

基于 Wiener 过程的电子测量设备性能退化建模与寿命预测

谭勇^{1,2}, 张紫娟¹, 黄婷婷³, 朱玉琴^{1,2}, 周堃^{1,2}, 张凯^{1,2}

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.国防科技工业自然环境试验研究中心, 重庆 400039;
3.北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: **目的** 开展电子测量设备寿命预测, 评价其健康状态, 提升装备状态监测的准确性, 充分发挥装备性能。**方法** 利用电子测量设备长期观测的性能退化数据, 基于 Wiener 过程建立电子测量设备性能退化模型和可靠性模型, 并结合环境剖面参数, 进行性能退化模型参数估计。**结果** 以某型电子测量设备为例, 建立了拟合性较好的性能退化建模, 并进行寿命预测。**结论** 该方法降低了电子测量设备在寿命预测过程中的试验成本, 提升了寿命预测技术的实践能力, 具有一定的工程应用价值。

关键词: Wiener 过程; 电子测量设备; 退化; 寿命预测

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.03.014

中图分类号: TJ01

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)03-0067-04

Performance Degeneration Modeling and Life Prediction of Electronic Measuring Equipment Based on Wiener Process

TAN Yong^{1,2}, ZHANG Zi-juan¹, HUANG Ting-ting³, ZHU Yu-qin^{1,2}, ZHOU Kun^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}

(1. Southwest Research Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China; 2. Natural Environmental Test and Research Center of Science, Technology and Industry for National Defense, Chongqing 400039, China;
3. Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: Objective To predict the life of electronic measuring equipment, evaluate its health state, improve the accuracy of equipment condition monitoring and give full play to the equipment performance. **Methods** Based on the Wiener process, the performance degradation model and reliability model of the electronic measurement equipment were established, and the model parameters were estimated in combination with the degradation data and the environmental parameters of the electronic measuring equipment. **Results** With a certain type of electronic measuring equipment as an example, the performance degradation modeling with better fitting was built, and life prediction was carried out. **Conclusion** This method reduces the test cost of the electronic measuring equipment in the life prediction, improves the practical ability of the life prediction technology, and has certain engineering application value.

KEY WORDS: Wiener process; electronic measuring equipment; degeneration; life prediction.

电子测量设备是指利用电子技术进行测量、分析的仪器, 在航天、航空、船舶等多个领域中应用十分

广泛, 主要用途为测量装备的电气参数, 评价装备状态。电子测量设备的失效会影响装备性能的发挥, 而

寿命预测技术可有效地评价电子测量设备的健康状态。目前常用的寿命预测技术分为基于失效时间和性能退化的预测技术两种。前者基于大量数据的统计原理,需要的样本数量大、时间长,工程应用困难;后者的关键是利用性能退化数据建立退化模型,而不需要设备的实际失效时间,试验成本较低,便于工程应用。电子测量设备一般具有可靠性高、寿命长、成本高的特点,要想通过开展大量寿命试验,统计失效时间,从而预测寿命的方案,试验成本高、时间长,不利于工程应用。开展少量样本试验,获取电子测量设备性能退化数据,从而预测寿命的方案更利于工程实践。

目前在利用随机过程开展电子测量设备退化建模时,常利用 Wiener 过程。结合电子测量设备的退化数据,估计模型参数,依据退化模型进而建立寿命分布函数,评估电子测量设备的剩余寿命。

1 电子测量设备性能退化模型

电子测量设备的主要性能表征参数是测量精度。受工作或贮存环境的影响,测量精度会随时间缓慢退化,其退化过程一般是随机过程,而 Wiener 过程作为常用的随机过程,常用于电子设备性能退化建模^[1]。基于 Wiener 过程建立的电子测量设备性能退化模型为:

$$X(t) = X(0) + \int_0^t r[w_1(t), w_2(t), w_3(t)]dt + \sigma B(t) \quad (1)$$

式中: $X(t)$ 为 t 时刻电子测量设备的测量精度; $X(0)$ 为初始时刻电子测量设备的测量精度; $r[w_1(t), w_2(t), w_3(t)]$ 为电子测量设备性能退化率函数; σ 为扩散参数; $B(t)$ 为标准布朗运动。

