



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

—— 中文核心期刊 中国科技核心期刊

加速寿命试验设计与评估软件ALT511及其应用（一）

黄首清 郭振伟 刘庆海 刘守文 遇今 李芳勇

Accelerated life test design and evaluation software ALT511 and its application (I)

HUANG Shouqing, GUO Zhenwei, LIU Qinghai, LIU Shouwen, YU Jin, LI Fangyong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2023050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星载大功率GaN固态功放寿命评估方法

Method for life evaluation of spaceborne high power GaN solid state power amplifier
航天器环境工程. 2021, 38(4): 420–425 <https://doi.org/10.12126/see.2021.04.007>

两种工程化的航天器用滚动轴承加速寿命试验方法

Two engineering methods for accelerated life test of aerospace rolling bearings
航天器环境工程. 2021, 38(4): 413–419 <https://doi.org/10.12126/see.2021.04.006>

基于Arrhenius模型的星载电子产品加速寿命试验技术

Accelerated life test technology for satellite electronic products based on Arrhenius model
航天器环境工程. 2018, 35(3): 247–251 <https://doi.org/10.12126/see.2018.03.008>

基于多元性能加速退化的航天器DC/DC电源寿命评估方法研究

The life estimation method for spacecraft DC/DC power supply based on multivariable accelerated performance degradation data
航天器环境工程. 2017, 34(4): 439–445 <https://doi.org/10.12126/see.2017.04.018>

空间推进系统产品贮存寿命评估之加速老化试验方法

Evaluation of storage life of space propulsion system products by using accelerated aging test
航天器环境工程. 2021, 38(2): 188–192 <https://doi.org/10.12126/see.2021.02.012>

航天器用固态功率放大器加速寿命试验方法研究

Method for accelerating life test of spacecraft solid-state power amplifier
航天器环境工程. 2017, 34(5): 543–548 <https://doi.org/10.12126/see.2017.05.016>

加速寿命试验设计与评估软件 ALT511 及其应用 (一)

黄首清^{1,2,3}, 郭振伟⁴, 刘庆海^{1,2,3*}, 刘守文^{1,2,3}, 遇今^{1,2,3}, 李芳勇^{1,2,3}

(1. 航天机电产品环境可靠性试验技术北京市重点实验室; 2. 可靠性与环境工程技术重点实验室;
3. 北京卫星环境工程研究所; 4. 中国空间技术研究院: 北京 100094)

摘要: 为满足适合工程应用的加速寿命试验设计和评估需要, 北京卫星环境工程研究所自研了加速寿命试验设计与评估软件 ALT511。该软件由 4 个基本模块组成, 其中“单应力一个应力水平”模块包括输入、加速因子计算、退化建模和可靠度评估 4 个选项卡。基于阿伦尼斯、逆幂律、广义艾琳、Norris-Landzberg 以及线性 5 种加速模型和加速因子计算式, 给出试验时间放大倍数和加速寿命试验时长的计算方法, 对未失效试验件给出退化建模和伪寿命计算方法, 阐述了换算成正常应力下的试验结果分布拟合方法、可靠度点估计值、可靠度下限值计算方法。最后以航天器轴承加速寿命试验为对象给出了软件应用案例。该软件融合了成熟的加速模型、试验方法、权威标准和专家经验, 兼具通用性和行业特色。

关键词: 可靠度; 加速寿命试验; 寿命评估; 加速寿命模型; 软件设计

中图分类号: V417⁺.3; TB114.37 文献标志码: A 文章编号: 1673-1379(2023)05-0541-09
DOI: 10.12126/see.2023050

Accelerated life test design and evaluation software ALT511 and its application (I)

HUANG Shouqing^{1,2,3}, GUO Zhenwei⁴, LIU Qinghai^{1,2,3*}, LIU Shouwen^{1,2,3}, YU Jin^{1,2,3}, LI Fangyong^{1,2,3}

(1. Beijing Key Laboratory of Environment & Reliability Test Technology for Aerospace Mechanical & Electrical Products;
2. Key Laboratory of Reliability and Environmental Engineering Technology;
3. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering; 4. China Academy of Space Technology: Beijing 100094, China)

Abstract: To meet the requirements of accelerated life test design and evaluation suitable for engineering applications, the software ALT511 has been developed by Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering (BISEE). One of the four basic modules of the software is *single stress & one stress level*, which includes input, acceleration factor calculation, degradation modeling and reliability evaluation tabs. Based on five acceleration models including Arrhenius, inverse power law, generalized Eyring, Norris-Landzberg and linear models, and the related acceleration factor calculation formulas, the methods for calculating test time magnification factor and accelerated life test duration were proposed. The methods for degradation modeling and calculation of pseudo life of non-failure test pieces were given. The distribution fitting of test results, the reliability point estimation and the reliability lower limit estimation were converted to normal stress condition and described. Finally, a software application case was presented for the accelerated life test on spacecraft bearings. The proposed software integrates proven acceleration models, test methods, authoritative standards and expertise, with both universality and industry characteristics.

