



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

中文核心期刊 中国科技核心期刊

空间站电动工具开关按钮性能退化特性加速寿命试验与可靠性评估

张兆霖 杨勇 黄首清 王浩 何贝琛 杨艳斌 李冬梅

Accelerated life test and reliability assessment for degradation characteristics of power tool switch buttons onboard China's Space Station

ZHANG Zhaolin, YANG Yong, HUANG Shouqing, WANG Hao, HE Beichen, YANG Yanbin, LI Dongmei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2024014>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

航天器用光缆可靠性及寿命验证技术综述

Review of reliability and life verification methods for spacecraft optical fiber cables
航天器环境工程. 2019, 36(3): 290–300 <https://doi.org/10.12126/see.2019.03.015>

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>

空间站吸声降噪设计的仿真评估与验证

Simulations for evaluation and verification of acoustic design of space station module
航天器环境工程. 2018, 35(4): 330–335 <https://doi.org/10.12126/see.2018.04.004>

基于性能退化的失效阈值变化速率对产品可靠性的影响

Effect of failure threshold change rate on the analysis of product reliability based on performance degradation
航天器环境工程. 2020, 37(2): 137–142 <https://doi.org/10.12126/see.2020.02.006>

空间站电动工具开关按钮性能退化特性 加速寿命试验与可靠性评估

张兆霖^{1,2}, 杨勇^{1,2}, 黄首清^{1,2*}, 王浩^{1,2}, 何贝琛^{1,2}, 杨艳斌^{1,2}, 李冬梅³

(1. 可靠性与环境工程技术重点实验室; 2. 北京卫星环境工程研究所; 3. 中国空间技术研究院: 北京 100094)

摘要: 面向中国空间站在轨寿命评估与延寿需求, 以舱外电动工具开关按钮为对象, 开展综合考虑在轨长期贮存与短期作业交替影响的加速寿命试验, 设置多温度水平, 研究开关按钮性能退化特性和失效机理, 并采用基于伪寿命分布的可靠性评估方法开展评估工作。加速寿命试验结果显示: 开关按钮在 50 °C 和 80 °C 温度下出现按压力松弛现象, 按压力退化与时间呈线性关系; 在 110 °C 和 140 °C 温度下出现卡滞、卡死和润滑脂溢出现象, 且按压力迟滞量在贮存后期显著增大。可靠性评估结果显示: 开关按钮满足 10 年寿命末期可靠度 0.995 4 的指标要求。文章所述研究方法可为空间站内其他长期贮存单机的可靠性评估提供借鉴。

关键词: 中国空间站; 舱外电动工具; 开关按钮; 加速寿命试验; 可靠性评估

中图分类号: V416.5; O213.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-1379(2024)02-0234-10

DOI: [10.12126/see.2024014](https://doi.org/10.12126/see.2024014)

Accelerated life test and reliability assessment for degradation characteristics of power tool switch buttons onboard China's Space Station

ZHANG Zhaolin^{1,2}, YANG Yong^{1,2}, HUANG Shouqing^{1,2*}, WANG Hao^{1,2}, HE Beichen^{1,2},
YANG Yanbin^{1,2}, LI Dongmei³

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering;

2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering; 3. China Academy of Space Technology: Beijing 100094, China)

Abstract: With a view to the in-orbit lifespan assessment and extension requirements for China's Space Station, an accelerated life test considering the alternating effects of in-orbit long-term storage and short-term operations was conducted on the switch buttons of extravehicular power tools, employing multiple temperature levels, to investigate their degradation characteristics and failure mechanisms. Meanwhile, a reliability assessment was carried out using a method based on pseudo-life distribution. The accelerated life test results reveal that the switch buttons exhibit pressure relaxation at temperatures of 50 °C and 80 °C, with linear pressure degradation. At temperatures of 110 °C and 140 °C, the switch buttons experience sticking, jamming, and lubricating grease overflow, leading to a significant increase in delayed pressing force in late storage period. The reliability assessment results indicate that the switch buttons meet the specified reliability requirements of 0.995 4 at the end of the 10-year lifespan. The research may provide a reference for the reliability assessment of similar long-term storage units onboard China's Space Station.

Keywords: China's Space Station; extravehicular power tools; switch buttons; accelerated life test; reliability assessment

收稿日期: 2023-09-20; 修回日期: 2024-04-16

基金项目: 国防科技重点实验室稳定支持科研项目 (编号: 6142004WDZC210401)

引用格式: 张兆霖, 杨勇, 黄首清, 等. 空间站电动工具开关按钮性能退化特性加速寿命试验与可靠性评估[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(2): 234-243

ZHANG Z L, YANG Y, HUANG S Q, et al. Accelerated life test and reliability assessment for degradation characteristics of power tool switch buttons onboard China's Space Station[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(2): 234-243

0 引言

中国空间站已正式转入应用与发展阶段。维持空间站长期在轨稳定运行,并在保障支持下延长运行寿命,是空间站运营效益最大化的现实需求;其中,在轨维修维护技术及定寿延寿工作是空间站实际工作寿命的重要保障^[1-2]。根据空间站在轨寿命评估与延寿专项要求,多类空间站产品正在开展地面定寿延寿试验研究。其中,空间站舱外电动工具作为航天员出舱活动的常备工具,在保证其输出力矩稳定的同时,可实现快速拆装,提高工作效率,缩短出舱作业时间^[3]。开关按钮作为直接控制舱外电动工具启停的关键组件,经历长期服役后可能出现卡滞、卡死或松动导致误触等现象,影响工具的正常作业。为准确获取舱外电动工具的可靠工作时间,结合舱外电动工具可靠性模型及故障模式、影响及危害性分析(FMECA)结果,需要对舱外电动工具的薄弱环节之一——开关按钮开展可靠性评估研究。

