

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.021

气体介质影响下梅花触头载流磨损特性与电接触寿命预测

林榕兴, 王扬程, 陈志鹏, 关向雨, 刘江, 蔡开明

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:梅花触头接触不良而引发的过热性故障是开关柜和气体绝缘组合电器的典型缺陷之一,研究不同气体介质中梅花触头的载流摩擦特性和剩余寿命预测对于准确评估该类型设备的健康状态具有重要意义。文中根据真实梅花触头材料和工艺加工了试验试样,采用自行搭建的载流摩擦台开展空气、 N_2 和 SF_6 气体介质下的载流摩擦试验并获取接触电阻的退化曲线。分析触头表面形貌得知:试样表面在大电流和机械位移作用下出现了明显的粘着磨损,气体介质通过改变磨损区域的形貌和元素组成影响触头的退化过程。根据触头的 $V-T$ 关系确定了接触电阻失效阈值,利用Savitzky-Golay滤波器对接触电阻原始曲线进行平滑滤波,采用贝叶斯更新的Wiener退化模型对不同气体介质下的梅花触头进行寿命预测,结果表明:与常规Wiener模型相比,采用贝叶斯更新的Wiener退化模型具有较好的预测准确度。空气中梅花触头的剩余寿命为9 500周期, N_2 中梅花触头的剩余寿命为61 300周期, SF_6 中梅花触头的剩余寿命为32 200周期。

关键词:梅花触头;气体介质;载流摩擦;退化曲线;表面形貌;失效预测

中图分类号: TM643

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)06-0197-09

0 引言

梅花触头具有导电性好、电动稳定性高等优点,因此梅花触头在气体绝缘开关设备和开关柜中得到了广泛应用。触头的接触状态直接影响到开关设备的整体运行状态^[1-2],因接触缺陷而导致的设备局部过热故障日益增加,已经成为电网发生故障的主要因素之一^[3-6]。当触头部位发生过热故障时,会导致触头烧毁并引发短路事故^[7-8],因此研究梅花触头的失效机理并实现失效预测尤为重要。

当开关设备在线路中运行时,由于环境温度和负荷电流的周期性变化引起的循环载荷,触指和动导杆之间会发生低速短距离的滑动摩擦。摩擦表面的接触点在高温、高载荷的条件下循环往复地生成与破坏,一系列物理和化学行为构成了开关设备的载流摩擦磨损行为^[9]。对于空气介质下的载流摩擦行为,文献[10]研究镀金铜触头在高频振动引起的微动下的失效机理,总结了3种典型的微动磨损状态。文献[11]在考虑插销相对速度和位置的基础上,研究了振动应力作用下针孔连接器的磨损特性。文献[12]表明,小电流电连接器的微动性能受到大滑动操作的强烈影响。文献[13-14]表明,受电弓的碳滑板和接触线之间发生了大电流高速滑动摩擦。对于非空气介质下的载流摩擦行为,文献[15-16]总结了不同气体介质对触点的电弧电压、燃

弧时间、侵蚀量等特性的影响,得出了气氛对触点性能的影响极其复杂的结论。开关设备中的梅花触头退化过程是在大电流下相比微动磨损更为强烈的一种载流磨损行为,目前对此类磨损行为的研究较少,还不足以支撑对不同气氛条件下梅花触头失效的解释。

目前针对电接触失效预测的方法主要有物理模型、数据驱动以及两者相结合的方法。文献[17-18]基于Wiener过程建立产品的失效预测模型,使用极大似然估计对预测模型进行参数估计。文献[19]采用Wiener模型对产品的剩余寿命进行研究,在极大似然估计的基础上,借助最大期望(expectation-maximization, EM)算法对模型中的参数进行估计。文献[20]利用多尺度卷积神经网络对轴承进行寿命预测。文献[21]使用粒子群算法优化的反向传播(back propagation, BP)神经网络实现了银基触点材料的寿命预测。文献[22]根据航空圆形电连接器的振动失效机理,建立接触电阻的退化模型,并基于粒子滤波算法实时更新模型参数和剩余寿命。