Keywords: reliability; accelerated life test; life evaluation; accelerated life model; software design

收稿日期: 2022-12-28; 修回日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: U22B2082; 52075043); 国家级重点实验室稳定支持科研项目 (编号: 6142004WDZC210401)

引用格式: 黄首清, 郭振伟, 刘庆海, 等. 加速寿命试验设计与评估软件 ALT511 及其应用 (一) [J]. 航天器环境工程, 2023, 40(5): 541-549

HUANG S Q, GUO Z W, LIU Q H, et al. Accelerated life test design and evaluation software ALT511 and its application (I)[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(5): 541-549

0 引言

加速寿命试验^[1-2]是在不改变故障模式和故障机理的前提下,用加大应力的方法进行的寿命试验;其优点是可以缩短试验时间,降低试验成本,提高试验效率,使长寿命高可靠产品的寿命与可靠性评价成为工程可行。美空军罗姆航空发展中心于1967年首次提出加速寿命试验的概念^[3],我国从20世纪70年代开始开展加速寿命试验方法的研究与应用,提出了多样化的加速模型和试验方法,积累了丰富的应用实践经验,但在应用层面存在一定程度的“不规范、不统一、难应用、乱应用”问题。

加速寿命试验按应力类型可以分为恒定应力、步进应力和序进应力^[4]。目前,工程上大多采用恒定应力加速寿命试验,因为其便于操作且结果可信度较高^[5];而步进应力加速寿命试验存在算法复杂和流程非标准化等问题,序进应力加速寿命试验还存在对设备要求高等问题。按加速应力的数量,加速寿命试验可分为单应力加速寿命试验和多应力加速寿命试验。其中,按照试验条件的数量,单应力加速寿命试验包括一个应力水平和多个应力水平。具体到加速模型^[6],常见的几种单应力加速模型^[7]认可度相对较高,包括描述温度应力的阿伦尼斯模型、描述机械应力和电应力的逆幂律模型,以及描述热应力疲劳效应的 Norris-Landzberg 模型,但这些模型存在应力适用性和适用区间问题,需要较多的工程经验。而多应力加速模型还停留在研究阶段^[8-10],有文献提出将单应力加速模型进行简单的相乘或相加组合成多应力加速模型的方法,但缺少足够的理论和试验数据支撑,可能导致多应力加速试验评估结果失真。此外,实际设计定时截尾加速寿命试验时,常常未考虑试验样本代表性和分散性等因素带来的风险,易造成欠试验。加速寿命模型参数的选取也在一定程度上存在缺少依据或依据混乱等问题。综上所述可以看出,设计加速寿命试验的技术性和经验性都很强,且各种模型和方法的验证周期可能极长,实际应用中对设计师的要求很高,很大程度上限制了加速寿命试验技术的推广应用。而将成熟的加速模型、试验方法、权威标准和专家经验软件化和工具化是破解上述困局、促进加速寿命试验技术规范高效推广应用的重要手段。

用于加速寿命试验的专用软件很少,少数几个软件将加速寿命试验和分析功能设计为一个模块。例如:加速寿命试验软件先驱——美国可靠性分

析软件 ReliaSoft 有 ALTA 加速寿命测试数据分析模块^[11];美国的数据分析软件 JMP Pro^[12]、质量管理统计软件 Minitab^[13],以及国可工软(苏州)科技有限公司的可靠性工程软件 ReliaQube^[14]均具有加速寿命试验设计和分析模块。这些软件将加速试验方案设计及试验数据统计分析方法流程化,能够满足单应力多个应力水平加速寿命试验和分析的需求,但不具备单应力一个应力水平下加速寿命试验设计和评估功能。然而,在只有极小样本试件的航天器领域,单应力一个应力水平加速寿命试验常常是经济和现实的需求。

针对加速寿命试验技术及其设计分析软件的现状和不足,北京卫星环境工程研究所面向实际工程特点和需求,聚焦航天器极小样本场景以及单应力的施加方式,将成熟的加速模型、试验方法、权威标准和专家经验融入到加速寿命试验设计与评估软件中,开发了加速寿命试验设计与评估软件 ALT511。本文重点介绍软件“单应力一个应力水平”模块的选项卡功能和计算方法,并给出应用案例。

1 两类加速寿命试验方法对比

“单应力一个应力水平”和“单应力多个应力水平”两类加速寿命试验方法各有优缺点。

“单应力一个应力水平”试验方法的特点是有加速模型,且加速模型参数已知。该方法具有所需试验样本量少、可提前确定试验时间以及试验成本较低的优点;但该方法依赖文献数据、经验数据和已有试验数据等历史数据,当历史数据不充分时,评估结果的可信度相对较低。

“单应力多个应力水平”试验方法的特点是无加速模型或加速模型参数未知。该方法可不依赖文献数据或历史数据,评估结果的可信度相对较高;但其所需试验样本量多,难以提前确定试验时长,且试验成本相对较高。