对于按压型开关的可靠性评估,国内外相关机构均有研究。Gill等^[4]使用螺栓螺母加载法,分别对3种镍基超合金螺旋弹簧的应力松弛行为进行测试,结果表明,在恒定位移载荷及600~700℃高温条件下弹簧应力的衰减速度比等效拉伸载荷条件下压缩蠕变数据预测的要快1~3个数量级。国内针对舱外电动工具开展的一系列寿命验证研究中也包括开关按钮按压频次模拟试验^[5-6]。王勇等^[7]采用温度应力4量级水平恒定应力加速试验方法研究了某型加速度开关的贮存退化过程,并采用极大似然估计和最小二乘法对试验数据进行了拟合分析,结果显示该加速度开关等效贮存寿命达33年。赵薇等^[8]以T9A螺旋压缩弹簧为研究对象,在不同温度条件下进行高温压缩加速试验,并建立贮存寿命预测方程,对弹簧的常温寿命进行预测。张新兰等^[9]通过不同温度下的加速老化试验获得某轴承用有机硅润滑脂的性能衰退数据,根据阿伦尼乌斯定律对常温下的润滑脂性能衰退进行了评估。

综上,对于开关按钮,目前国内外相关研究多集中于其工作寿命验证以及弹簧类结构、润滑油脂

的长期贮存特性分析,而忽略了其内部弹簧与润滑脂等在在轨长期贮存与短期作业交替影响下的性能退化特性。考虑开关按钮在轨将经历舱内贮存与舱外作业两种不同环境交替作用,其内部又同时存在弹簧类结构与润滑油脂等薄弱环节,长期贮存可能会导致其内部弹簧类结构因蠕变而出现应力松弛现象,而舱外作业时的高频次按压也可能导致其内部润滑脂的理化性能发生变化^[10],因此需要开展试验测试,重点研究在轨服役综合环境对开关按钮性能退化的影响,通过收集性能退化数据对开关按钮的可靠性做出评估。

本文以中国空间站舱外电动工具开关按钮为研究对象,在深入分析开关按钮结构及其失效机理的基础上,设计综合考虑长期在轨贮存与短期作业交替影响的加速寿命试验;结合开关按钮性能退化数据,采用基于伪寿命分布的可靠性评估方法,开展开关按钮可靠性评估工作;旨在验证开关按钮10年寿命末期的可靠度是否满足0.9954的设计指标要求,并为空间站内其他长期贮存单机的可靠性评估提供思路。

1 开关按钮结构及其失效机理分析

中国空间站舱外电动工具目前已投入在轨使用,主要用于完成M5不脱出紧固装置的装拆工作,可以适应舱外复杂的真空和高低温环境。舱外电动工具每年供出舱作业不少于2次,要求满足单次出舱可工作时间不短于8h,拧钉不少于140颗;其余时间为舱内常温(25℃)常压环境长期贮存。舱外电动工具实物如图1所示。



图1 中国空间站舱外电动工具实物
Fig. 1 Photo of extravehicular power tool used for China's Space Station

开关按钮位于舱外电动工具外壳的握柄处,操作力要求 7~30 N, 按压总位移量为 14 mm。图 2 所示为空间站舱外电动工具开关按钮的实物外观与内部结构。

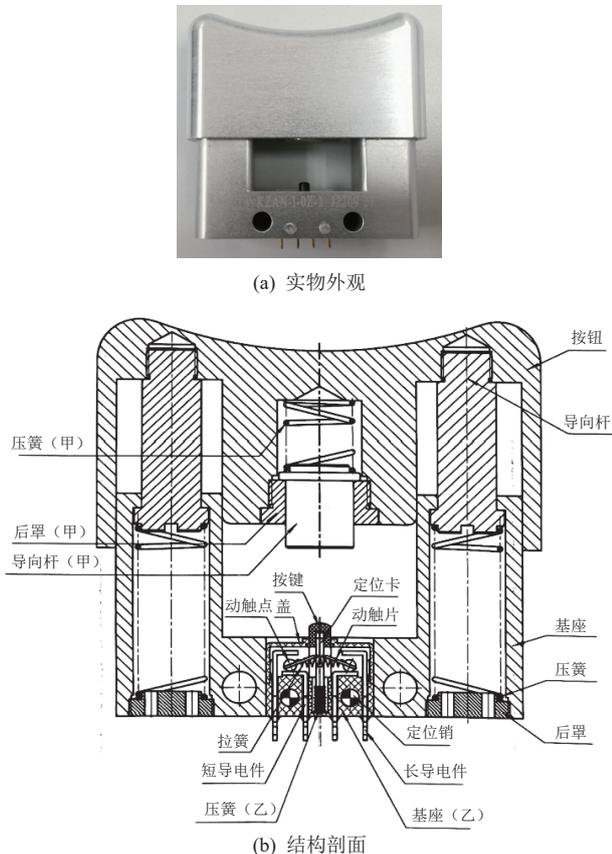


图 2 开关按钮外观及内部结构示意图

Fig. 2 Schematic of appearance and internal structure of switch buttons

结合舱外电动工具在轨服役状态与开关按钮内部结构,分析开关按钮的薄弱环节。当舱外电动工具处于在轨贮存状态时,开关按钮内部弹簧类结构因长期受到低于其屈服强度的恒定应力作用,会发生蠕变,导致应力松弛;而在舱外作业状态下,高频次的按压会加速开关按钮摩擦副间润滑脂的消耗,同时弹簧类结构的弹性系数也会逐渐降低;这两种状态将统一表现为开关按钮的按压力发生退化。根据以上分析,并结合国内外相关研究^[4-12],本文认为导致开关按钮性能退化的关键环节在于其内部弹簧类结构及润滑油脂,其中:导致弹簧类结构应力松弛的主要影响因素为温度及长期负载;而润滑油脂理化性能的变化则主要受温度及动作频次的影响。