气体绝缘开关设备普遍采用的绝缘介质为 SF_6 ^[23-24],开关柜中的绝缘介质为空气,而一些不执行开关任务的高压设备会使用 N_2 和 SF_6 混合气体,因此对比这3种气体介质下的梅花触头失效机理具有工程意义。文中将接触电阻作为梅花触头的退化指标,设计加工了梅花触头试样,开展不同气体介质下的载流摩擦试验,获取接触电阻的退化数

收稿日期:2023-03-20;修回日期:2023-05-27

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2020J01509)

据,并对触点的表面摩擦形貌特征和失效形式进行分析。最后使用贝叶斯更新的 Wiener 退化模型对 3 种气体介质下的梅花触头进行电接触失效预测,并验证了该模型的预测准确度。

1 梅花触头载流摩擦试验

为了模拟开关设备梅花触头的载流摩擦过程,研究触头的摩擦磨损现象。文中设计加工了梅花触头试样,利用实验室自行搭建的载流摩擦台开展不同介质下梅花触头的载流摩擦试验,获取不同介质下试样的接触电阻退化数据和表面磨损形貌。

1.1 梅花触头试样加工

文中所研究的梅花触头由 16 片并联触指通过 4 根弹簧抱紧导电杆。其中触指的材料为铜,动静导电杆材料为铝合金,两者表面均有镀银层,镀银层的平均厚度为 20 μm 。

典型的开关设备梅花触头的结构如图 1 所示,图 1(a)为梅花触头整体结构,图 1(b)为单片触指与导电杆的接触情况。文中忽略了重力因素、导杆插接偏差和零件生产误差的影响,认为每一片触指与导电杆的接触状态都相同,如图 1(a)所示,触指均匀分布,导杆稳定插接在触指之间。因此,文中将接触试样简化成 2 个圆柱侧面垂直接触的模型,试样接触形式如图 1(b)中的试样示意图所示。

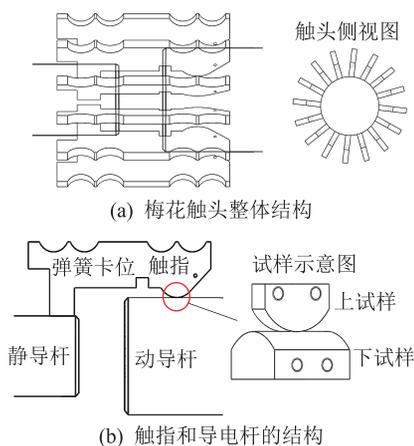


图 1 梅花触头结构

Fig.1 The structure of plum blossom contact

1.2 试验平台组成

试验平台的整体接线如图 2 所示,由 AC 恒流源、数字万用表、载流摩擦台、电机控制盒、工控机、压力信号调理箱和 NI 采集卡构成。AC 恒流源提供恒定的交流电流;数字万用表测量电压值;载流摩擦台用于模拟梅花触头在不同气体介质下的载流滑动摩擦行为;电机驱动软件(CME2)通过电机控制盒设置音圈电机往复运动的幅值和频率;压力信

号调理箱和 NI 采集卡用于获取接触压力 F 。

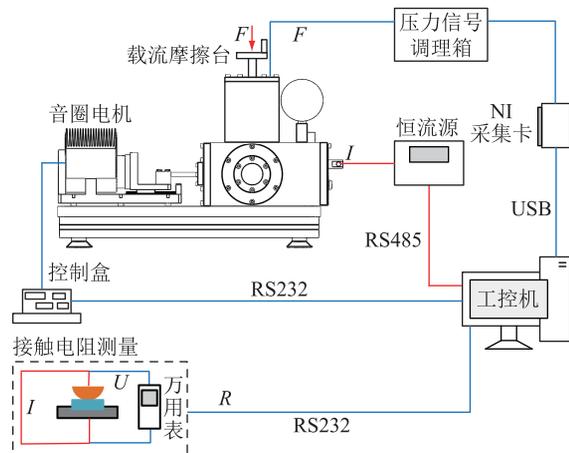


图 2 试验平台接线

Fig.2 The wiring of test platform

作为梅花触头电接触寿命评估的参数指标,接触电阻值的准确测量尤为重要,因此文中采用开尔文四线法获取上、下试样之间的接触电阻值。试验过程中的接触压力 F 、电流 I 、电压 U 和接触电阻 R 均通过工控机上的 Labview 软件予以实时记录。

