型号装备寿命概念及指标验证分析

陶书弘,刘顺利,何　平
(中国航发控制系统研究所,江苏无锡 214063)

摘要:针对航空发动机型号装备研制中所提出的寿命指标含义不清晰的问题,基于 GJB 451 和 GJB 451A,梳理分析了与寿命相关的参数,进一步明确了各参数之间的相互关系以及寿命与故障关系等。分类分析了个体寿命和总体寿命,明确型号装备寿命指标对应的是装备总体寿命指标。对于型号装备耐久寿命的验证,介绍了 2 种耐久寿命验证试验类型,明确耐久性试验利用极小样本个体寿命鉴定总体寿命的关键在于合理选择经验系数。针对型号装备长期寿命指标缺少有效验证手段的问题,提出了加速寿命试验和加速耐久性试验 2 种加速验证方式。

关键词: 耐久寿命;个体寿命;总体寿命;加速寿命试验;加速耐久性试验;航空发动机
中图分类号: V240.2　　**文献标识码:**A　　**doi:**10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.04.017

Verification and Analysis of Concept and Index of Model Equipment Lifetime

TAO Shu-hong, LIU Shun-li, HE Ping
(AECC Aero Enigine Control System Institute, Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: Aiming at the problem that the meaning of lifetime index was not clear in the development of aeroengine model equipment, the parameters related to lifetime were sorted out and analyzed based on GJB 451 and GJB 451A, and the relationship between the parameters and the relationship between lifetime and failure were further clarified. The individual lifetime and collectivity lifetime were classified and analyzed. It was clear that the lifetime index of the model equipment corresponds to the collectivity lifetime index of the equipment. For the verification of the durability lifetime of model equipment, two types of durability lifetime verification test were introduced. It was clear that the key of using minimal sample individual lifetime to identify the collectivity lifetime of durability test was to select the experience coefficient reasonably. Aiming at the lack of effective verification means for long-term lifetime index of model equipment, accelerated lifetime test and accelerated durability test were proposed.

Key words: durability lifetime; individual lifetime; collectivity lifetime; accelerated lifetime test; accelerated durability test; aeroengine

0　引言

以可靠性为中心的维修分析(Reliability Centered Maintenance,RCM)理论认为,定时翻修对提高复杂装备的可靠性几乎不起作用,但是对于以耗损型故障模式为支配地位的装备可显著提高其可靠性。因此,目前在型号装备研制中,仍会规定翻修期、使用寿命等相关寿命指标。装备在整个研制过程中,需考虑寿命指标的实现与验证。装备设计寿命能否满足研制要求,不仅影响装备的经济性,也显著影响其可靠性和安全性。

目前装备寿命相关参数较多,文献[1-2]研究涉及了航天器在轨寿命指标;文献[3]描述了寿命、使用寿命、设计寿命、维护寿命、经济寿命、替代寿命和市场寿命等寿命相关术语概念;文献[4]从不同分类角度介绍了工作寿命和存储寿命、有轨道寿命和有效工作寿命、平均寿命和可靠寿命、设计寿命、评估寿命和实际寿命等寿命概念。不同的研究者对相同寿命参数的定义存在不一致之处,典型的如前苏联军标 13377 将存储寿命定义为“产品在规定的条件下存储及运输的

收稿日期:2019-03-04　　**基金项目:**航空动力基础研究项目资助
作者简介:陶书弘(1962),男,工程硕士,高级工程师,从事质量与可靠性工程管理工作;E-mail:taosh88@163.com。

引用格式: *陶书弘, 刘顺利, 何平. 型号装备寿命概念及指标验证分析 [J]. 航空发动机,2019,45 (4):86-91.TAO Shuhong, LIU Shunli, HE Ping. Verification and analysis of concept and index of model equipment lifetime[J]. Aeroengine,2019,45(4):86-91.*

日历时间，在此期间内及存储后的规定参数值，应保持在规定的范围内变化”;GJB 451A 则将存储寿命定义为“产品在规定的存储条件下能够满足规定要求的存储期限”。

在设计、分析和验证环节,存在诸多寿命参数及对其概念理解不清的问题,将严重影响装备寿命设计与验证。为了理清不同寿命概念内涵,本文从相关国军标出发,对标准中规定的寿命相关参数进行对比分析,明确其概念内涵。梳理 2 类加速寿命验证方法,分析其应用特点,为耐久寿命指标的验证提供支持。