在研制经费和周期受限的航天器工程领域,“单应力一个应力水平”试验方法更具现实意义。

2 ALT511 软件基本模块与功能

ALT511 软件的主界面如图1所示。该软件包括“单应力一个应力水平”、“单应力多个应力水平”、“多应力”、“关于”4个模块,其中:“单应力一个应力水平”模块有4个选项卡,分别是输入、加速因子、退化建模和可靠度评估;“单应力多个应力水

平”模块也有4个选项卡,分别是导入数据、每组应力水平寿命分布、加速模型拟合和指定应力水平下寿命值;“多应力”模块仍在开发中;“关于”模块介绍软件版权、开发人员、参考资料等信息。

ALT511 软件融入了5种加速模型、3种寿命分布模型、各类标准5项以及专家经验数十条;具有以鼠标悬停提示的方式给出专家经验(如图2所示),以及加速模型曲线、失效概率密度曲线等重要曲线可以自动保存成高分辨率图片等特色功能。

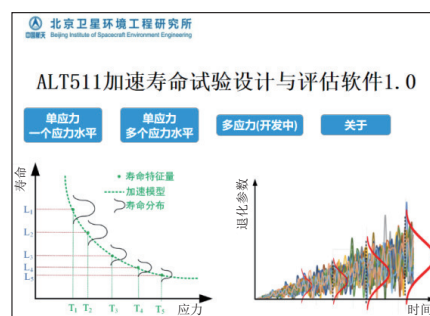
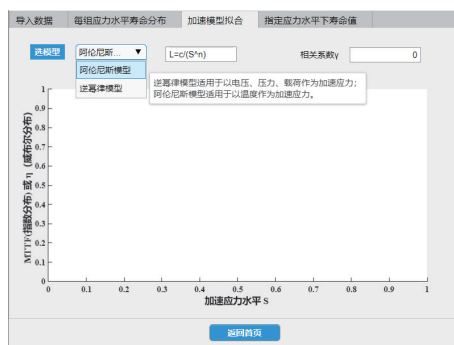


图1 ALT511 软件主界面

Fig. 1 The main interface of ALT511 software



(a) 选择寿命分布模型的提示



(b) 选择加速寿命模型的提示

图2 专家经验提示功能示例

Fig. 2 Examples of expertise tips

3 ALT511 软件使用流程

如图3所示,ALT511 软件在使用过程中按单应力一个应力水平和单应力多个应力水平2个模块分别有不同的试验设计和试验数据分析流程,其中:“单应力一个应力水平”的流程包括5个步骤,

可以给出可靠度下限对应的可靠寿命是否满足使用寿命指标,以及正常应力下任意指定时刻的可靠度点估计值和可靠度下限值;“单应力多个应力水平”的流程包括6个步骤,可以给出加速模型和指定应力水平下的可靠寿命。

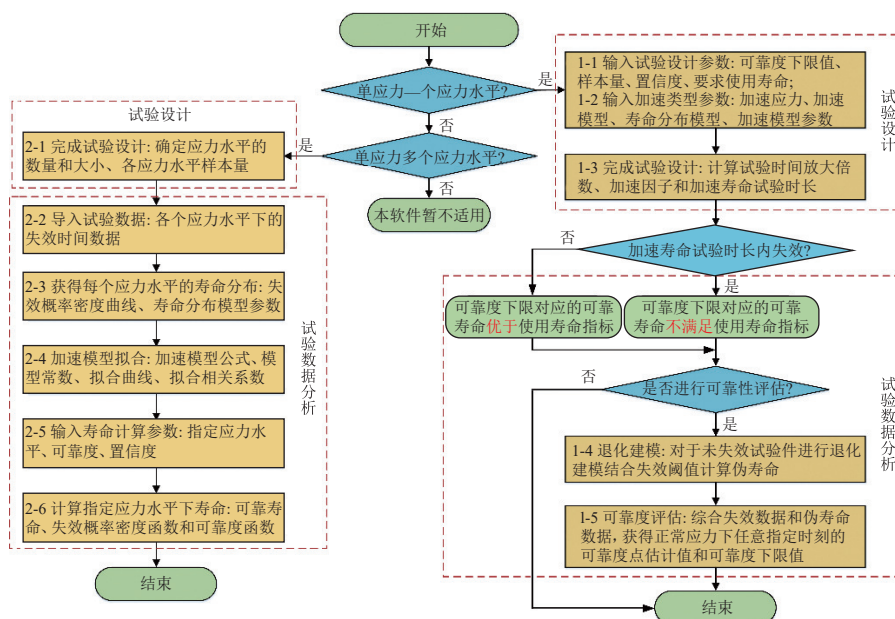


图3 ALT511 软件使用流程

Fig. 3 Process flow of ALT511 software

4 单应力一个应力水平的加速寿命试验设计和评估模块介绍

本节对“单应力一个应力水平”模块的4个选项卡功能进行详细阐述,其中:“加速因子”选项卡属于试验设计范畴;“退化建模”选项卡和“可靠度评估”选项卡属于试验评估范畴。