1.3 试验参数和试验流程

为模拟梅花触头的整个退化过程,文中设计了不同气体介质下的载流摩擦试验,接触压力为 30 N,位移幅值为 3 mm,滑动频率为 2 Hz,气体压强为 0.2 Mpa。为探究不同气体介质对梅花触头电接触失效机理的影响,文中将气体介质作为自变量,在 60 A 的交流电流下进行试验,分别得到空气、 N_2 、 SF_6 介质下试样接触电阻退化数据和表面磨损形貌。

试验流程如图 3 所示,试验前,使用酒精对试样进行清洁,在完成载流摩擦台的安装接线后,对密封腔体进行充气。对试样加载法向载荷并施加 60 A 交变电流,在 CME2 软件上设置音圈电机运动的幅值、频率,随即开启 Labview 软件的各个测量模块对数据进行采集。经过 66 000 次循环摩擦后,结束试验,将试样迅速取出,并使用真空泵将其封装在真空袋中。单次试验时间为 10 h。

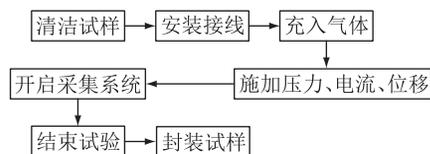


图 3 载流摩擦试验流程

Fig.3 The procedure of current-carrying friction test

2 试验结果分析及失效阈值确定

文中从接触电阻退化趋势、试样表面形貌等方

面分析接触对的载流摩擦磨损特性,并进一步总结不同气体介质对梅花触头电接触特性的影响规律,在此基础上揭示并阐述其载流摩擦机理,同时根据 $V-T$ 关系确定梅花触头的失效阈值。

2.1 接触电阻退化曲线

不同气体介质下的试样接触电阻退化曲线如图4所示,试样的接触电阻在载流摩擦试验中的退化趋势呈现阶段性变化。各阶段的划分可以从两方面进行总结,一方面,在波动规律上,第一阶段的波动幅值明显低于第二阶段,第二阶段的波动幅值与第三阶段的前期相近,甚至在 N_2 中还会高于第三阶段,但第三阶段数据波动的剧烈程度明显高于第二阶段,这一点可以从退化曲线的密集程度上得知。另一方面,在数据波动范围上对各阶段进行划分,如表1所示。同时考虑各阶段的波动规律和范围,即可明确地对退化曲线进行阶段划分。

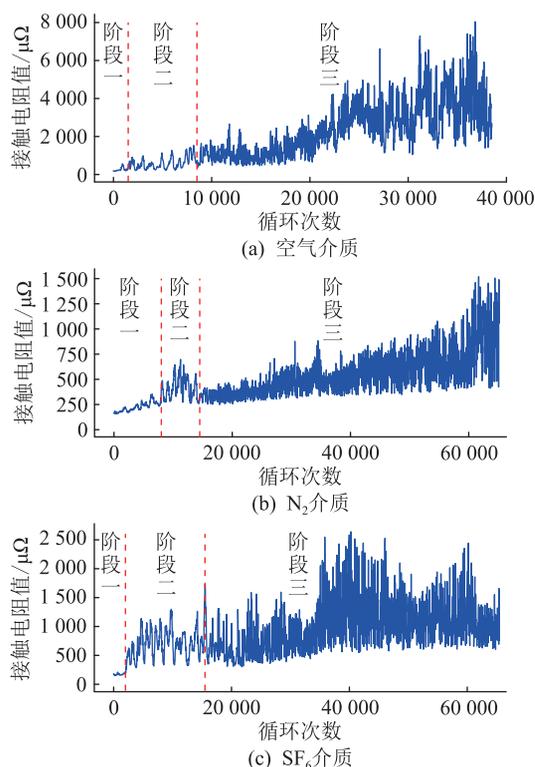


图4 不同气体介质下接触电阻退化曲线
Fig.4 The contact resistance degradation curves in different gas medium

