

弹用电连接器湿热环境下寿命预测

姜普涛^{1,2}, 韩建立¹, 马俊慧³, 吴一乔¹

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264000; 2. 91423 部队, 辽宁 大连 116041;
3. 92808 部队, 海南 三沙 573199)

摘要: **目的** 预测某型电连接器的剩余寿命。**方法** 以某弹用电连接器为研究对象, 在分析导弹服役环境和电连接器失效机理的基础上, 基于电连接器接触电阻性能退化特点, 利用 Wiener 过程拟合电连接性能退化轨迹。然后, 以 Wiener 过程的漂移参数为中间变量, 采用广义 Eyring 模型, 对温度、湿度应力进行建模, 进而根据试验数据对性能退化数据似然函数的参数进行估计。最后, 结合加速模型, 推导得到正常应力水平下的漂移参数值, 从而确定出电连接器的可靠度模型。**结果** 计算出样品电连接器的平均寿命, 可进一步推断该型电连接器的其他寿命信息。**结论** Wiener 过程可以拟合湿热环境下电连接器的性能退化轨迹, 温湿应力是开展弹上设备试验需重点关注的因素, 考虑进一步提高类似环境载荷下的加速退化试验效率, 可在一定程度上增大温度应力水平。

关键词: 电连接器; 寿命预测; 导弹服役环境; Wiener 过程; Eyring 模型; 加速退化试验

中图分类号: TJ760 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)08-0013-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.08.003

Lifetime Prediction of Missile Electrical Connector under Hot and Humid Environment

JIANG Pu-tao^{1,2}, HAN Jian-li¹, MA Jun-hui³, WU Yi-qiao¹

(1. Naval Aviation University, Shandong Yantai 264000, China; 2. Unit 91423 of the PLA, Liaoning Dalian 116041, China;
3. Unit 92808 of the PLA, Hainan Sansha 573199, China)

ABSTRACT: This paper is to predict the remaining lifetime of a certain type of electrical connector. Taking a certain missile electrical connector as the research object, on the basis of analyzing missile service environment and failure mechanism of electrical connectors, and based on the degradation characteristics of electrical connector contact resistance performance, the Wiener process is used to fit the degradation track of the electrical connection performance. And then, with the drift parameters of the Wiener process as the intermediate variables, the generalized Eyring model is used to model the temperature and humidity stress. Then the parameters of likelihood function of performance degradation data are estimated according to the test data. Finally, combined with the acceleration model, the drift parameters under the normal stress level are derived, and the reliability model of the electrical connector is determined. The average lifetime of the sample electrical connector is calculated, which can

收稿日期: 2022-06-30; 修订日期: 2022-08-08

Received: 2022-06-30; Revised: 2022-08-08

作者简介: 姜普涛 (1980—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为武器装备综合保障。

Biography: JIANG Pu-tao (1980-), Male, Master, Engineer, Research focus: comprehensive support of weapons and equipment.

通讯作者: 韩建立 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向导弹延寿技术。

Corresponding author: HAN Jian-li (1967-), Male, Doctor, Professor, Research focus: missile life-extending technology.

引文格式: 姜普涛, 韩建立, 马俊慧, 等. 弹用电连接器湿热环境下寿命预测[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 013-020.

JIANG Pu-tao, HAN Jian-li, MA Jun-hui, et al. Lifetime Prediction of Missile Electrical Connector Under Hot and Humid Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 013-020.

further infer other lifetime information of this type of electrical connector. Wiener process can fit the performance degradation tracks of the electrical connector under hot and humid environment. The temperature and humidity stress are the key factors to be paid attention to when carrying out test of equipment on missile. Considering further improving the efficiency of accelerated degradation test under similar environmental loads, the temperature stress level can be increased to a certain extent.

KEY WORDS: electrical connector; lifetime prediction; missile service environment; Wiener process; Eyring model; accelerated degradation test

弹用电连接器是导弹系统电气连接和信号传递的重要部件,其性能会随着导弹贮存时间的增加产生退化,进而对导弹的性能和可靠性产生影响。特别是导弹在濒海环境区域服役时,会面对高温、高湿的长期作用,其电连接器如果发生壳体腐蚀、绝缘体性能下降、接触件电阻增加及断路等问题,将导致弹上信号不能有效传输,直接影响导弹性能^[1]。某型导弹即将到寿,组织对其电连接器进行寿命预测研究是开展导弹延寿、制订导弹技术维护措施、继续保持导弹技战术性能指标重要环节之一。