4.1 “输入”选项卡

“输入”选项卡主要用于设计要求、加速类型和

加速模型3类参数的输入。设计要求参数包括可靠度下限值、样本量、置信度和使用寿命。加速类型参数包括加速应力、加速模型和寿命分布模型,其中:加速模型有阿伦尼斯、逆幂律、广义艾琳、Norris-Landzberg和线性模型5种,其参数设置视模型的不同而变化(如图4所示),例如阿伦尼斯模型包括激活能、正常温度、加速温度;寿命分布模型有威布尔分布、指数分布和正态分布3种。

Figure 4(a) shows the 'Input' tab for the Arrhenius model. The 'Basic Parameters' section includes: 可靠度下限值RL (0.99), 样本量n (5), 置信度y (0.9), and 使用寿命tuse (1.402e+05). The 'Acceleration Stress' is set to '温度' (Temperature). The 'Acceleration Model' is '阿伦尼斯' (Arrhenius), and the 'Life Distribution Model' is '指数分布' (Exponential). The 'Other Parameters' section includes: 激活能Ea (0.6), Tuse(K) (300), and Tstress(K) (343). The formula for f_a is shown as $f_a = \exp\left[\frac{E_a}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{stress}}\right)\right]$.

(a) 阿伦尼斯模型

Figure 4(b) shows the 'Input' tab for the Inverse Power Law model. The 'Basic Parameters' section is the same as in (a). The 'Acceleration Stress' is set to '压力' (Pressure), and the 'Acceleration Model' is '逆幂律' (Inverse Power Law). The 'Life Distribution Model' is '正态分布' (Normal). The 'Other Parameters' section includes: Sstress (256), Suse (37.78), and alpha (3). The formula for f_a is shown as $f_a = \left(\frac{S_{stress}}{S_{use}}\right)^a$.

(b) 逆幂律模型

Figure 4(c) shows the 'Input' tab for the Generalized Eyring model. The 'Basic Parameters' section is the same as in (a). The 'Acceleration Stress' is set to '温度' (Temperature), and the 'Acceleration Model' is '广义艾琳' (Generalized Eyring). The 'Life Distribution Model' is '正态分布' (Normal). The 'Other Parameters' section includes: 激活能Ea (0.6), Suse (6), Tuse(K) (300), Sstress (7), Tstress(K) (333), and alpha (3). The formula for f_a is shown as $f_a = \exp\left[\frac{E_a}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{stress}}\right)\right] \left(\frac{S_{stress}}{S_{use}}\right)^a$.

(c) 广义艾琳模型

Figure 4(d) shows the 'Input' tab for the Norris-Landzberg model. The 'Basic Parameters' section is the same as in (a). The 'Acceleration Stress' is set to '温度' (Temperature), and the 'Acceleration Model' is 'Norris-Landzberg'. The 'Life Distribution Model' is '指数分布' (Exponential). The 'Other Parameters' section includes: 激活能Ea (0.6), T_stress (1), f_stress (1), T_use (1), f_use (1), B (1.9), and C (0.33). The formula for f_a is shown as $f_a = \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_{ref}}\right)^C \left(\frac{f_{stress}}{f_{use}}\right)^B \exp\left[\frac{E_a}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{stress}}\right)\right]$.

(d) Norris-Landzberg模型

图4 “输入”选项卡中加速模型参数设置

Fig. 4 Parameter settings for the acceleration models in the tab "input"

4.2 “加速因子”选项卡

“加速因子”选项卡主要用于计算试验时间放大倍数、加速因子和试验时间。试验时间放大倍数是考虑失效时间分散性等因素带来的风险而引入的系数,ALT511软件提供了计算值和经验值两类计算方法(如图5所示),且不同寿命分布下试验时间放大倍数的计算公式不同。加速因子则是根据加速模型及其参数直接计算。

Figure 4(a) shows the 'Acceleration Factor' tab. It has two main sections: '计算值' (Calculated) and '经验值' (Empirical). The '计算值' section has input fields for '加速因子fa' (18.35) and '试验时间放大倍数计算值' (1.5). The '经验值' section has an input field for '试验时间t0' (1.146e+04). There are also buttons for '计算加速因子' (Calculate Acceleration Factor) and '返回' (Return).

