

DOI:10.11918/202405035

基于组合模型的电连接器剩余寿命预测

骆燕燕¹, 祁侨绅¹, 王永鹏², 刘 昊³, 安劲昭⁴

(1. 电工产品可靠性技术省部共建协同创新中心(河北工业大学), 天津 300401; 2. 国家电网山东省电力公司邹平供电公司, 山东 邹平 256200; 3. 国家电网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北 唐山 063000; 4. 天津津航计算技术研究所, 天津 300308)

摘要: 为预测电连接器的剩余寿命, 提出了一种自适应 Wiener 模型与离散灰色模型(discrete grey model, DGM(1,1))组合的电连接器寿命预测方法。首先, 根据 Arrhenius 模型选取温度循环试验的应力大小, 确定试验周期、暴露时间及温升率等参数, 选择接触电阻为退化特征量, 进行温度循环试验; 其次, 分别采用自适应 Wiener 模型与 DGM(1,1)模型对温度循环下的电连接器剩余寿命进行预测, 对比不同温度应力下两种模型伪寿命预测结果, 提出了自适应 Wiener 与 DGM(1,1)的组合模型; 最后, 采用最小二乘法估计 Arrhenius 模型中参数, 外推正常温度下电连接器寿命。结果表明: DGM(1,1)模型在较低的温度应力下预测结果更准确, 而自适应 Wiener 模型在较高的温度应力下预测结果更准确; 在综合考虑不同温度应力模型适用性的情况下, 构建的自适应 Wiener 和 DGM(1,1)组合模型能更精准地预测电连接器的剩余寿命。研究结果可为电连接器的维修决策提供参考, 为电气设备可靠性的提升提供支撑。

关键词: 电连接器; 自适应 Wiener 模型; DGM(1,1)模型; 温度循环; 寿命预测

中图分类号: TM501

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)06-0127-09

Residual life prediction of electrical connector based on combination model

LUO Yanyan¹, QI Qiaoshen¹, WANG Yongpeng², LIU Tan³, AN Jingzhao⁴

(1. Provincial and Ministerial Co-construction Collaborative Innovation Center on Reliability Technology of Electrical Products(Hebei University of Technology), Tianjin 300401, China;

2. Zouping Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zouping 256200, Shandong, China;

3. Tangshan Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Company limited, Tangshan 063000, Hebei, China;

4. Tianjin Jinhang Institute of Computing Technology, Tianjin 300308, China)

Abstract: In order to predict the remaining life of electrical connector, this paper proposes a life prediction method for the electrical connector based on a combination model of an adaptive Wiener and a discrete grey model (DGM(1,1)). First, based on the Arrhenius model, the stress level of the temperature cycle test is selected to determine experimental parameters such as test cycle, exposure time, and temperature rise rate, and contact resistance is chosen as the degradation characteristic quantity for the temperature cycle test. Second, the remaining life of the electrical connector under temperature cycles is predicted using both the adaptive Wiener model and the DGM(1,1) model separately. By comparing the pseudo-life prediction results of the two models under different temperature stresses are compared, a combined model of the adaptive Wiener and DGM(1,1) is proposed. Finally, the parameters in the Arrhenius model are estimated by the least squares method, and the life of the electrical connector under normal temperature is extrapolated. The results show that the DGM(1,1) model provides more accurate predictions under lower temperature stresses, while the adaptive Wiener model provides more accurate predictions under higher temperature stresses. Considering the applicability of the model under different temperature stresses comprehensively, the combined model of adaptive Wiener and DGM(1,1) can predict the remaining life of electrical connectors more accurately. The research results can provide reference for maintenance decisions of electrical connectors and support for the reliability improvement of electrical equipment.

Keywords: electrical connector; adaptive Wiener model; DGM(1,1) model; temperature cycle; life prediction

电连接器是信号传递和电气连接的基础元件, 广泛应用于机械、电力、航空航天、交通运输等领域。随着科技的迅猛发展, 电连接器的应用领域不断扩

展, 工作环境日益复杂和恶劣, 对其性能和可靠性的要求越来越高。电连接器的可靠性水平直接影响系统的安全可靠运行^[1-2]。在服役及贮存中, 电连接

收稿日期: 2024-05-14; 录用日期: 2024-07-01; 网络首发日期: 2024-08-16

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240816.0928.002>

作者简介: 骆燕燕(1971—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 祁侨绅, 983651950@qq.com

器会受到温湿度、振动、臭氧、砂尘和盐雾等环境因素影响^[3]。研究表明,58%的电气设备故障是由环境温湿度导致的^[4]。温度循环变化使电连接器接触件间发生微小的相对位移,产生微动磨损现象,进而使其接触性能降低,直至失效。因此,对温度循环环境下电连接器进行寿命预测,有助于对失效,尤其是对间歇性失效进行早期预警。

目前,电气设备寿命预测常用的方法有 Wiener 过程、Gamma 过程、灰色模型和神经网络模型。Sun 等^[5]利用静态 Gamma 退化模型推导出可靠性模型,获得了橡胶 O 形环在不同温度应力下的可靠性和储存寿命;Ibrahim 等^[6]提出一种基于 Gamma 分布退化的随机方法,用于估计磷光体转换白色 LED 的长期流明退化寿命;汪从敏等^[7]基于灰色模型对运行复合绝缘子硅橡胶材料剩余寿命进行预测;李志刚等^[8]通过小波包重构方法对 AR(autoregressive)模型和 RBF(radial basis function)神经网络进行重构以提高继电器寿命预测精度;李奎等^[9]以触头质量消耗历史数据为退化轨迹,基于非线性 Wiener 过程预测交流接触器剩余寿命。为获得更准确的预测结果,许多研究结合不同方法构建组合模型用以预测产品寿命。Li 等^[10]将加速应力水平和可靠性作为训练输入向量,提出了一种灰色 RBF 神经网络,解决了建立加速模型困难与多似然方程计算复杂的问题;Zhang 等^[11]结合改进的变分模态分解、粒子滤波器和高斯过程回归,提出了一种预测电池容量和 RUL(remaining useful life)的混合预测方法。

