

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413055

基于触头形貌特征的低压直流断路器可靠性评估*

李奎^{1,2}, 张月^{1,2}, 姜惠^{1,2}, 侯天航^{1,2}, 郭庆斌^{1,2}

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300130;

2. 河北工业大学河北省电磁场与电器可靠性重点实验室 天津 300130)

摘要:针对触头表面形貌的变化,提出了一种基于触头烧蚀区域形貌特征的可靠性评估模型。首先对触头的形貌演变过程及烧蚀机理进行分析,利用基于图像块权重改进的自适应多阈值分割算法进行触头图像分割,提取引弧板上熔融和喷溅部分作为感兴趣区域;分析感兴趣区域二值图的面积和质心,将其作为触头性能退化的两个关键特征量;对触头形貌变化特征进行分析,利用 Gath-Geva (GG) 模糊聚类算法得到断路器不同退化阶段的变点,由 Copula 函数建立了二元特征相关的多阶段 Wiener 退化模型,拟合优度 KS 值小于 0.3,并通过低压直流断路器的电寿命实验进行模型的验证。

关键词: 图像分割; 感兴趣区域; 形貌特征; 二元多阶段 Wiener 模型; 可靠性评估

中图分类号: TM 61.1 TP391.41 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

Reliability assessment of low-voltage DC circuit breaker based on morphological characteristics of contacts

Li Kui^{1,2}, Zhang Yue^{1,2}, Jiang Hui^{1,2}, Hou Tianhang^{1,2}, Guo Qingbin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: In this article, a reliability assessment model based on the morphology characteristics of the ablative region of the contacts is proposed for the change of surface morphology of the contacts. Firstly, the contact morphology evolution process and ablation mechanism are analyzed. The contact images are segmented using the adaptive multi-threshold segmentation algorithm based on the improvement of the image block weight, and the melting and splashing part of the arc-guiding plate is extracted as the region of interest. The area and center of mass of the binary map of the region of interest are analyzed as the two key features of the degradation of the contact performance. The change characteristics of the contact morphology are analyzed, and the change points of different degradation stages of circuit breakers are obtained by the Gath-Geva (GG) fuzzy clustering algorithm, and the multi-stage Wiener degradation model with binary feature correlation is formulated by Copula function. The goodness-of-fit of the KS test is less than 0.3, and the model is evaluated by the electric life experiments of low-voltage DC circuit breakers.

Keywords: image segmentation; region of interest; morphological characteristics; binary multi-stage Wiener model; reliability assessment

0 引言

低压直流断路器作为配电系统重要的保护类开关电器,其健康状态关系到低压配电系统的安全可靠运行^[1],

因此对断路器进行可靠性评估,分析其服役过程中的性能退化机理很有必要。由于低压断路器高可靠性和长寿命的特点,在有限的时间和成本下进行传统的寿命实验很难获取足够多的失效数据,同时也无法准确实现个体产品在服役过程中的实时可靠性预测,因此基于寿命统

计的可靠性研究逐渐向基于性能退化的研究方式转变^[2]。然而,在低压断路器服役过程中反映其性能退化的触头磨损量等特征量在线实时监测成本高、实施困难,因此通过分析电弧侵蚀机理,探究触头表面形貌的演变规律并提取关键的形貌特征量,对提高低压直流断路器的运行可靠性具有重要意义。

已有不少文献针对电弧触头材料的抗电弧侵蚀能力和触头表面微观形貌的变化特进行了分析。文献[3]针对不同操作次数下 Ag/CdO 触头微观形貌变化进行研究,在接触表面观察到了一些新的、不同的电弧侵蚀形态,并利用电子探针微量分析仪发现了电弧侵蚀区域内部出现了贫镉层、富镉层和纯银层。文献[4]通过对触点接触状态的演化过程进行分析,将电弧烧蚀区域分为中心烧蚀区、表面影响区和热影响区,并认为在电侵蚀过程触点材料的单次电侵蚀量相对固定,中心烧蚀区面积与相对高度间存在竞争关系。文献[5]将差分图像法与数学形态学运算相结合,提出了一种新的电弧侵蚀区识别方法,通过探究电弧侵蚀面积随着循环开断电流次数的变化规律,揭示了 3 种类型的电弧侵蚀状态(集中电弧侵蚀、分离电弧侵蚀和换向电弧侵蚀),发现了在耐久性实验中电弧侵蚀区域的中心坐标的连续迁移现象,证明了接触表面内电弧侵蚀是不均匀的。

随着机器学习^[6]的兴起,数字图像处理技术被广泛用于图像特征的提取,传统特征有颜色特征^[7]、纹理特征^[8]、直方图特征^[9]等,还有通过深度学习^[10-11]挖掘图像更深、更为抽象的深度特征。文献[12]采用快速离散剪切波变换对图像进行分解和重构,利用灰度共生矩阵描述粗糙度子图纹理特征,得到了能量、相关、反差和逆差矩 4 类特征参数的变化趋势,揭示了疲劳损伤过程碳钢表面形貌特征变化规律;文献[13]在腐蚀形貌分析中引入了用于描述自然界几何形貌不规则程度的分形维数,并用其描述了金属腐蚀坑表面和截面轮廓线的分形维数与疲劳寿命的线性关系;文献[14]针对多视角问题提出了特征点检测与描述自监督训练模型 SuperPoint,首先利用合成的图像数据训练特征检测器,然后通过单应性自适应生成伪特征点,进而训练 SuperPoint 网络,其中特征点检测采用交叉熵损失,特征点描述采用合页损失。

根据低压直流断路器触头烧蚀形貌特征进行可靠性评估,通过改进的图像分割算法提取出感兴趣区域,定义能够表征断路器退化规律的关键形貌特征参数,构建形貌特征向量数据集,基于 Copula 函数建立二元特征相关的多阶段 Wiener 退化模型对断路器进行可靠性评估。

1 触头表面形貌及其演变特征分析

触头失效的根本原因是在电弧燃烧过程中产生质量损失,在电弧的作用下,触头材料以蒸发、液体飞溅或固态脱落等形式脱离触头本体,触头表面形貌随之发生改变^[15]。

触点材料以银为基体,钨为骨架;引弧板材料主要是铁,与触点连接,制成特定形状,有利电弧快速移动。新的触头部件表面较为光滑,呈现较为明亮的金属光泽。当开断次数较少时,电弧烧蚀程度较轻,触头表面附着一层黑色的氧化物和碳化物^[16]。弧根经过的引弧板区域熔融,在引弧板上形成一条凹陷的银白色痕迹,这一时期弧柱大幅膨胀并迅速弯曲和伸长,电弧电压迅速上升,电弧电流减小^[17],因此越靠近触点的位置烧蚀程度越严重。且随着开断次数增加,引弧板与触点连接部分银白色区域显著增大,如图 1 所示。