(a) 通过计算获得试验时间放大倍数



(b) 通过经验获得试验时间放大倍数

图5 “加速因子”选项卡界面

Fig. 5 Interface of the tab "acceleration factor"

4.3 “退化建模”选项卡

“退化建模”选项卡的功能主要是进行退化建模并计算伪寿命。如图6所示, 点击“导入数据”按钮, 可将 Excel 文件记录的试验退化数据导入软件并显示在左上角的表格中; 用户根据产品特性输入退化参数的阈值, 再选择拟合方式(线性拟合、抛物线拟合、三阶最小二乘法和四阶最小二乘法)即可对退化参数进行退化建模, 并将拟合结果绘制图形显示在界面下方, 同时根据拟合曲线与阈值的交点计算出该产品的伪寿命。

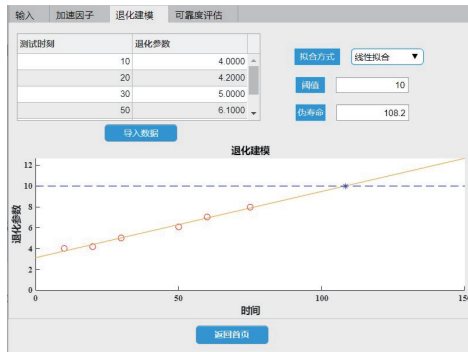


图6 “退化建模”选项卡界面

Fig. 6 Interface of the tab "degradation modeling"

4.4 “可靠度评估”选项卡

“可靠度评估”选项卡主要用来计算可靠度点估计值和可靠度下限值。如图7所示, 点击“导入数据”按钮, 能够将 Excel 文件记录的失效时间数据导入软件, 并显示在界面左上角的表格中; 点击“添加伪寿命”按钮, 可将“退化建模”选项卡计算出来的伪寿命数据添加到表格中; 根据选择的可靠度评估方法(基于威布尔分布、基于指数分布)和输入的置信度, 点击“可靠度评估”按钮即可获取正常应力

下指定时刻的可靠度点估计值和可靠度下限值, 并绘制可靠度点估计曲线和可靠度下限曲线。



图7 “可靠度评估”选项卡界面

Fig. 7 Interface of the tab "reliability evaluation"

5 计算方法

5.1 加速模型

软件中用到的5种加速模型^[6-7]如下:

1) 阿伦尼斯模型

$$L(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

式中: L 为寿命值; T 为温度应力; A 为模型常数; E_a 为激活能; k 为玻耳兹曼常数, $8.617385 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ 。

2) 逆幂律模型

$$L(V) = KS^\alpha, \quad (2)$$

式中: K 和 α 为模型常数, S 为应力。

3) 广义艾琳模型

$$L(T, S) = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \times KS^\alpha, \quad (3)$$

式中: E_a 为激活能; S 为除温度外的应力。

4) Norris-Landzberg 模型

$$L(\Delta T, f, T_{\max}) = A(\Delta T)^B f^C \exp\left(\frac{E_a}{kT_{\max}}\right), \quad (4)$$

式中: A 、 B 和 C 均为与产品材料、设计等相关的常数; ΔT 为温度范围; f 为温变率; $T_{\max}$ 为高温水平。

5) 线性模型

$$L(S) = a + b \times S, \quad (5)$$

式中 a 和 b 为模型有关常数。

5.2 加速因子计算

根据加速模型及应力水平确定加速因子 f_a 的计算方法如下, 其中: 下标 use 和 $stress$ 分别为正常应力和加速应力; 在无明确历史试验数据支撑情况下, 部分常见电子元器件的 E_a 经验取值可参考美

军标 MIL-HDBK-338B^[15]。

1) 阿伦尼斯模型

$$f_a = \exp \left[\frac{E_a}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{\text{use}}} - \frac{1}{T_{\text{stress}}} \right) \right]。$$

2) 逆幂律模型

$$f_a = \left(\frac{S_{\text{stress}}}{S_{\text{use}}} \right)^\alpha。$$

3) 广义艾琳模型

$$f_a = \exp \left[-\frac{E_a}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{\text{use}}} - \frac{1}{T_{\text{stress}}} \right) \right] \left(\frac{S_{\text{stress}}}{S_{\text{use}}} \right)^\alpha。$$

4) Norris-Landzberg 模型

$$f_a = \left(\frac{\Delta T_{\text{stress}}}{\Delta T_{\text{use}}} \right)^B \left(\frac{f_{\text{use}}}{f_{\text{stress}}} \right)^C \exp \left[\frac{E_a}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{\text{use}}} - \frac{1}{T_{\text{stress}}} \right) \right]，$$

式中: B 和 C 的取值参考国际行业标准 JESD 94A^[16], $B=1.9$, $C=1/3$ 。

5) 线性模型

$$f_a = f_{\text{stress}} / f_{\text{use}}。$$

5.3 试验时间计算

基于本文方法的加速寿命试验一般可以按式 (6) 提前确定试验时间,

$$t_a = f_r \times t_{\text{use}} / f_a, \quad (6)$$

式中: t_{use} 为产品在正常工作应力水平下的寿命指标要求; f_r 为考虑评估风险的试验时间放大倍数。依据下面的方式和方法确定 f_r 的取值可以有效地避免欠试验:

1) 根据航天标准和相关统计模型^[17-18] 确定, 适用于具有累积损伤特性的功能模块(失效寿命满足威布尔分布)。确定方法是: 在无失效前提下, $f_r = \left[\frac{\ln(1-\gamma)}{n \ln R_L} \right]^{1/m}$ 。式中: R_L 为可靠度下限值; n 为样本量; γ 为置信度; m 为形状参数。

2) 根据航天标准确定, 适用于具有随机失效特征的功能模块(失效寿命满足指数分布)。确定方法是: 在无失效前提下, $f_r = \frac{\ln(1-\gamma)}{n \ln R_L}$ 。

3) 依据 GJB 899—2009《可靠性鉴定和验收试验》^[19], 适用于具有随机失效特征的功能模块(失效寿命满足指数分布)。确定方法是: 在无失效前提下, $\gamma=0.8$ 时, 针对 t_{use} =平均故障间隔时间 MTTF (可靠度 0.368 下的可靠寿命), $f_r=1.61/n$ 。

4) 根据载人航天工程经验确定, 适用于具有累

积损伤特性的功能模块(失效寿命满足威布尔分布或正态分布)。例如在无失效前提下, $\gamma=0.7$ 时: 当 $n=1$, 则 $f_r \geq 1.5$; 当 $n \geq 2$, 每个样本 $f_r \geq 1$ 。

5.4 伪寿命计算

记录试验过程中失效试验件的失效时间。对未失效的试验件, 可对试验中监测数据进行建模与分析, 预测试验件的失效时间, 即伪寿命, 步骤如下:

1) 建立各试验件监测参数随时间的退化模型, ALT511 软件目前只具备单参数退化建模功能;

2) 根据监测参数的失效阈值, 求解达到失效阈值所需的时间, 将此时间视为该试验件的失效时间。

5.5 试验结果分析

如果加速寿命试验过程中(试验时间 t_a 内)无失效发生, 则表示该批试验件在正常应力下, 可靠度下限 R_L 对应的可靠寿命优于寿命指标 t_{use} ; 若有失效发生, 则表示 R_L 对应的可靠寿命不满足 t_{use} 。但需要注意, 这一结果仅说明是否满足可靠寿命下限, 并不能估计可靠度和寿命到底是多少。要回答这一问题, 需要进行可靠度评估。

5.6 可靠度评估

1) 基于指数分布的可靠性评估方法

指数分布可靠性评估模型为

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (7)$$

式中: λ 为故障率, t 为试验时间。

以 f_a 为桥梁, 将加速寿命试验下的失效率转换到正常应力下, 失效率点估计按式 (8) 计算, 失效率上限按式 (9)^[20] 计算。可靠度点估计和可靠度下限分别按式 (10) 和式 (11) 计算。

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{f_a T}, \quad (8)$$

$$\lambda_U = \frac{\chi_\gamma^2(2r+2)}{2T f_a}, \quad (9)$$

$$\hat{R} = e^{-\hat{\lambda} t}, \quad (10)$$

$$R_L = e^{-\lambda_U t}, \quad (11)$$

式中: T 为累积试验时间; r 为失效数; $\chi_\gamma^2(2r+2)$ 为卡方分布分位数。

2) 基于威布尔分布的可靠性评估方法

威布尔分布评估模型为

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^m} \quad t > 0, \quad (12)$$

式中 η 为特征寿命。

对于失效数 $r \geq 3$ 的情况, 通过求解方程 (13)^[20] 计算形状参数 m :

$$\frac{1}{m} + \frac{\sum_{i=1}^r \ln t_i}{r} - \frac{\sum_{i=1}^n t_i^m \ln t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^m} = 0. \quad (13)$$

上式中: 失效时间分别为 $t_1, t_2, \dots, t_r$; 无失效样本试验时间分别为 $t_{r+1}, t_{r+2}, \dots, t_n$ 。

对于 $r < 3$ 的情况, 则根据航天器型号工程经验确定形状参数 m , 即沿用单机取 3、改进单机取 2、新研单机取 1.5。

以 f_a 为桥梁, 将加速寿命试验下的特征寿命转换到正常应力下, 特征寿命点估计按照式 (14) 和式 (15) 计算, 可靠度点估计函数和可靠度下限函数分别按式 (16) 和式 (17) 计算。

$$t^* = \sum_{i=1}^n t_i^{\hat{m}}, \quad (14)$$

$$\hat{\eta} = f_a \left(\frac{t^*}{r} \right)^{\frac{1}{\hat{m}}}, \quad (15)$$

$$\hat{R} = e^{-\left(\frac{t}{\hat{\eta}}\right)^{\hat{m}}}, \quad (16)$$

$$R_L = e^{-\frac{t^{\hat{m}}}{2 f_a^{\hat{m}} r^{\hat{m}} \chi_{\gamma}^2(2r+2)}}, \quad (17)$$