2 开关按钮加速寿命试验设计

开关按钮在轨分为长期舱内贮存与短期舱外

作业两种状态,因此加速寿命试验按照这两种状态交替的原则进行设计。其中长期贮存过程加速进行,以温度作为加速应力,每 2 次测试间隔内贮存 1 周(试验后期间隔 2 周),计算加速系数,模拟长期贮存阶段;短期作业过程不作加速处理,且负载条件与实际作业工况保持一致。

加速寿命试验设计具体包括 5 个方面——加速应力、应力水平、样本量、截尾方式和测试时间^[13]。

1)加速应力:根据第 1 章的开关按钮结构及失效机理分析,本试验选取温度作为加速应力,保持负载条件及动作频次与实际状态一致,加速模型为阿伦尼乌斯模型。

2)应力水平:根据中华人民共和国国家标准 GB/T 2689.1—1981《恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则》^[14],在进行恒定应力寿命试验时,应力水平之一应接近或等于该产品技术标准中规定的额定值(开关按钮贮存温度额定值为 25 °C),最高应力水平不得大于该产品的结构材料、制作工艺所能承受的极限应力(弹簧类结构许用温度高温至 130 °C,润滑脂耐长期高温至 121 °C)。在施加应力时,应遵循分级步进、逐步提高的原则。因此,本试验共设定了 4 组温度水平,分别为 50 °C、80 °C、110 °C、140 °C,其中 140 °C 温度水平用于验证高温是否导致失效模式发生变化。

3)样本量:4 组温度水平下每组试验样本量为 5 个,共 20 个开关按钮样本。

4)截尾方式:本试验采用定数截尾方式,每组温度水平下待 5 个样本均失效或有明显失效趋势后停止试验,失效判据为下压 14 mm 时测试按压力小于 7 N 或大于 30 N。

5)测试时间:由于开关按钮早期退化较快且退化波动较大,测试时间间隔采取“先密后疏”的原则,试验前期每周测试 1 次,试验后期每 2 周测试 1 次。

本试验流程如图 3 所示。加速贮存过程在高温温箱(见图 4)中进行;按压力测试在常温环境下的按压力测试仪上进行(见图 5),每次按压力测试前对开关按钮按压 20 次以上(等效在轨 1 年内按压 280 次以上),模拟开关按钮实际工作状态。

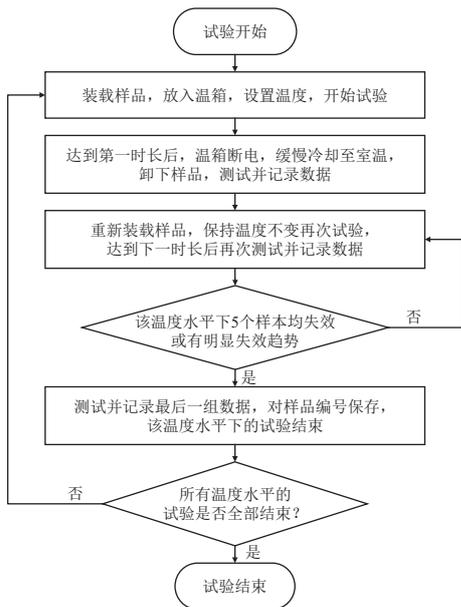


图 3 开关按钮加速寿命试验流程

Fig. 3 Block diagram of accelerated life test procedure for switch buttons



(a) 外观 (b) 内部状态

图 4 开关按钮加速寿命试验用温箱

Fig. 4 Oven for accelerated life test of switch buttons



(a) 起始位置 (b) 下压14 mm

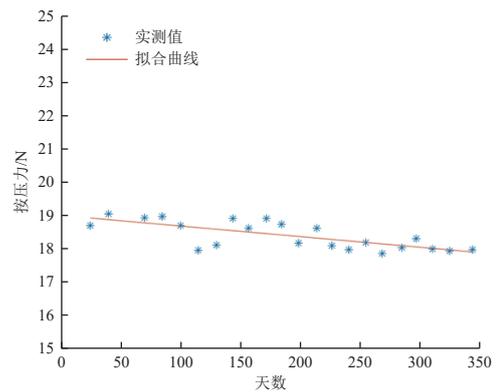
图 5 开关按钮典型位置按压力测试状态

Fig. 5 Typical positions of the switch buttons in pressing force test

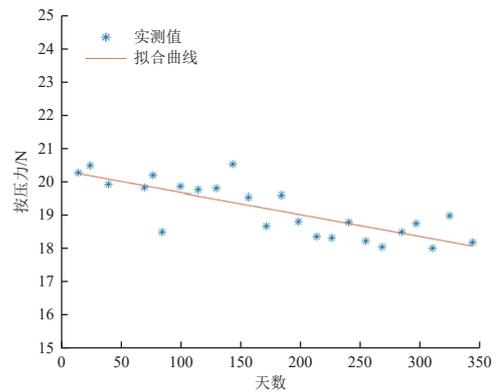
3 开关按钮失效模式及退化特性分析

3.1 按压力变化及分析

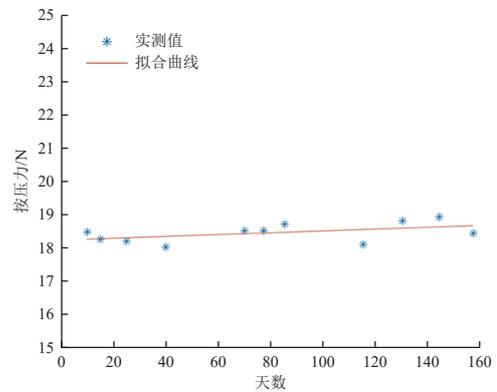
图 6(a)~(d) 为各温度下开关按钮典型样本的按压力退化曲线, 试验时按钮下压 14 mm。