电连接器的可靠性评估以及寿命预测研究一直受到许多学者关注,并取得了一定成果。徐廷学等^[2]在预测某型弹用电连接器寿命时,假设温度、湿度应力互不影响,从而简化了广义 Eyring 模型的参数估算。孙旭波等^[3]选取温度作为加速应力,设计了电连接器步进加速退化试验,证实了极大似然法的参数估计方法能更好地拟合实测数据曲线。骆燕燕等^[4]为预测航空电连接器寿命,提出了一种模拟昼夜温差影响的热循环加速试验方法。王浩伟等^[5]为提高某弹用电连接器可靠性评估精度,使用 Gamma 过程对产品退化进行建模,将加速老化数据作为先验信息和实测的产品服役现场信息进行了有效融合。

对比型号导弹延寿工作特点,总的来看,电连接器研究存在应力选择与实际服役环境存在一定差异、或试验条件较为严苛不易实施、或估计模型参数所需数据较难获取等现实问题。本文综合考量导弹服役环境和电连接器失效机理,利用 Wiener 模型对接触电阻退化过程进行建模,以温度和湿度作为恒定加速应力,使用广义 Eyring 模型建立电连接器退化率与温湿应力之间的关系。最后,根据加速退化试验所得性能退化数据,利用推导出来的可靠度函数,实现对某型弹用电连接器寿命预测。

1 弹用电连接器失效分析

1.1 导弹服役环境及电连接器环境效应分析

为较为真实地模拟开展弹上设备加速试验,进行寿命评估预测,需确定弹上设备的环境敏感应力,而导弹的实际服役环境通常是不可缺少的考虑因素。导

弹是较为典型的机电一体化产品,属于“长期贮存、一次使用”的武器装备,其服役过程中寿命期通常在“库房贮存、装卸运输、战斗值班”3个阶段反复循环^[6],大部分时间处于库房贮存或战斗值班状态,且导弹基本置于储运箱或发射筒内。导弹储运箱或发射筒都具有良好的气密性,盐、雾、光照等环境因素很难进入箱内,可以不考虑盐、雾、光照对导弹的影响。从某型导弹自交付部队以来整个服役过程的数据记录分析,每年度内该型弹寿命期处于战备值班剖面的时间段基本没有较大变化,整个服役剖面内,温度、湿度是影响其性能状态变化的2个主要因素^[7-8]。工程实践中,一般不考虑同一地域服役的导弹年度间贮存环境的小幅波动,采用一年中的温度、湿度统计值来描述该导弹服役战备值班自然环境。

电连接器的失效模式通常有4种类型:导通件失效、绝缘件失效、机械件失效以及密封件失效^[3,9]。其中,导通件失效通常又叫作“接触失效”,是由于接触体之间的接触压力不足、接触体表面镀层磨损或严重受力出现的接触对瞬断、接触电阻增大和导通性变差^[10]。据统计,接触失效是电连接器的主要失效形式,约占电连接器失效数量的45%,严酷的温湿环境会加速接触体与空气中氧的反应速度,使插针插孔表面更快形成氧化物,而接触电阻的值会随着氧化物的堆积越来越大,到了一定阈值就会导致电连接器失效^[11]。结合有关方面研究结论,对于导弹电连接器,致使其接触电阻失效的主要环境应力可归结为温度和湿度^[12-14]。鉴于此,本文主要结合湿热应力下弹用电连接器接触电阻的形成和变化特点,围绕电连接器失效占比较大的接触失效展开研究。

1.2 电连接器失效机理分析

1) 接触电阻的形成过程。电连接器通常由接触件、绝缘件、机械件和密封件4部分组成,一般通过接触件界面的相互接触来实现电信号的传导。从微观上看,电连接器接触界面电信号的联通是通过若干凹凸不平的“接触斑点”的互相接触来实现的,这些起电导通作用的接触斑点一般称为“导电斑点”^[15-17]。当电流通过接触件界面时,导电斑点附近电流线发生收缩,此时接触界面出现局部的附加电阻,称为“收缩电阻”。收缩效应如图1所示。

电连接器在环境应力作用下, 受氧化、腐蚀、空气尘埃等影响, 一般接触件表面会形成氧化膜、腐蚀膜以及沉积膜等“界面膜”。当电流通过覆盖界面膜的导电斑点时, 据“隧道效应”理论, 会产生一种通常被叫作“膜层电阻”的附加电阻, 如图 2 所示。

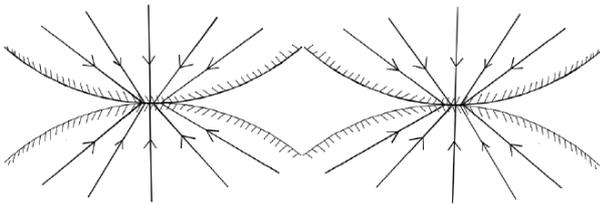


图 1 导电斑点附近电流线的收缩效应

Fig.1 Contraction effect of current lines near conductive spots



图 2 膜层电阻的形成过程

Fig.2 Formation process of film resistance

接触电阻通常就指上述“收缩电阻”和“膜层电阻”之和, 而接触电阻的变化主要与膜层电阻大小有关^[9]。研究表明^[18-20], 膜层电阻的变化除了与金属本身特性有关外, 主要受温度、湿度等环境因素影响。