表1 接触电阻值波动范围

Table 1 The fluctuating range of contact resistance values $\mu\Omega$

介质	阶段一	阶段二	阶段三
空气	150~550	200~1 500	500~8 000
N_2	150~350	250~700	250~1 500
SF_6	150~200	200~1 300	350~2 500

阶段一,银镀层基本保持完好,试样的接触电

阻值较低,同时良好的表面状况使得试样在摩擦过程中的接触电阻值变化十分平稳。阶段二,接触电阻值缓慢上升,同时呈现并不剧烈的波动变化,此阶段中,试样表面银镀层的磨损程度相对较低,摩擦区域中的磨屑较少,摩擦表面的粗糙度增大,在宏观上表现为接触面积减小。阶段三,试样表面状况进一步恶化,随着滑动摩擦次数的增加,接触电阻值逐渐上升并且波动十分剧烈,最高值远超出触头接触电阻失效阈值,这种情况称为间歇失效现象^[25]。

间歇失效现象的发生有两方面原因:(1)试样表面不断生成金属颗粒及其反应物之类的磨屑,这些阻碍电流传导的产物一部分在摩擦区域中循环移动,另一部分在压力载荷的作用下附着在摩擦表面,使得触点的接触状态很难保持稳定,导致试样的接触电阻剧烈变化。(2)导电斑点在接触压力和机械位移的作用下迅速消失,接触电阻急剧上升,电流热效应增强,使得接触区域的材料软化、蒸发,生成了新的导电斑点,从而使接触电阻值下降。导电斑点生成和消失之间的竞争导致的后果是变化极其不稳定的接触电阻值以及磨损程度愈发严重的表面状况。

2.2 试样表面形貌分析

图5为通过 uscan 光学轮廓仪所观察到的 SF_6 介质下的试样表面轮廓图,图中的颜色表征试样表面的高度值(最低点高度值为 $0 \mu m$)。从图中可以看到,试样之间发生了粘着磨损,上试样表面有材料堆积,而下试样表面则出现材料缺失现象。上述材料转移现象的发生是因为铝材料的硬度小于铜材料,从而在电流和机械位移的作用下,使得下试样失去的材料堆积在上试样表面。

图6—图8为3种介质下的摩擦上试样表面形貌图和能谱分析图。在表面形貌图中,红色方框所标定的区域为放大区域,从图中可以看出,3种介质下的试样表面均存在镀层磨损,并且有化学反应物附着在试样表面。在能谱分析图中,横坐标为各元素的电子结合能,纵坐标为相对光电子流强度,从图中得知,3种介质下的上试样都出现了Al元素,由此可以进一步判断出试样之间发生了材料转移现象。

在空气介质下,上试样表面有大片的电流侵蚀区域,由图6(a)中的放大区域可见,上试样摩擦区域的银镀层完全被磨穿,基体表面覆盖着大量的金属氧化物。试样表面还存在着类似刮痕的剥落痕迹,由于在热作用下,试样摩擦区域的温度很高,凸

