

基于维纳过程的 MEMS 陀螺仪贮存寿命评估

谭甜甜, 张世艳, 杨昊雨, 赵方超

(西南技术工程研究所 弹药贮存环境效应重点实验室, 重庆 400039)

摘要: **目的** 针对 MEMS 陀螺仪在步进应力加速试验条件下获取的性能退化数据, 提出基于维纳过程的贮存寿命评估方法及其模型准确度检验方法。**方法** 首先, 确定温度为影响 MEMS 陀螺仪性能退化的主要环境因素, 采用步进温度应力加速试验的方式获取其性能退化数据。其次, 分析各项性能参数的演变规律, 确定标度因数为表征产品性能退化的特征性能参数。最后, 采用漂移维纳过程对标度因数退化轨迹进行建模, 并外推得到常温条件下的贮存寿命。**结果** 采用留一法对模型精度进行验证, 模型准确度最低为 86.44%。可靠度水平为 0.95 时, 常温贮存 (25 °C) 条件下的寿命评估结果为 50.02 a。**结论** 基于维纳过程建立的性能退化模型的准确度在 85% 以上, 该模型可应用于指定贮存条件下 MEMS 陀螺仪的性能退化预测及贮存寿命评估。

关键词: MEMS 陀螺仪; 步进退化; 标度因数; 维纳过程; 贮存寿命评估; 留一法交叉验证

中图分类号: TJ04

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)02-0059-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.02.008

Storage Life Evaluation of MEMS Gyroscope Based on Wiener Process

TAN Tiantian, ZHANG Shiyan, YANG Haoyu, ZHAO Fangchao

(CSGC Key Laboratory of Ammunition Storage Environment Effects, Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a storage life evaluation and model accuracy verification method based on the Wiener process according to the performance degradation data of the MEMS gyroscope obtained in the step-stress acceleration test. Firstly, temperature was determined as the main environmental factor affecting the performance degradation of MEMS gyroscopes during storage, and the performance degradation data were obtained by a step-stress acceleration test. Secondly, the evolution law of each performance parameter was analyzed, and the scaling factor was determined as the characteristic performance parameter. Finally, the linear drift Wiener process was used to establish a model for the degradation trajectory of the scaling factor, and the storage life at actual natural condition was evaluated. The model accuracy was validated by the leave-one-out method, and the minimum accuracy of the model was 86.44%. According to the established model, when the reliability level was 0.95, the storage life in the actual natural environment (25 °C) was 50.02 years. The accuracy of the performance degradation model based on the Wiener process was above 85%, so the model is applicable to the performance degradation prediction and storage life evaluation of MEMS gyroscopes under specified storage conditions.

KEY WORDS: MEMS gyroscope; step-stress degradation; scaling factor; Wiener process; storage life evaluation; leave-one-out cross-validation

收稿日期: 2023-11-15; 修订日期: 2023-11-17

Received: 2023-11-15; Revised: 2023-11-17

引文格式: 谭甜甜, 张世艳, 杨昊雨, 等. 基于维纳过程的 MEMS 陀螺仪贮存寿命评估[J]. 装备环境工程, 2024, 21(2): 59-64.

TAN Tiantian, ZHANG Shiyan, YANG Haoyu, et al. Storage Life Evaluation of MEMS Gyroscope Based on Wiener Process[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(2): 59-64.

装备在实际服役时作战效能降低,主要体现在贮存过程中其基础产品各项性能参数的退化上,因此准确构建性能退化规律模型,对科学评估装备长期贮存寿命及作战效能具有重要意义。先进制导弹药相对于非制导弹药增加了制导与控制部分,包括电子系统、机械系统、光学系统等,零部件大量采用电子部件、精密机械件、光学器件^[1-2],例如导引头、惯性器件等产品。其中,惯性器件的纵向零漂对射程、侧向零漂对弹道侧偏具有重要影响,是制导弹药长期贮存寿命评估的关键薄弱环节之一^[3-6]。