对于电连接器性能退化过程,往往不满足 Gamma 过程的严格单调增加与神经网络的较强波动性条件。因此,本文分别采用自适应 Wiener 模型和离散灰色模型(discrete grey model, DGM(1,1))预测电连接器的剩余寿命,对比不同温度应力下两种模型的误差,进而选取各温度应力下的最优模型组成组合模型,采用最小二乘法估计 Arrhenius 模型中的参数,外推正常温度下电连接器的寿命,以期为电连接器的定期维护与更换提供参考。

1 加速退化试验

1.1 试品

本文采用某型号 M 系列航空电连接器,插针直径约 10 mm,长度约 65 mm,采用黄铜(HPb59-1 级:铜,60.0%;铅,1.9%;镍,1.0%;铁,0.5%;平衡锌)和镀金镍镀层。其实物如图 1 所示,基本性能参数见表 1。

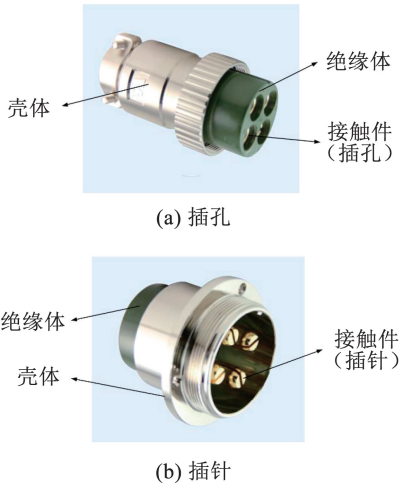


图 1 电连接器试品

Fig. 1 Electrical connector test product

表 1 电连接器试品基本性能参数

Tab. 1 Electrical connector test product basic performance parameters

额定 电压/V	额定 电流/A	工作 电压/V	耐电压/kV	接触 电阻/mΩ	绝缘 阻抗/GΩ
500	80	600	3	0.2	2

1.2 加速应力和加速模型的选取

加速应力的选择通常与产品的失效机理有关。为确定电连接器的加速应力,本文进行了电连接器的失效机理分析。电连接器的性能是由接触件的性能所决定的,接触件表面为镀金层,金是一种惰性金属,不易与空气发生氧化反应。但镀金层并不是理想的全面覆盖,可能存在细小孔隙。在微动磨损期间,因接触压力的作用会出现更多、更大的间隙。当含有氧气和水分的湿润气体进入间隙后,便具备了形成电解液的条件^[12]。根据化学反应原理可知,铜的化学性质比金活泼,基体金属铜会失去电子发生还原反应。此外,铜失去电子会发生扩散运动,当遇到接触表面间隙中的空气时,会与其中的氧气发生氧化反应,形成氧化铜产物,导致接触件导电性能明显下降。随着镀金层的破损,更多的基体铜被氧化,最终使接触件的接触电阻达到失效阈值。

高温作用下,各种化学反应加剧,氧化物生成率增大(暴露空气中 1 000 h 的铜在 100 ℃环境中产生的氧化物是 20 ℃环境中的 6.8 倍),更严重时则会生成氧化膜^[13]。同时,磨屑堆积量也会增多,使电连接器接触性能明显下降^[14-16]。因此,本文选择温度作为加速应力,Arrhenius 模型作为加速模型,描述温度与产品寿命之间的关系。

1.3 试验设备

电连接器加速试验设备主要由接触电阻测量单

元、温度循环试验箱及计算机组成,试验结构原理如图 2 所示。温度循环试验箱用于提供测试所需的温度应力,温度循环试验箱实物如图 3 所示。接触电阻测量单元主要是定时检测试品的接触电阻值,并传送至计算机。

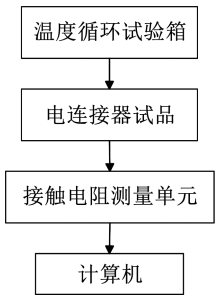


图 2 电连接器温度循环试验结构原理

Fig. 2 Structural principle of temperature cycling test for electrical connector



图 3 温度循环试验箱实物

Fig. 3 Temperature cycling test chamber

1.4 加速退化试验方案

温度循环加速退化试验设定的试验参数有高温应力水平、温度变化速率、暴露时间和温度循环次数。试验参照 GB/T 2423—2008《电工电子产品环境试验》^[17],根据产品耐受温度,设置温度循环中低温应力水平为 25 ℃、最高高温温度应力水平为 95 ℃,最低高温温度应力水平为 50 ℃。根据 Arrhenius 模型,两个中间高温温度应力水平可按倒数等间隔的原则选取^[18],即:

$$\Delta = \frac{1}{M-1} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_4} \right) \tag{1}$$

$$T_j = \left[\frac{1}{T_1} - (j-1)\Delta \right]^{-1} \tag{2}$$

式中:Δ 为加速因子,M 为应力水平数,T₁ 为最低高温温度应力水平,T₄ 为最高高温温度应力水平,T_j 为高温中间温度应力水平(j=2,3)。

因此,本文设计的温度循环加速试验中,高温应力水平分别为 50、59、73 和 95 ℃。为避免引入新的失效机理,且兼顾试品的退化进程以及试验设备的热容量和箱内风速对试验中试品温度变化速率的影

响,温度变化速率选取为 3 ℃/min,暴露时间为 12 h。依照每个温度应力水平下的样本数不低于 10 个,特殊电子产品不低于 5 个的原则^[19],本文设置每个温度应力水平下试品数为 6,并对其进行编号(A1~A6、B1~B6、C1~C6、D1~D6)。试验共进行 25 个周期,每个周期中的温度应力波形如图 4 所示,试验方案见表 2。

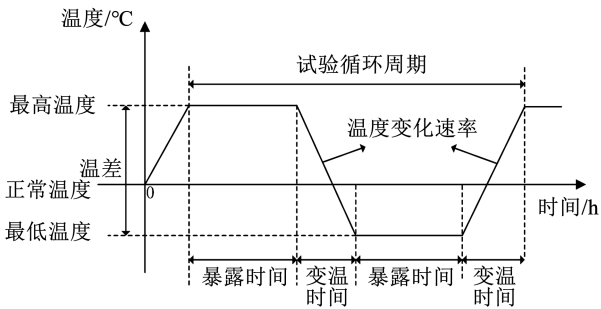


图 4 温度应力波形

Fig. 4 Temperature stress waveform

表 2 试验方案

Tab. 2 Experimental scheme

试品 编号	最高 温度/℃	最低 温度/℃	温升率/ (℃·min ⁻¹)	暴露 时间/h	试验 时间/h
A1 ~ A6	95	25	3	12	600
B1 ~ B6	73	25	3	12	600
C1 ~ C6	59	25	3	12	600
D1 ~ D6	50	25	3	12	600