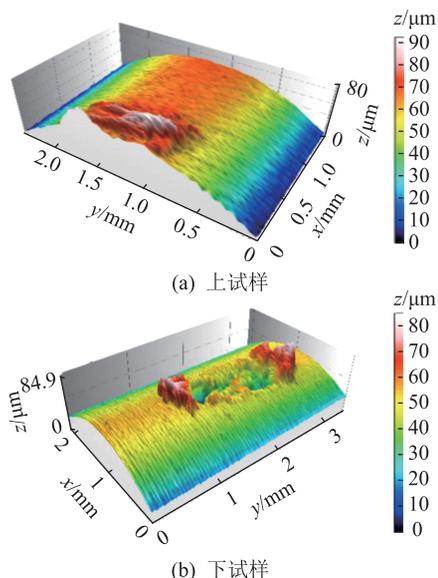


图5 SF₆介质下的试样表面轮廓

Fig.5 The surface profile of friction sample under SF₆

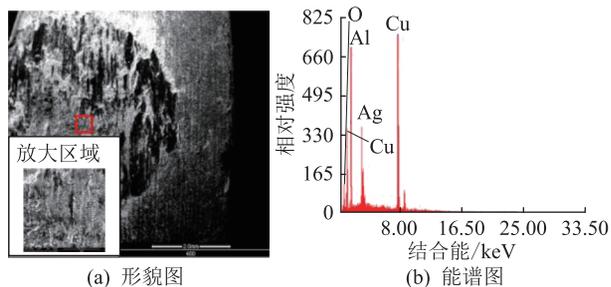


图6 摩擦上试样表面形貌及能谱图(空气)

Fig.6 The surface morphology and energy spectrum of friction sample (air)

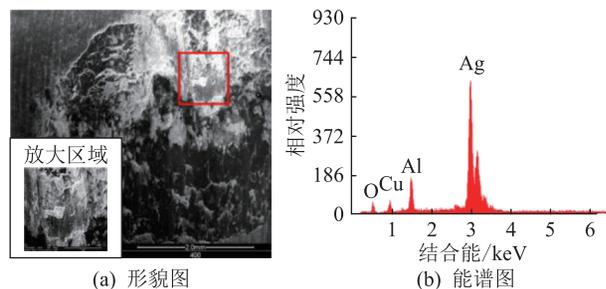


图7 摩擦上试样表面形貌及能谱图(N₂)

Fig.7 The surface morphology and energy spectrum of friction sample (N₂)

起点软化并在接触压力的作用下附着在试样表面,在滑动过程中粘连脱落,形成刮痕。

在 N₂ 介质下,摩擦区域内存在少量金属颗粒、犁沟以及剥落层,摩擦表面还有亮白色的氧化物覆盖。另外,金属氧化物在高温的作用下软化,粘着在试样表面,并在滑动摩擦力下被剪切,从而在基体表面留下了粘着物。

在 SF₆ 介质下,试样表面的银镀层并没有被完

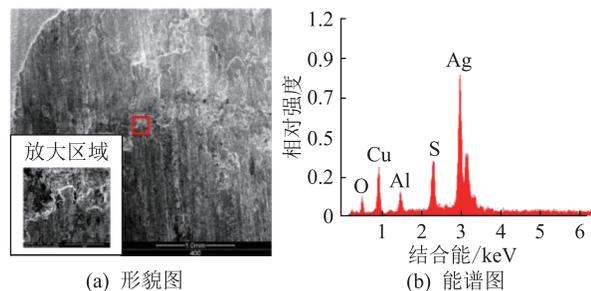


图8 摩擦上试样表面形貌及能谱图(SF₆)

Fig.8 The surface morphology and energy spectrum of friction sample (SF₆)

全磨掉,只有在小部分区域才有铜基体裸露。从放大区域中可见到电流侵蚀和熔融现象。由能谱图可见,磨损区域中存在 S 元素,这说明 SF₆ 气体在较高的接触温升下发生分解,并与试样表面的金属发生了化学反应形成硫化物。

综上,通过对 3 种介质下的试样表面形貌分析可知,空气介质下的试样表面存在刮痕,其表面磨损最为恶劣;N₂ 介质下的试样表面有粘着物附着,镀银层磨损严重;SF₆ 介质下的试样表面磨损程度最低,铜基体并没有完全暴露在气体介质下。

2.3 梅花触头的接触电阻失效阈值

接触电阻失效阈值的确定是对梅花触头进行失效预测的一个重要环节,文中根据梅花触头的 V-T 关系确定了接触电阻失效阈值。当触头表面的温升达到材料的软化点时,将触头视为失效。