加速试验通过施加某种加大应力,在不改变产品失效机理的基础上,促使试验样品在较短的时间内失效,从而缩短试验时间,提高试验效率,降低试验成本,能够较快地预测产品在正常条件下的贮存寿命,在高可靠、长寿命产品的寿命评估中发挥了重要作用,其主要包含恒定应力加速试验和步进应力加速试验 2 个重要的研究方向^[7-8]。由于步进应力加速试验的加速速率高于恒定应力试验,并且所需的试验样本与恒定应力试验相比大为减少,从而降低了试验成本,因此对于具有高价值、长寿命特征的惯性器件产品,可选择步进应力作为加速试验的应力施加方式。由于应力施加方式较恒定应力更为复杂,所以针对步进应力加速试验数据的处理方面较为局限,1980年 Nelson 理论的提出为此类数据的处理奠定了关键基础^[9]。基于 Nelson 理论,针对步进应力加速试验中获得的失效数据,主要采用由郑波等提出的 GJB 5103 中的数据处理方法^[10-11]。对于常出现的无样本失效情形,则需要充分挖掘步进退化数据中的信息,进而对产品贮存寿命进行评估。目前对于步进退化数据的处理方法主要包括数据折算和随机过程 2 种方法^[12-13]。其中,数据折算的方法原理为把步进应力下的试验数据折算为恒定应力下的试验数据,进而采用相对较为成熟的恒定应力退化数据处理方法实现贮存寿命评估。谭勇等^[14]、贾占强等^[15]、高丽娜等^[16]、罗小林等^[17]通过采用将不同应力条件下的试验时间等效折算至同一个试验应力条件下,评估得到产品贮存寿命。此类方法具有较强的可操作性,应用广泛,但其本质为对各个应力条件下的少量数据分别建模,数据规律、数据量等因素对于模型精度有较大的影响。基于维纳过程、高斯过程等随机过程的建模方法,可综合考虑到产品退化过程的随机性、动态性、退化量在时间轴上存在一定的不确定性,以及样本之间的差异性,被广泛认为可以更好地描述产品性能变化过程和失效产生机理,成为当前加速退化建模的重要技术手

段。如蔡忠义等^[18]、刘小平等^[19]、Duan 等^[20]、Sun 等^[21]、张炬工等^[22]分别采用非线性维纳过程、随机效应维纳过程、逆高斯过程建立了性能退化轨迹模型,评估得到贮存寿命。然而已有研究中,大多侧重于模型建立过程的优化,弱化了对方法的适用性和模型的检验,存在不足之处。

鉴于此,本文以某型 MEMS 惯性器件为对象,开展步进温度加速试验,针对获取的步进退化、非严格单调数据,采用维纳过程描述产品性能退化过程,外推得到常温贮存寿命。进一步针对已有研究成果中普遍存在的对于模型检验的不足之处,采用留一法结合均方根误差 RMSE、判定系数 R^2 这 2 个量化指标检验模型效果。检验结果表明,模型预测结果与试验实测结果具有较高的一致性,可为此类产品的性能退化轨迹拟合和寿命评估提供参考。

1 步进加速退化轨迹模型建立

1.1 基本模型

假设产品性能退化过程可以用式(1)所示的维纳过程进行描述:

$$X(t) = x_0 + \lambda t + \sigma_w W(t) \quad (1)$$

式中: $X(t)$ 为 t 时刻产品性能指标; x_0 为性能参数初值,不失一般性可设 $x_0=0$; λ 为漂移系数,表征性能退化速率; σ_w 为扩散系数; $W(t)$ 为标准维纳过程。

给定失效阈值为 D 时,基于维纳过程及其首次时分布,可得可靠度函数为:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{D - \lambda t}{\sigma_w \sqrt{t}}\right) - \exp\left(\frac{2\lambda D}{\sigma_w^2}\right) \Phi\left(\frac{-D - \lambda t}{\sigma_w \sqrt{t}}\right) \quad (2)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