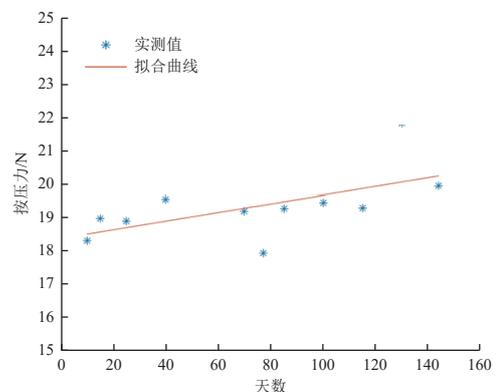
(a) 50 °C 下



(b) 80 °C 下



(c) 110 下 (试验于开始157天后停止)



(d) 140 下 (试验于开始157天后停止)

图 6 各温度下开关按钮典型样本按压力-时间曲线

Fig. 6 Curves of pressing force vs. time for typical witch button samples at various temperatures

由图6可见,开关按钮加速寿命试验进行350天后,50℃和80℃温度下开关按钮出现按压力松弛现象,且退化趋势稳定;110℃和140℃温度下的开关按钮样本在试验开始157天后均明显失效,因此这2组温度下的试验提前停止。对图中的数据点进行拟合分析可知,开关按钮按压力退化与时间呈线性关系,其中50℃、80℃温度下拟合曲线斜率为负,即随着贮存过程的推进,开关按钮按压力逐渐下降,且80℃温度下按压力下降速率加快;110℃和140℃温度下拟合曲线斜率为正,即随着贮存过程的推进,开关按钮按压力逐渐上升,且140℃温度下按压力上升速率加快。出现此现象的原因可能为,开关按钮按压力变化受两方面因素影响:一方面,内部弹簧随时间推移出现应力松弛现象,直接导致按压力下降;另一方面,随时间推移,润滑脂的润滑效果降低,开关按钮运动副摩擦力随之增大,进而使得按压力上升。在温度较低时,前者为开关按钮性能退化的主导因素;随着温度的升高,后者逐渐演变为主导因素。

3.2 按压力迟滞量变化及分析

开关按钮按压力迟滞量是指按钮下压至某一位移与回弹至相同位移量时所需的按压力差值。图7为开关按钮按压力迟滞量典型曲线,可以看到,对应不同按压位移的按压力迟滞量有所不同。

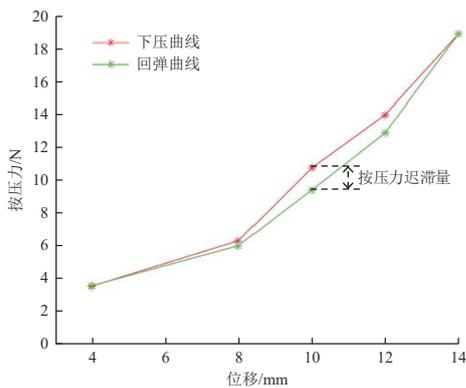
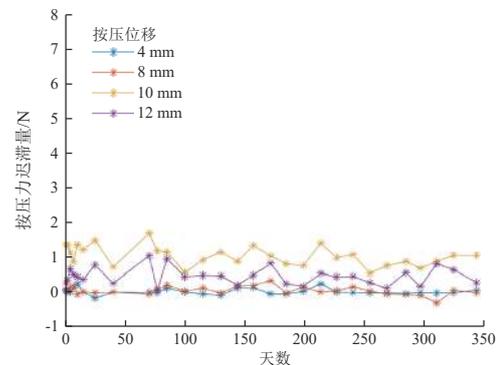


图7 开关按钮按压力迟滞量典型曲线

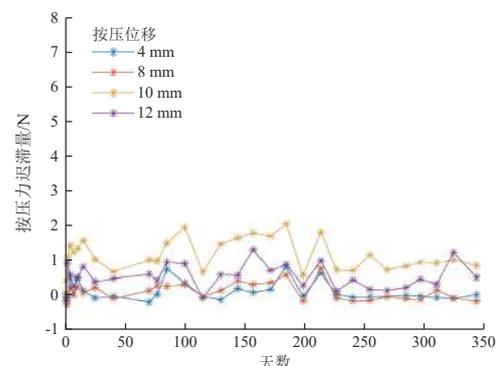
Fig. 7 Typical curves of delayed pressing force for switch buttons

图8为各温度下开关按钮典型样本的按压力迟滞量曲线。可以看出,随着温度的升高,开关按钮按压力迟滞量有增大趋势:在50℃和80℃温度下,按压力迟滞量基本保持稳定;在110℃和140℃温度下,随着按压位移的增大,按压力迟滞量逐渐增大。110℃温度下,4段位移的按压力迟滞量均值由0.885 N·m增加至1.900 N·m,涨幅为