1　寿命参数定义及其分析

1.1　寿命参数定义

装备寿命指标属于可靠性指标范畴,GJB 451 [6]对寿命相关参数进行了定义,GJB 451A 对其定义进行了更新,并增加了 4 个寿命相关参数,具体内容见表 1。

表 1　GJB451 和 GJB451A 中相关寿命参数定义

序号	寿命参数	451 定义	451A 定义
1	使用寿命	产品从制造完成到出现不可修复的故障或不能接受的故障率时的寿命单位数。	产品使用到无论从技术上还是经济上考虑都不宜再使用,而必须大修或报废时的寿命单位数。
2	储存寿命	产品在规定的条件下存储时,仍能满足规定质量要求的时间长度。	产品在规定的存储条件下能够满足规定要求的存储期限。
3	总寿命		在规定的条件下,产品从开始到报废的寿命单位数。
4	首次大修期		在规定条件下,产品从开始使用到首次大修的寿命单位数。也称首次翻修期限。
5	大修间隔期		在规定条件下,产品 2 次相继大修间的寿命单位数。也称翻修间隔期。
6	耐久性	产品在规定的使用和维修条件下,其使用寿命的 1 种度量。	产品在规定的使用、存储和维修条件下,达到极限状态之前,完成规定能力的能力。极限状态是指由于耗损(如疲劳、磨损、腐蚀、变质等)使产品从技术上或从经济上考虑,都不宜在继续使用而必须大修或报废的状态。
7	可靠寿命		给定可靠度所对应的寿命单位数。

由于寿命参数较多,大量的寿命参数基于国军标中所列的参数衍生而来,且具有专用性。为了简化研究,统一认知,本文主要对国军标中相关寿命参数进行分析,以便依据国军标开展产品寿命设计、分析和验证时,能够有着统一的理解,便于不同产品层次协调工作。

1.2　寿命参数相关性分析

根据表 1 中耐久性定义,总寿命、使用寿命、储存寿命、首次翻修期和大修间隔期都是耐久性相关寿命。可靠寿命与耐久性无必然的相关性,但可综合表征寿命和可靠性的关系。

使用寿命可作为确定产品首次翻修期和大修间隔期的基值。总寿命为首次翻修期加上多次翻修间隔期以及最后一次翻修到报废的时间。总寿命从产品启用时计时,所以不包括储存寿命。储存寿命、总寿命、首次翻修期和大修间隔期的关系如图 1 所示。

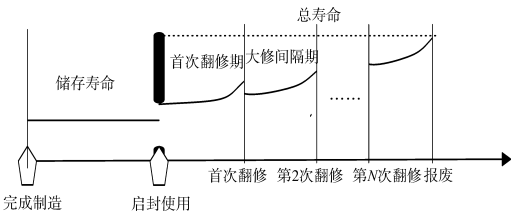

图 1　储存寿命、总寿命、首翻期和翻修间隔期关系

装备在使用条件下可发生决定产品寿命终结的失效,在非工作条件下也可以发生决定产品寿命终结的失效,2 种条件下装备失效的机理不同且相互之间无显著相关性,因而总寿命、首次翻修期和大修间隔期除了用工作时间度量外,也经常同时以日历时间度量,二者以先达者确定产品到寿。

2　装备故障与寿命

寿命与故障是对立统一的,没有故障也就没有寿命,因此有必要对故障进行分类分析,以便明确寿命与故障的关系。

2.1　故障统计规律

大多数简单产品的故障率随时间的变化如图 2 所示,俗称浴盆曲线。浴盆曲线描绘了产品故障率随时间变化的 3 个阶段:早期故障阶段、偶然故障阶段和耗损故障阶段。

2.2　故障与耐久寿命

偶然故障阶段是产品的主要工作阶段,决定其使

用寿命长短。进入耗损故障阶段,预示着产品即将到寿。若装备故障主要由其组成产品的耗损故障支配,则可通过对该产品的定时维修、更换等预防性维修措施,延长装备的总寿命。除了支配性耗损故障外,装备也可能存在其他次要耗损故障,若定期维修仅更换支配故障耗损装备,则意味着每次维修后,失效率较前稳定期的有所提高,直至失效率达到装备报废阈值,装备到寿,如图 3 所示。