1.2 步进应力条件下的性能退化模型

假设共有 n 个样本在 l 个应力水平下进行步进试验,每个应力水平下样本检测 k 次。记第 j 个样本在第 i 个应力水平下 $t_{i,q}^j$ ($i=1, \dots, l; j=1, \dots, n; q=1, \dots, k$) 时刻的性能退化量为 $X(t_{i,q}^j)$ 。由步进应力加速试验进程可得,第 j 个样本在第 i 个应力水平下的性能退化量初值是第 $i-1$ 个应力水平下的退化量终值,即 $X(t_{i,0}^j) = X(t_{i-1,k}^j)$ 。不同加速应力对产品的影响主要体现在产品性能退化速率的差异上,即 λ 与应力水平 S_i 有关,记为 λ_i 。进一步得到基于维纳过程的步进应力加速试验退化过程:

$$X(t_{i,q}^j) = \begin{cases} \lambda_1 t_{1,q}^j + \sigma_w W(t_{1,q}^j) & 0 \leq t_{1,q}^j < t_{1,k}^j \\ \lambda_2 (t_{i,q}^j - t_{1,k}^j) + \lambda_1 t_{1,k}^j + \sigma_w W(t_{i,q}^j) & t_{1,k}^j \leq t_{i,q}^j < t_{2,k}^j \\ \vdots & \\ \lambda_l (t_{i,q}^j - t_{l-1,k}^j) + \sum_{i=1}^{l-1} \lambda_i (t_{i,q}^j - t_{i-1,k}^j) + \sigma_w W(t_{i,q}^j) & t_{l-1,k}^j \leq t_{i,q}^j < t_{l,k}^j \end{cases} \quad (3)$$

式中: $t_{i,0}^j = t_{i-1,k}^j$ 。

则第 i 个应力水平下第 j 个样本在第 q 次相对于第 $q-1$ 次检测时的性能退化量增量为:

$$\Delta X(t_{i,q}^j) = X(t_{i,q}^j) - X(t_{i,q-1}^j) \quad (4)$$

时间间隔为:

$$\Delta t_{i,q}^j = t_{i,q}^j - t_{i,q-1}^j \quad (5)$$

进一步根据维纳过程的性质可得:

$$\Delta X(t_{i,q}^j) \sim N(\lambda_i \Delta t_{i,q}^j, \sigma_w^2 \Delta t_{i,q}^j) \quad (6)$$

1.3 加速模型与随机效应模型

当加速应力为温度时, 加速模型为阿伦尼乌斯模型, 则漂移系数 λ_i 可表示为:

$$\lambda_i = a \exp(-b/T_i) \quad (7)$$

式中: a 、 b 为未知参数; T_i 为热力学温度。

对于同一批产品来说, 由于材料缺陷、生产工艺偏差等原因, 产品个体之间往往存在差异, 导致同批产品不同个体之间的退化行为存在个体差异性。为表征产品间的个体差异性, 对未知参数 a 进行随机化处理, 得到第 i 个应力水平下第 j 个产品的漂移系数, 可表示为:

$$\lambda_i^j = a_j \exp(-b/T_i), a_j \sim N(\mu_a, \sigma_a^2) \quad (8)$$

则有:

$$\begin{aligned} \lambda_i &\sim N(\mu_a \exp(-b/T_i), \\ \sigma_a^2 \exp(-2b/T_i)) &\triangleq N(\mu_\lambda, \sigma_\lambda^2) \end{aligned} \quad (9)$$

综上所述, 可得到考虑个体差异性、温度应力后的可靠度函数表达式:

$$\begin{aligned} R_i(t) &= \Phi\left(\frac{D - \mu_\lambda t}{\sqrt{\sigma_w^2 t + \sigma_\lambda^2 t^2}}\right) - \\ &\exp\left(\frac{2\lambda D}{\sigma_w^2} + \frac{2\sigma_\lambda^2 D}{\sigma_w^4}\right) \cdot \\ &\Phi\left(\frac{2\sigma_\lambda^2 D t + \sigma_w^2 D + \sigma_w^2 \mu_\lambda t}{\sigma_w \sqrt{\sigma_w^2 t + \sigma_\lambda^2 t^2}}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