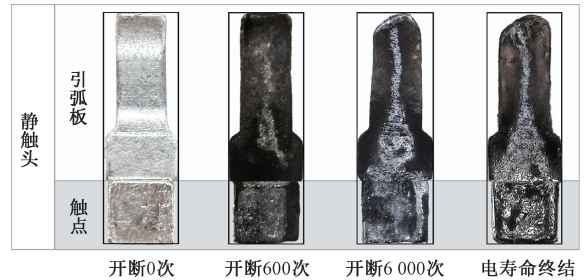


图 1 不同开断次数后触头表面形貌

Fig. 1 Surface morphology of contacts after different breaking times

燃弧过程中电弧热、力的作用^[18-19]使熔层表面凹凸不平,材料不断损失直至消耗殆尽。引弧板发生局部轻微形变,其顶端材料在电弧烧蚀下部分脱落,银白色区域的面积和轮廓在触头的退化过程中发生了更明显的变化。经 SEM&EDS 分析,银白色区域主要由引弧板铁基熔融和触头开断过程中银滴喷溅在引弧板与触点连接部分组成,与其他部分的灰度值呈现出较为明显的差异,因此可以将其作为反映触头退化的感兴趣区域(region of interest, ROI)^[20],通过采集不同烧蚀程度的触头图像,分割表面形貌显著变化的区域,提取关键的形貌特征量对断路器进行可靠性评估。

2 基于图像分割的触头形貌特征提取

2.1 基于图像块权重改进的自适应多阈值分割

首先对采集到的触头图像进行预处理^[21-22],经电弧烧蚀后的触头图像直方图没有明显双峰,使用单阈值分割不能明显体现感兴趣区域轮廓边缘与噪声的灰度差

异^[23],分割效果不佳。因此提出一种基于图像块赋权重的方法,确定合适的阈值和阈值数目进行图像分割。假设一幅触头图像具有 N 个像素, L 个灰度等级,灰度级为 i 的像素点数目为 N_i ,设 Q_j 表示以像素 x_j 为中心的图像块,大小为 $q \times q$,令 r_{jk} 表示 Q_j 内第 k 个像素的权重。

$$r_{jk} = r_d \times r_p \quad (1)$$

其中, $r_d = 1/(1 + d_j)$ 表示图像块的位置权重; d_j 表示图像块中心像素与触头几何中线之间的欧式距离,距离弧根中心越近,得到的权重越大。令 $c_{jk} = |g_{jk} - g'_{jk}|$, $r_p = \exp[-(c_{jk} - \bar{c})]$ 表示图像块的灰度相对变化量, g_{jk} 为图像块 Q_j 中第 k 个像素的灰度值; g'_{jk} 为邻域像素的灰度值,指数形式具有较快的衰减速度,因此可以为感兴趣区域边缘及噪点赋较小的权重。将 r_{jk} 进行归一化得:

$$r_{jk} = r_d \times r_p / \sum_{k \in Q_j} (r_d \times r_p) \quad (2)$$

传统的基于多阈值的类间方差函数为:

$$\begin{aligned} \sigma^2_{(t_1, t_2, \dots, t_n)} &= w_0 w_1 (\mu_0 - \mu_1)^2 + w_0 w_2 (\mu_0 - \mu_2)^2 + \\ &\dots + w_0 w_n (\mu_0 - \mu_n)^2 + w_1 w_2 (\mu_1 - \mu_2)^2 + \\ &w_1 w_3 (\mu_1 - \mu_3)^2 + \dots + w_1 w_n (\mu_1 - \mu_n)^2 + \\ &\dots + w_{n-1} w_1 (\mu_{n-1} - \mu_n)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: μ_l 表示图像不同类像素的平均灰度值; w_l 表示不同类像素出现的概率, $l = 1, 2, \dots, n$ 。本文定义目标函数为:

$$J(t_1, t_2, \dots, t_n) = \frac{\sigma^2(t)}{\sum_{l=0}^n \sum_{k \in Q_j} r_{jk} \|g_{jk} - \mu_l\|^2} \quad (4)$$

使目标函数 $J(t_1, t_2, \dots, t_n)$ 具有最大值时的阈值为最佳阈值,即 $(t_1^*, t_2^*, \dots, t_n^*) = \operatorname{argmax}_{0 < t_1 < t_2 < \dots < 255} J(t_1, t_2, \dots, t_n)$, 当该图像块与所属类别的平均灰度值越接近,且与其他类别的灰度值差异越大则视为该图像块具有越强的类别属性,目标函数也越大。

为确定最优阈值数目,定义图像的类间差异与类内差异的加权比值 G 为式(5)、(6),当 G 取最大值时, s^* 为最优阈值数目。

$$G = \frac{\sigma_w^2/s}{\sigma_b^2/(N - s - 1)} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_w^2 = \sum_{i=1}^{s+1} N_i \bar{u}_i^2 - N \bar{u}^2 \\ \sigma_b^2 = \sum_{i=1}^{s+1} \sum_{j=1}^{N_i} (g_{ij} - u_i)^2 \end{cases} \quad (6)$$

其中, σ_w^2 和 σ_b^2 分别表示图像的类间方差和类内方差; s 表示每一幅图像的阈值个数; g_{ij} 表示图像中第 i 类第 j 个像素点的灰度值; \bar{u} 表示图像像素的灰度均值; \bar{u}_i 表示图像第 i 类的灰度均值。

多阈值算法需要遍历图像的所有图像块中的像素来计算最佳阈值,随着阈值的增加,计算复杂度会呈指数级

增长,因此引入粒子群算法^[24]改善其求解效率低、细节丢失的问题。

设置图像块大小为 3×3 , 种群大小为 500, 最大迭代次数为 300, 最大迭代阈值数目 $S_{\max} = 5$, 将式(4)作为适应度函数,对种群初始化后进行个体极值和种群极值的计算,通过迭代更新得到种群最优解,最终根据自适应加权比值 G 选择每幅图像的最优阈值数目和最佳阈值。为方便表征的电弧烧蚀程度,将多阈值灰度图像转换为二值图,此时图像像素只有 0、1 两个值,本文方法与传统图像分割算法的对比如图 2 所示。