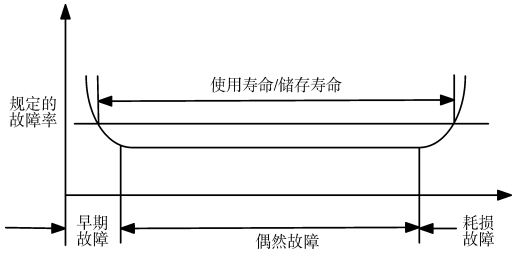

图 2 装备典型的故障率曲线

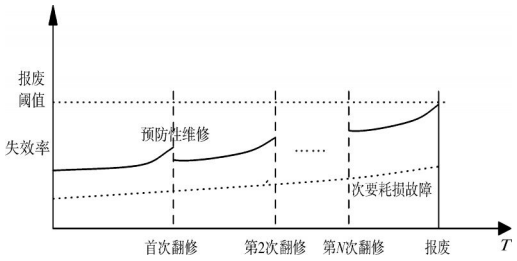

图 3 预防性维修条件下装备的失效率与时间关系

若装备具有多种耗损故障,且没有支配性耗损故障,每个耗损故障对应的寿命有一定的差距,如图 4 所示。以存在 3 类耗损故障为例,最短寿命故障首次在 t_{11} 时刻发生,修复后第 2 次在 t_{12} 时刻发生,再次修复后在 t_{13} 次发生,第 2 短寿命故障模式和第 3 短寿命故障模式分别于 t_{21} 时刻和 t_{31} 时刻首次发生,修复后分别于 t_{22} 时刻和 t_{32} 时刻再次发生,从图 4 中可明显看出很难制定翻修间隔期。

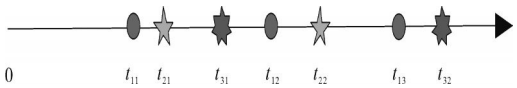

图 4 多种耗损故障共存的故障分布

将图 4 在时间尺度上放大,3 类故障多次交替发生,一段时间后,装备单位时间内发生的故障次数近似恒定不变,如图 5 所示。实际上对于复杂装备,无论其组成部件故障是否属于耗损故障,当出现故障即更新部件时,一段时间稳定后,装备故障时间都接近于指数分布,在 20 世纪 60 年代后期,将这种情况称为“复杂产品无耗损区”[7]。如果稳定期该失效率满足可靠性要求,则只要不出现致命故障,则装备无耐久寿命约束。

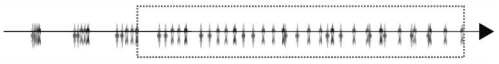

图 5 复杂产品故障分布

2.3 故障与可靠寿命

可靠寿命与耐久性无绝对相关性,只要存在失效的可能,即使不存在耗损故障区,装备也存在与可靠度相关的可靠寿命。存在耗损故障区的装备可靠寿命曲线,在可靠度由 1 开始降低时,对应的可靠寿命迅速增加,在可靠度降低至某一区域时(耗损故障区),对应的可靠寿命基本保持不变。从这一特点可见,当装备存在耗损区时,其可靠寿命与耐久寿命基本一致,可以利用可靠寿命度量耐久寿命。装备进入耗损故障区时,即开展预防性维修可以牺牲装备较低的剩余价值(耐久寿命)获得较高的装备可靠性。不存在耗损故障区的装备可靠性曲线则不存在此特征,如图 6 所示。