1.5 退化特征量及失效阈值

确定电连接器的退化特征量是进行加速退化试验和寿命预测的前提。当退化特征量持续退化并超过故障阈值时,产品即达到寿命极限。不同于断路器、继电器等开关元件,电连接器主要起到信号传递与电气连接的作用,其接触性能往往决定着连接器的正常工作与否,而接触电阻是电连接器接触性能最常用、最直接的表征参数。为验证接触电阻作为本试验退化特征量的合理性,本文进行了温度循环预试验:设置最高高温温度应力水平为 90 ℃,随机选择 6 个试品进行测试,试验进行 12 个周期,在每个循环周期结束时测量接触件接触电阻值,其退化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,电连接器的接触电阻值随时间变化呈线性增长趋势,6 个试品在相同温度下的增长趋势相同,且增长率差异不大。试验中电连接器接触件处于紧密插合状态,微动摩擦较小,且接触电阻变化曲线未出现冷粘现象导致的阶跃式变化,可以忽略冷粘现象对试品的影响。故根据产品退化特征量的选择条件,可选用接触电阻作为退化特征量。根据该型电连接器产品说明书规定:

接触电阻达到 5 mΩ 时,该型电连接器接触性能大幅降低,应停止使用。故本文将失效阈值设定为 5 mΩ。

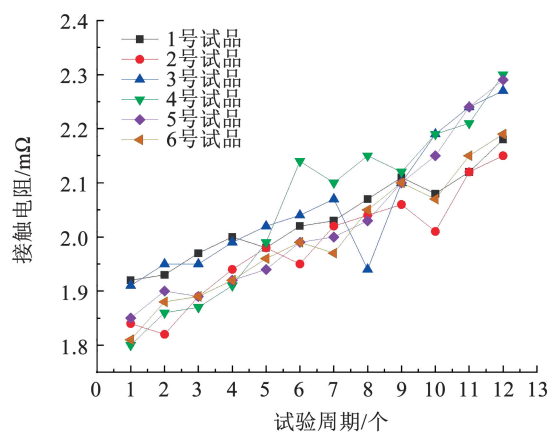


图 5 接触电阻预试验退化曲线

Fig. 5 Contact resistance pre-test degradation curve

2 基于自适应 Wiener 模型的寿命预测

2.1 接触电阻分段退化量的正态分布检验

由上文分析可知,相同温度应力下,不同试品接触电阻增长趋势相同,且增长率差异不大。以 A1 试品为例,其接触电阻退化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,接触电阻退化量基本呈线性增长趋势。

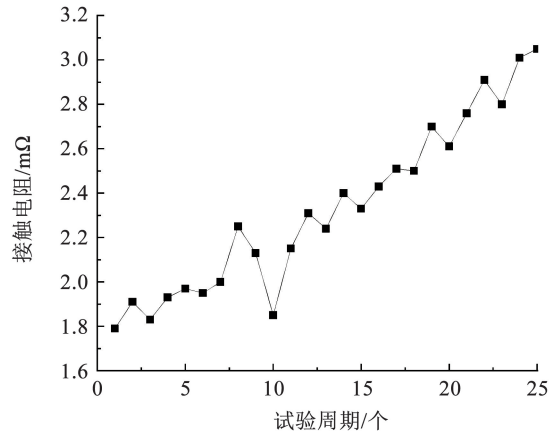


图 6 接触电阻退化曲线

Fig. 6 Contact resistance degradation curve

对电连接器接触电阻退化量以每周期为一段进行分段,每段的退化量记为 Δx ,其接触电阻分段退化量如图 7 所示。

根据接触电阻退化试验数据建立 Wiener 模型需要进行正态分布检验以判断是否满足 Wiener 过程。本文以 95 ℃ 下的 6 个试品为例,设置置信水平为 95%,对接触电阻分段退化量进行正态分布检验,结果见图 8。由图 8 可知,接触电阻退化量多集中于 (0, 0.2) mΩ (图 8(a)),且退化量数据拟合为直线(图 8(b)),故电连接器接触电阻分段退化量符合正态分布,可使用 Wiener 模型进行寿命预测。

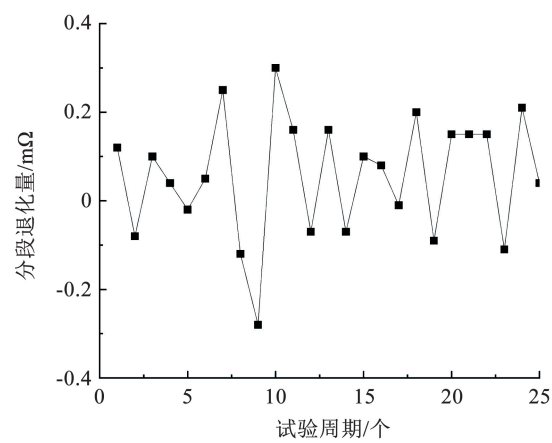
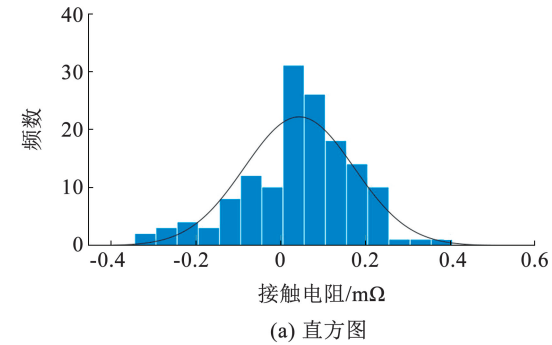
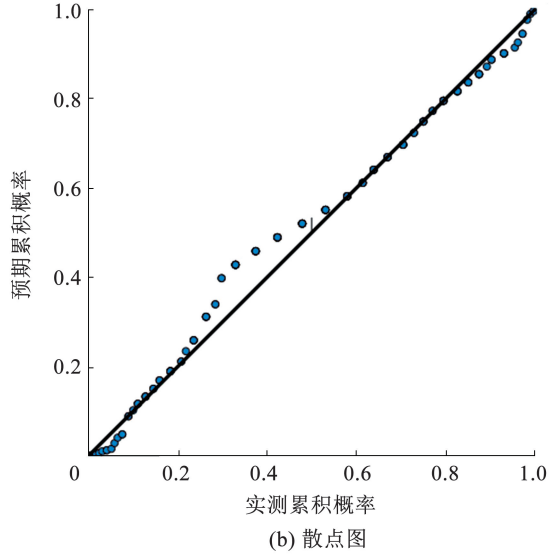