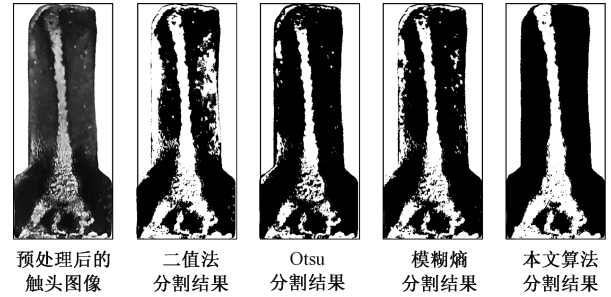


图2 触头图像分割结果

Fig. 2 Contact image segmentation results

由图 2 可知,本文方法通过引入图像块的空间位置和灰度相对变化量两个参数的权重,能够准确地分割出弧根中心处的熔融痕迹,并舍弃由于熔池喷溅触头边缘形成的噪点,能够自适应确定合适的阈值数目,得到理想的感兴趣区域。

2.2 关键形貌特征及其定义

为表征弧根从触点跃迁至引弧板过程中烧蚀产物的累积和触点材料的损失程度,引入二维图像的质心。设 $f(x, y)$ 为二维连续图像在像素 (x, y) 处的灰度值, x 和 y 分别表示像素点所在的行和列,则图像的 $p+q$ 阶矩 m_{pq} 如式(7)所示。

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (7)$$

其中, p 和 q 是非负的整数,对于离散化的数字图像,式(7)变为:

$$m_{pq} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N i^p j^q f(i, j) \quad (8)$$

在二维数字图像中,图像的矩能够描述图像形状的全局特征,零阶矩 m_{00} 表示连通域的面积;一阶矩 m_{01} 、 m_{10} 用来确定连通域的质心。用 (i_c, j_c) 表示连通域的质心坐标,表达式为:

$$\begin{cases} i_c = \frac{m_{10}}{m_{00}} \\ j_c = \frac{m_{01}}{m_{00}} \end{cases} \quad (9)$$

液滴的喷溅方向具有随机性,因此由 2.1 节分割得到的感兴趣区域可能具有多个连通域,设各个连通域的面积分别为 $S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_n$, j 表示连通域的序号,则感兴趣区域的质心表示为:

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum_{j=1}^n x_j S_j}{S} \\ y_c = \frac{\sum_{j=1}^n y_j S_j}{S} \end{cases} \quad (10)$$

其中, S 表示感兴趣区域的总面积; x_j 和 y_j 分别表示第 j 个连通域的横坐标和纵坐标。

熔融的材料在电弧熄灭后快速冷却,其表面留下了一些不规则的流动凝固后的痕迹,同时裂纹和气孔的存在使得连续区域灰度值差异较大,虽然 2.1 小节中的分割方法已经去除了大部分非感兴趣区域,但不可避免的存在毛刺、孔洞、孤立点等错误分割情况。如图 3 所示,采用数学形态学^[25]对感兴趣区域的二值图像进行开、闭运算填充孔洞、平滑边缘、消除孤立点和小的联通区域,对比腐蚀、膨胀操作对关键特征提取的部分具有较好的分割效果。

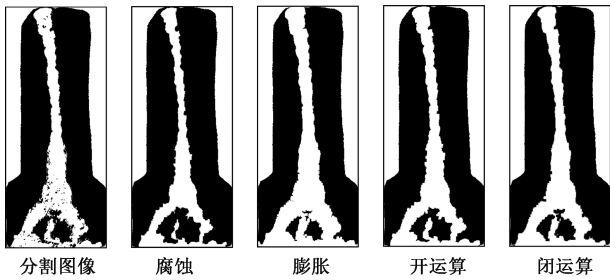


图 3 形态学运算
Fig. 3 Morphological operation

由式(8)得到白色像素点的累计数目即图像的零阶矩,记为感兴趣区域的面积特征向量 $T^{(1)}$ 。统一分割后的二值图像的大小,以左上角为原点,以像素点为单位长度,建立直角坐标系,由式(10)计算得到图像的质心坐标,由于质心横坐标在退化过程中无明显规律,因此后续分析将质心坐标的纵分量记为感兴趣区域的质心特征向量 $T^{(2)}$ 。

如图 4 所示为低压直流断路器某试样在分断大电流 300、2 000、6 000 和 12 000 次后两个静触头图像在所建立的直角坐标系下感兴趣区域相关形貌特征,二值图的白色像素部分代表感兴趣区域的面积,一阶矩 y 轴坐标代表感兴趣区域的质心纵分量,两者都随着触头开断次数的增大而增大,可见本文定义的两个关键形貌特征退化量能较好反映触头的退化状态。

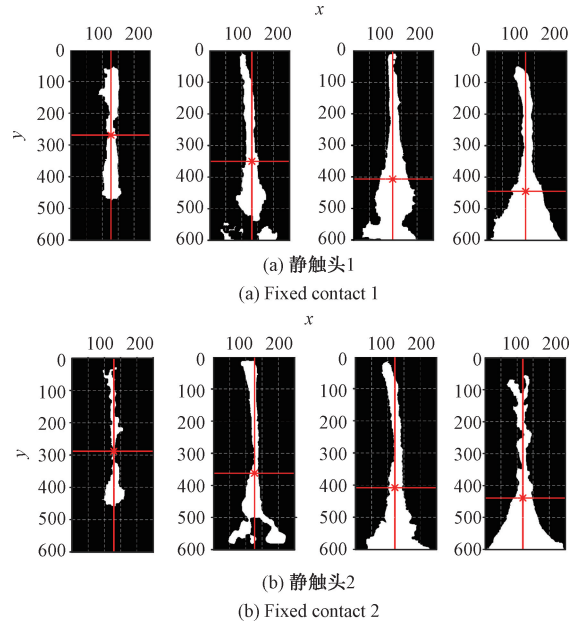


图 4 不同开断次数下静触头 1、2 感兴趣区域的形貌特征
Fig. 4 Morphological characteristics of region of interest of fixed contacts 1 and 2 with different breaking times

3 二元特征相关的多阶段 Wiener 退化模型

通过对关键形貌特征的分析,发现整个退化过程是非线性的,具有随机、模糊、阶段性变化的特点,Wiener 随机过程因其良好的适应性在可靠性评估领域受到广泛应用。因此本文综合考虑两个形貌特征退化量,建立二元多阶段 Wiener 过程对低压直流断路器进行可靠度评估。

3.1 二元多阶段 Wiener 退化模型

考虑到模型复杂程度较高,在进行模型的构建时认为触头的退化状态在某一阶段向下一阶段转变时的变点是固定的,并作出以下假设。

首先,形貌退化特征向量 $T^{(1)}$ 、 $T^{(2)}$ 各包含 $n-1$ 个状态转换点,用 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}$ 表示,且 $0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_{n-1}$,当 $t \in (\tau_{i-1}, \tau_i)$ 时,其中 $i=1, 2, \dots, n-1$,触头系统的退化状态在第 $i-1$ 阶段,且在第 $i-1$ 退化阶段未发生失效时,进入第 i 退化阶段。