根据试验结果对式(10)中的未知参数进行估计, 并给定温度应力水平, 即可得可靠度函数, 实现可靠寿命的评估。

1.4 模型参数求解

由式(6)建立极大似然函数为:

$$\begin{aligned} \ln L &= -\frac{nlk}{2} [\ln(2\pi) + \ln \sigma_w^2] - \\ &\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^l \sum_{q=1}^k \ln(\Delta t_{i,q}^j) - \\ &\frac{1}{2\sigma_w^2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^l \sum_{q=1}^k \frac{[\Delta X(t_{i,q}^j) - \lambda_i^j \Delta t_{i,q}^j]^2}{\Delta t_{i,q}^j} \end{aligned} \quad (11)$$

将式(8)代入可得:

$$\begin{aligned} \ln L &= -\frac{nlk}{2} [\ln(2\pi) + \ln \sigma_w^2] - \\ &\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^l \sum_{q=1}^k \ln(\Delta t_{i,q}^j) - \frac{1}{2\sigma_w^2} \\ &\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^l \sum_{q=1}^k \frac{\Delta X(t_{i,q}^j) - a_j \exp(-b/T_i)(t_{i,q}^j - t_{i,q-1}^j)^2}{t_{i,q}^j - t_{i,q-1}^j} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: a_j 、 σ_w^2 、 b 为未知参数。

分别令式(12)关于 a_j 和 σ_w^2 的一阶偏导数为 0, 即:

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L}{\partial \sigma_w^2} = 0 \\ \frac{\partial \ln L}{\partial a_j} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

可得:

$$\hat{a}_j = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{q=1}^k \Delta X(t_{i,q}^j) \exp(-b/T_i)}{\sum_{i=1}^l \sum_{q=1}^{k_i} \exp(-2b/T_i)(t_{i,q}^j - t_{i,q-1}^j)} \quad (14)$$

$$\hat{\sigma}_w^2 = \frac{1}{nlk} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^l \sum_{q=1}^k \frac{(\Delta X(t_{i,q}^j) - \hat{a}_j \exp(-b/T_i)(t_{i,q}^j - t_{i,q-1}^j))^2}{t_{i,q}^j - t_{i,q-1}^j} \quad (15)$$

由式(14)、(15)可得, a_j 、 σ_w^2 的值均依赖于未知参数 b , 因此可采用以下方法依次进行求解:

1) 估计 \hat{b} 。将 \hat{a}_j 、 $\hat{\sigma}_w^2$ 和试验数据代入对数似然函数表达式(12), 得到的表达式中只有未知参数 b , 极大化该项对数似然函数^[23], 可得到参数估计值。

2) 估计 \hat{a}_j 和 $\hat{\sigma}_w^2$ 。将 1) 中得到的 \hat{b} 代入式(14)~(15), 即可得到 \hat{a}_j 和 $\hat{\sigma}_w^2$ 。

则 $\hat{\mu}_a$ 和 $\hat{\sigma}_a^2$ 为:

$$\hat{\mu}_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \hat{a}_j, \hat{\sigma}_a^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\hat{a}_j - \hat{\mu}_a)^2 \quad (16)$$

由此可得到漂移系数的均值和方差:

$$\hat{\mu}_\lambda = \hat{\mu}_a \exp(-\hat{b}/T_i), \hat{\sigma}_\lambda^2 = \sigma_a^2 \exp(-2\hat{b}/T_i) \quad (17)$$

将给定的常温条件 T_0 、失效阈值 D 、 $\hat{\mu}_\lambda$ 、 $\hat{\sigma}_w^2$ 、 $\hat{\sigma}_\lambda^2$ 代入式(10), 即可得可靠度函数及指定可靠度水平下的贮存寿命水平。