图 7 接触电阻分段退化曲线

Fig. 7 Contact resistance segment degradation curve



(a) 直方图



(b) 散点图

图 8 接触电阻分段退化量正态分布检验

Fig. 8 Normal distribution test of contact resistance segment degradation

2.2 自适应 Wiener 模型的建立

Wiener 模型是寿命预测中广泛使用的概率统计模型^[20-22],其不仅可以给出预测点的估计,还可以给出概率密度函数和可靠性函数的预测结果。考虑到温度循环环境下电连接器接触电阻退化过程具有波动性,本文采用自适应 Wiener 模型进行寿命预测。相比传统 Wiener 模型,自适应 Wiener 模型具有更高的预测精度,可以减小不确定性对预测结果

的影响,其退化模型可描述为

$$X(t) = X_0 + \mu t + \sigma_b B(t) \tag{3}$$

式中: X_0 为初始时刻接触电阻退化量; t 为接触电阻时间段数; $X(t)$ 为接触电阻累计退化量,服从正态分布 $X(t) \sim N(\mu t, \sigma^2 t)$; μ 服从正态分布 $\mu \sim N(\mu_a, \sigma_a^2)$; μ, μ_a 均为漂移系数, $\sigma, \sigma_a, \sigma_b$ 均为扩散系数; $B(t)$ 为标准布朗运动。

当电连接器性能退化过程可用线性 Wiener 过程表示时, T_τ 可作为电连接器在 τ 时刻的剩余寿命,则以下公式成立:

$$Y(t) = X(\tau) + \mu t + \sigma_b W(t), t \geq 0 \tag{4}$$

式中: $Y(t)$ 为 $\tau + t$ 时刻的退化量, $X(\tau)$ 为 τ 时刻的退化量, $W(t) = B(t + \tau) - B(t)$ 。

根据 Wiener 模型的独立增量和齐次马尔可夫性质,电连接器在 τ 时刻的剩余寿命可表示为

$$T_\tau = \inf\{Y(t) \geq L, t \geq 0\} = \inf\{X(t) \geq L - X(\tau), t \geq 0\} \tag{5}$$

式中 L 为退化量失效阈值。

根据贝叶斯全概率公式^[23-25],可得其剩余寿命的概率密度函数为

$$f_{T_\tau}(t|\mu_a, \sigma_a^2) = \frac{L - X(\tau)}{\sqrt{2\pi t^2(\sigma_a^2 t^2 + \sigma^2 t)}} \times \exp\left(-\frac{(L - X(\tau) - \mu_a t)}{2(\sigma_a^2 t^2 + \sigma^2 t)}\right) \tag{6}$$

使用多元正态分布的最大似然估计算法估计退化模型的未知参数,在考虑单位之间可变性的情况下,最大似然函数为

$$\ln L(\mu_a, \sigma_a^2|X) = -\frac{n}{2}\ln(2\pi) - \frac{1}{2}\ln(\Sigma) - \frac{1}{2}(X - \mu V)^T \Sigma^{-1}(X - \mu V) \tag{7}$$

式中: $\Sigma = \sigma_b^2 Q + \sigma_a^2 V V^T$, $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$,

$$Q = \begin{bmatrix} t_1 & t_1 & \cdots & t_1 \\ t_1 & t_2 & \cdots & t_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_1 & t_2 & \cdots & t_n \end{bmatrix}, V = [t_1, t_2, \dots, t_n]。$$

该模型存在 3 个未知参数 $\mu_a, \sigma_a, \sigma_b$,故在参数估计时,要将 σ_a^2 提出,令 $\tilde{\Sigma} = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_a^2} Q + V V^T$,并令 $\frac{\sigma_b}{\sigma_a} = \sigma_{b,a}$ 。

分别对未知参数求导,可得 μ 和 σ^2 的最大似然估计值为

$$\begin{cases} \hat{\mu}_a = \frac{V \tilde{\Sigma}^{-1} X}{V \tilde{\Sigma}^{-1} V} \\ \hat{\sigma}_a^2 = \frac{(X - \hat{\mu}_a V)^T \tilde{\Sigma}^{-1} (X - \hat{\mu}_a V)}{n} \end{cases} \tag{8}$$

将式(8)代入式(7),并使用寻优算法寻找最小值:

$$\ln L(\sigma_{b,a}|X) = -\frac{n}{2}\ln(2\pi) - \frac{1}{2}\ln(\sigma_{b,a} \tilde{\Sigma}) - \frac{n}{2} \tag{9}$$

2.3 自适应 Wiener 模型的预测结果

将 95 ℃ 下 6 个试品接触电阻数据代入自适应 Wiener 模型,根据式(8)得出 6 个试品的漂移系数分别为 0.049 2、0.038 8、0.040 0、0.033 1、0.040 1、0.040 2,扩散系数分别为 0.040、0.041、0.179、0.049、0.022、0.030。同时,得到电连接器剩余寿命概率密度曲线,如图 9 所示。由图 9 可知,随着试验周期的增加,电连接器的剩余寿命逐渐减小;将概率密度函数的期望视为产品的伪失效寿命,则由自适应 Wiener 模型得出 95 ℃ 下 6 个试品的伪失效寿命分别为 65.25、82.69、78.08、93.20、78.24、79.99 个周期。