2) 弹用电连接器失效机理分析。某弹用电连接器接触件基体材料由铜构成, 表面镀金, 由于镀层工艺的问题, 接触体镀金层存在些许裂纹和细微的小孔。该电连接器在导弹服役过程中, 工作环境中的潮湿气体以及腐蚀性气体渗透到电连接器接触件基体铜内部, 在化学反应作用下逐渐生成电解液。由于铜、金元素电极电位的差异性, 铜-金界面会发生原电池反应, 界面铜侧逐渐生成 Cu^+ , 如图 3 所示。另外, 随着原电池反应的不进行, 浓度越来越高的 Cu^+ 会从铜-金界面处向接触斑点表面的镀金层析出, 与接触体缝隙中的氧进行反应。经过一段时间后, 接触界面生成 Cu_2O 的膜层, 如图 4 所示。上述化学反应主要过程为: $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^+ + \text{e}$, $4\text{Cu} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O}$ 。

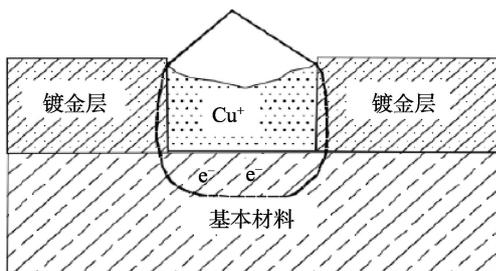


图 3 裸露基体材料

Fig.3 Bare leak base material

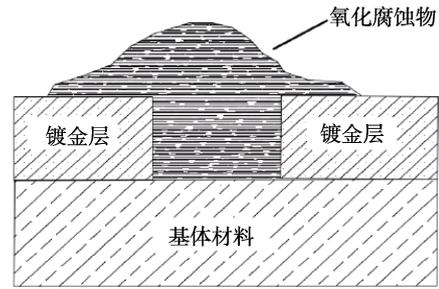


图 4 裸露基体材料的氧化腐蚀

Fig.4 Oxidation corrosion of bare leak matrix materials

随着膜层厚度不断变大, 电连接器的接触电阻也不断增大。对于弹用电连接器, 这一变化过程主要考虑隧道效应, 当膜层厚度小于一定值时, 杨奋为^[13]给出了一个线性表达式:

$$\rho = \lambda h \tag{1}$$

式中: h 为膜层厚度; ρ 为隧道电阻率; λ 为比例常数。

接触电阻增量 ΔR 与膜层厚度之间关系可表示为:

$$\Delta R = R - R_0 = \lambda(h - h_0) / S \tag{2}$$

式中: h_0 为膜层厚度初始值; S 为接触面积。

与膜层厚度生长趋势相反, 表面膜层的生长速率随膜层厚度的逐渐增大而不断下降, 膜层的厚度与其增长速度有如下关系:

$$h = \sqrt{\theta t} \tag{3}$$

式中: θ 为表面膜层的生长速率。

当 $h_0=0$ 时, 令 $\mu = \lambda\sqrt{\theta} / S$, 定义为接触电阻的增长速率, 结合式(2)、(3)可得:

$$\Delta R = \mu\sqrt{t} \tag{4}$$

通过电连接器失效机理分析可知, 接触电阻的增长速率与促进膜层生长的温度、湿度环境应力有紧密联系, 电连接器寿命与接触电阻的变化也有密切关系。考虑 Wiener 过程特点和接触电阻性能变化的易测量性, 为进一步量化上述参量之间的关联, 本文用 Wiener 过程的漂移参数 μ 表示式(4)中定义的增长速率, 用扩散参数 σ 来描述电连接器性能退化数据实测值和理论值之间的随机性偏差^[3], 同时考虑使用广义 Eyring 模型来量化 μ 与双环境应力的关系。

2 可靠性评估建模

2.1 Wiener 过程和电连接器可靠度函数

设随机变量 $Y(t)$ 表示产品性能退化量和时间 t 的函数, 若在连续的时间内满足:

1) $\Delta Y(t)$ 为 $[t, t+\Delta t]$ 时间段内的性能退化增量, 且

$\Delta Y(t)=Y(t+\Delta t)-Y(t)\sim N(\mu\Delta t, \sigma^2\Delta t)$;

2) 在任意不相交的时间段 $[t_1, t_2]$, $[t_3, t_4]$ 内, 增量 $Y(t_2)-Y(t_1)$ 与 $Y(t_4)-Y(t_3)$ 相互独立;

3) $Y(0)=0$, 在 $t=0$ 处, 性能退化函数 $Y(t)$ 是连续的。

则 $Y(t)$ 可用 Wiener 过程来描述, 即 $Y(t)=\mu\Delta t+\sigma W(t)$, 其中, $W(t)$ 为标准 Wiener 过程。