其次, $T^{(1)}$ 、 $T^{(2)}$ 在各个退化阶段都服从 Wiener 过程,退化增量在不相交的两个区间相互独立,并且各个退化阶段的二元退化过程建立在相同增量区间上的,在不同增量区间 $[t, t+\Delta t]$ 上认为其相互独立。

令 $k=1, 2$,分别代表基于感兴趣区域构造的触头烧蚀区域面积和质心两个关键形貌退化量,基于上述假设,建立触头二元形貌特征的多阶段 Wiener 退化模型。其表达式为:

$$X_k(t) = \sum_{i=1}^n [X_{i,k}(\tau_{i-1}) + u_{i,k}(t - \tau_{i-1}) + \sigma_{i,k}B(t - \tau_{i-1})] \times I_{k[\tau_{i-1}, \tau_i]}(t) \quad (11)$$

式中: $X_{i,k}(\tau_{i-1})$ 为第 k 个形貌特征在第 i 退化阶段变点 τ_{i-1} 处的退化量; $u_{i,k}$ 和 $\sigma_{i,k}$ 分别表示第 k 个形貌特征在退化阶段 i 的漂移系数和扩散系数。考虑到个体差异性, 令 u 服从正态分布: $u \sim N(\eta, \sigma_\eta)$, $I_k(t)$ 表示第 k 个形貌特征的示性函数; 规定 $\tau_0 = X_{0,k} = 0$, 即认为两个特征的初始退化量为 0; $B(t)$ 为标准布朗运动。

记 $\mathbf{T}^{(1)}$ 、 $\mathbf{T}^{(2)}$ 的失效阈值为 $w = (w_1, w_2)$, 当任意一个形貌特征的累计退化量超过其失效阈值时, 触头失效。第 k 个形貌退化量首次达到其失效阈值的时间为:

$$T_k = \inf\{t \geq 0 \mid X_k(t) \geq w_k\} \quad (12)$$

因此, 触头系统的寿命可以表示为 $T = \min(T_1, T_2)$,

由 Wiener 过程首次达时间服从逆高斯分布^[26], 触头系统第 k 个形貌特征退化量的可靠度函数 $R_{i,k}(t)$ 和寿命分布函数 $F_{i,k}(t)$ 在不同退化阶段的函数表达式为:

$$R_{i,k}(t) = \Phi\left(\frac{w_k - x_{i-1,k} - \eta_{i,k}t}{\sqrt{(\sigma_\eta)_{i,k}^2 t^2 + \sigma_{i,k}^2 t}}\right) - \exp\left(\frac{2\eta_{i,k}(w_k - x_{i-1,k}) + 2(\sigma_\eta)_{i,k}^2(w_k - x_{i-1,k})^2}{\sigma_{i,k}^2}\right) \times \Phi\left(-\frac{2(\sigma_\eta)_{i,k}^2(w_k - x_{i-1,k})t + \sigma_{i,k}^2(w_k - x_{i-1,k} + \eta_{i,k}t)}{\sigma_{i,k}^2 \sqrt{(\sigma_\eta)_{i,k}^2 t^2 + \sigma_{i,k}^2 t}}\right) \quad (13)$$

$$F_{i,k}(t) = 1 - R_{i,k}(t) \quad (14)$$

其中, $x_{i-1,k} = \sum_{j=1}^{i-1} X_k(\tau_{j-1}) I_{k[\tau_{j-1}, \tau_j]}(t)$ 。为综合考虑两个形貌退化量得到断路器的可靠度, 使用二元 Copula 函数^[27]描述两个特征变量之间的关系, 则各退化阶段的二元可靠度函数可以由式(15)表达。

$$R_i(t) = P(T > t) = P(\min(T_1, T_2) > t) = 1 - P(T_1 \leq t) - P(T_2 \leq t) + P(T_1 \leq t, T_2 \leq t) = R_{i,1}(t) + R_{i,2}(t) + C(F_{i,1}(t), F_{i,1}(t); \alpha) - 1 \quad (15)$$

综上所述, 低压直流断路器的退化可靠度函数为:

$$R(t) = \begin{cases} R_1(t; u_1, \sigma_1), & 0 \leq t \leq \tau_1 \\ R_1(\tau_1 \sim t; u_2, \sigma_2) \times R_1(\tau_0; u_1, \sigma_1), & \tau_1 \leq t \leq \tau_2 \\ \dots \\ R_n(\tau_{n-1} \sim t; u_n, \sigma_n) \times \dots \times R_1(\tau_0; u_1, \sigma_1), & \tau_{n-1} \leq t \leq T \end{cases} \quad (16)$$

3.2 退化模型参数估计

假设有 M 台试样, 针对每台断路器的第 k 个形貌特征提取 l 个退化数据。为简化模型的复杂度, 忽略两个形貌特征的分段累积退化量在退化过程中不同阶段的相关性, 即 $i \neq i'$ 时, $\Delta X_{i,k}(t)$ 与 $\Delta X_{i',k}(t)$ 相互独立, 则在后续

建模中只考虑两个形貌退化量处于同一退化阶段时的相关性。根据 Wiener 过程的独立增量性质及 $u_{i,k} \sim N(\eta_{i,k}, (\sigma_\eta)_{i,k}^2)$, 则形貌退化增量 $\Delta x_{i,k}(t)$ 在第 i 退化阶段的概率密度函数为:

$$f_{i,k}(\Delta x_{i,k} \mid \sigma_{i,k}^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta t(\sigma_{i,k}^2 + (\sigma_\eta)_{i,k}^2 \Delta t)}} \times \exp\left\{-\frac{(\Delta x_{i,k} - \eta_{i,k} \Delta t)^2}{2\Delta t(\sigma_{i,k}^2 + (\sigma_\eta)_{i,k}^2 \Delta t)}\right\} \quad (17)$$

记模型中每个退化阶段的未知参数为 $\Theta_i = [\eta_{i,1}, \sigma_{i,1}^2, (\sigma_\eta)_{i,1}, \eta_{i,2}, \sigma_{i,2}^2, (\sigma_\eta)_{i,2}, \alpha_i]$, 构建似然函数见式(18), 模型中每个退化阶段有 7 个待估参数, 似然函数包含积分且形式复杂, 因此采用两阶段贝叶斯参数估计分别对各退化阶段的边缘退化过程以及相关性模型进行参数估计。首先利用边缘推断法建立边缘分布似然函数计算形貌特征在第 i 个退化阶段的未知参数。

$$L_i(\Theta_i) = \prod_{a=1}^{l_i} \prod_{j=1}^M c[F_{\Delta x_{i,1}}^{(j)}(\Delta x_{i,1}), F_{\Delta x_{i,2}}^{(j)}(\Delta x_{i,2}); \alpha_i] \times \prod_{k=1}^2 f_{i,k}^{(j)}(\Delta x_{i,k}) \quad (18)$$

$$L_i(u_{i,1}, \sigma_{i,1}) = \prod_{j=1}^M \prod_{a=1}^{l_i} f_{i,1}^{(j)}(\Delta x_{i,1}) \quad (19)$$

$$L_i(\alpha_i) = \prod_{j=1}^M \prod_{a=1}^{l_i} c[F_{\Delta x_{i,1}}^{(j)}(\Delta x_{i,1}), F_{\Delta x_{i,2}}^{(j)}(\Delta x_{i,2}); \alpha_i] \quad (20)$$