3 基于 DGM(1,1)模型的寿命预测

灰色模型是一种在信息不完全、数据不足的情况下,用来预测和分析事物发展趋势的数学模型,在许多领域得到了广泛应用^[26-27]。但传统灰色预测模型在实际应用时因理论上的缺陷,拟合结果往往会产生一些偏差,尤其是进行长期预测时,效果不是十分理想。由自适应 Wiener 模型预测结果可知,最高高温温度应力水平(95 ℃)电连接器试品的伪失效寿命均大于 60 个周期,预测周期较长,传统灰色预测模型的精确性得不到保证。因此,本文采用 DGM(1,1)模型对不同环境下电连接器寿命进行预测。相比之下,DGM(1,1)模型的预测精度不会随序列增长速率的增大而降低,可实现无偏预测。

3.1 DGM(1,1)模型的构建

1) 定义初始序列 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$,并将其累加后形成序列 $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$,其中:

$$x^{(1)}(m) = \sum_{i=1}^m x^{(0)}(i), m = 1, 2, \dots, n \tag{10}$$

式中 n 为原始数据序列中的样本数,本文中 $n = 25$ 。则 $x^{(1)}(m + 1) = \beta_1 x^{(1)}(m) + \beta_2$ 为一阶单变量 DGM(1,1)模型。其中, β_1, β_2 为估计参数。

2) 使用最小二乘法对 β_1, β_2 进行参数估计,则 DGM(1,1)模型的 β_1, β_2 满足:

$$(\beta_1, \beta_2)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \tag{11}$$

式中:

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(1)}(2) \\ x^{(1)}(3) \\ \vdots \\ x^{(1)}(n) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} x^{(1)}(1) & 1 \\ x^{(1)}(2) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x^{(1)}(n-1) & 1 \end{bmatrix}。$$

3) 令 $x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$, 递推函数为

$$\hat{x}^{(1)}(\gamma + 1) = \beta_1^\gamma \left(x^{(0)}(1) - \frac{\beta_2}{1 - \beta_1} \right) + \frac{\beta_2}{1 - \beta_1}, \gamma = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (12)$$

4) 求累减还原值, 得到电连接器接触电阻预测值:

$$\hat{x}^{(0)}(\gamma + 1) = \hat{x}^{(1)}(\gamma + 1) - \hat{x}^{(1)}(\gamma) \quad (13)$$

3.2 DGM(1,1) 模型的预测结果

将 95 ℃ 下 6 个试品 (A1 ~ A6) 接触电阻试验数据输入 DGM(1,1) 模型, 以接触电阻第一次达到 5 mΩ 时的周期数作为伪失效寿命, 其寿命预测拟合

曲线如图 10 所示。由图 10 可知: 拟合退化轨迹与实际退化轨迹相近, 保持持续上升趋势, 实际值与拟合值基本在同一条曲线上; 寿命预测相对误差结果分别为 2.99%、3.16%、4.33%、3.26%、1.61% 和 1.59%。表明接触电阻值的实际值与拟合值之间的差异非常小, 其相对误差最大仅为 4.33%。因此, DGM(1,1) 模型可用于电连接器的寿命预测。