设 l 为试验样品失效阈值, 则其寿命 ξ 与性能退化量 $Y(t)$ 之间有如下关系:

$$\xi = \inf \{t | Y(t) \geq l\} \quad (5)$$

文献[21]证明, 性能退化服从 Wiener 过程产品, 其寿命分布服从逆高斯分布, 概率密度函数可表示为:

$$f(t|\mu, \sigma, l) = \frac{l}{\sqrt{2\pi\sigma^2 t^3}} e^{-\frac{(l-\mu t)^2}{2\sigma^2 t}} \quad (6)$$

可靠度函数为:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{l-\mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right) - e^{\frac{2\mu l}{\sigma^2}} \Phi\left(-\frac{l+\mu t}{\sigma\sqrt{t}}\right) \quad (7)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态函数。

2.2 电连接器性能退化模型

设 y_{ijk} 为第 k 组加速应力下第 j 个样品在第 i 次测量时的性能退化量, t_{ijk} 为第 k 组加速应力下第 j 个样品进行第 i 次测量的时间点, $\Delta y_{ijk} = y_{ijk} - y_{(i-1)jk}$ 为性能退化量的增量, $\Delta t_{ijk} = t_{ijk} - t_{(i-1)jk}$ 为时间增量。

由 Wiener 过程的特性可知: $\Delta y_{ijk} \sim N(\mu\Delta t_{ijk}, \sigma^2\Delta t_{ijk})$, 建立性能退化数据极大似然函数:

$$L_1(\mu_k, \sigma_k) = \prod_{i=1}^{n_1} \prod_{j=1}^{n_2} \prod_{k=1}^{n_3} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k^2\Delta t_{ijk}}} e^{-\frac{(\Delta y_{ijk} - \mu_k\Delta t_{ijk})^2}{2\sigma_k^2\Delta t_{ijk}}} \quad (8)$$

式中: n_1 为单个样品测量次数; n_2 为每组加速应力下的试验样品数; n_3 为试验采用的加速应力组数; μ_k 、 σ_k 为第 k 组加速应力下 Wiener 过程的漂移和扩散参数^[22]。

2.3 加速模型

由于产品退化速率在不同应力水平下会发生变化, 为量化 Wiener 过程退化模型参数在不同应力水平的变化情况, 针对本研究开展的温湿加速试验, 采用文献[23]中的假设, 各组合应力下的 $\sigma_k = \sigma$, 与应力水平无关, 利用广义 Eyring 模型来描述 μ_k 与温度、湿度大小的关系。即:

$$\left. \begin{aligned} \mu_k &= ae^{y_{ijk}} \\ y_{ijk} &= -\frac{b}{T_k} + c \cdot RH_k \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: a 、 b 、 c 均为非负待定系数; T_k 为温度; RH_k 为相对湿度。

2.4 参数估计模型

首先, 由式(8)、(9)得到整个模型的基于性能退化数据的似然函数为:

$$L(a, b, c, \sigma^2) = \prod_{i=1}^{n_1} \prod_{j=1}^{n_2} \prod_{k=1}^{n_3} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2\Delta t_{ijk}}} e^{-\frac{(\Delta y_{ijk} - ae^{y_{ijk}}\Delta t_{ijk})^2}{2\sigma^2\Delta t_{ijk}}} \quad (10)$$

然后, 对式(10)两边取对数, 即可获得整个模型的对数似然函数, 即:

$$\begin{aligned} \ln L(a, b, c, \sigma^2) &= \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2\Delta t_{ijk}}} e^{-\frac{(\Delta y_{ijk} - ae^{y_{ijk}}\Delta t_{ijk})^2}{2\sigma^2\Delta t_{ijk}}} = \\ &= \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \left[-\frac{(\Delta y_{ijk} - ae^{y_{ijk}}\Delta t_{ijk})^2}{2\sigma^2\Delta t_{ijk}} - \ln \sqrt{2\pi\sigma^2\Delta t_{ijk}} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

接着, 通过对数似然函数 $\ln L(a, b, c, \sigma^2)$ 对参数 a, b, c, σ^2 分别求偏导数, 并使结果等于0, 即令:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \ln L(a, b, c, \sigma^2)}{\partial a} &= \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \frac{(\Delta y_{ijk} - ae^{y_{ijk}}\Delta t_{ijk}) e^{y_{ijk}}\Delta t_{ijk}}{(\sigma^2\Delta t_{ijk})} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(a, b, c, \sigma^2)}{\partial b} &= \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \frac{(\Delta y_{ijk} - ae^{y_{ijk}}\Delta t_{ijk}) a\Delta t_{ijk} e^{y_{ijk}}}{(\sigma^2 T_k \Delta t_{ijk})} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(a, b, c, \sigma^2)}{\partial c} &= \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \frac{(\Delta y_{ijk} - ae^{y_{ijk}}\Delta t_{ijk}) a\Delta t_{ijk} e^{y_{ijk}} RH_k}{(\sigma^2 \Delta t_{ijk})} = 0 \\ \frac{\partial \ln L(a, b, c, \sigma^2)}{\partial \sigma^2} &= \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \left[\frac{(\Delta y_{ijk} - ae^{y_{ijk}}\Delta t_{ijk})^2}{(\sigma^4 \Delta t_{ijk})} - \frac{1}{\sigma^2} \right] = 0 \quad (12) \end{aligned} \right.$$