电子测量设备测量精度的退化一般受工作或贮存时温度、湿度和盐雾环境的影响,在电子测量设备性能退化率函数 $r[w_1(t), w_2(t), w_3(t)]$ 中, $w_1(t)$ 代表 t 时刻温度, $w_2(t)$ 代表 t 时刻湿度, $w_3(t)$ 代表 t 时刻盐雾浓度。依据多应力广义阿伦尼斯模型形式^[2],建立电子测量设备的退化率函数:

$$r[w_1(t), w_2(t), w_3(t)] = b_0 + b_1 \cdot w_1(t) + b_2 \cdot \frac{1}{w_2(t)} + b_3 \cdot w_3(t) \quad (2)$$

环境应力的独立项和交互项都会影响电子测量设备的退化率,根据试验观测结果分析,一般环境应力独立项为主要项,交互项为次要项。为减少待估参数的数量,式(2)中只保留环境应力的独立项,其中, b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 为待估参数。

2 模型参数估计

文中以电子测量设备不同时间段的退化数据和

对应的环境参数为基础,进行退化模型参数估计。基于布朗运动过程的独立增量特性^[3],对退化模型积分部分进行累加求和近似,进而对待估参数 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 和扩散参数 σ 进行估计。退化模型 $X(t)$ 可以近似为:

$$X(t) \approx X(0) + \sum_{i=1}^m r[w_1(t_i), w_2(t_i), w_3(t_i)]\Delta t_i + \sigma B(t) \quad (3)$$

式中: m 为从 0 时刻直到 T 时刻退化变量的累积观测次数; Δt_i 为观测时间间隔, $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$; $w_k(t_i)$ 为时间区间 $[t_{i-1}, t_i]$ 内的环境应力 $w_k(t_i)$, $k=1, 2, 3$ 。

根据布朗运动的独立增量特性可得:

$$\Delta X(t_i) = X(t_i) - X(t_{i-1}) \quad (4)$$

$$\Delta X(t_i) \sim N(r[w_1(t_i), w_2(t_i), w_3(t_i)]\Delta t_i, \sigma^2 \Delta t_i) \quad (5)$$

$$\frac{\Delta X(t_i)}{\Delta t_i} \approx r[w_1(t_i), w_2(t_i), w_3(t_i)] \quad (6)$$

在对退化率函数中的待估参数进行估计时,利用电子测量设备的退化数据求得 $\Delta X(t_i)/\Delta t_i$ 结果,通过回归分析实现对退化率函数中待估参数的估计。

通过最大似然法对退化模型中的扩散参数 σ 进行估计,首先将数据中的退化率累积效应项剔除,即:

$$\Delta H(t_i) = X(t_i) - X(0) - \sum_{i=1}^m r[w_1(t_i), w_2(t_i), w_3(t_i)]\Delta t_i = \sigma B(t) \quad (7)$$

由于布朗运动是微小粒子表现出的无规则运动,代表一种随机涨落现象,服从正态分布,即 $\sigma B(t) \sim N(0, \sigma^2 t)$ ^[4], 则:

$$\Delta H(t_i) \sim N(0, \sigma^2 \Delta t_i) \quad (8)$$

其似然函数为:

$$L(\sigma) = \prod_{i=1}^m \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi \Delta t_i}} \exp \left[-\frac{\Delta H(t_i)^2}{2\sigma^2 \Delta t_i} \right] \quad (9)$$

对数似然函数为:

$$l(\sigma) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \ln(2\pi \Delta t_i) - \frac{1}{2} m \ln \sigma^2 - \sum_{i=1}^m \left[\frac{\Delta H(t_i)^2}{2\sigma^2 \Delta t_i} \right] \quad (10)$$

对扩散参数 σ 求一阶偏导:

$$\frac{\partial l(\sigma)}{\partial \sigma^2} = -\frac{m}{2\sigma^2} + \frac{1}{\sigma^4} \sum_{i=1}^m \left[\frac{\Delta H(t_i)^2}{2\Delta t_i} \right] = 0 \quad (11)$$

