因子估计。工程上, 对于电子类产品多认为其寿命服从指数分布, 产品的特征寿命与失效率 λ 成反比。此时由式 (2) 加速因子的定义可得:

$$AF = \frac{\lambda_s}{\lambda_o} \quad (10)$$

式中: λ_s 表示加速条件下电子产品的故障率; λ_o 表示正常条件下电子产品的故障率。

假设电子部件是由 n 个单元组成的串联系统,

其中任何一个单元器件发生故障, 都会导致该设备故障。则电子部件的整体失效率为各单元失效率之和, 即:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n p_i \lambda_i \quad (11)$$

式中: λ 为电子部件的整体失效率; p_i 为第 i 类元器件的数量; λ_i 为第 i 类元器件的故障率。

由此可得, 电子部件总体的加速因子可表示为:

$$AF_c = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \lambda_{si}}{\sum_{i=1}^n p_i \lambda_{oi}} \quad (12)$$

式中: λ_{si} 为第 i 类元器件加速条件下的故障率; λ_{oi} 为第 i 类元器件正常条件下的故障率。

由式 (10) 可知, 第 i 类元器件在加速应力条件下相对于正常应力的加速因子为:

$$AF_{si,oi} = \frac{\lambda_{si}}{\lambda_{oi}} \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (12) 得到电子部件整体的加速因子为:

$$AF_c = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \lambda_{si}}{\sum_{i=1}^n p_i \lambda_{oi}} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i AF_{si,oi} \lambda_{oi}}{\sum_{i=1}^n p_i \lambda_{oi}} \quad (14)$$

2.3 等效加速试验时间计算

对弹上电子部件开展恒定温度加速寿命试验, 实际上是构建一种加速试验环境, 使得弹上电子部件在失效机理不变的前提下, 在加速应力下达到某可靠度所需要的贮存时间 t_{test} , 相当于在自然环境下达到相同可靠度的贮存时间 t_m , 根据加速因子的定义可得:

$$t_m = AF_c t_{test} \quad (15)$$

由式 (4)、(9)、(14)、(15) 可得相对于正常温度应力下不同加速温度应力的加速试验时间, 进而为弹上电子部件的加速寿命试验方案的制定提供可靠依据。

3 算例

以某型导弹综合控制器中的时序控制电路板为例, 运用本文所提出的弹上电子部件加速因子估计方法预计其加速因子, 并计算在不同加速温度应力条件下所需要的试验时间。该电路板主要用于根据接收信号控制电爆管的连通。根据 1a 内导弹贮存环境温度数据, 得到典型的 1a 温度剖面, 见表 1。

该电路板上的元器件种类、数量、正常工作条件下各类元器件的活化能 E_{ai} 、故障率 λ_{oi} , 见表 2, 其

中故障率参考标准手册^[12]获得。

表 1 时序控制电路 1 a 环境温度
Tab.1 Annual environment temperature of timing controller circuit board

实际温度/℃	时间/d
9	15
15	25
18	30
20	35
22	32
25	65
27	54
30	31
33	30
35	26
38	22

表 2 时序控制电路板各元器件参数
Tab.2 Components parameters on the timing controller circuit board

序号	名称	数量	E_{ai}/eV	$\lambda_{oi}/(10^{-9} h)$
1	电阻	18	0.45	0.2
2	电容	12	0.6	0.7
3	电感	8	0.6	0.4
4	三极管	2	0.34	2.2
5	二极管	4	0.34	1.7
6	继电器	1	0.5	6.7
7	双极型数字集成电路	1	0.4	3.2

通过分析时序控制电路中所有元器件的温度特性，明确该设备的贮存温度上限应小于 125 ℃。为了避免过应力对设备造成破坏，温度应力的取值范围设为 70~110 ℃。根据阿伦尼斯加速模型，由式（4）、（14）计算可得在不同温度应力下的加速因子。

该类型的电子部件已经随导弹贮存 8 a，现将对该型导弹进行 12 a 的贮存寿命评估，因此需要通过加速寿命试验来评估该电子部件是否还具有 4 a 的贮存寿命。根据不同加速温度应力下的加速因子，由式（15）计算可得在不同加速应力下所需要的加速试验时间，见表 3。

由表 3 可知，随着加速温度应力的增大，加速因子增大，从而使得加速寿命试验所需要的时间缩短。若取加速温度应力 80 ℃，根据表 1 的各个温度点及其持续时间，分别计算对应的加速因子及 4 a 贮存寿命的试验时间，见表 4。