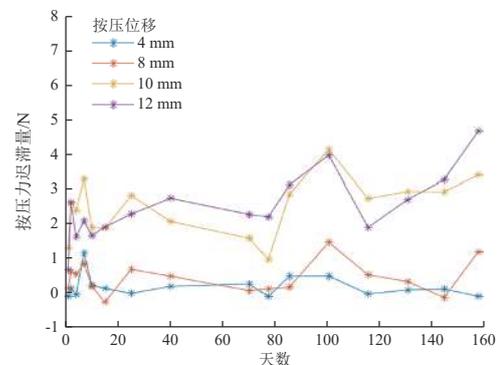
114.7%;140℃温度下,4段位移的按压力迟滞量均值由0.930 N·m增至10.748 N·m,涨幅达10倍多。



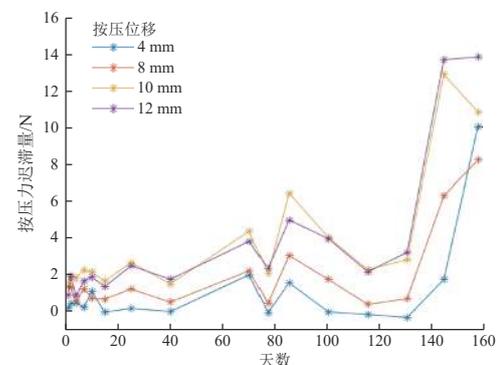
(a) 50℃下



(b) 80℃下



(c) 110℃下(试验于开始157天后停止)



(d) 140℃下(试验于开始157天后停止)

图8 各温度下按钮典型样本按压力迟滞量-时间曲线
Fig. 8 Curves of delayed pressing force vs. time for typical switch button samples at various temperatures

按压力迟滞量的变化与按压过程中活动部位的摩擦力有关^[15]。舱外电动工具开关按钮的内部润滑材料选用 7253 航空用低温润滑脂，其可耐受低温达 -73 ℃，耐长期高温至 121 ℃。随着温度的升高，润滑脂流失现象加剧，并逐渐从涂油处溢出；当贮存温度为 140 ℃ 时，已超出润滑脂耐受温度上限，润滑脂流失现象最为明显。在图 8 中表现为，在贮存阶段后期，多个样本出现迟滞量异常增长趋势，说明开关按钮的性能退化失效模式改变为润滑脂润滑效果降低导致开关按钮运动副摩擦力增大。开关按钮内部涂油处以及开关按钮润滑脂高温下溢出现象如图 9 所示。

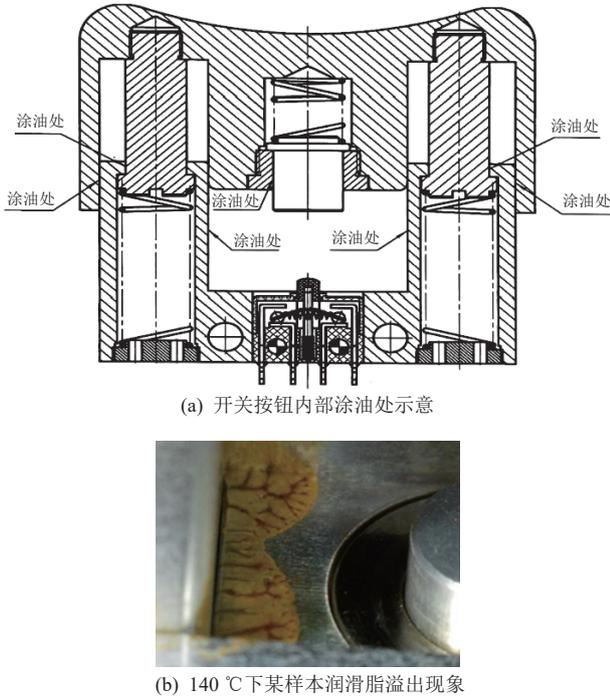


图 9 开关按钮润滑脂溢出现象

Fig. 9 Lubricating grease overflows in switch buttons

4 基于加速退化数据的可靠性评估方法

由于开关按钮的在轨实际贮存温度为 25 ℃，根据 3.1 节分析，弹簧的应力松弛现象为开关按钮性能退化的主导因素，故本文根据 50 ℃、80 ℃ 温度下的加速退化数据对开关按钮开展可靠性评估工作。

传统的加速寿命试验可靠性评估方法要求至少有 3 组应力，每组应力不少于 3 个产品发生失效。然而，这对于航天单机产品而言很难实现，甚至在很多情况下，即便对有些产品开展加速寿命试验也无法获得失效数据，但会加速产品性能退化。

因此，可以基于产品性能退化数据，结合产品性能退化模型、寿命分布模型及加速模型等，对航天单机产品开展可靠性评估工作^[16]。

基于加速退化数据的可靠性评估方法的一般步骤为：对每个样本应用性能退化建模，根据加速退化数据进行外推，获得产品的预计失效时间，即“伪寿命值”；对伪寿命值进行假设检验，确定伪寿命分布类型及待定参数；再根据伪寿命结果，应用其分布模型对应的加速寿命试验可靠性评估方法获得产品的可靠性评估结果。

4.1 伪寿命值预测

对于给定的性能参数阈值或者失效判据，可以根据性能退化模型进行外推，获取产品伪寿命值。性能退化模型拟合常用的方法为最小二乘法。

以线性退化模型为例介绍最小二乘法的一般形式。对线性退化模型 $y=ax+b$ ，以及样本数据 $x_i, y_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，最小二乘法拟合的目的是确定待定参数 \hat{a}, \hat{b} ，使得估计值 $\hat{y}_i = \hat{a}x_i + \hat{b}$ 与实际值 y_i 之间的残差的平方和最小，即 $\min \sum (\hat{y}_i - \hat{a}x_i - \hat{b})^2$ 。这样，就把退化模型的拟合问题转化为求极值的问题。