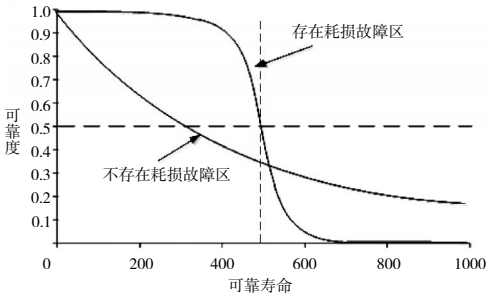

图 6 存在耗损故障区和不存在耗损故障区的可靠寿命与可靠度的关系

可靠寿命与故障类型无关,因此在验证可靠寿命时,需明确装备是否存在耗损故障区,以避免利用偶然阶段故障率评估具有耗损故障区的装备可靠寿命,造成对耐久寿命的误解。利用处于浴盆曲线偶然故障阶段的产品失效率,计算装备可靠寿命,可能得出远大于装备的耐久寿命。例如电子装备储存偶然故障阶段,其失效率可达到负七次方量级,可靠度为 0.9 对应的可靠寿命为 120 a,而实际上元器件的存储寿命可能仅 15 ~ 20 a[8]。当装备存储时间超出了元器件存储寿命期时,耗损故障占装备故障主要部分,电子装备整机失效率远大于偶然故障阶段失效率,其批量装备可靠度为 0.9 时,对应的总的存储时间应远小于

120 a。

3　个体寿命与总体寿命

无论是使用寿命还是储存寿命,国军标中给出的定义主要针对装备个体,属于装备个体寿命。决定装备个体寿命有 2 种情况,一种是出现从技术上还是经济上都不宜修复的故障,即 GJB 451 中提及的不可修故障;另一种是随着装备的翻修,装备故障率越来越高,翻修产生的效益已不抵不过维修、使用产生的成本,即经济上不宜再修复。无论是何种情况,由于个体组成材料、制造工艺、所处环境、使用条件等的差异性,导致每个个体寿命都是不一样的。

对于不可修产品而言,不同个体寿命概率分布构成总体寿命分布。对于可修产品来说,由于每个个体寿命是不同的, 首次翻修期或翻修间隔期也是不同的。但是对于批产产品而言,为了便于统一维修,批产产品规定的首翻期或翻修间隔期都是唯一的。总体寿命分布不再由个体寿命构成,而是由整个使用阶段的翻修间隔期加上最后一次翻修后个体剩余寿命概率分布构成,如图 7 所示。

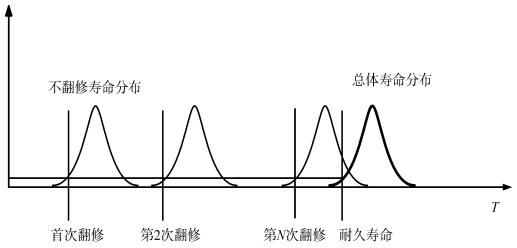

图 7　批产产品翻修期与寿命

图 7 选用产品寿命具有集中分布的特点,其总体寿命分布内任何时刻都可能发生产品故障,根据 GJB 451 中定义, 可事先确定判定到寿的失效率阈值,即人为选择某一时刻,作为装备总体寿命。

对于不具有集中分布的装备寿命,不宜开展定期维修策略的,也就不宜选定某一时刻作为装备总体寿命。典型的如寿命服从指数分布的装备,定期翻修不仅不会提高装备可靠性, 浪费翻修件剩余的使用价值,而且可能引入早期故障,降低装备的可靠性。

个体寿命是随机的,总体寿命是确定的。对于型号装备来说,在设计阶段,需要 1 个明确的寿命指标,以指导其开展设计。因而型号装备的寿命指标应是总体寿命指标。总体寿命由个体寿命决定,但不能随意选用某个体寿命度量总体寿命。

4　寿命验证

4.1　寿命验证概述

对于有翻修期、使用寿命和存储寿命等耐久寿命指标要求的装备,在定型前需要验证其寿命是否满足规定的要求。GJB 451A 中定义了 2 类寿命相关试验:寿命试验和耐久性试验,均可用于验证装备耐久寿命是否满足要求。其中,寿命试验是为了测定装备在规定条件下的寿命所进行的试验;耐久性试验是指在规定使用和维修条件下,为评估和验证装备是否达到规定的耐久性要求所进行的试验;从定义上看,寿命试验属于寿命测定试验,耐久性试验属于寿命考核试验。