当电流通过梅花触头时,触点的温升 T_k 和电压降 U 之间的关系,即 V-T 关系^[26]为:

$$T_k = U^2/8LT \quad (1)$$

式中:L为系数,取 2.4×10⁻⁸ V²/K²;T为触头平均温度,T=(T_r+T_b)/2,T_b为长期工作时最大允许发热温度,镀银触头的 T_b为 378 K,T_r为触头材料的软化点温度。

梅花触头单片触指的长期载流量一般为 65 A,铝的软化点温度为 423 K,代入式(1)得到电压降,再根据欧姆定律求得接触电阻失效阈值为 895 μΩ。

3 梅花触头剩余寿命预测建模

为实现对梅花触头剩余寿命的预测,文中首先使用 Savitzky-Golay 滤波器对原始曲线进行平滑滤波,根据首达时间的定义,接触电阻值首次超过失效阈值的时刻为触头的失效时间;再使用贝叶斯更新的 Wiener 模型对梅花触头进行失效预测并与常规的 Wiener 模型进行比较,验证了贝叶斯更新的 Wiener 模型对梅花触头电接触失效预测的适用性。

3.1 Savitzky-Golay 滤波器

Savitzky-Golay 滤波器是基于最小二乘法与低次多项式拟合的一种滤波方法,其假设有 $2m+1$ 个数据,分别为 $x(-m)$ 、 $x(-m+1)$ 、 \dots 、 $x(m-1)$ 、 $x(m)$,现构造一个 n 阶多项式来拟合这些数据:

$$h(i) = \sum_{k=0}^n c_k x(i)^k \quad (2)$$

式中: c_k 为该多项式的系数。 n 阶多项式的拟合效果可用拟合数据点与原数据点的残差平方和表示:

$$\varepsilon = \sum_{i=-m}^m (h(i) - x(i))^2 \quad (3)$$

为使残差平方和最小,将式(2)代入式(3),对式(3)的各个系数 c_0 、 c_1 、 \dots 、 c_n 分别求偏导为 0,解得:

$$\sum_{i=-m}^m x(i) i^r = \sum_{k=0}^n c_k \sum_{i=-m}^m i^{k+r} \quad r = 0, 1, \dots, n \quad (4)$$

当确定单边点数 m 、多项式的阶次 n 以及待拟合的数据 $x(i)$ 时,即可求出该多项式的系数 c_k ,再将数据中心点的横坐标输入式(2),就可得到中心点关于整组数据的最佳拟合。

文中使用 Savitzky-Golay 滤波器对接触电阻退化数据进行平滑处理,去除短期趋势,保留了长期趋势,如图 9 所示。空气、 N_2 、 SF_6 介质下的接触电阻退化曲线到达失效阈值时的循环周期分别为 9 500、61 300、32 200。从图 9 中可知,空气介质下的试样接触电阻退化得最为迅速,这是由于试样表面金属在热作用下迅速与氧气反应生成金属氧化膜并逐渐累积,极大地阻碍了电流的传导。 N_2 和 SF_6 介质下的试样接触电阻退化较为缓慢,其中 SF_6 介质下的试样接触电阻值较 N_2 介质下的试样接触电阻值大的原因是:在大电流的热效应下, SF_6 气体分解,分解物与试样表面金属发生化学反应生成阻碍电流传导的硫化物。

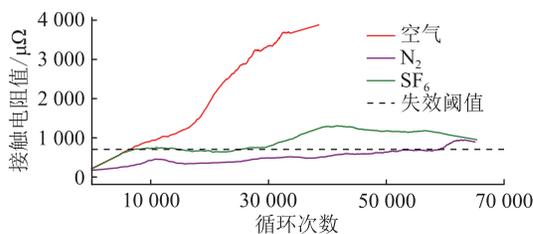


图 9 接触电阻退化过程

Fig.9 The degradation process of contact resistance

3.2 Wiener 数学模型

文中研究的梅花触头电接触退化过程存在多变量耦合和非线性的特点,其接触电阻值的退化受到多方面因素的影响,退化过程十分复杂,难以建

立起较为准确的失效机理模型。统计数据驱动的方法不需要彻底了解导致系统故障的基本物理过程,因此可以用于触头的失效预测。基于 Wiener 过程的方法是一种具有独立增量的随机过程,是一类具有漂移项的布朗运动,可以描述由大量微小损失不断累积的单调或非单调的退化过程^[27]。