式中的 $\hat{m}$ 均为形状参数估计值。

6 软件应用案例

以某航天器轴承组件为试验对象, 应用 ALT511 软件对其进行一个应力水平的加速寿命试验设计与评估。输入和加速因子选项卡中相关参数设置如图 8 和图 9 所示。该航天器轴承使用寿命 t_{use} 要求为 16 年(大约 140 160 h), 可靠度下限 $R_L=0.99$, 置信度 $\gamma=0.9$, 加速应力为压力(具体为当量动载荷)。根据专家经验, 加速模型选择逆幂律模型, 指数 α 按照球轴承的经验值取 3。寿命分布模型选择威布尔分布, 形状参数 m 取保守值 1.5。当样本量取 5 时, 软件计算的试验时间放大倍数为 12.8。滚动轴承的正常压力(额定当量动载荷)为 37.78 N。取加速压力(当量动载荷)为 256 N 时, 计算出加速因子 $f_a=311.1$ 、加速寿命试验时间 $t_a=5769$ h(约 240 d)。

图 8 航天器轴承加速寿命试验参数

Fig. 8 Accelerated life test parameters of spacecraft bearings

图 9 航天器轴承加速寿命试验加速因子和试验时长计算
Fig. 9 Calculation on acceleration factor and test duration for accelerated life test of spacecraft bearings

如果在预定的试验时长 5769 h 内无失效发生, 则表示航天器轴承在正常压力(额定当量动载荷) 37.78 N 下, 满足可靠度 0.99(对应可靠寿命优于 16 年)的寿命指标。进一步地, 可借助软件开展退化建模, 进行可靠性和寿命评估。如图 10 和图 11 所示, 根据试验中监测到的振动幅值退化数据, 结合阈值, 可计算出 5 个轴承试验件的伪寿命分别为 13 300 h、12 000 h、11 500 h、15 100 h 和 8077 h; 进而结合 4.4 节的可靠度评估方法, 计算得出形状参数 $m=6.3$, 正常应力下的特征寿命为 $\eta=4.024 \times 10^6$ h。

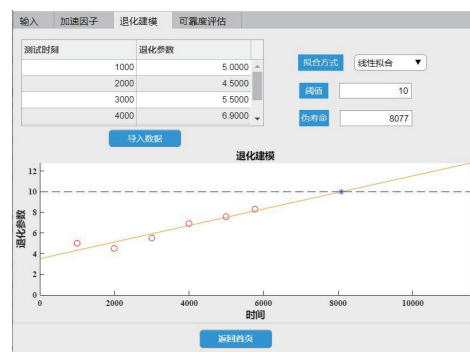


图 10 航天器轴承退化建模

Fig. 10 Degradation modeling of spacecraft bearing

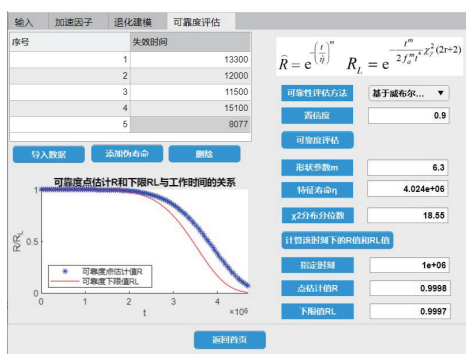
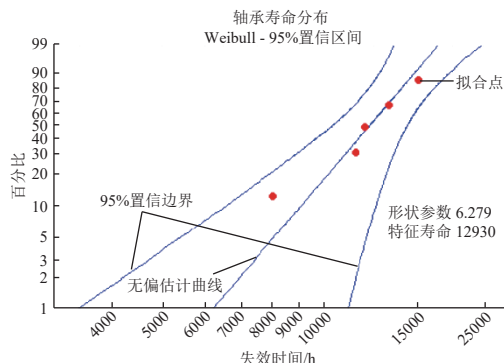


图 11 基于伪寿命的航天器轴承可靠度评估

Fig. 11 Reliability evaluation of spacecraft bearing based on pseudo life

比较 Minitab 软件的计算结果, 如图 12 所示, 加速应力下形状参数为 6.279, 特征寿命为 12 930 h, 换算成正常应力下的特征寿命为 $12\,930 \times 311.1 = 4.022 \times 10^6$ h, 与本软件计算结果基本一致。进一步可得正常应力下的可靠度点估计函数曲线和可靠度下限函数曲线。指定正常应力下的 1×10^6 h 时刻, 计算得到可靠度点估计值为 0.999 8、 $\gamma=0.9$ 时的可靠度下限值 $R_L=0.997$; 其他任意时刻的可靠度均可以方便算得。

图 12 Minitab 软件计算的加速应力下威布尔分布拟合结果
Fig. 12 Fitting results of Weibull distribution under accelerated stress calculated by software Minitab

7 结束语

针对航天领域可靠性试验时间紧和样本少的情况, 北京卫星环境工程研究所开发了加速寿命试验设计与评估软件 ALT511, 旨在满足航天器单应力一个应力水平、单应力多个应力水平的加速寿命试验和分析的需求。本文重点介绍了单应力一个应力水平的加速寿命试验设计和评估模块, 包括输入选项卡、加速因子计算选项卡、退化建模选项卡和可靠度评估选项卡, 阿伦尼斯、逆幂律、广义艾琳、Norris-Landzberg 和线性模型 5 种加速模型的表达