其中, $c(\cdot)$ 表示二元 Copula 函数的概率密度函数, l_i 表示第 i 退化阶段的特征数据个数。对式(19)取对数后分别对 $u_{i,1}$ 和 $\sigma_{i,1}$ 求偏导得到 n 个退化阶段的估计值 $\hat{u}_{i,1}$ 、 $\hat{\sigma}_{i,1}$, 同理求出 $\hat{u}_{i,2}$ 、 $\hat{\sigma}_{i,2}$, 得到边缘分布函数的估计值后, 进而可以计算得到式(18)中退化增量的累积分布函数 $F_{\Delta x_{i,1}}^{(j)}(\Delta x_{i,1})$ 、 $F_{\Delta x_{i,2}}^{(j)}(\Delta x_{i,2})$ 。在此基础上, 构建 Copula 似然函数, 见式(20), 利用贝叶斯估计法获得 Copula 函数的参数估计值 $\hat{\alpha}_i$, 完成对二元退化模型的参数估计。

4 实例分析

4.1 数据集介绍

选取某公司生产的低压直流断路器作为研究对象, 每台断路器有两对触头。对 3 台试样进行电气实验, 在实验过程中对触头形貌进行了拍摄, 获得触头形貌退化数据集, 拍摄时将试样置于光源统一的密闭遮光箱内, 实验装置如图 5 所示。

低压断路器的电寿命实验参数如表 1 所示, 开断次数 2 000 次之前形貌变化明显, 每间隔 300 次对断路器进行拆卸采集一次触头图像, 开断 2 000 次之后形貌变化缓慢, 每间隔 500 次采集一次图像。为方便后续针对感



图 5 实验装置

Fig. 5 Diagram of the experimental setup

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

实验参数	参数值
壳架电流/A	$I_e = 63$
直流电源/V	$U_s = 500$
负载电阻/ Ω	$R = 7.94$
负载电感/mH	$L = 15.88$
时间常数/ms	$\tau = 2$
开断电流/A	$I = 126$
LED 无影灯功率/W	$P = 25$

兴趣区域的分割计算,将采集到的静触头图像进行裁剪、缩放,统一像素大小为 600 pixels×250 pixels。

4.2 触头形貌特征提取

利用 1.2~1.4 小节的方法对实验获得的图像进行预处理和关键形貌特征的提取,基于改进的多阈值分割算法准确分割出感兴趣区域,采用形态学方法进行孔洞填充和边缘平滑,特征提取流程如图 6 所示。

记本文所用型号 MCCB 的两个静触头为 $\Gamma = (\Gamma_1, \Gamma_2)$,假定与电源阳极相连的静触头为 Γ_1 ,与电源阴极相连的静触头为 Γ_2 ,则由式(8)~(10)计算得到的两个形貌退化特征向量分别为 $\mathbf{T}^{(1)} = (T_{r_1}^{(1)}, T_{r_2}^{(1)})$ 和 $\mathbf{T}^{(2)} = (T_{r_1}^{(2)}, T_{r_2}^{(2)})$,其随开断次数的变化规律如图 7 所示。

随着断路器开断次数的增加, $\mathbf{T}^{(1)}$ 、 $\mathbf{T}^{(2)}$ 都呈现出非线性的变化趋势,但整体都随着开断次数增大而增大。触头从完好到失效的过程中,其退化过程呈现出明显的阶段性变化。

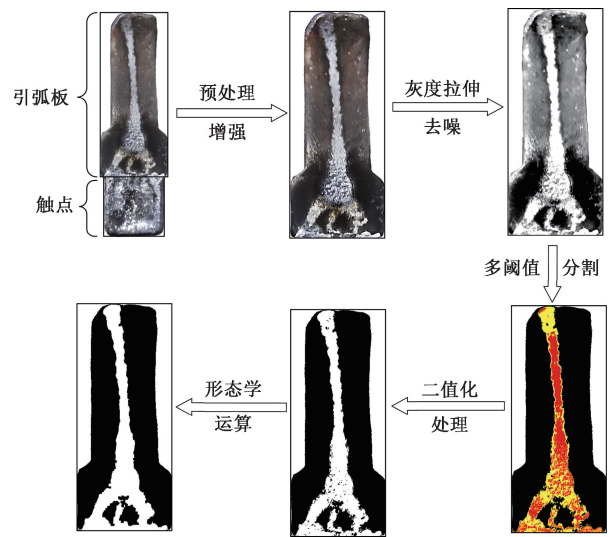
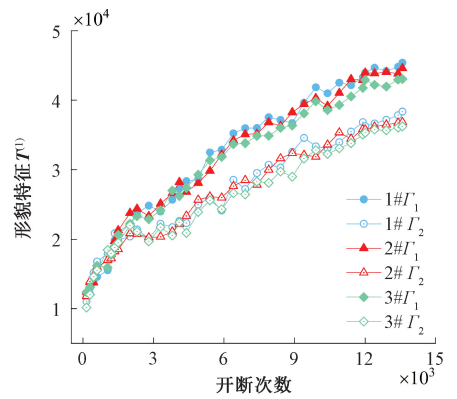


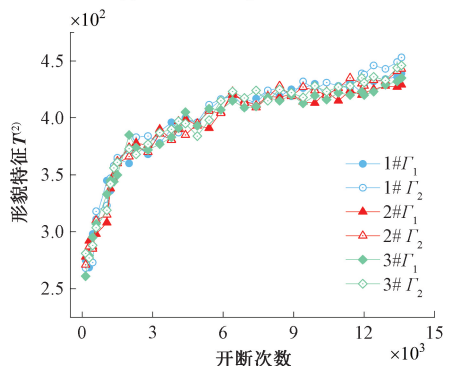
图 6 特征提取流程

Fig. 6 Flowchart of feature extraction



(a) 感兴趣区域面积 $T^{(1)}$

(a) Area of the region of interest $T^{(1)}$



(b) 感兴趣区域质心 $T^{(2)}$

(b) Center of mass of the region of interest $T^{(2)}$

图 7 关键形貌特征变化趋势

Fig. 7 Trends in key morphological features

4.3 低压直流断路器的可靠性评估

在实际服役过程中,电寿命由磨损程度最大的触头对决定,由图 7(a)可知,静触头 Γ_1 的侵蚀量>静触头 Γ_2 的侵蚀量,因此后续可靠度评估工作中选择静触头 Γ_1 的