扩散参数 σ 的估计值为:

$$\sigma^2 = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{\Delta H(t_i)^2}{\Delta t_i} \right] \quad (12)$$

3 电子测量设备的寿命预测

得到电子测量设备的退化模型后,根据失效阈值和未来环境剖面,可对电子测量设备的可靠度进行预测。假设 D 为失效阈值, t_s 为退化数据首次穿越阈值

的时间，可得其可靠度模型为：

$$R(t)=1-\int_0^t f(t)dt$$

(13)

式中： $f(t)$ 为概率密度函数。由 Daniels^[3]切线逼近法可以得到 $f(t)$ 的表达式：

$$f(t)=\frac{D-X(t)}{\sqrt{2\pi\sigma^2t^3}}\exp\left[-\frac{(D-X(t))^2}{2\sigma^2t}\right]$$

(14)

4 实例分析

以某型电子测量设备长期观测获取的性能退化数据和环境剖面数据为例，进行退化建模与寿命预测。表 1 为长期观测获取的环境剖面数据和对应的性能退化数据。

表 1 环境剖面数据和性能退化数据

观测时间/d	温度/℃	相对湿度/%	盐雾/(mg·100 ⁻¹ cm ⁻² ·d ⁻¹)	退化数据/%
0	23	68	0.0006	0.063
23	27	68	0.001	0.067
62	28	70	0.001	0.076
100	32	63	0.0001	0.080
140	32	61	0.004	0.072
180	31	60	0.005	0.080
217	33	58	0.0008	0.077
249	28	77	0.01	0.081
277	26	82	0.01	0.086
369	25	68	0.02	0.088

利用退化数据，由式（4）和式（6），可求得退化率数据。将环境剖面数据代入退化率函数中，通过多元回归方法即可求得退化率函数中的待估参数 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 。利用公式（7）—（12），可对扩散参数 σ 值进行估计，表 2 为各待估参数的估计结果。

表 2 参数估计结果

参数符号	b_0	b_1	b_2	b_3	σ
估计结果	1.07E-6	2.87E-8	-5.79E-4	-6.23E-5	9.39E-6

将表 2 中的参数结果代入式（1）即可得到电子测量设备的性能退化模型。该模型由三个部分组成：第一部分表示电子测量设备的初始性能；第二部分表示随时间 t 的性能退化量；第三部分表示在 t 时刻，退化量服从 $N(0,\sigma^2\Delta t_i)$ 分布的概率，其扩散参数 σ 决定了分布幅度。利用观测的退化数据对退化模型预测数据进行拟合优度检验，拟合优度检验系数计算式为：

$$Q=\sum_{i=1}^n(y_i-y_i^*)^2$$

(15)

$$R=1-\sqrt{Q/\sum_{i=1}^ny_i^2}$$

(16)

式中： y_i 为观测数据； y_i^* 为预测数据； Q 为观测数据与预测数据的残差平方和； n 为观测次数； R 为拟合优度检验系数。

拟合优度是衡量回归模型对观测值的拟合程度，是表达因变量与所有自变量之间的总体关系，取值范围为[0,1]。 R 越大，说明回归模型对观测值的拟合程度越好；反之，说明回归模型对观测值的拟合程度越差。经计算，拟合优度检验系数 R 值为 0.947，可见建立的退化模型对观测数据的拟合程度较好，观测数据与预测数据曲线对比如图 1 所示。

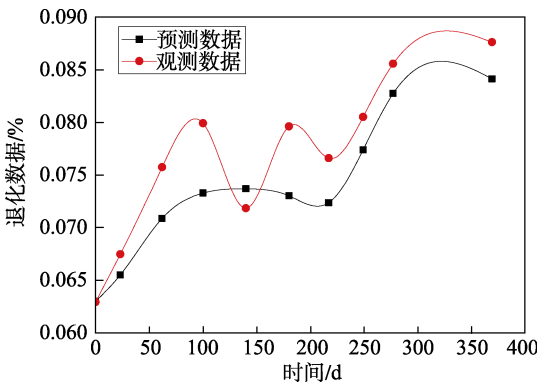


图 1 观测数据与预测数据对比

假设电子测量设备未来经历的环境剖面与前期观测阶段相同，根据已估计出的参数和失效阈值 D ，可以计算出电子测量设备退化数据首次穿越失效阈值的时间及其对应的概率密度函数 $f(t)$ 和可靠度函数 $R(t)$ 。假设该型电子测量设备的失效阈值为 0.2%，利用式（1）可计算出首次穿越失效阈值的时间约为 6.5 年，利用式（13）和（14），可计算出 6.5 年时该电子测量设备的可靠度约为 0.81。