相对于寿命测定试验, 耐久性试验具有试验时长短,试验样本量少(一般 2 个)等特点,因而在工程应用中,耐久性试验常用于对型号装备耐久寿命的考核。

通过对文献[9]所提出的工程经验法中的无故障寿命估计公式进行变形处理,可确定耐久性试验时长

$$T=T_0\cdot K \tag{1}$$

式中:T 为每台试验件试验时间;T_0 为耐久性指标要求;K 为经验系数, 具体数值由承制方和使用方协商确定。

耐久性试验能够利用极小样本个体寿命估计总体寿命的关键在于合理选择经验系数。顾名思义,经验系数的取值主要凭借经验,主观性强,据此开展的鉴定试验可信度具有很大的不确定性。针对该问题,文献[10]基于威布尔分布对寿命评估公式中的经验系数进行了理论分析,将经验系数与试验样本数、威布尔分布的形状参数,规定的可靠度以及置信度联系起来。由于威布尔分布描述型号装备耗损失效分布具有广泛的适用性,因而该文献中所提出的方法同样具有广泛的适用性。利用文献中所提出的方法,计算经验系数的理论值,可提高利用极小样本个体寿命鉴定型号装备总体寿命(可靠寿命)是否满足研制要求的可信性。

对于耐久性寿命要求不高的型号装备,寿命试验和耐久性试验均可用于验证耐久性寿命指标。但是对于具有长期耐久寿命要求的型号装备,传统的寿命验证方法需要耗费大量的试验时间,在定型前基本无条件开展此类验证试验。

对 2 类试验采用加速的方式开展,可大大缩减试验时间, 使得定型前长期耐久性寿命验证称为可能。采用加速的方式开展的寿命试验称之为加速寿命试

验。采用加速的方式开展的耐久性试验可称之为加速耐久性试验。目前,利用加速寿命试验或加速耐久性试验验证型号装备长期耐久寿命的技术尚不成熟，下文仅对 2 类方法进行简单介绍,为工程应用提供参考。

4.2 加速寿命试验

按照应力施加方式的不同,可将加速寿命试验分为恒定应力加速寿命试验、步进 / 步退应力加速寿命试验、序进应力加速寿命试验等。其中恒定应力加速寿命试验和步进应力加速寿命试验技术最为成熟,已在国军标中推荐使用[11]。

基于恒定应力加速寿命试验和步进 / 步退应力加速寿命试验评估装备寿命的简要流程如图 8 所示。为保证评估的准确性,应力水平至少设计有 3 级应力,且每个应力水平上,均要求有一定量的试样样本，以便能够利用样本个体寿命准确估计总体寿命,试验样本量要求较高。

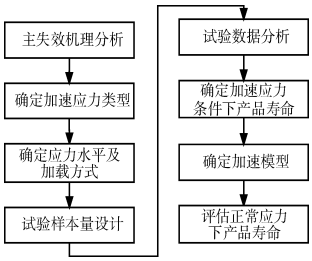

图 8 基于加速寿命试验评估产品寿命的简要流程

加速模型是连接应力和总体寿命特征参数的纽带,基于该模型,可利用加速应力条件下的装备总体特征寿命外推自然使用 / 贮存条件下装备的总体特征寿命。常用的加速模型有阿伦尼斯模型、艾琳模型、逆幂律模型和 Coffin-Manson 等模型。此外,也可以借助灰色模型[13]、神经网络模型[14]等预测算法,直接利用试验数据,挖掘寿命特征量与应力的关系,无需事先确定适用的参数模型。

4.3 加速耐久性试验

加速耐久性试验具有耐久性试验的所有优点,且通过加大试验应力，可显著缩短耐久性试验时长,能够在定型前鉴定具有长寿命指标要求的型号装备。实施加速耐久性试验,需要事先确定加速载荷谱及其加速因子,以确定等效耐久性试验所施加的加速载荷和试验时长,其基本工作流程如图 9 所示。

通过收集、实测和仿真任务载荷等方法,获得实际任务载荷数据,并对其进行处理,编制 1 个周期的实际任务载荷谱。基于任务载荷谱,确定目标应力下的加速因子,可编制等效 1 个周期实际任务载荷谱的当量加速载荷谱,以实施加速耐久性试验。