将表 4 中各个温度点在 80 ℃的加速温度应力下对应的试验时间叠加，与表 3 采用等效温度计算所得结果基本一致，证明了文中所提方法的正确性。若采用环境温度的加权平均值 25.2 ℃作为实际环境温度，

表 3 等效环境温度不同加速温度应力下的加速因子与试验时间

Tab.3 Acceleration factor and test time under different acceleration temperature stress by equivalent temperature

序号	温度应力/℃	加速因子	试验时间/h
1	70	11.24	3 117
2	75	14.48	2 420
3	80	18.57	1 887
4	85	23.67	1 480
5	90	30.03	1 167
6	95	37.92	924
7	100	47.65	735
8	105	59.59	588
9	110	74.17	472

表 4 时序控制电路各温度点的加速试验时间
Tab.4 Acceleration test time of each temperature point of the timing controller

实际温度/℃	时间/d	加速因子	试验时间/h
9	15	69	21
15	25	43.24	56
18	30	34.54	83
20	35	29.73	113
22	32	25.84	119
25	65	20.94	298
27	54	18.15	286
30	31	14.82	201
33	30	12.26	235
35	26	10.68	234
38	22	8.94	236

由式（4）、（14）、（15）计算可得不同加速温度应力下的加速因子与 4 a 贮存寿命的试验时间，见表 5。

表 5 均值环境温度不同加速温度应力下的加速因子与试验时间

Tab.5 Acceleration factor and test time under different acceleration temperature stress by mean environment temperature

序号	温度应力/℃	加速因子	试验时间/h
1	70	12.46	2 812
2	75	16.09	2 178
3	80	20.65	1 697
4	85	26.37	1 329
5	90	33.51	1 046
6	95	42.36	827
7	100	53.29	658
8	105	66.71	525
9	110	83.12	422

对比表 3 和表 5 可知，采用传统加权平均温度计算的加速因子与采用等效温度计算的结果相比存在差异，导致计算得到的长期贮存加速试验时间存在较

大差异。以 80 ℃ 的加速温度应力为例, 4 a 贮存寿命的试验时间二者相差 190 h。若采用加权平均温度得到的加速寿命时间进行加速寿命试验设计, 必将导致试验不充分, 影响试验效果, 且随着实际环境温度起伏的增大, 偏差将会加大。在实际工程中, 应根据具体情况选择合适的加速温度应力, 准确计算加速因子与加速寿命试验时间, 以提高加速寿命试验方案设计的有效性。

4 结语

本文根据弹上电子部件的实际贮存环境, 提出一种基于等效温度的加速因子估计方法, 并对某型导弹综合控制器中的时序控制电路板进行算例分析。与传统估计方法相比, 该方法能够反映真实环境温度, 在加速因子估计和加速寿命试验时间预测上更加准确, 尤其是在实际贮存环境温度起伏变化较大的情况下, 优势更加明显, 从而为弹上电子部件加速寿命试验方案设计提供更加可靠的依据。该方法不仅可以应用于弹上电子部件, 对其他高可靠长寿命产品的加速因子估计也具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 孟涛, 张仕念, 易当祥. 导弹贮存延寿技术概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013.
MENG Tao, ZHANG Shi-nian, YI Dang-xiang. The Missile Storage Life Extension Technology [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2013.
- [2] NELSON W. Accelerated Testing: Statistical, Test Plans, and Data Analyses[M]. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- [3] 滕克难, 韩建立. 海军战术导弹贮存延寿工程实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
TENG Ke-nan, HAN Jian-li. Research on the Application for Tactical Missile Storage Life Extension Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020.
- [4] 赵志兵. 导引头故障模式、影响与危害性分析[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
ZHAO Zhi-bing. Failure mode Effect Criticality Analysis for Seeker[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [5] 罗赓, 穆希辉, 牛跃昕, 等. 小子样条件下某型加速度计步降加速寿命试验优化设计[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(5): 696-700.
LUO Geng, MU Xi-hui, NIU Yue-ting, et al. Optimal Design Method for Accelerometer Step-down-Stress Accelerated Life Testing on Condition of Small Sample[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(5): 696-700.
- [6] 李晨阳. 引信系统电子产品加速寿命试验方法研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(1): 89-92.
LI Chen-yang. Research of Accelerated Life Testing Method of Fuze System Electronic Products[J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(1): 89-92.
- [7] 秦强, 张生鹏. 综合环境条件下电子装备贮存寿命加速试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 81-87.
QIN Qiang, ZHANG Sheng-peng. Accelerated Storage Test of Electric Equipment under Integrated Environmental Stresses[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 81-87.
- [8] 张鑫, 韩建立, 张崇会, 等. 弹载二次电源加速寿命试验试验谱研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(5): 54-59.
ZHANG Xin, HAN Jian-li, ZHANG Chong-hui, et al. Study on Accelerated Life Test Spectrum of Bomb Secondary Power Supply[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(5): 54-59.
- [9] 张生鹏, 王晓红, 李晓钢. 电子整机加速贮存试验方案设计[J]. 质量与可靠性, 2011(2): 24-28.
ZHANG Sheng-peng, WANG Xiao-hong, LI Xiao-gang. Design of Accelerated Life Test Plan of Assembly Product[J]. Quality and Reliability, 2011(2): 24-28.
- [10] 肖阳, 吕卫民, 江式伟, 等. 导弹板级电子产品加速环境谱设计方法[J]. 战术导弹技术, 2016(6): 38-45.
XIAO Yang, LV Wei-min, JIANG Shi-wei, et al. Accelerated Environmental Spectrum Design of Missile Board Electronic Device[J]. Tactical Missile Technology, 2016(6): 38-45.
- [11] 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.
- [12] 徐如远, 袁宏杰, 李鹏, 等. 基于薄弱环节的整机加速因子计算[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 1-4.
XU Ru-yuan, YUAN Hong-jie, LI Peng, et al. Whole Machine Acceleration Factor Based on Weak Links[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 1-4.
- [13] 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): 14-19.
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): 14-19.
- [14] 郭恒晖, 李传日, 庞月婵, 等. 基于极大似然估计的加速因子计算方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 49-53.
GUO Heng-hui, LI Chuan-ri, PANG Yue-chan, et al. Cal-