5 结语

电子测量设备在长期使用时会表现出较为隐蔽的退化型失效，影响人们对装备测量结果的判断，从而影响装备性能的发挥。文中基于 Wiener 过程原理，利用对电子测量设备观测获取的性能退化数据和环境剖面数据，建立了拟合程度较好的性能退化模型及其对应的可靠度预计模型，并进行了寿命及可靠性预测。利用建立的性能退化模型，对不同时间段电子测量设备性能参数进行预测，其结果与试验结果之间的拟合优度检验系数达到了 0.947。该方法得到的性能退化模型拟合性较好，同时通过可靠性预测模型预计该型电子测量设备在 6.5 年时的可

靠度约为 0.81。

基于性能退化数据的建模和寿命预测方法可为具有高可靠、长寿命和小样本特点的电子测量设备及其类似产品的寿命预测问题提供解决途径。该方法建立的退化模型及可靠度预计模型依赖于前期获取的退化数据,因此预测结果准确程度受获取的先验信息数量和精度的影响。利用该方法可降低电子测量设备包含类似产品在寿命预测过程中的试验成本,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 王书锋,王友仁,姜媛媛. Wiener 过程性能退化电子产品的剩余寿命预测方法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(5): 17-20.
- [2] 林震,姜同敏,程永生. 阿伦尼斯模型研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2005, 23(6): 12-14.
- [3] 杨静,王丽霞. 爱因斯坦与布朗运动的数学理论[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2006, 36(1): 169-172.
- [4] 尹慧琳,杨筱菡,陆恒. Wiener 过程性能退化产品可靠性评估新 Bayes 方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(8): 1234-1238.
- [5] 范金城,梅长林. 数据分析(第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] DANIELS H E. Approximating the First Crossing-time Density for a Curved Boundary[J]. Bernoulli, 1996, 2(2): 133-143.
- [7] LIAO H, TIAN Z. A Framework for Predicting the Remaining Useful Life of a Single Unit under Time-varying Operating Conditions[J]. IIE Transactions, 2013, 45(9): 964-980.
- [8] 司小胜,周东华,胡昌华. 带测量误差的非线性退化过程建模与剩余寿命估计[J]. 自动化学报, 2012, 38(1): 1-12.
- [9] 马伦,康建设,赵春宇,等. 武器装备故障预测建模方法选择研究[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(7): 1929-1938.
- [10] 谷玉波,贾云献,张英波. 基于 Gamma 退化过程的剩余寿命预测及维修决策优化模型研究[J]. 轴承, 2013(4): 44-49.
- [11] BIAN L, GEBRAEEL N. Stochastic Methodology for Prognostics under Continuously Varying Environmental Profiles[J]. Statistical Analysis & Data Mining, 2013, 6(3): 260-270.
- [12] BIAN L, GEBRAEEL N, KHAROUFEH J. Degradation Modeling for Real-Time Estimation of Residual Lifetimes in Dynamic Environments[J]. IIE Transactions, 2014, 47(5): 471-486.
- [13] TANG L, CHANG D. Reliability Prediction Using Non-destructive Accelerated-degradation Data: Case Study on Power Supplies [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 44(4): 562-566.
- [14] SI X S, WANG W B, HU C H, et al. Remaining Useful Life Estimation—A Review on the Statistical Data Driven Approaches[J]. European Journal of Operational Research, 2011, 213(1): 1-14.
- [15] 彭宇,刘大同,彭喜元. 故障预测与健康管理技术综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 1-9.