最后, 得到未知参数 a, b, c, σ^2 的最大似然估计 $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \hat{\sigma}^2$, 分别表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{a} &= \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \Delta y_{ijk}}{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} e^{y_{ijk}} \Delta t_{ijk}} \\ \hat{b} &= T_k \left(c \cdot RH_k + \ln \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} a \Delta t_{ijk}}{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \Delta y_{ijk}} \right) \\ \hat{c} &= \frac{1}{RH_k} \left(\frac{b}{T_k} + \ln \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \Delta y_{ijk}}{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} a \Delta t_{ijk}} \right) \\ \hat{\sigma}^2 &= \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} (\Delta y_{ijk} - a e^{y_{ijk}} \Delta t_{ijk})^2}{\Delta t_{ijk}} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

接下来, 采取迭代的方式计算模型未知参数的最大似然估计 $(\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \hat{\sigma}^2)$ [24-25], 具体求解算法如下所述。

输入: $a^{(0)}, b^{(0)}, c^{(0)}, \sigma^{2(0)}$, 输出: $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \hat{\sigma}^2$ 。

第 1 步: 依据现有经验设定模型未知参数的初始值 $a^{(0)}, b^{(0)}, c^{(0)}, \sigma^{2(0)}$, 并记 $\theta^{(0)} = (a^{(0)}, b^{(0)}, c^{(0)}, \sigma^{2(0)})$ 。

第 2 步: 根据式 (13), 通过计算可以得到未知参数的第一次迭代结果 $\theta^{(1)} = (a^{(1)}, b^{(1)}, c^{(1)}, \sigma^{2(1)})$ 。

第 3 步: 判断迭代结果是否满足收敛准则。如果满足, 则该迭代结果即为最终期望的最大似然估计值; 反之返回第 2 步, 将此次迭代结果作为输入值, 进行下一次迭代, 并产生一系列估计值 $\{\theta^{(1)}, \theta^{(2)}, \theta^{(3)}, \dots\}$ 。

第 4 步: 输出模型未知参数最大似然估计

$\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \hat{\sigma}^2$ 。

3 电连接器寿命的评估预测

3.1 试验安排

综合考虑延寿工作军事效率和经济效益, 电连接器试验类别安排为加速退化试验, 应力施加采取恒定加速方式, 试验设计具体如下:

1) 样本选取。以某弹用电连接器为试验对象, 随机抽取 18 个样品, 对应不同应力组合分成 3 组, 每组各 6 个。

2) 试验设备。TZ-80-70-WH 型 8 立方综合环境试验箱, AT515 电阻测试仪。

3) 应力组合及水平确定。参考有关文献介绍的应力水平组合设计原则^[26], 选取温度和湿度的组合为加速应力, 应力水平分别为 $S_1(65\text{ }^\circ\text{C}, 75\%)$ 、 $S_2(85\text{ }^\circ\text{C}, 85\%)$ 、 $S_3(100\text{ }^\circ\text{C}, 95\%)$, 正常工作应力水平为 $S_0(20\text{ }^\circ\text{C}, 55\%)$ 。

4) 数据测量。试验开始前, 测量得 18 个样品初始值; 其后, 在 S_1 、 S_2 、 S_3 应力下分别间隔 96、72、48 h 对各组样品退化情况进行测量, 每组加速应力下的样品全部测量 10 次, 记录实际测量值 (y_{ijk}, t_{ijk}) 。