- ulation of Acceleration Factor Based on Maximum Likelihood Estimation[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(5): 49-53.
- [15] 李楼德, 袁宏杰. 板级电子产品加速因子预计方法研究[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(2): 42-45.
LI Lou-de, YUAN Hong-jie. Acceleration Factor Estimation Method of PCB[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(2): 42-45.
- [16] 申争光, 苑景春, 董静宇, 等. 弹上设备加速寿命试验中加速因子估计方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2015, 37(8): 1948-1952.
SHEN Zheng-guang, YUAN Jing-chun, DONG Jing-yu, et al. Research on Acceleration Factor Estimation Method of Accelerated Life Test of Missile-Borne Equipment[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(8): 1948-1952.
- [17] 姚军, 韩娜, 傅玲莉. 加速贮存寿命试验及可靠性评估[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(3): 71-75.
YAO Jun, HAN Na, FU Ling-li. Accelerate Storage Life Test and Reliability Evaluation[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(3): 71-75.
- [18] NELSON W. Accelerated Life Testing - Step-Stress Models and Data Analyses[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1980, 29(2): 103-108.
- [19] 丰雷. 某弹用电子部件贮存寿命评估[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(6): 114-119.
FENG Lei. Storage Life Assessment of Electronic Component in a Missile[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(6): 114-119.
- [20] 王蓓. 某型号导弹整机加速贮存延寿研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
WANG Bei. Research on Accelerated Storage Life Extension for a Type of Missile[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [21] CHOI H S, SEO W S, CHOI D K. Prediction of Reliability on Thermoelectric Module through Accelerated Life Test and Physics-of-Failure[J]. *Electronic Materials Letters*, 2011, 7(3): 271-275.
- [22] EVANS J W, CHEN Guang-ming, EVANS J Y, et al. Development of Acceleration Factors for Reliability Testing of Mechanical Equipment[J]. *International Journal of Quality Engineering and Technology*, 2014, 4(3): 213-224.
- [23] GJB/Z 108A—2006, 电子设备非工作状态可靠性预计手册[S].
GJB/Z 108A—2006, Nonoperating Reliability Prediction Handbook for Electronic Equipment[S].
- [24] 陈循, 张春华, 汪亚顺, 谭源源. 加速寿命试验技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, WANG Ya-shun, et al. Accelerated life testing technology and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [25] 张仕念, 颜诗源, 张国彬, 等. 导弹产品基于阿伦尼乌斯方程的环境等效温度计算方法[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(6): 74-77.
ZHANG Shi-nian, YAN Shi-yuan, ZHANG Guo-bin, et al. Computing Method of Environment Equivalent Temperature Based on Arrhenius Equation for Missile Products[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(6): 74-77.
- [26] 王裕鹏, 高鑫, 陈文森, 等. 基于 Arrhenius 模型的汽车电子产品加速寿命试验设计分析[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(3): 22-25.
WANG Yu-peng, GAO Xin, CHEN Wen-miao, et al. Design of Accelerated Life Test for Automotive Electronics Based on Arrhenius Model[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(3): 22-25.

责任编辑: 刘世忠