令 $Q = \sum (\hat{y}_i - \hat{a}x_i - \hat{b})^2$ ，其中 \hat{a}, \hat{b} 应满足方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \hat{a}x_i - \hat{b}) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \hat{a}x_i - \hat{b})x_i = 0 \end{cases} \quad (1)$$

求解方程组 (1)，可得到 \hat{a}, \hat{b} 的最小二乘估计值为

$$\begin{cases} \hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ \hat{b} = \bar{y} - \hat{a}\bar{x} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\bar{x} = (1/n) \cdot \sum_{i=1}^n x_i$ ； $\bar{y} = (1/n) \cdot \sum_{i=1}^n y_i$ 。

对 n 个样本进行测试，每个样本测试 m_i 次 ($i=1, 2, \dots, n$)，测试时间与测试数据为 (x_{ij}, y_{ij}) (j 指单个样本的第 j 次测量， $j=1, 2, \dots, m_i$)，任务时间为 t_0 ，失效阈值为 ρ_0 。根据最小二乘法对每个样本的线性退化模型进行估计，拟合结果为

$$\rho_i(t) = \hat{a}_i t + \hat{b}_i \quad (3)$$

对应失效阈值 ρ_0 , 确定各样本的伪寿命值 $L_i = \inf\{t|\rho_0 = \hat{a}_i t + \hat{b}_i\}$ 。

4.2 假设检验与可靠性评估

以威布尔分布为例介绍假设检验及参数估计的一般方法。试验样本数为 n , 失效数为 r , 相应的失效时间为 t_1, t_2, \dots, t_r , 且 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_r$, 无失效产品的试验时间为 $t_{r+1}, t_{r+2}, \dots, t_n$, 检验的原假设为

$$H_0: F(t) = F_0(t; \eta; m) = 1 - \exp[-(t/\eta)^m], \quad (4)$$

计算统计量为

$$W = \frac{\sum_{i=r_1+1}^{r-1} \frac{l_i}{r-r_1-1}}{\sum_{i=1}^{r_1} \frac{l_i}{r_1}} \frac{(X_{i+1} - X_i)}{(X_{i+1} - X_i)}, \quad (5)$$

式中: $l_i = \ln \left[\ln \left(\frac{4(n-i-1)+3}{4n+1} \right) / \ln \left(\frac{4(n-i)+3}{4n+1} \right) \right]$, $i=1, \dots, r-1$, 其中 $X_i = \ln t_i$; $r_1 = [r/2]$ 。统计量 W 渐进服从自由度为 $[2(r-r_1-1), 2r_1]$ 的 F 分布, 显著性水平 α 下,

$$F_{2(r-r_1-1), 2r_1, \alpha/2} \leq W \leq F_{2(r-r_1-1), 2r_1, 1-\alpha/2}. \quad (6)$$

接受原假设后, 可利用伪寿命值确定威布尔分布参数取值, 威布尔分布的可靠度函数为

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right], \quad (7)$$

式中: m 为形状参数; η 为尺度参数。

参数估计采用极大似然估计方法, 对应的似然函数为

$$L(m, \eta) = \prod_{i=1}^r \frac{m}{\eta} \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^{m-1} \exp[-(t_i/\eta)^m] \prod_{i=r+1}^n \exp[-(t_i/\eta)^m], \quad (8)$$

对似然函数取对数后求导, 根据

$$\begin{cases} \frac{1}{m} + \frac{\sum_{i=1}^r \ln t_i}{r} - \frac{\sum_{i=1}^n t_i^m \ln t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^m} = 0 \\ \eta^m = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^n t_i^m \end{cases} \quad (9)$$

确定待定参数 m 和 η 。

以基于威布尔分布的阿伦尼乌斯模型可靠性评估为例, 介绍基于加速模型的可靠性评估的一般方法^[17-18]。阿伦尼乌斯模型的一般形式为

$$L = A \exp \left(- \frac{E_a}{kT} \right) \quad (10)$$

式中: L 为产品退化速率; A 为模型常数; E_a 为激活能; k 为玻耳兹曼常数 ($8.617 \ 385 \times 10^{-5}$ eV/K); T 为热力学温度。

试验温度为 $T_i (i=1, 2, \dots, k)$, 工作温度为 T_0 , 特征寿命值为 $\eta_i (i=1, 2, \dots, k)$ 时, 根据阿伦尼乌斯模型, 样本寿命数据可表示为

$$\eta_i(T_i) = A \exp \left(\frac{B}{T_i} \right), \quad (11)$$

根据各温度水平下的伪寿命数据可确定阿伦尼乌斯模型参数。

加速系数是指加速应力下产品特征寿命与正常应力下特征寿命的比值, 其计算公式为

$$A_{cc} = \frac{\eta_0(T_0)}{\eta_1(T_1)} = \frac{A \exp \left(\frac{B}{T_0} \right)}{A \exp \left(\frac{B}{T_1} \right)} = \exp \left(\frac{B}{T_0} - \frac{B}{T_1} \right). \quad (12)$$

可由加速系数确定工作温度 T_0 下的特征寿命 η_0 。当失效机理不发生改变时, 各应力水平下模型的形状参数 m 应保持不变^[19], 因此对各应力水平下估计出的形状参数进行加权平均, 得到一致的形状参数估计值 m_0 , 从而得到工作温度 T_0 下的可靠度估计值为

$$\hat{R}_0 = \exp \left[- \left(\frac{t}{\hat{\eta}_0} \right)^{m_0} \right]. \quad (13)$$