5) 失效判据。接触电阻实际测量值大于或等于 5 mΩ 即为失效。

3.2 性能退化数据拟合及分布检验

试验得到电连接器性能退化数据见表 1。

表 1 电连接器加速退化数据
Tab.1 Accelerated degradation data of electrical connectors

应力	样品	退化量/mΩ									
		96 h	192 h	288 h	384 h	480 h	576 h	672 h	768 h	864 h	960 h
S_1	1	0.04	0.11	0.19	0.21	0.32	0.45	0.53	0.63	0.71	0.78
	2	0.06	0.15	0.22	0.25	0.39	0.56	0.69	0.77	0.84	0.98
	3	0.13	0.14	0.29	0.33	0.41	0.58	0.71	0.82	0.88	1.06
	4	0.16	0.18	0.31	0.39	0.41	0.66	0.79	0.98	1.07	1.32
	5	0.15	0.21	0.3	0.38	0.56	0.73	0.86	1.26	1.37	1.56
	6	0.18	0.28	0.35	0.55	0.78	0.91	1.08	1.26	1.52	1.69
S_2		72 h	144 h	216 h	288 h	360 h	432 h	504 h	576 h	648 h	720 h
	1	0.13	0.18	0.25	0.31	0.49	0.51	0.58	0.66	0.73	0.78
	2	0.18	0.2	0.35	0.51	0.59	0.67	0.74	0.93	1.08	1.22
	3	0.21	0.36	0.45	0.59	0.68	0.72	0.81	0.96	1.14	1.43
	4	0.27	0.41	0.49	0.67	0.74	0.83	1.14	1.22	1.53	1.76
	5	0.26	0.42	0.53	0.77	0.81	1.01	1.25	1.58	1.75	2.14
S_3	6	0.28	0.46	0.6	0.88	0.94	1.23	1.47	1.86	2.19	2.38
		48 h	96 h	144 h	192 h	240 h	288 h	336 h	384 h	432 h	480 h
	1	0.22	0.31	0.43	0.69	0.72	0.81	1.01	1.22	1.35	1.48
	2	0.24	0.52	0.59	0.78	1.05	1.26	1.43	1.68	1.87	2.12
	3	0.38	0.65	0.81	1.12	1.37	1.64	1.85	2.03	2.24	2.51
	4	0.36	0.82	0.92	1.28	1.46	1.73	1.89	2.22	2.67	3.28
	5	0.47	0.78	1.09	1.29	1.64	1.85	2.26	2.63	3.12	3.6
	6	0.51	1.01	1.56	1.89	2.13	2.51	3.44	3.68	3.96	4.59

根据所测性能退化数据,将各不同组合应力下电连接器性能退化轨迹进行标绘,如图5所示。可以看出,在3组应力水平下,随试验时间的推移,样品电连接器

的性能退化量总体上呈线性递增变化,但个别数据略有回落,并不是完全严格递增,故考虑使用 Wiener 过程对该电连接器样品性能退化过程予以拟合。

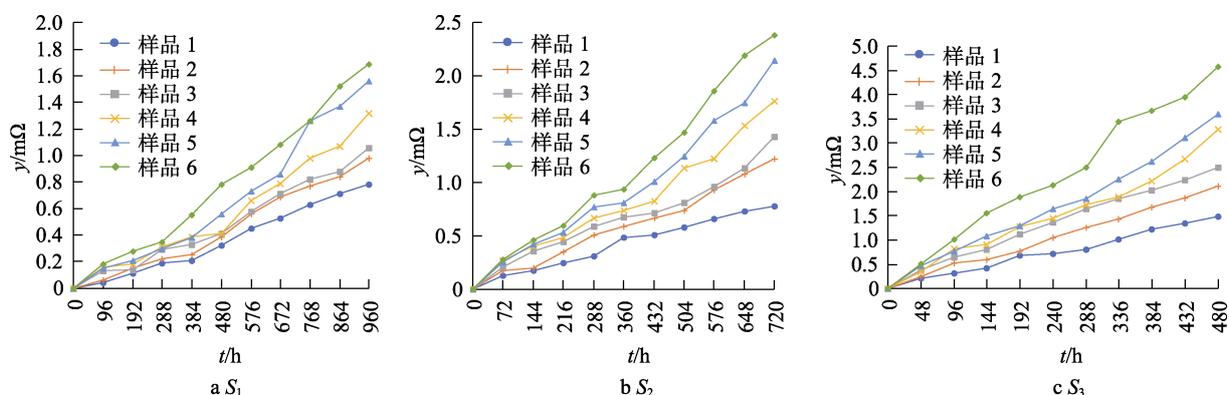


图5 3组加速应力下的性能退化数据轨迹

Fig.5 Three sets of performance degradation data tracks under acceleration stress

考虑 Wiener 过程 $\Delta y \sim N(\mu\Delta t_i, \sigma^2\Delta t_i)$ 这一特性,本文采用传统的概率分布检验方法对电连接器性能退化是否服从 Wiener 过程进行检验。考虑每组应力下,电连接器试验数据测量时间间隔相同,本文对退化数据进行整理后,对 Δy_i 值进行 Anderson-Darling 拟合优度检验。结果表明, Wiener 过程可以很好地描述本试验样品电连接器的性能退化过程。

3.3 数据统计分析

利用 Matlab 软件,将初步计算整理得到的性能退化数据增量 ($\Delta y_{ijk}, \Delta t_{ijk}$) 以及对应的 T_k, RH_k 代入式(13),采取迭代的方式进行计算,求解所得参数估计值 ($\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \hat{\sigma}^2$) 为 $(1.105, 3.427 \times 10^3, 2.621, 4.880 \times 10^{-5})$ 。