从上述梅花触头的接触电阻退化曲线分析可知,触头在载流滑动摩擦的过程中,由于受到热、电、力等多方面因素的影响,其退化过程是非线性、随机性的,因此,文中采用非线性 Wiener 过程对梅花触头退化过程进行数学建模。文中采用的非线性 Wiener 模型为:

$$X(t) = X(0) + \mu\Lambda(t; \theta) + \sigma B(t) \quad (5)$$

式中: $X(t)$ 为退化量; $X(0)$ 为初始退化量; $\Lambda(t; \theta)$ 为非线性退化过程,文中定义 $\Lambda(t; \theta) = t^b$, b 为常数; $B(t)$ 为布朗运动过程; μ 、 σ 分别为漂移系数和扩散系数。

相较于线性 Wiener 过程,非线性 Wiener 过程难以得到首达时刻分布的封闭表达式,为克服这一障碍,文中采取了一个温和的假设^[28]:如果退化过程恰好在某个时间能精确达到失效阈值,则假定在该时间之前超过失效阈值的概率可以忽略不计。文中采用了触头失效的概率密度函数(probability density function, PDF)的近似表达式:

$$f_{T|\mu} = \frac{1}{\sqrt{2\pi t}} \left(\frac{S(t)}{t} + \frac{\Lambda'(t; \theta)}{\sigma} \right) \exp\left(-\frac{S^2(t)}{2t} \right) \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} S(t) = \frac{1}{\sigma} (D - \mu\Lambda(t; \theta)) \\ \Lambda'(t; \theta) = \mu b t^{b-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中: D 为失效阈值。

文中假定 $t_{0:n} = \{t_0, t_1, \dots, t_n\}$ 时刻的退化数据对应为 $X_{0:n} = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$,由上述分析可得到退化模型的似然函数如式(8)所示,对式(8)两边取对数,可得到退化模型的对数似然函数。

$$L(\theta) = \prod_{j=0}^n \frac{x_j - \mu(1-b)t_j^b}{\sqrt{2\pi t_j^3 \sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x_j - \mu t_j^b)^2}{2t_j \sigma^2} \right) \quad (8)$$

3.3 模型参数辨识

为了描述触头退化过程中的随机效应,文中将 Wiener 退化模型中的漂移系数随机化,假设其服从高斯分布 $\mu \sim N(\mu_0, \sigma_0)$ 。文中使用 EM 算法对随机漂移系数和扩散系数进行参数辨识。

EM 算法由 E 步和 M 步反复迭代完成^[29]。已

知退化数据 X 及其隐变量 Y 构成完全数据 Z , 则完全数据 Z 关于模型参数 θ 的似然函数为:

$$L(\theta|Z) = L(\theta|X, Y) \triangleq p(X, Y|\theta) = p(X|Y, \theta)p(Y|\theta) \quad (9)$$

式中: \triangleq 为定义式符号; $p(X, Y|\theta)$ 为完全数据的后验分布; $p(X|Y, \theta)$ 为退化数据 X 的后验分布; $p(Y|\theta)$ 为隐变量 Y 的后验分布。

E 步: 求取完全数据对数似然函数关于隐变量 Y 的条件期望。

$$Q(\theta_{k+1}|X, \theta_k) = E\{\ln L(\theta_{k+1}|Z) | X, \theta_k\} = E\{\ln p(X, Y|\theta_{k+1}) | X, \theta_k\} = \int \ln p(X, Y|\theta_{k+1}) \cdot f(y|X, \theta_k) dy \quad (10)$$

式中: θ_k 为第 k 次迭代时的参数估计值; θ_{k+1} 为待进行第 $k+1$ 次迭代的模型参数; $f(y|X, \theta_k)$ 为隐变量 Y 的边缘分布密度函数。