5 基于加速退化数据的开关按钮可靠性评估

根据第 4 章所述可靠性评估方法, 结合加速退化数据与失效判据, 可获取各样本的伪寿命值。开关按钮样本在 50 °C 和 80 °C 温度下的伪寿命值数据如表 1 所示。

表 1 开关按钮样本在 50 °C 和 80 °C 温度下的伪寿命值
Table 1 Pseudo-life values at temperatures of 50 °C and 80 °C for the switch button samples

温度/°C	伪寿命值/d				
	样本1	样本2	样本3	样本4	样本5
50	5 475.0*	5 475.0*	3 159.0	5 475.0*	3 757.5
80	3 367.0	2 902.5	2 217.2	2 982.1	2 039.2

*注: 伪寿命值大于 5475 天 (15 年) 的样本数据取截尾数据 5475 天。

计算得到: 50 °C 温度下开关按钮伪寿命值服从 $m=6, \eta=5067$ 的威布尔分布, 80 °C 温度下开关

按钮伪寿命值服从 $m=6.4$ 、 $\eta=2908$ 的威布尔分布，其概率密度函数曲线如图 10 所示。

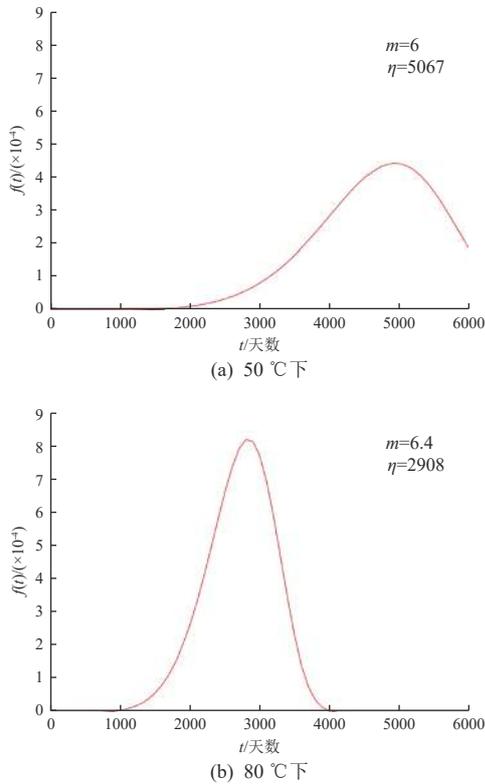


图 10 开关按钮伪寿命值概率密度函数曲线

Fig. 10 Probability density function plot of pseudo-life values for switch buttons

结合阿伦尼乌斯模型加速系数计算方法，可得出 25 °C 温度下开关按钮可靠度服从 $m=6.2$ 、 $\eta=8766$ 的威布尔分布（可靠度曲线如图 11 所示），其 3650 天时的可靠度估计值为 0.995 6，可靠度 0.995 4 对应的寿命天数为 3681 天。

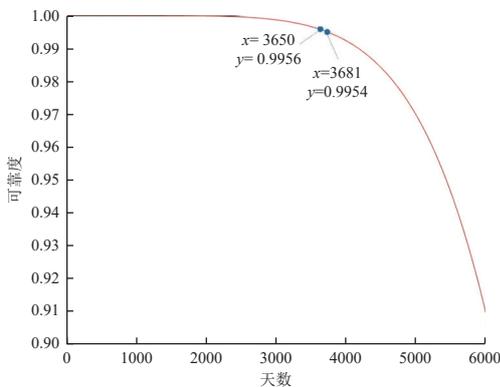


图 11 25 °C 温度下开关按钮可靠度曲线

Fig. 11 Reliability curve of switch buttons at temperature of 25 °C

由于表 1 中的部分伪寿命值采用截尾数据，因此加速系数计算的结果略小于真实值，导致外推 25 °C 温度下开关按钮可靠度威布尔分布的 η 值略

小于真实值，即可靠度评估结果偏保守，但该评估结果仍满足 10 年寿命末期可靠度 0.995 4 的指标要求。

6 结论

本文以中国空间站舱外电动工具开关按钮样本为对象，开展综合考虑在轨长期贮存与短期作业交替影响的加速寿命试验，深入分析电动工具开关按钮的性能退化特性，采用基于伪寿命分布的可靠性评估方法对开关按钮开展可靠性评估，得出以下结论：

1) 舱外电动工具开关按钮加速寿命试验进行 350 天后所有样本均已出现明显退化趋势，其中 110 °C 和 140 °C 温度下样本于试验开始 157 天后已出现卡滞或卡死现象；50 °C 和 80 °C 温度下开关按钮的按压力退化与时间呈线性关系，随着贮存时间的推进，开关按钮按压力逐渐下降，且 80 °C 温度下按压力下降的速率比 50 °C 温度下的更快。

2) 在贮存温度较低时(50 °C、80 °C)，开关按钮内部弹簧类结构的应力松弛现象为按钮性能退化的主导因素；随着贮存温度的升高(110 °C、140 °C)，润滑脂从涂油处溢出，开关按钮运动副摩擦力增大逐渐成为按钮性能退化的主导因素。

3) 开关按钮按压力迟滞量变化主要由于按钮润滑脂溢出，即运动副摩擦力变化导致，且该现象与温度相关，其中 50 °C 和 80 °C 温度下，未出现润滑脂溢出现象，按压力迟滞量基本保持稳定；110 °C 和 140 °C 温度下，出现润滑脂溢出现象，且随着按压位移的增大按压力迟滞量也逐渐增大，按压力迟滞量均值涨幅分别达 114.7% 和 1 055.7%。建议将开关按钮内部润滑脂改用固体润滑脂，以避免高温条件下润滑脂溢出。