根据式(9)可得,在 S_0 条件下, $\hat{\mu} = 2.187 \times 10^{-4}$ 。由式(7)可得样品在 S_0 条件下的失效概率密度函数为:

$$f(t) = \frac{57.102}{\sqrt{t^3}} e^{-\frac{(5-2.187 \times 10^{-4}t)^2}{0.949 \times 10^{-4}t}}$$

由式(8)可得样品在 S_0 条件下的可靠度函数为:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{5-2.187 \times 10^{-4}t}{6.986 \times 10^{-3}\sqrt{t}}\right) - 10^{19} \Phi\left(3.105 \times \left(-\frac{5+2.187 \times 10^{-4}t}{6.986 \times 10^{-3}\sqrt{t}}\right)\right)$$

根据逆高斯分布的均值计算公式 $\bar{\xi} = 1/\hat{\mu}_0$, 算得样品的平均寿命为 2.286×10^4 h。

根据可靠度函数,可进一步对该型电连接器的寿命信息进行推断,进而为导弹定寿、制定预防性维修策略等提供重要的参考。

4 结语

本文以某型导弹延寿任务为牵引,对电连接器寿命预测方法进行了研究。为获得更为真实的敏应力,详细讨论了导弹服役环境;为确定关键寿命表征参数和性能退化性质,深入分析了电连接器失效机理;为减少统计建模的不稳定因素干扰,基于 Wiener 过程描述了电连接器接触电阻性能退化轨迹;为实现工程的可操作性,采用广义 Eyring 双应力加速模型并设计开展了恒定加速退化试验。结合本研究,提出以下建议供参考:

1) Wiener 过程虽能较好描述本文电连接器寿命表征量的随机情况,但在求解精度上有一定欠缺。为更精准地评估电连接器的可靠性,基于多源信息融合的方法是可以深入研究的方向,工程上可通过规范导弹管理维护单位的工作流程和作业管理要素而获得更全面、更翔实的数据信息予以支撑。

2) 就本研究而言,温湿应力试验可较为真实地反映该电连接器实际工作环境,可作为该型弹其他部分机电设备开展加速试验的应力选择参考。但若导弹服役地点、使命任务、值班规律等情况变化发生变化,仍需进一步综合考量其他环境载荷和诱导载荷影响。

参考文献:

- [1] 王玲, 杨万均, 张世艳, 等. 热带海洋大气环境下电连接器环境适应性分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 5-9.
WANG Ling, YANG Wan-jun, ZHANG Shi-yan, et al. Environmental Worthiness Analyses of Electrical Connectors in Tropic Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 5-9.