两个形貌特征量作为性能退化量。

考虑到断路器性能退化的过程在时间尺度上具有连续性^[26],通过GG模糊聚类引入隶属度^[28]对退化状态进行划分并确定不同退化阶段的变点。综合考虑静触头 T_1 的两个形貌退化量,首先对 $T^{(1)}$ 、 $T^{(2)}$ 进行归一化,

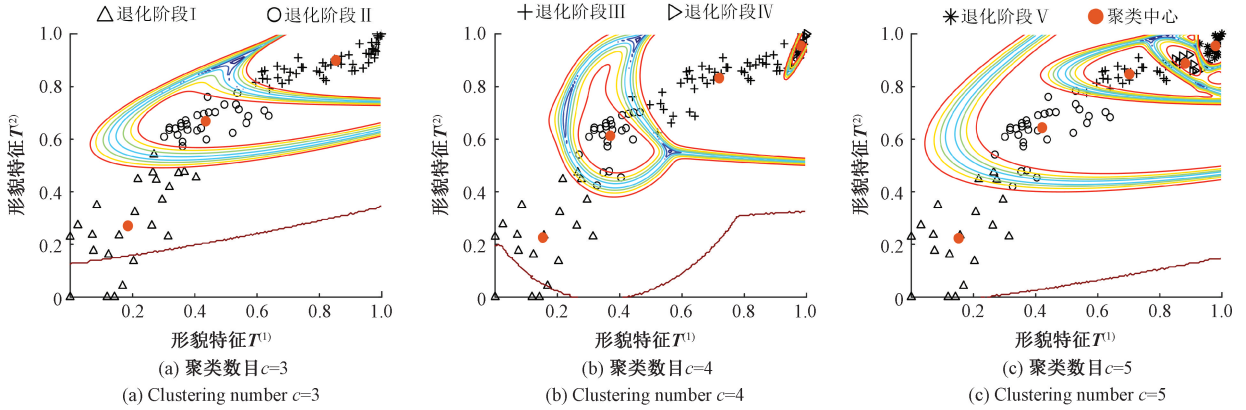


图8 静触头 T_1 的模糊聚类图

Fig. 8 Fuzzy clustering diagram of fixed contact T_1

表2 聚类评价结果

Table 2 Cluster evaluation results

聚类数目 c	分类系数	平均模糊熵
3	0.973 5	0.035 9
4	0.954 7	0.060 5
5	0.952 3	0.063 1

由于个体差异性,不同试品的退化变点可能不尽相同,由隶属度矩阵和图8得到3台断路器的退化状态向下一阶段转换所对应的特征值,将该特征值对应的开断次数作为退化变点,见表3。取试品变点最小值作为本批次产品所处退化阶段向下一阶段转换的变点,即 $\tau_1=2\ 000$ 次, $\tau_2=6\ 400$ 次。

表3 各试品的退化变点及变点处的形貌特征值

Table 3 The degradation points of each sample and the corresponding value of morphological characteristics

	退化变点/次		形貌特征参数	
			$T^{(1)}$	$T^{(2)}$
试品 1	τ_1	2 000	22 235	376
	τ_2	6 400	35 250	420.5
试品 2	τ_1	2 300	24 391	378
	τ_2	6 900	35 092	415
试品 3	τ_1	2 300	23 314	385
	τ_2	6 400	33 688	417

根据退化趋势初步设置聚类数目 $c=3,4,5$,静触头 T_1 的二维等高线聚类图如图8所示,等高线上的点表示处于两个退化阶段的过渡区间。不同聚类数目的评价系数^[29]见表2,将退化过程划分成3个阶段时,各类别特征量出现混叠的情况最少,聚类效果最好。

对 $T^{(1)}$ 、 $T^{(2)}$ 3个退化阶段进行二元Wiener建模,利用边缘推断法对参数进行估计,根据式(17)~(19)首先分别求出两个形貌退化特征量在各退化阶段的随机参数估计值,见表4。两个形貌特征的边缘退化过程具有明显的阶段性和个体差异性,证明所采用模型具有合理性。

表4 边缘分布参数估计值

Table 4 Marginal distribution parameter estimates

边缘参数		退化阶段		
		I	II	III
形貌特征 $T^{(1)}$	$\hat{\eta}$	5.421 9	2.422 6	1.405 5
	$\hat{\sigma}_{2\eta}^2$	0.057 5	0.027 6	0.303 3
	$\hat{\sigma}^2$	66.807 9	54.939 1	48.285 3
形貌特征 $T^{(2)}$	$\hat{\eta}$	0.048 7	0.007 6	0.003 5
	$\hat{\sigma}_{2\eta}^2$	0.002 1	0.000 9	0.001 4
	$\hat{\sigma}^2$	0.846 0	0.428 7	0.251 2

将上述所得边缘分布参数估计值带入式(20)可得不同退化阶段退化增量的累积分布函数。由文献^[30]中不同Copula函数的概率密度函数,在退化特征数据和上述边缘参数估计值的基础上,利用贝叶斯估计法对3个退化阶段的未知参数 $\alpha=(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ 进行估计,选择最常用的Frank-Copula函数描述二元形貌退化量在不同退化阶段的相关性。3个阶段的相关度参数为 $\alpha=(2.765\ 0, -0.281\ 2, -5.681\ 9)$,根据Kendall秩相关系数标准^[31-32],可以认为 $T^{(1)}$ 、 $T^{(2)}$ 在不同退化阶段是相关的。

实验得到试品 1 的电寿命为 13 585 次,试品 2 的电寿命为 14 350 次,试品 3 的电寿命为 15 102 次。选择 3 个试品中电寿命最先终结的断路器对应的形貌特征参数作为本批次产品的失效阈值,由图 7 得试品 1 在开断电流 13 585 次时对应 $w_1 = 44\ 602$, $w_2 = 435$,也就是当静触头 T_1 感兴趣区域的面积和质心达到该阈值时,触头失效。

将上述参数带入式(16)得到产品的综合可靠度函数曲线,为证明基于二元形貌特征的 Wiener 退化模型的优越性,记本文建立的二元 Wiener 退化过程为模型 1,以样本的经验可靠度函数为基准,通过拟合优度进行评价,同时基于单形貌特征退化量 $T^{(1)}$ 、 $T^{(2)}$ 分别建立一元 Wiener 模型,记为模型 2、3,将其可靠度曲线作为对比,如图 9 所示。