1.5 模型检验

采用留一法交叉检验退化轨迹模型误差。根据 $n-1$ 组性能检测数据建立模型, 并估计得到模型参数, 保留 1 组样本数据作为模型检验数据, 为避免数据选取的随机性, 按照以下步骤执行遍历操作。

S1: 选择样本编号为#1 的样本数据作为模型检验数据。

S2: 代入其余 $n-1$ 组数据, 建立模型并估计参数。

S3: 计算模型预测均值, 根据式 (18) 和式 (19) 计算均方误差 R_{RMSE} 与判定系数 R^2 :

$$R_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{kl} \sum_{i=1}^{kl} (\hat{y}_i - y_i)^2} \tag{18}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{kl} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{kl} (y_i - \bar{y})^2} \tag{19}$$

S4: 选择样本编号为#2 的样本数据作为模型检验数据, 重复 S2~S3, 直至遍历所有样本。

S5: 取 R_{RMSE} 的均值和 R^2 的最小值作为模型最终量化检验结果。

2 实例验证

某型 MEMS 陀螺仪是基于 MEMS 工艺, 利用柯氏效应和石英晶体的压电/逆压电效应研制的测量载体角速度的 MEMS 惯性传感器, 可用于工业领域各类载体的姿态测量与控制、导航与制导。为评估该型 MEMS 陀螺仪在常温条件下的贮存寿命, 本文选取 24 个试验样品开展了步进应力加速试验。

2.1 试验条件

通过对产品结构进行分析, 确定加速贮存寿命试验以温度为加速应力。通过温度特性确认试验, 确定试验最高温度应力为 110 °C。试验应力水平设置参照 GJB 5103: 最高温度应力为 110 °C, 应力的步长大体相等, 分别设置为 80、90、100、110 °C, 性能检测周期设置见表 1。

表 1 步进应力加速试验性能检测周期设置
Tab.1 Testing cycle of step-stress accelerated test

温度/°C	性能检测时间/d	累积试验时间/d
80	18	18
	18	36
	19	55
90	14	69
	14	83
	13	96
100	9	105
	9	114
	10	124
110	5	129
	5	134
	4	138

2.2 试验结果分析

根据表 1 中的检测周期定期对 MEMS 陀螺仪的零偏、角度随机游走、零偏稳定性、零偏重复性、标度因数、标度因数非线性度、标度因数不对称度等性能参数进行检测^[24-25], 结合该型 MEMS 陀螺仪各项性能参数失效判据初步分析试验结果。试验结果显示, 加速试验过程中, 所有产品均未发生失效。随着试验时间的增加, 标度因数总体呈现出递减的趋势, 且样本数据的分散性增加。除标度因数外, 其他参数指标值总体呈随机波动变化, 无明显变化趋势。MEMS 陀螺仪的标度因数在步进温度应力加速试验后的变化曲线如图 1 所示。

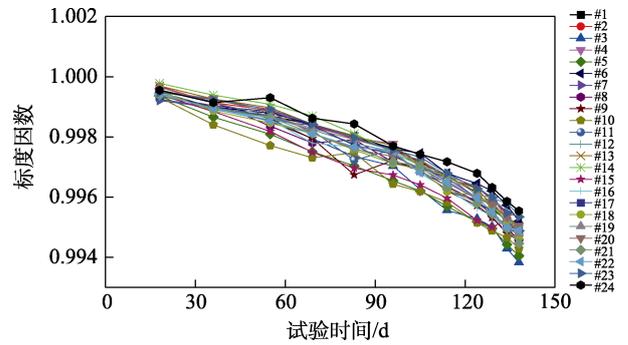


图 1 标度因数步进应力加速退化轨迹
Fig.1 Step-stress accelerated degradation trajectories of the scaling factor