- [2] 徐廷学, 王浩伟, 张鑫. 步进加速试验中基于 Gamma 过程的可靠性建模方法[J]. 现代防御技术, 2015, 43(1): 124-128.
XU Ting-xue, WANG Hao-wei, ZHANG Xin. Reliability Modeling Method Based on Gamma Processes at Step-Stress Accelerated Tests[J]. Modern Defence Technology, 2015, 43(1): 124-128.
- [3] 孙旭波, 王浩伟, 王峰. 基于加速退化数据的某型电连接器可靠性评估[J]. 海军航空工程学院学报, 2014, 29(1): 67-71.
SUN Xu-bo, WANG Hao-wei, WANG Feng. Reliability Assessment for a Certain Type of Electrical Connector Based on Accelerated Degradation Data[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2014, 29(1): 67-71.
- [4] 骆燕燕, 马旋, 李晓宁, 等. 航空电连接器热循环试验与寿命预测[J]. 中国机械工程, 2018, 29(3): 333-339.
LUO Yan-yan, MA Xuan, LI Xiao-ning, et al. Thermal Cycling Test and Life Prediction of Aviation Electrical Connectors[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(3): 333-339.
- [5] 王浩伟, 徐廷学, 刘勇. 基于随机参数 Gamma 过程的剩余寿命预测方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(4): 699-704.
WANG Hao-wei, XU Ting-xue, LIU Yong. Remaining Useful Life Prediction Method Based on Gamma Processes with Random Parameters[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(4): 699-704.
- [6] 王浩伟, 滕克难, 奚文骏. 非恒定环境下基于载荷谱的导弹部件寿命预测[J]. 兵工学报, 2016, 37(8): 1524-1529.
WANG Hao-wei, TENG Ke-nan, XI Wen-jun. Load Spectra-Based Lifetime Prediction for Missile Components under Varying Environment[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(8): 1524-1529.
- [7] 王浩伟, 奚文骏, 冯玉光. 基于退化失效与突发失效竞争的导弹剩余寿命预测[J]. 航空学报, 2016, 37(4): 1240-1248.
WANG Hao-wei, XI Wen-jun, FENG Yu-guang. Remaining Life Prediction Based on Competing Risks of Degradation Failure and Traumatic Failure for Missiles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(4): 1240-1248.
- [8] 张仕念, 吴勋, 颜诗源, 等. 贮存使用环境对导弹性能的影响机理[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 17-22.
ZHANG Shi-nian, WU Xun, YAN Shi-yuan, et al. Influencing Mechanism of Storage/Use Environment on Missile Performance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 17-22.
- [9] 夏宏运. 电连接器组合应力加速寿命试验与统计分析的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.
XIA Hong-yun. Research on Combined Stresses Accelerated Life Test and Statistical Analysis of Electrical Connector[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.
- [10] 杨奋为. 航天电连接器质量检验专题讲座 第 4 讲 航天电连接器的电性能检验(上)[J]. 质量与可靠性, 2007(4): 56-59.
YANG Fen-wei. Lecture on Quality Inspection of Aerospace Electrical Connectors The 4th Speak Electrical Performance Test of Aerospace electrical Connectors (PART 1)[J]. Quality and Reliability, 2007(4): 56-59.
- [11] MOORE K L. A Matrix Fraction Approach to Higher-order Iterative Learning Control: 2-D Dynamics through Repetition-domain Filtrig[C]//Proceedings of the Second International Workshop on Multidimensional(ND) Systems. Czocha Castle: [s.n.], 2000.
- [12] 林思达, 潘骏, 陈文华, 等. 电连接器可靠性研究述评[J]. 机电元件, 2009, 29(4): 52-57.
LIN Si-da, PAN Jun, CHEN Wen-hua, et al. An Introductory Review on Reliability Research of Electrical Connectors[J]. Electromechanical Components, 2009, 29(4): 52-57.
- [13] 杨奋为. 军用电连接器创新发展研讨[J]. 机电元件, 2012, 32(4): 52-61.
YANG Fen-wei. Discuss on Innovation and Development of Military Electrical Connector[J]. Electromechanical Components, 2012, 32(4): 52-61.
- [14] 刘琦, 郁大照, 王琳, 等. 航空电连接器海洋环境加速试验与腐蚀仿真研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 18-27.
LIU Qi, YU Da-zhao, WANG Lin, et al. Acceleration Test and Corrosion Simulation of Aviation Electrical Connectors in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 18-27.
- [15] 魏文. 航天电连接器振动可靠性统计分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
WEI Wen. Statistical Analysis of Space-Flight Electrical Connector for Vibration Reliability[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [16] 潘骏. 航天电连接器振动可靠性建模与评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
PAN Jun. Model and Estimate of Electrical Connectors under Vibration Stress[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [17] 李奇志. 综合应力作用下航天电连接器加速寿命试验的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
LI Qi-zhi. Research on Accelerated Life Test of Electrical Connectors under Environment Multiple Stresses[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [18] 连文志. 航天电连接器综合应力加速寿命试验优化设计的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
LIAN Wen-zhi. Research on Accelerated Life Test Optimum Design of Electrical Connectors under Multiple Stresses[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [19] 冯红艺. 航天电连接器综合应力加速寿命试验优化设计与统计分析的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
FENG Hong-yi. Research on Accelerated Life Test Optimum Design and Data Statistical Analysis of Electrical

- Connectors under Multiple Stresses[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [20] 方晶敏. 航天电连接器综合应力可靠性评估与增长的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
FANG Jing-min. Research on the Evaluation and Reliability Growth of Aerospace Electrical Connectors under Multi-Ply Stress[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [21] SESHADRI V. The Inverse Gaussian Distribution[M]. New York: Oxford University Press, 1993.
- [22] 田莹, 魏训涛, 郝天坤, 等. 掘进机截齿磨损退化机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 129-134.
TIAN Ying, WEI Xun-tao, HAO Tian-kun, et al. Study on Wear Degradation Mechanism of Roadheader Pick[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(11): 129-134.
- [23] NELSON W, MEEKER W Q, ESCOBAR L A. Statistical Methods for Reliability Data[J]. Technometrics, 1998, 40(3): 255.
- [24] HARPER W V, ESCHENBACH T G, JAMES T R. Concerns about Maximum Likelihood Estimation for the Three-Parameter Weibull Distribution: Case Study of Statistical Software[J]. The American Statistician, 2011, 65(1): 44-54.
- [25] 钱萍. 航天电连接器综合应力加速寿命试验与统计分析的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
QIAN Ping. Research on Multiple Stresses Accelerated Life Test and Statistical Analysis of Aerospace Electrical Connector[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [26] 陈文华, 冯红艺, 钱萍, 等. 综合应力加速寿命试验方案优化设计理论与方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 101-105.
CHEN Wen-hua, FENG Hong-yi, QIAN Ping, et al. Theory & Method for Optimum Design of Accelerated Life Test Plan under Multiple Stresses[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12): 101-105.

责任编辑: 刘世忠