加速因子的准确性,直接决定了加速耐久性试验的有效性。如条件许可,应开展摸底寿命试验,确定不

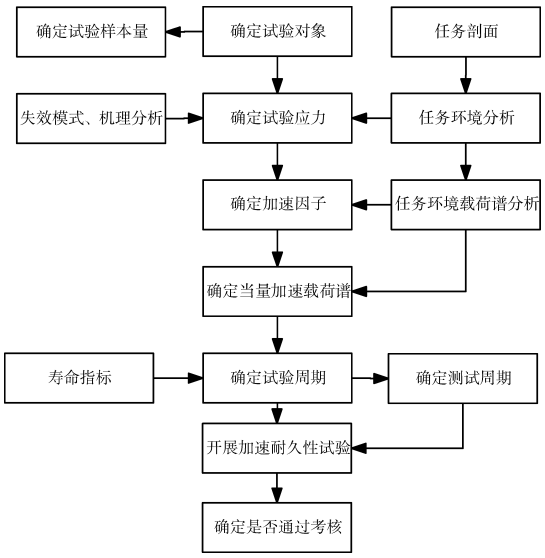

图 9 加速耐久性试验验证设计流程

同应力条件下装备的特征寿命,进而确定装备加速因子。如未积累同类装备加速因子,也无条件开展寿命摸底试验,则可通过分析计算确定装备加速因子。

对简单产品，分析计算加速因子开展的研究较多,对于复杂装备则少有研究。有 1 种理论认为,装备寿命取决于其组成寿命最短的部件，即寿命薄弱环节,只要保证该部件寿命满足要求,则装备寿命即可满足要求,该方法称为薄弱环节法。按该方法,可将计算复杂装备加速因子转化为计算简单产品加速因子。

通过分析计算装备加速因子,需要借用经验数据确定模型参数[15],通过分析确定阿伦尼斯模型为适用模型,借用经验激活能,计算半导体元件的加速因子;若事先已知装备寿命分布,也可以基于加速因子对应的寿命特征量关系,通过预计不同应力条件下装备的寿命特征量,计算装备加速因子[16]。

通过分析计算,确定装备加速因子,其准确性难以保证，在后续装备使用过程中，应通过正常使用 / 储存数据,对加速因子进行修正,积累适用的加速模型和加速因子,为后续装备寿命验证提供基础。

5 总结

对 GJB 451 和 GJB 451A 中规定的寿命相关参数进行了梳理分析。对标准中的耐久寿命、可靠寿命和故障的关系进行了分析,明确耐久寿命指标仅适用于具有支配型耗损故障的装备。可靠寿命与故障类型无关,在验证可靠寿命时,需明确装备是否存在耗损故障区,以避免利用偶然阶段故障率评估具有耗损故障区的装备可靠寿命,造成对耐久寿命的误解。对个

体寿命与总体寿命进行了分类分析,明确型号装备寿命指标为总体寿命指标,在耐久寿命验证时,应考虑到个体寿命的随机性。对于耐久寿命的验证,分析了寿命验证 2 种试验类型,强调了耐久性试验的优点并指明利用极小样本个体寿命估计总体寿命的关键在于合理选择经验系数,同时给出了经验系数理论分析的参考依据。对于具有长期寿命指标的型号装备寿命,建议并简单介绍了加速寿命试验和加速耐久性试验两种加速验证方式。通过以上分析,为统一型号装备设计人员对寿命指标的理解提供参考,为开展型号装备长期耐久性寿命的验证提供支持。

参考文献:

[1] 何世禹. 航天器在轨寿命预测与可靠性评价 [J]. 航天器环境工程,2008(25):209-211.
HE Shiyu. On-orbit lifetime prediction and reliability evaluation of spacecraft [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008 (25): 209-211. (in Chinese)

[2] 王文平,王向晖,张庆君,等. 基于 Arrhenius 模型的星载电子产品加速寿命试验技术[J]. 航天器环境工程,2018,35(3):247-251.
WANG Wenping, WANG Xianghui, ZHANG Qingjun, et al. Accelerated life test technology for satellite electronic products based on Arrhenius model [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(3): 247-251. (in Chinese)