由图 1 可得, 在步进温度应力的加速试验下, 各个样本的标度因数参数呈现出线性递减趋势。结合该型 MEMS 陀螺仪标度因数的合格指标要求为 0.95~1.05, 若进一步延长试验时间, 标度因数会超出失效阈值下限, 导致产品失效。因此, 本文选取标度因数作为 MEMS 陀螺仪的特征性能参数, 进行性能退化建模。

2.3 产品贮存寿命评估

由试验条件可得各项参数: 样本数 $n=24$, 应力水平个数 $l=4$, 每个应力水平下样本检测次数 $k=3$, 失效阈值取区间范围下限 $D=0.95$ 。将样品检测数据代入上文中建立的模型, 可得模型各项参数估计结果见表 2。

表 2 维纳过程模型参数估计结果
Tab.2 Model parameter estimation results of Winner process

\hat{b}	$\hat{\mu}_a$	$\hat{\sigma}_a^2$	$\hat{\mu}_\lambda$	$\hat{\sigma}_\lambda^2$	$\hat{\sigma}_w^2$
6 180.50	-805.24	6 074.76	-8.00×10^{-7}	6.00×10^{-15}	1.97×10^{-5}

表 2 中的 $\hat{\mu}_\lambda$ 和 $\hat{\sigma}_\lambda^2$ 指常温应力下 (25 °C) 的参数估计值。将各项参数值代入式 (10), 即可求得可靠度函数的具体表达式, 绘制可靠度函数曲线如图 2 所示。由图 2 可得, 在贮存条件为 25 °C 时, 给定可靠度水平为 0.95, 该型 MEMS 陀螺仪的贮存寿命为 50.02 a。

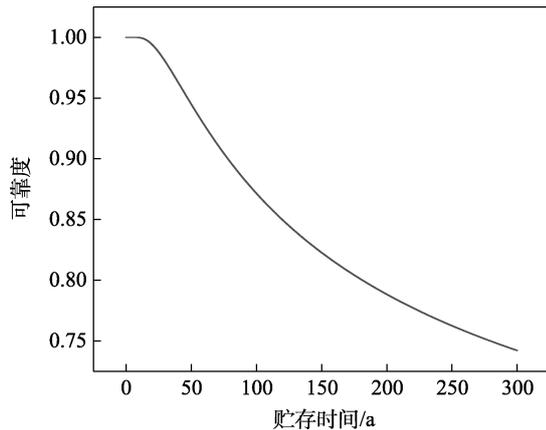


图 2 MEMS 陀螺仪可靠性曲线
Fig.2 Reliability curves of MEMS gyroscope

2.4 模型检验

采用各个样本数据作为模型检验数据,采用上文中的方法对性能退化模型进行检验,得到结果见表 3。由表 3 可得,在 24 次检验结果中, R_{RMSE} 平均值为 3.12×10^{-4} , R^2 最小值为 0.864 4,即模型准确度最低为 86.44%。以上 2 项指标说明基于维纳过程的性能退化建模与数据拟合效果较好,模型准确度高于 85%。

表 3 性能退化模型检验结果
Tab.3 Test results of degradation model

样品编号	$R_{RMSE}/10^{-4}$	R^2	样品编号	$R_{RMSE}/10^{-4}$	R^2
#1	2.42	0.987 9	#13	1.70	0.994 8
#2	0.35	0.999 8	#14	0.95	0.998 5
#3	10.40	0.864 4	#15	0.79	0.998 3
#4	3.40	0.983 9	#16	1.04	0.997 5
#5	8.11	0.888 2	#17	0.74	0.999 0
#6	3.89	0.969 3	#18	1.81	0.994 2
#7	0.54	0.999 4	#19	0.38	0.999 8
#8	2.97	0.985 4	#10	2.29	0.988 4
#9	2.69	0.986 1	#21	3.83	0.977 1
#10	5.57	0.934 7	#22	0.65	0.999 1
#11	1.46	0.995 4	#23	5.33	0.933 1
#12	6.09	0.900 6	#24	7.42	0.876 8