4) 开关按钮在 3650 天时的可靠度估计值为 0.995 6，可靠度 0.995 4 对应的寿命天数为 3681 天，满足 10 年寿命末期可靠度 0.995 4 的指标要求；且该评估结果偏保守，开关按钮的实际可靠度应优于该评估结果。

后续将对开关按钮进行破坏性失效分析，进一步研究其失效机理。本文所采用的试验设计思路与基于伪寿命分布的可靠性评估方法后续还可应用于空间站舱外电动工具锂电池组与电机等的加速

寿命试验设计和可靠性评估,以支撑空间站在轨寿命评估与延寿专项。

参考文献 (References)

- [1] 张伟,侯永青,夏侨丽,等.空间站维修设计与实践[J].*中国科学:技术科学*,2022,52(9):1332-1344
ZHANG W, HOU Y Q, XIA Q L, et al. Maintenance design and practice for the China space station[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2022, 52(9): 1332-1344
- [2] 易予生,李立凌,罗鹏,等.载人航天器舱外在轨维修设计与实现[J].*航天器工程*,2023,32(1):43-48
YI Y S, LI L L, LUO P, et al. Design and implementation of manned spacecraft in-orbit extravehicular maintenance[J]. *Spacecraft Engineering*, 2023, 32(1): 43-48
- [3] 傅浩,于洋,王哲,等.载人航天在轨维修舱外电动工具的发展与思考(下)[J].*载人航天*,2021,27(4):513-521
FU H, YU Y, WANG Z, et al. Development and reflection of power tools for on-orbit servicing in manned space flight (Part II)[J]. *Manned Spaceflight*, 2021, 27(4): 513-521
- [4] GILL S P A, MCCOLVIN G, STRANG A. Stress relaxation of nickel-based superalloy helical springs at high temperatures[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 613: 117-129
- [5] WU T, FU H, YU Y, et al. Reliability design and evaluation of the EVA power tool[C]//13th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). Hangzhou, 2021: 227-230
- [6] 李芳勇,苏新明,周原,等.空间站舱外电动工具的旋钮功能考核的热真空试验装置:CN114229051A[P].2022-03-25
- [7] 王勇,夏昌福,郭茂.基于加速退化模型的加速度开关贮存寿命评估[J].*压电与声光*,2023,45(3):484-488
WANG Y, XIA C F, GUO M, et al. Evaluation of storage life of acceleration switch based on accelerated degradation model[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2023, 45(3): 484-488
- [8] 赵薇,宫晓春,洪洁,等.螺旋压缩弹簧的加速贮存行为研究[J].*失效分析与预防*,2022,17(1):37-40
ZHAO W, GONG X C, HONG J, et al. Study on accelerated storage behavior of spiral compression spring[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2022, 17(1): 37-40
- [9] 张新兰,陈风波,王姝瑛,等.轴承用有机硅润滑脂贮存寿命评估[J].*润滑与密封*,2020,45(6):125-128
ZHANG X L, CHEN F B, WANG S Y, et al. Evaluation on shelf life of organosilicon grease for bearings[J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(6): 125-128
- [10] 王晓生,史润军.高压开关设备弹簧断裂分析[J].*河南科技*,2023,42(15):34-37
WANG X S, SHI R J. Analysis of spring rupture in high-voltage switchgear[J]. *Henan Science and Technology*, 2023, 42(15): 34-37
- [11] 吕向飞,陈进.采用统一性能衰退轨迹模型的润滑和密封材料加速寿命预测[J].*机械科学与技术*,2023,42(5):802-807
LÜ X F, CHEN J. Accelerated life prediction of lubricating and sealing materials using unified performance degradation trajectory model[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023, 42(5): 802-807
- [12] 王柯.螺旋压缩弹簧应力松弛特性分析及服役寿命预测[D].西安:西安理工大学,2019:18-22
- [13] 查国清,黄小凯,康锐.基于多应力加速试验方法的智能电表寿命评估[J].*北京航空航天大学学报*,2015,41(12):2217-2224
ZHA G Q, HUANG X K, KANG R. Smart meter lifetime evaluation based on multi-stress acceleration test method[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(12): 2217-2224
- [14] 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则:GB/T 2689.1—1981[S]
- [15] 谢庆喜,周守玉,张农,等.钢板弹簧迟滞特性的试验与仿真研究[J].*汽车工程*,2016,38(5):632-637
XIE Q X, ZHOU S Y, ZHANG N, et al. Experimental study and simulation on the hysteresis characteristics of leaf spring[J]. *Automotive Engineering*, 2016, 38(5): 632-637
- [16] 朱炜.航天产品可靠性评估方法[M].北京:中国宇航出版社,2022:64-68
- [17] 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
- [18] 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 W P, WANG X H, ZHANG Q J, et al. Accelerated life test technology for satellite electronic products based on Arrhenius model[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(3): 247-251

[19] 马小兵, 刘宇杰, 王晗. 加速寿命试验三参数威布尔分布

的极小变异-极大似然估计[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 12-18

MA X B, LIU Y J, WANG H. Minimum variation-maximum likelihood estimation of three-parameter Weibull distribution under accelerated life test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 12-18

(编辑: 闫德葵)

一作简介: 张兆霖, 硕士研究生, 研究方向为航天器产品环境与可靠性技术。

*通信作者: 黄首清, 研究员, 研究方向为航天器可靠性技术。