由 DGM(1,1) 模型可得出 95 ℃ 下 6 个试品的伪失效寿命分别为 48.02、57.34、57.16、58.04、50.23、54.78 个周期。

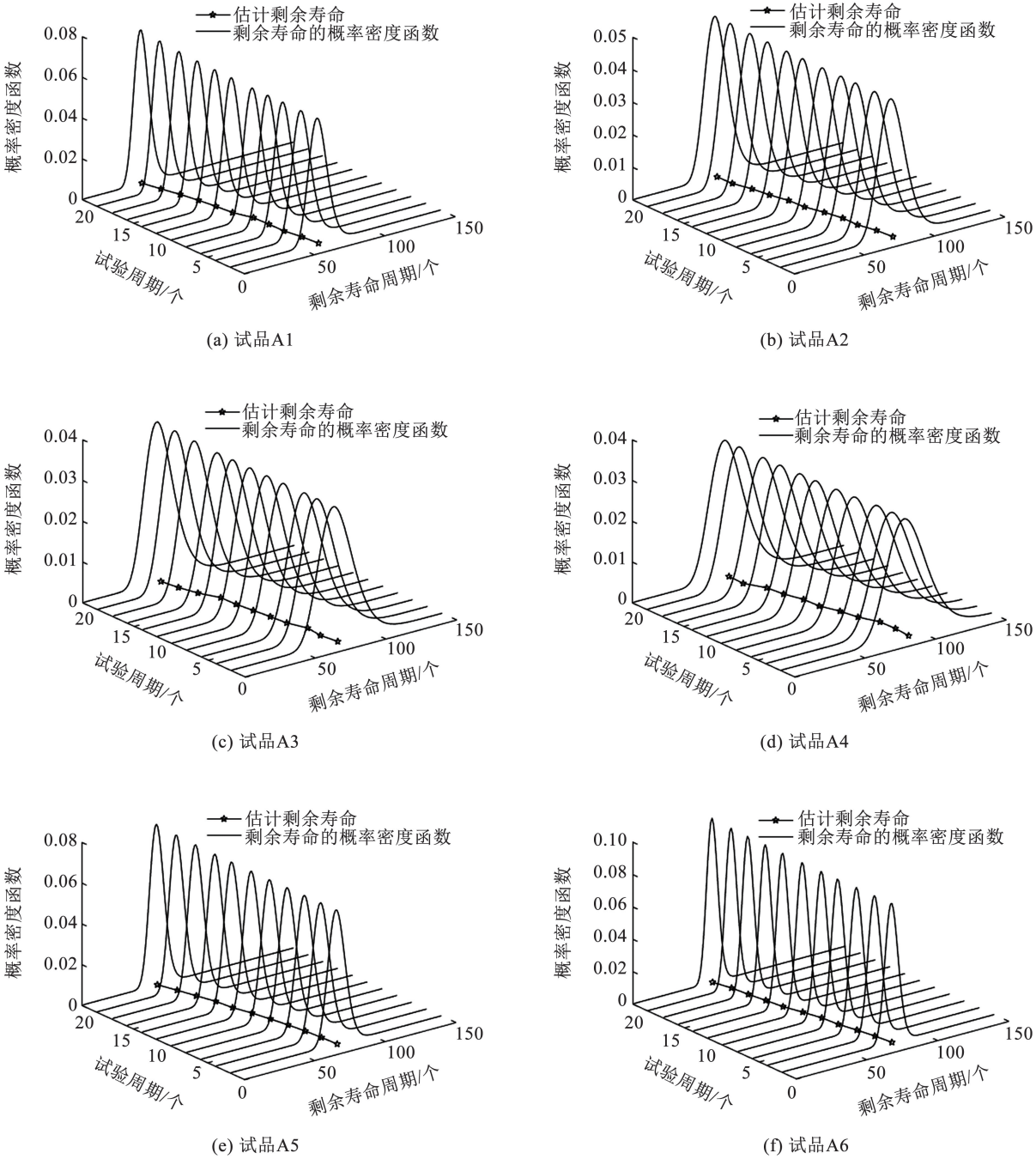


图 9 剩余寿命概率密度曲线

Fig.9 Residual life probability density curve

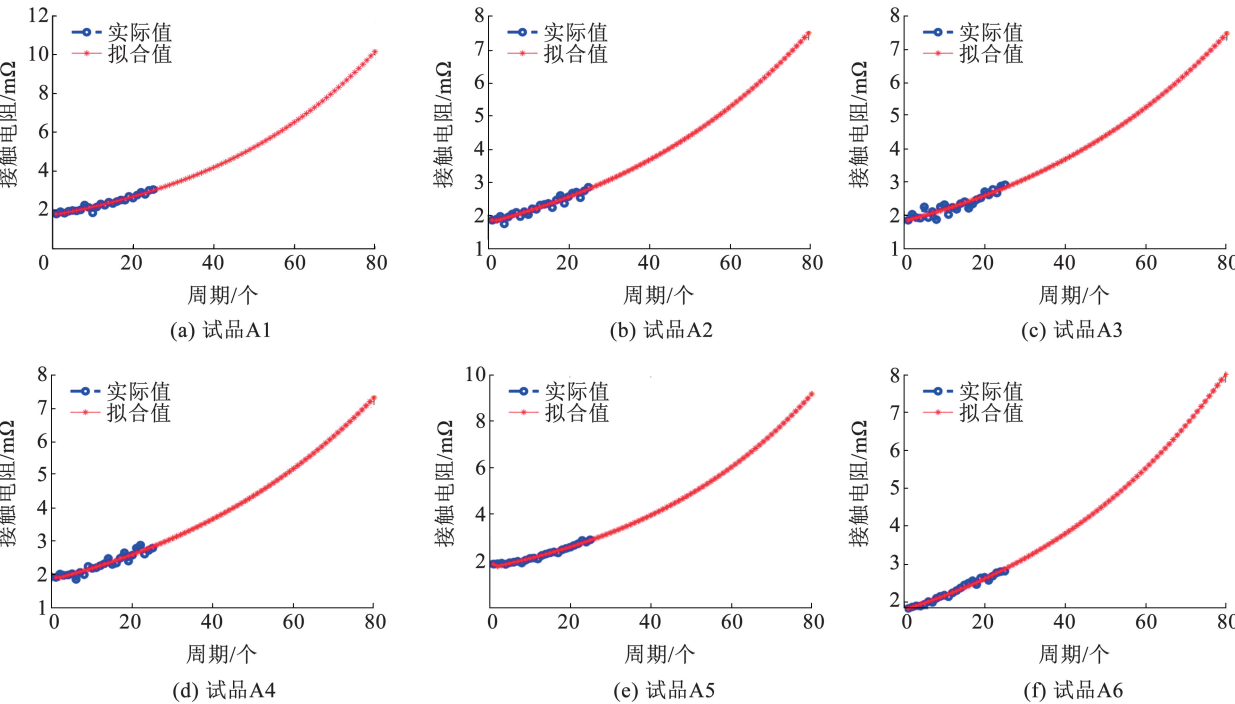


图 10 寿命预测拟合曲线

Fig. 10 Life prediction fitting curve

4 基于组合模型的寿命预测

使用单一模型对不同温度应力下试品进行寿命预测,精度往往达不到要求,使用最小二乘法进行正常寿命推算会进一步扩大误差。因此,本文分别采用自适应 Wiener 模型和 DGM(1,1)模型对各温度应力下试品的退化特征量进行预测,计算试验周期内(前 25 个周期)实际值与拟合值的标准误差和平

均绝对误差,通过选取各温度应力下标准误差和平均绝对误差较小的预测模型,以达到提高预测精度的目的。

表 3 为自适应 Wiener 模型和 DGM(1,1)模型的预测结果。由表 3 可知,两种预测方法获得的伪失效寿命结果有一定的差别,特别是温度应力为 50 ℃时伪失效寿命差异很大,而温度应力为 59、73 和 95 ℃时差异较小。

表 3 各温度应力下试品的伪失效寿命

Tab. 3 Pseudo failure life of stress specimens at different temperatures

温度/ ℃	试品 编号	自适应 Wiener 伪失效寿命周期/个	DGM(1,1) 伪失效寿命周期/个	差异/ 个	温度/ ℃	试品 编号	自适应 Wiener 伪失效寿命周期/个	DGM(1,1) 伪失效寿命周期/个	差异/ 个
95	A1	65.25	48.02	17.23	59	C1	151.32	184.22	32.90
95	A2	82.69	57.34	25.35	59	C2	166.39	200.12	33.73
95	A3	78.08	57.16	20.92	59	C3	154.21	158.17	3.96
95	A4	93.20	58.04	35.16	59	C4	149.29	166.89	17.60
95	A5	78.24	50.23	28.01	59	C5	157.89	147.75	10.14
95	A6	79.99	54.78	25.21	59	C6	162.10	161.23	0.87
73	B1	120.21	82.91	37.30	50	D1	212.33	261.28	48.95
73	B2	110.56	73.55	37.01	50	D2	234.21	295.45	61.24
73	B3	114.35	80.02	34.33	50	D3	216.71	283.77	67.06
73	B4	105.64	91.49	14.15	50	D4	205.65	257.39	51.74
73	B5	109.35	81.22	28.13	50	D5	241.29	321.11	79.82
73	B6	106.41	77.25	29.16	50	D6	235.03	240.74	5.71

因同一批产品之间存在某些差异,导致电连接器达到故障阈值的时间不同,故本文选取同一温度应力下 6 个试品的伪失效寿命平均值作为该温度应力下试品的伪失效寿命。表 4 为自适应 Wiener 模