式和加速因子计算式, 试验时间放大倍数、加速寿命试验时间、未失效试验件的退化建模和伪寿命计算方法, 以及换算成正常应力下的试验结果分布拟合、可靠度点估计值和可靠度下限值计算方法。最后, 以航天器轴承加速寿命试验为对象给出了本软件的应用案例, 其试验数据分布拟合计算结果如形状参数和特征寿命与 Minitab 软件计算结果基本一致。本软件在功能全面性、可视化和工程经验融合方面优势明显, 已成功应用于航天器轴承等产品。

由于篇幅所限, 对于单应力多个应力水平的加速寿命试验设计和评估模块及其原理将于下期详细介绍。

参考文献 (References)

- [1] 可靠性维修性保障性术语: GJB 451—2005[S]
- [2] 李新立, 刘志全, 遇今. 航天器机构固体润滑球轴承的加速寿命试验方法[J]. 航天器工程, 2008, 17(5): 82-87
LI X L, LIU Z Q, YU J. A method of accelerate life test for solid-lubricated ball bearings of spacecraft mechanisms[J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(5): 82-87
- [3] 陈循, 陶俊勇, 张春华. 可靠性强化试验与加速寿命试验综述[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(4): 29-32
CHEN X, TAO J Y, ZHANG C H. Reliability enhancement testing and accelerated life testing: an introductory review[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2002, 24(4): 29-32
- [4] 吴松, 吕晶晶, 李小康. 可靠性加速寿命试验综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, 39(1): 94-100
WU S, LÜ J J, LI X K. Review of reliability accelerated life test[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2021, 39(1): 94-100
- [5] 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则: GB 2689.1—1981[S]
- [6] 茆诗松. 加速寿命试验的加速模型[J]. 质量与可靠性, 2003(2): 15-17
MAO S S. Accelerated model of accelerated life test[J]. Quality and Reliability, 2003(2): 15-17
- [7] 徐立立, 杜胜杰, 李焕, 等. 加速寿命方法及模型的使用指导分析[J]. 环境技术, 2021, 39(5): 56-61
XU L L, DU S J, LI H, et al. Analysis of the application guidance of accelerated life methods and models[J]. Environmental Technology, 2021, 39(5): 56-61
- [8] 李晓阳, 姜同敏. 加速寿命试验中多应力加速模型综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(5): 828-831
LI X Y, JIANG T M. Review of multiple-stress models in

- accelerated life testing[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(5): 828-831
- [9] 葛峰, 韩建立, 张光宇. 基于通用对数线性模型的多应力加速寿命试验预测方法[J]. 兵工自动化, 2020, 39(10): 10-14
- GE F, HAN J L, ZHANG G Y. Multi-stress accelerated life test prediction method based on general logarithmic linear model[J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(10): 10-14
- [10] 黄小凯, 刘守文, 黄首清, 等. 基于响应面方法的轴承多应力加速模型建模与验证技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(7): 128-134
- HUANG X K, LIU S W, HUANG S Q, et al. Modeling and verification technology of bearing multi-stress acceleration model based on response surface method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(7): 128-134
- [11] HKB Company. Accelerated life testing module[EB/OL]. [2023-05-04]. <https://www.reliasoft.com/products/weibull-software-accelerated-life-testing-module>
- [12] JMP. Predictive analytics software for scientists and engineers[EB/OL]. [2023-05-04]. https://www.jmp.com/en_us/software/predictive-analytics-software.html
- [13] Minitab Company. Minitab 21[EB/OL]. [2022-07-22]. <https://www.6xigema.com/>
- [14] 国可工软科技有限公司. 可靠性软件[EB/OL]. [2023-05-04]. https://www.nationrel.com/pages_8.html
- [15] Electronic reliability design handbook: MIL-HDBK-338B[S], 1998
- [16] Application specific qualification using knowledge based test methodology: JESD 94A[S], 2007
- [17] 黄首清, 代巍, 姚泽民, 等. 两种工程化的航天器用滚动轴承加速寿命试验方法[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(4): 413-419
- HUANG S Q, DAI W, YAO Z M, et al. Two engineering methods for accelerated life test of aerospace rolling bearing[J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2021, 38(4): 413-419
- [18] 焦育洁. 航空发动机主轴轴承可靠性技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004: 21-40
- [19] 可靠性鉴定和验收试验: GJB 899—2009[S]
- [20] EBELING C E. 可靠性与维修性工程概论[M]. 康锐, 李瑞莹, 王乃超, 等, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010: 301-303

(编辑: 许京媛)

一作简介: 黄首清, 高级工程师, 研究方向为航天器可靠性技术。

*通信作者: 刘庆海, 高级工程师, 研究方向为航天器电子学设计与软件设计。