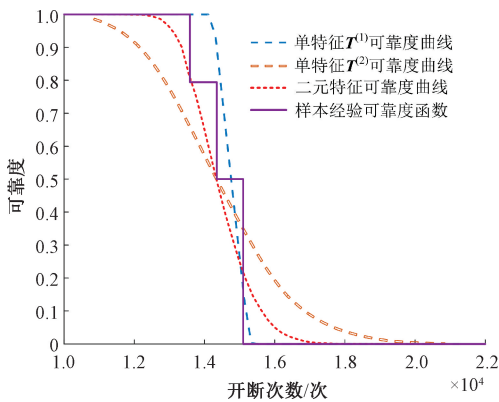


图 9 可靠度曲线

Fig. 9 Reliability graph

其中拟合优度采用 KS 统计量进行评价,见表 5。

表 5 拟合优度

Table 5 Goodness of fit

模型	模型 1	模型 2	模型 3
KS 值	0.258 7	0.336 8	0.410 5

在小样本条件下,同一批寿命数据的经验分布函数为:

$$F_n(t) = \begin{cases} 0, & t < t_1 \\ \frac{(g - 0.3)}{n + 0.4}, & t_g \leq t < t_{g+1} \\ 1, & t \geq t_n \end{cases} \quad (21)$$

式中: $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_g \leq \dots \leq t_n$ 为试品的寿命; g 表示试品的失效序号。

由文献[33]可知,模型的 KS 值在置信度为 95% 的区间下均满足使用 Wiener 过程的条件,因此可以利用 Wiener 过程进行形貌特征参数的退化建模,且模型 1 的

拟合优度为 0.258 7,远远优于基于单个形貌特征退化量建立的模型 2、3。

由于不同退化阶段变点对应的形貌特征参数总是小于失效阈值,因此断路器只会退化阶段 III 过程中发生失效。由图 9 可知,若只考虑 $T^{(1)}$,在开断 14 106 次后可靠度仍为 1,而用 $T^{(2)}$ 表征断路器的退化过程时,可靠度在动作 10 560 次后就开始下降,此时用 $T^{(2)}$ 来描述断路器的早期失效更加准确。当开断 14 867 次后,仅考虑特征 $T^{(2)}$ 又高估了断路器的可靠性水平。因此,综合两个形貌特征退化量进行断路器的可靠性评估效果更好。

5 结 论

针对触头表面形貌烧蚀退化的表征问题,通过分析触头上显著变化的电弧烧蚀痕迹,准确分割出感兴趣区域,提出了触头烧蚀区域形貌特征的低压直流断路器的可靠性评估方法。通过对感兴趣区域的提取,定义了关键形貌特征量,建立特征向量数据集,基于 Copula 函数构建了二元形貌特征相关的多阶段 Wiener 退化模型,采用某型号低压直流断路器进行实例验证,得出如下结论:

1) 通过分析电弧侵蚀后触头表面形貌的变化特征,揭示了电弧作用下触头形貌演变过程及其与触头性能退化的关系。将引弧板基体材料熔融和触点材料的喷溅累积引起显著变化的银白色区域作为感兴趣区域,通过引弧板的烧蚀痕迹分析,可以判断触头系统开断电流情况,并对断路器的电寿命做出判断。

2) 针对引弧板上熔融与喷溅区域的灰度值与触头其他部位具有较大差异的特点,提出一种基于图像块权重改进的多阈值分割算法,可以较为准确分割出感兴趣区域。针对感兴趣区域构造了两个能够表征触头退化过程的关键形貌特征参数。

3) 构建了基于二元形貌特征的多阶段 Wiener 过程的可靠性评估模型,利用 Copula 函数建立两个形貌退化表征量在不同退化阶段的相关性,并基于单个形貌特征建立的模型进行了可靠性评估,结果表明二元退化模型计算的可靠度能够更加准确地描述低压直流断路器的退化过程。

参考文献

- [1] 赵成晨,李奎,胡博凯,等. 变应力条件下低压断路器剩余电寿命预测[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 8004-8016.

- ZHAO CH CH, LI K, HU B K, et al. Residual electrical life prediction of low-voltage circuit breakers under varied stress[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21):8004-8016.
- [2] 孙曙光,李勤,王佳兴,等. 基于性能退化模型的万能式断路器操作附件实时剩余寿命预测[J]. 仪器仪表学报,2019,40(10):120-129.
- SUN SH G, LI Q, WANG J X, et al. Real-time remaining useful life prediction of operating accessories for the conventional circuit breaker based on performance degradation model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(10):120-129.
- [3] WU Q, XU G F, YUAN M, et al. Influence of operation numbers on arc erosion of Ag/CdO electrical contact materials[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging & Manufacturing Technology, 2020, 10(5):845-857.
- [4] 王天阳. 基于原位观测法的触点材料电侵蚀特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- WANG T Y. Investigation on arc erosion characteristics of contact materials based on in-situ observation method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [5] ZHENG ZH, REN W B, ZHANG CH. Visualization and characterization of cumulative arc erosion behavior using 2-D microscopic images[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2023, 13(1):34-44.
- [6] 冯治国,金日,罗冲,等. 基于 Transformer 神经网络的变压器状态监测[J]. 国外电子测量技术,2023, 42(2):145-150.
- FENG ZH G, JIN R, LUO CH, et al. Power transformer state monitoring based on Transformer deep neural network[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023,42(2):145-150.
- [7] CHANG Y H, MUKAI N. Color feature based dominant color extraction[J]. IEEE Access, 2022, 10(1):93055-93061.
- [8] 王强,李柏林,侯云,等. 一种改进的 LBP 特征实现铁路扣件识别[J]. 西南交通大学学报,2018,53(5):893-899.
- WANG Q, LI B L, HOU Y, et al. An improvement of LBP features realize railway deduction identification[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018,53(5):893-899.
- [9] DIXIT U D, SHIRDHONKAR M S, SINHA G R. Automatic logo detection from document image using HOG features[J]. Multimedia Tools and Applications, 2023, 82(1):863-878.
- [10] 张伟光,钟靖涛,于建新,等. 基于机器学习和图像处理的路面裂缝检测技术研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2402-2415.
- ZHANG W G, ZHONG J T, YU J X, et al. Research on pavement crack detection technology based on convolution neural network[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021,52(7):2402-2415.
- [11] 刘传洋,吴一全,刘景景. 基于视觉的输电线路金具锈蚀缺陷检测方法研究进展[J]. 仪器仪表学报,2024, 45(3):286-305.
- LIU CH Y, WU Y Q, LIU J J. Research progress of vision-based rust defect detection methods for metal fittings in transmission lines [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(3):286-305.
- [12] LIU T, WU J X, LEI J F, et al. Multi feature extraction of three-dimensional topography of carbon steel specimen during fatigue process[J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2021, 2021(9):1-15.
- [13] 王勇刚,郭一冰,董逸君,等. 基于分形维数的预腐蚀铝合金疲劳寿命预测[J]. 机械工程材料,2022, 46(12):79-84.
- WANG Y G, GUO Y B, DONG Y J, et al. Fatigue life prediction of pre corroded aluminum alloy based on fractal dimension method[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022,46(12):79-84.
- [14] DETONE D, MALISIEWICZ T, RABINOVICH A. Super point: Self-supervised interest point detection and description[C]. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Utah, United States of America, 2018:337.
- [15] 陈静洪,任县利,方继恒,等. Ag-30 W 的电弧行为为高速摄像及表面侵蚀研究[J]. 贵金属,2017,38(4):34-38.
- CHEN J H, REN X L, FANG J H, et al. Study on surface erosion and arc erosion profile of Ag-30 W by using high-speed imaging technique[J]. Precious Metals, 2017,38(4):34-38.