型和 DGM(1,1)模型的伪失效寿命预测结果。由表 4 可知,在 50 和 59 ℃下,DGM(1,1)模型预测的伪失效寿命的标准误差和平均绝对误差较小,而 73 和 95 ℃时结果相反。因此,DGM(1,1)模型在较低

温度应力下更准确,而自适应 Wiener 模型在较高温度应力下更准确。原因是 DGM(1,1)模型采用指数退化规律拟合数据进行预测,而接触电阻退化量更符合正态分布,即线性退化规律,导致指数函数在高温时拟合度较低。因此,在温度循环环境下电连接器寿命预测中,低温(50 和 59 ℃)时采取 DGM(1,1)模型进行寿命预测,而高温(73 和 95 ℃)时则采用自适应 Wiener 模型进行寿命预测,以提高预测的精度。由组合模型得出 95、73、59 和 50 ℃下试品的伪失效寿命分别为 54.26、81.07、156.87、224.20 个周期。

表 4 两种模型伪失效寿命预测结果

Tab.4 Pseudo failure life prediction results

温度/ ℃	平均值/个		标准误差/%		平均绝对误差/%	
	自适应 Wiener	DGM (1,1)	自适应 Wiener	DGM (1,1)	自适应 Wiener	DGM (1,1)
95	79.58	54.26	3.82	8.21	3.42	5.72
73	111.09	81.07	4.98	5.54	4.13	4.13
59	156.87	169.73	17.47	5.98	14.96	5.26
50	224.20	276.62	26.70	13.23	23.49	12.64

5 正常寿命推算

以上通过组合模型所得到的结果均为试验温度应力下的试品寿命,为获得正常温度应力下的试品寿命,本文使用 Arrhenius 模型进行外推,其表达式为

$$R=A\exp\left(\frac{-E_a}{kK}\right)$$
 (14)

式中:R 为退化速率,E_a 为激活速率,k 为玻尔兹曼常数,K 为绝对温度,A 为常量。

对式(14)两侧取积分,得到温度应力的加速性能退化方程:

$$\int_{R_0}^R dR=\int_0^\delta A\exp\left(\frac{-E_a}{kK}\right)d\tau$$
 (15)

式中:δ 为试品寿命,R₀ 为初始退化速率。

令 ΔR=R-R₀,则

$$\delta=\frac{\Delta R}{A}\exp\left(\frac{E_a}{kK}\right)$$
 (16)

对式(16)两侧取对数,可得:

$$\lg \delta=\lg \frac{\Delta R}{A}+\frac{E_a}{kK} \lg e$$
 (17)

令 $h=\lg \frac{\Delta R}{A}, w=\frac{E_a}{k} \lg e$,则式(18)可写为

$$\lg \delta=h+w\left(\frac{1}{K}\right)$$
 (18)

通过最小二乘法可获得不同预测方法下加速模型中 h、w 两个常数以及相关系数 r 和残差二次方和

R_{ss},结果见表 5。相关系数 r 越接近 1,且残差二次方和 R_{ss}越接近 0,预测结果越精确。由表 5 可知,相比于自适应 Wiener 模型及 DGM(1,1)模型,组合模型的 r 最接近 1,且 R_{ss}最接近 0,表明其拟合效果最好,预测结果最准确。将组合模型 h、w 的数据代入式(18),可推算出各温度应力下的电连接器寿命为

$$\lg \delta=-6.574+2874.215\left(\frac{1}{K}\right)$$
 (19)

表 5 最小二乘法预测结果

Tab.5 Least squares method prediction results

模型	<i>h</i>	<i>w</i>	<i>r</i>	<i>R_{ss}</i>
自适应 Wiener	-5.105	2 664.228	0.984	0.006 62
DGM(1,1)	-6.757	3 011.104	0.989	0.007 42
组合模型	-6.574	2 874.215	0.991	0.003 31

电连接器的正常温度应力为 25 ℃,将其代入式(19)可推算出,在正常使用环境下,电连接器的伪失效寿命为 1 165 d,即在使用约 3 a 后,电连接器接触电阻会超过 5 mΩ,此时已无法保证其工作的可靠性。

6 结 论

1)温度循环环境下电连接器接触电阻分段退化量符合正态分布,可使用 Wiener 模型进行预测。

2)因电连接器退化过程具有波动性,本文采用的自适应 Wiener 模型考虑了单位之间可变性,相比于传统 Wiener 模型,该模型更贴合工程实际;鉴于预测时间较长,采用更适用于长期预测的 DGM(1,1)模型,以提高预测精度。

3)DGM(1,1)模型在较低温度应力下预测结果更准确,而自适应 Wiener 模型的在较高温度应力下预测更准确。综合考虑不同温度应力下模型适用性的情况下,构建的自适应 Wiener 和 DGM(1,1)组合模型能更精准的预测电连接器的剩余寿命。

4)采用最小二乘法估计 Arrhenius 模型中的参数,并外推获得正常温度应力下电连接器寿命为 1 165 d。

参考文献

[1]BRAUNOVIC M. Fretting in electrical/electronic connections; a review[J]. IEICE Transactions on Electronics,2009,92(8):982. DOI:10.1587/transele.E92.C.982

[2]IKEDA H, ITO T, SAWADA S, et al. Influence of fretting wear on lifetime of tin plated connectors [J]. IEICE Transactions on Electronics,2009,92(9):1215. DOI:10.1587/transele.E92.C.1215

[3]LIU Xinlong, CAI Zhenbing, LIU Shanbang, et al. Influence of wear test parameters on the electrical contact performance of brass alloy/copper contactors under fretting wear[J]. Journal of Materials

Engineering and Performance, 2019, 28 (2) : 817. DOI: 10. 1007/s11665 - 018 - 3821 - 9

[4] 马杰,姚静波,辛朝军. 环境温湿度对航天电连接器可靠性的影响[J]. 机电元件,2014,34(1):28
MA Jie, YAO Jingbo, XIN Chaojun. The effect of temperature and humidity on reliability of electrical aerospace connector[J]. Electromechanical Components, 2014, 34(1): 28. DOI:10. 3969/j. issn. 1000 - 6133. 2014. 01. 007

[5] SUN Bo, YAN Meichen, FENG Qiang, et al. Gamma degradation process and accelerated model combined reliability analysis method for rubber O-rings [J]. IEEE Access, 2018, 6: 10581. DOI: 10. 1109/ACCESS. 2018. 2799853