3 结语

本文基于某型 MEMS 陀螺仪步进温度加速退化试验数据,建立了带有线性漂移项的维纳过程模型,模拟特征性能参数退化轨迹。进一步针对已有研究中该模型普遍缺乏量化验证的问题,提出留一法交叉验证模型准确度。最终得到的均方误差和判定系数 2 个模型评价指标显示,模型准确度高于 85%。结果表明,建立的维纳过程模型能综合考虑样品退化过程的随机性以及各平行样之间差异性,适用于该型 MEMS 陀螺仪步进应力加速退化数据的处理与验证,可推广应用于具有相似数据结构的步进应力加速贮存寿命评估模型建立与验证。

参考文献:

- [1] 仲伟君,李德胜,崔亮.一种制导弹药电子部件可靠性预计方法[J].装备环境工程,2014,11(2):103-105.
ZHONG W J, LI D S, CUI L. A Method for the Reliability Prediction of Electronic Components in Guided Munitions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(2): 103-105.
- [2] 蒲亚博,王艳艳,赵方超,等.典型制导弹药故障预示预警系统的设计[J].兵器装备工程学报,2021,42(8):39-45.
PU Y B, WANG Y Y, ZHAO F C, et al. Design of Fault Prediction and Early Warning System for Typical Guided Ammunition[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(8): 39-45.
- [3] 宋卫东,张进忠.惯导陀螺零漂对末制导炮弹道性能的影响[J].南京理工大学学报(自然科学版),2010,34(2):161-165.
SONG W D, ZHANG J Z. Influence of Zero Drift of Inertial Guide Gyro on Trajectory Characteristics of Terminal Guide Shell[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2010, 34(2): 161-165.
- [4] 黄琛,穆希辉,牛跃听,等.基于加速寿命试验的陀螺仪贮存寿命评估概述[J].飞航导弹,2017(10):62-66.
HUANG C, MU X H, NIU Y T, et al. Overview of Gyroscope Storage Life Evaluation Based on Accelerated Life Test[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(10): 62-66.
- [5] 褚进,陈瑞军,张宝.激光末制导炮弹高原弹道特性研究[J].火力与指挥控制,2021,46(9):182-186.
CHU J, CHEN R J, ZHANG B. Research on Plateau Ballistic Features of Laser Terminal Guidance Projectile[J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(9): 182-186.
- [6] 张世艳,吴护林,赵方超,等.某机械陀螺长贮性能演变规律及性能退化模型研究[J].装备环境工程,2023,20(3):15-21.
ZHANG S Y, WU H L, ZHAO F C, et al. Performance Evolution Law and Degradation Model of Mechanical Gyroscope during Long-Term Storage[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 15-21.
- [7] 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/LV/LU/LYU) J J, LI X K. Review of Reliability Accelerated Life Test[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2021, 39(1): 94-100.
- [8] CHEN W H, GAO L, PAN J, et al. Design of Accelerated Life Test Plans—Overview and Prospect[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 13.
- [9] NELSON W. Accelerated Life Testing-Step-Stress Models and Data Analyses[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1980, R-29(2): 103-108.
- [10] GJB 5103—2004, 弹药原件加速寿命试验方法[S].
GJB 5103—2004, Accelerated Life Test Method for Ammunition Components[S].
- [11] 郑波,杨宝强,南彬,等.步进应力加速寿命试验在预