- [16] SLADE P. Variations in contact resistance resulting from oxide formation and decomposition in Ag-W and Ag-WC-C contacts passing steady currents for long time periods[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, 1986, 9(1):3-16.
- [17] WANG L J, WANG Y J, LI Y J, et al. Measurement and simulation analysis of internal pressure in arc chamber of low-voltage molded case circuit breaker[J]. AIP Advances, 2018, 8(6):5030964.
- [18] YIN J N, WANG Q, LI X W, et al. Numerical study of influence of frequency and eddy currents on arc motion in low-voltage circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8(8):1373-1380.
- [19] WANG Y J, XU N, WANG L J. Numerical simulation and analysis of contact erosion by high-current and low-voltage air arc considering the movement of arc[J]. AIP Advances, 2023, 13(5):0144666.
- [20] GAO Y, QI ZH Y, ZHAO D X, et al. Edge-enhanced instance segmentation by grid regions of interest[J]. The Visual Computer, 2023, 39(3):1137-1148.
- [21] JONAS W, TOMASO Z V R, DANIEL S, et al. An end-to-end workflow for multiplexed image processing and analysis[J]. Nature Protocols Erecipes for Researchers, 2023, 18(11):3565-3613.
- [22] 葛万凯,赵世海,范雨佳. 基于对比度受限直方图均衡化和非锐化掩模的织物表面瑕疵图像增强算法[J]. 毛纺科技, 2021, 49(12):68-74.
GE W K, ZHAO SH H, FAN Y J. Image enhancement algorithm for fabric surface defects based on contrast-limited histogram equalization and non-sharpening mask[J]. Wool Spinning Science and Technology, 2021, 49(12):68-74.
- [23] 罗钧,杨永松,侍宝玉. 基于改进的自适应差分演化算法的二维 Otsu 多阈值图像分割[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(8):2017-2024.
LUO J, YANG Y S, SHI B Y. Multi-threshold image segmentation of 2D Otsu based on improved adaptive differential evolution algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(8):2017-2024.
- [24] 黄海宏,汪宇航,王海欣. 基于粒子群优化粒子滤波算法的 SOC 估算研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2):245-253.
HUANG H H, WANG Y H, WANG H X. Research on SOC estimation based on particle swarm algorithm and particle filter algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2):245-253.
- [25] 万宏强,张晨辉,孙正阳. 基于改进的模板匹配在规则边缘零件内孔检测中的应用[J]. 电子测量技术, 2021, 44(7):88-92.
WAN H Q, ZHANG CH H, SUN ZH Y. Application of inner hole detection of regular edge parts based on improved template matching[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(7):88-92.
- [26] 卢扬,李永丽. 基于实时状态评估与剩余寿命计算的高压断路器预测性维护策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(7):2716-2726.
LU Y, LI Y L. Predictive maintenance policy for high-voltage circuit breakers based on real-time state estimation and remanent useful life calculation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7):2716-2726.
- [27] 赵洪山,常杰英,曲岳哈,等. 基于二元非线性 Wiener 随机过程的变压器油纸绝缘剩余寿命预测方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15):4040-4049.
ZHAO H SH, CHANG J Y, QU Y H, et al. Residual life prediction method of transformer oil-paper insulation based on binary nonlinear Wiener random process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15):4040-4049.
- [28] 武晓春,楚昕. 基于小波包分解与 GG 模糊聚类的转辙机退化阶段划分研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(1):79-85.
WU X CH, CHU X. Research on the degradation stage division of switch machine based on wavelet packet decomposition and GG fuzzy clustering[J]. Journal of Railway, 2022, 44(1):79-85.
- [29] GUPTA K K, KUMAR S. K-means clustering based high order weighted probabilistic fuzzy time series forecasting method[J]. Cybernetics and Systems, 2023, 54(1/4):197-219.
- [30] 秦红志,孙明娟,王伟伟,等. 二元性能相关多阶段退化系统可靠性建模与分析[J]. 运筹与管理, 2022, 31(3):105-111.
QIN H ZH, SUN M J, WANG W W, et al. Reliability modeling and analysis of multi-stage bivariate degradation

process systems[J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(3):105-111.

[31] CHI B J, WANG Y SH, HU J W, et al. Reliability assessment for micro inertial measurement unit based on accelerated degradation data and copula theory [J]. *Maintenance and Reliability*, 2022, 24(3):554-563.

[32] 李金峰, 杨翊坤, 王西峰, 等. 基于多元退化数据的 RV 减速器可靠性评估 [J]. *机械传动*, 2023, 47(5): 82-87.

LI J F, YANG Y K, WANG X F, et al. Reliability evaluation of RV reducers based on multi degenerate data[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2023, 47(5):82-87.

[33] MASSEY F. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1951, 46(253):68-78.

作者简介



E-mail:likui@hebut.edu.cn

Li Kui (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 1987, received his M. Sc. degree from Hebei University of Technology in 1992, and received his Ph. D. degree from Fuzhou University in 1996. He is currently a professor at Hebei University of Technology. His main research interests include reliability and intellectualization of electrical apparatus, faulty diagnosis, life prediction of electrical apparatus, etc.

李奎 (通信作者), 1987 年于河北工业大学获得学士学位, 1992 年于河北工业大学获得硕士学位, 1996 年于福州大学获得博士学位, 现为河北工业大学电气工程学院教授, 主要研究方向为电器可靠性与智能化、故障诊断与电气设备的寿命预测等。