[6] IBRAHIM M S, FAN J J, YUNG W K C, et al. Lumen degradation lifetime prediction for high-power white LEDs based on the gamma process model[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6):8887259. DOI:10. 1109/JPHOT. 2019. 2950472

[7] 汪从敏,李明磊,张平,等. 基于灰色模型 GM(1,N) 的运行复合绝缘子硅橡胶材料剩余寿命研究[J]. 电瓷避雷器,2023(5):137
WANG Congmin, LI Minglei, ZHANG Ping, et al. Remaining lifespan of silicone rubber material of operating composite insulators based on GM(1,N) model[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023 (5) : 137. DOI:10. 16188/j. isa. 1003 - 8337. 2023. 05. 019

[8] 李志刚,刘伯颖,李玲玲,等. 基于小波包变换及 RBF 神经网络的继电器寿命预测[J]. 电工技术学报,2015,30(14):233
LI Zhigang, LIU Boying, LI Lingling, et al. Life prediction of relay based on wavelet packet transform and RBF neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14) : 233. DOI:10. 19595/j. cnki. 1000 - 6753. tces. 2015. 14. 032

[9] 李奎,高志成,武一,等. 基于统计回归和非线性 Wiener 过程的交流接触器剩余寿命预测[J]. 电工技术学报,2019,34(19):4058
LI Kui, GAO Zhicheng, WU Yi, et al. Remaining lifetime prediction of AC contactor based on statistical regression and nonlinear Wiener process [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19) : 4058. DOI: 10. 19595/j. cnki. 1000 - 6753. tces. 180764

[10] LI Shuzhen, LI Xiaoyang, JIANG Tongmin. A prediction method of life and reliability for CSALT using grey RBF neural networks [C]//IEEE 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Beijing: IEEE, 2009: 699. DOI:10. 1109/ICIEEM. 2009. 5344500

[11] ZHANG Chaolong, ZHAO Shaishai, HE Yiyang. An integrated method of the future capacity and RUL prediction for lithium-ion battery pack [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 71(3) : 2601. DOI:10. 1109/TVT. 2021. 3138959

[12] TAMAI T, SAWADA S, HATTORI Y. Contact mechanisms and contact resistance characteristics of solid tin and plated tin contacts used for connectors[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2010, 93(5):670. DOI:10. 1587/transele. E93. C. 670

[13] 戚正风. 固态金属中的扩散与相变[M]. 北京:机械工业出版社,1998
QI Zhengfeng. Diffusion and phase transformation in solid metals [M]. Beijing: China Machine Press, 1998

[14] LUO Yanyan, ZHANG Zhaopan, WU Xiongwei, et al. Identification and sensing of wear debris caused by fretting wear of electrical connectors[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2020, 103(5): 246. DOI:10. 1587/transele. 2019ECP5045

[15] 骆燕燕,刘昙,张兆攀,等. 电连接器接触件的性能退化规律与寿命预测[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(9):39
LUO Yanyan, LIU Tan, ZHANG Zhaopan, et al. Performance degradation law and life prediction of electrical connector contacts [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43 (9) : 39. DOI:10. 11809/bqzbgcxb2022. 09. 007

[16] LUO Yanyan, AN Jingzhao, SU Jingyuan, et al. Study on wear debris distribution and performance degradation in low frequency fretting wear of electrical connector [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2023, 106(3) : 93. DOI:10. 1587/transele. 2022ECP5022

[17] 电工电子产品环境试验:GB/T 2423—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2009
Environmental testing for electrical and electronic products: GB/T 2423—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009

[18] 骆燕燕,王振,李晓宁,等. 电连接器热循环加速试验与失效分析研究[J]. 兵工学报,2014,35(11):1908
LUO Yanyan, WANG Zhen, LI Xiaoning, et al. Accelerated thermal cycling test and failure analysis of electrical connectors [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35 (11) : 1908. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000 - 1093. 2014. 11. 024

[19] 张福学. 可靠性工学[M]. 北京:中国科学技术出版社,1992:217
ZHANG Fuxue. Reliability engineering [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1992:217

[20] LI Tianmei, PEI Hong, PANG Zhenan, et al. A sequential Bayesian updated Wiener process model for remaining useful life prediction [J]. IEEE Access, 2019, 8: 5471. DOI: 10. 1109/ACCESS. 2019. 2962502

[21] ZHAI Qingqing, YE Zhisheng. RUL prediction of deteriorating products using an adaptive Wiener process model [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6) : 2911. DOI:10. 1109/TII. 2017. 2684821

[22] 李奎,段宇,黄少坡,等. 基于 Wiener 过程的交流接触器剩余电寿命预测[J]. 中国电机工程学报,2018,38(13):3978
LI Kui, DUAN Yu, HUANG Shaopo, et al. Residual electrical life prediction of AC contactor based on the Wiener process [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (13) : 3978. DOI: 10. 13334/j. 0258 - 8013. psee. 170547

[23] 李军星,王治华,刘成瑞,等. 随机效应 Wiener 过程退化可靠性分析方法[J]. 系统工程理论与实践,2018,38(9):2434
LI Junxing, WANG Zhihua, LIU Chengrui, et al. Reliability analysis based on a random-effect Wiener process degradation model [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2018, 38 (9) : 2434. DOI:10. 12011/1000 - 6788(2018)09 - 2434 - 07

[24] SI Xiaosheng, WANG Wenbin, HU Changhua, et al. Remaining useful life estimation based on a nonlinear diffusion degradation process[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(1):50. DOI:10. 1109/TR. 2011. 2182221

[25] LEI Yaguo, LI Naipeng, LIN Jing. A new method based on stochastic process models for machine remaining useful life prediction [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65 (12) : 2671. DOI: 10. 1109/TIM. 2016. 2601004

[26] XIE Naiming, LIU Sifeng. Interval grey number sequence prediction by using non-homogenous exponential discrete grey forecasting model [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(1) : 96. DOI:10. 1109/JSEE. 2015. 00013

[27] DEJAMKHOORY A, DASTFAN A, AHMADYFARD A. Modeling and forecasting nonstationary voltage fluctuation based on grey system theory [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3) : 1212. DOI:10. 1109/TPWRD. 2014. 2386696