[3] 胡林忠. 电子产品的寿命设计与管理[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2009,27 (S1):147-151.
HU Linzhong. Life design and management of electric products [J]. Electronic Product Reliability And Environmental Testing,2009,27 (S1):147-151. (in Chinese)

[4] 王志梅,刘正高.航天器寿命数据的定义、范畴及其分类研究[J].质量与可靠性,2009(4):22-24.
WANG Zhimei, LIU ZhiGao. Study on the definition, scope and category of the spacecraft lifetime data[J]. Quality and Reliability, 2009 (4):22-24. (in Chinese)

[5] 全国军事技术装备可靠性标准化技术委员会. GJB 451A-2005 可靠性维修性保障性术语[S]. 北京:中国标准出版社,2004:10-11.
National technical committee for standardization of reliability of military technical equipment. GJB 451A-2005. Reliability, maintainability and supportability terms [S]. Beijing: China Standards Press, 2004:10-11. (in Chinese)

[6] 全国军事技术装备可靠性标准化技术委员会. GJB 451-1990 可靠性维修性术语[S]. 北京:中国标准出版社,1990:3-4.
National technical committee for standardization of reliability of military technical equipment. GJB 451-1990. Reliability and maintainability terms [S]. Beijing:China Standards Press, 1990:3-4. (in Chinese)

[7] 吕俊霞. 电子设备的故障及其规律分析 [J]. 电子质量,2007(10): 47-49 .
LYU Junxia. The breakdown and its regulation of the electronics equipments is analytical[J]. Electronics Quality, 2007(10):47-49. (in Chinese)

[8] 上官芝,付桂翠,万博. 基于加速性能退化的元器件贮存寿命预测[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2009,27(5):32-36.
SHANGGUAN Zhi, FU Guicui, WAN Bo. Component storage life prediction based on accelerated performance degradation [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2009, 27(5):32-36. (in Chinese)

[9] 国防科学技术委员会. 航空技术装备寿命和可靠性工作暂行规定[S]. 北京:国防科学技术委员会,1985:10-15.
Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. Aviation technology equipment life and reliability working regulations [S]. Beijing:Commission of Science , 1985:10-15.(in Chinese)

[10] 杨为民,屠庆慈,陆廷孝. 对工程经验法的理论分析[J]. 航空学报,1988,9(8):366-374.
YANG Weimin, TU Qingci, LU Tingxiao. Theoretical analysis of engineering experience method[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1988, 9(8): 366-374. (in Chinese)

[11] 机械电子工业部第二一三研究所. GJB 736.13-91 火工品试验方法 加速寿命试验 恒定温度应力试验法 [S]. 北京: 中国标准出版社,1991:1-14.
The 213rd research institute of the ministry of machinery and electronics industry. GJB 736.13-91. Method of initiating explosive device test Accelerated life test- Method of constant temperature stress[S]. Beijing:China Standards Press, 1991:1-14. (in Chinese)

[12] 总装军械技术研究所. GJB 5103-2004 弹药元件加速寿命试验方法[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2004:1-15.
Institute of general ordnance technology. GJB 5103-2004 Accelerated life test method for ammunition components [S]. Beijing:General armament department military standard publishing department, 2004: 1-15. (in Chinese)

[13] 李坤兰. 恒温加速退化试验的灰色预测[J]. 装备环境工程,2011, 8 (4):20-24.
LI Kunlan. Grey prediction of constant temperature accelerated degradation testing[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8 (4): 20-24.(in Chinese)

[14] 张慰,李晓阳,姜同敏,等. 基于 BP 神经网络的多应力加速寿命试验预测方法[J]. 航空学报,2009(9):1691-1696. (in Chinese)
ZHANG Wei, LI Xiaoyang, JIANG Tongmin, et al. Life-prediction of multi-stress accelerated life testing based on BP algorithm of artificial neural network [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009 (9): 1691-1696. (in Chinese)

[15] Ovidiu-Nicolae Nica. The evaluation of the acceleration factor to reliability test [C]//7th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering. Bucharest:IEEE Press, 2011:1-4.

[16] 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, LYU Weimin, JIANG Shiwei, et al. Accelerated environmental spectrum design of missile board electronic device[J]. Tactical Missile Technology, 2016(6):38-45.(in Chinese)

(编辑:李华文)