- 测底火贮存寿命中的应用[J]. 火工品, 2003(1): 19-21.
ZHENG B, YANG B Q, NAN B, et al. Application of Stepping Stress Acceleration Life Test in Forecasting Primer Storage Life[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2003(1): 19-21.
- [12] 刘震宇. 多性能参数相依情形下的可靠性建模与评估方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014.
LIU Z Y. Reliability Modeling and Assessment Method for Dependent Systems with Multiple Performance Characteristics[D]. Beijing: Beihang University, 2014.
- [13] 李天梅, 司小胜, 刘翔, 等. 大数据下数模联动的随机退化设备剩余寿命预测技术[J]. 自动化学报, 2022, 48(9): 2119-2141.
LI T M, SI X S, LIU X, et al. Data-Model Interactive Remaining Useful Life Prediction Technologies for Stochastic Degrading Devices with Big Data[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(9): 2119-2141.
- [14] 谭勇, 周堃, 罗天元, 等. 步进应力加速寿命试验数据处理方法在产品定寿试验中的应用[J]. 装备环境工程, 2017, 14(1): 30-33.
TAN Y, ZHOU K, LUO T Y, et al. Application of Data Processing Method for Step-up Stress Accelerated Life Test in Product Life Testing[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(1): 30-33.
- [15] 贾占强, 蔡金燕, 梁玉英, 等. 基于步进加速退化试验的电子产品可靠性评估技术[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1279-1285.
JIA Z Q, CAI J Y, LIANG Y Y, et al. Reliability Assessment Technology for Electronic Equipment Based on Step-up-Stress Accelerated Degradation Testing[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(7): 1279-1285.
- [16] 高丽娜, 赵领. 温度应力下基于步进加速退化试验的电子器件寿命预测[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(6): 72-76.
GAO L N, ZHAO L. Life Prediction of Electronic Equipments Based on Step-Stress Accelerated Degradation Test under Temperature Stress[J]. Electronic Components and Materials, 2014, 33(6): 72-76.
- [17] 罗小林, 张亚. 无线电引信步进应力加速度试验数据处理方法[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(6): 87-89.
LUO X L, ZHANG Y. Data Processing Method for Stepping Stress Acceleration Test of Radio Fuze[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2008, 29(6): 87-89.
- [18] 蔡忠义, 陈云翔, 张净敏, 等. 非线性步进加速退化数据的可靠性评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(3): 576-582.
CAI Z Y, CHEN Y X, ZHANG Z M, et al. Reliability Assessment Method of Nonlinear Step-Stress Accelerated Degradation Data[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(3): 576-582.
- [19] 刘小平, 崔德军, 吴振宇, 等. 具有随机效应维纳过程的步进应力加速退化试验优化设计[J]. 控制与决策, 2019, 34(12): 2558-2566.
LIU X P, CUI D J, WU Z Y, et al. Optimal Design of Step-Stress Accelerated Degradation Test Based on Wiener Process with Random Effects[J]. Control and Decision, 2019, 34(12): 2558-2566.
- [20] DUAN F J, WANG G J. Optimal Step-Stress Accelerated Degradation Test Plans for Inverse Gaussian Process Based on Proportional Degradation Rate Model[J]. Journal of Statistical Computation and Simulation, 2018, 88(2): 305-328.
- [21] SUN L, GU X H, SONG P. Accelerated Degradation Process Analysis Based on the Nonlinear Wiener Process with Covariates and Random Effects[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 5246108.
- [22] 张烜工, 穆希辉. 基于非线性维纳过程的末制导炮弹控制舱光耦贮存寿命评定[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(4): 75-78.
ZHANG (H/X)G, MU X H. Evaluation of Optocoupler Storage Life of Terminal Guided Projectile Based on Nonlinear Wiener Process[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(4): 75-78.
- [23] 谢中华. MATLAB 统计分析与应用: 40 个案例分析[M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
XIE Z H. Statistical Analysis and Application of MATLAB: Analysis of 40 Cases[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2015.
- [24] 陈俊光, 谷专元, 何春华, 等. MEMS 惯性器件的主要失效模式和失效机理研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3): 1-5.
CHEN J G, GU Z Y, HE C H, et al. Study of Main Failure Modes and Failure Mechanisms of MEMS Inertial Devices[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(3): 1-5.
- [25] 张树侠, 何昆鹏. 陀螺仪性能参数表征与评定[J]. 导航与控制, 2010, 9(2): 33-35.
ZHANG S X, HE K P. The Performance Parameters and Selection on Gyroscope Characterization[J]. Navigation and Control, 2010, 9(2): 33-35.