M 步: 对 E 步所求得的期望进行极大化估计, 找到一个最大值 θ_{k+1} 。

$$\theta_{k+1} = \arg \max_{\theta} Q(\theta|X, \theta_k) \quad (11)$$

最后将参数估计结果返回 E 步, 如此形成反复迭代, 直至结果收敛, 得到模型的参数估计值。

文中将 EM 算法估计的结果作为先验信息, 使用贝叶斯方法对先验信息进行更新, 得到漂移系数的超参数后验分布, 将后验分布代入 EM 算法中进行下一轮的迭代。根据贝叶斯概率分布理论^[30], 在已知退化数据的前提下, 漂移系数 μ 的后验分布 $p(\mu|X_{0:n})$ 为:

$$p(\mu|X_{0:n}) = \frac{p(X_{0:n}|\mu)p(\mu)}{p(X_{0:n})} \quad (12)$$

式中: $p(X_{0:n}|\mu)$ 为当前漂移系数下, 退化数据的后验分布; $p(\mu)$ 为漂移系数 μ 的先验分布; $p(X_{0:n})$ 为退化数据的先验分布。令 μ_{01}, σ_{01} 表示参数 μ 的先验信息, 则 $p(X_{0:n}|\mu)$ 和 $p(\mu)$ 的具体分布为:

$$p(X_{0:n}|\mu) = \prod_{j=0}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta t_j \sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x_j - \mu\Delta t_j^b)^2}{2\Delta t_j \sigma^2}\right) \quad (13)$$

$$p(\mu) = \prod_{j=0}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{01}^2}} \exp\left(-\frac{(\mu - \mu_{01})^2}{2\Delta t_j \sigma_{01}^2}\right) \quad (14)$$

由于 $p(X_{0:n}|\mu)$ 和 $p(\mu)$ 均服从正态分布, 则两者的乘积为共轭正态分布, 根据共轭正态分布的性质, 可得到其后验分布为:

$$p(\mu|X_{0:n}) = \prod_{j=0}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{01}^2}} \exp\left(-\frac{(\mu - \mu_{01})^2}{2\Delta t_j \sigma_{01}^2}\right) \quad (15)$$

4 预测结果分析

为验证贝叶斯更新的 Wiener 模型适用于梅花触头的失效预测, 文中分别使用该模型和常规 Wiener 模型对 3 种介质下的梅花触头进行剩余寿命预测。2 个模型所得出的失效概率密度曲线如图 10—图 12 所示, 根据失效概率密度曲线所获取的预测寿命值如表 2 所示。

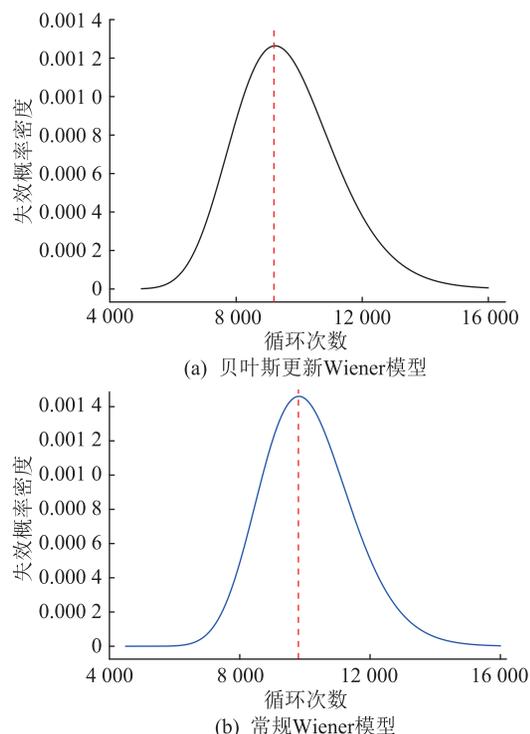


图 10 失效概率密度曲线(空气)

Fig.10 The failure probability density curves (air)

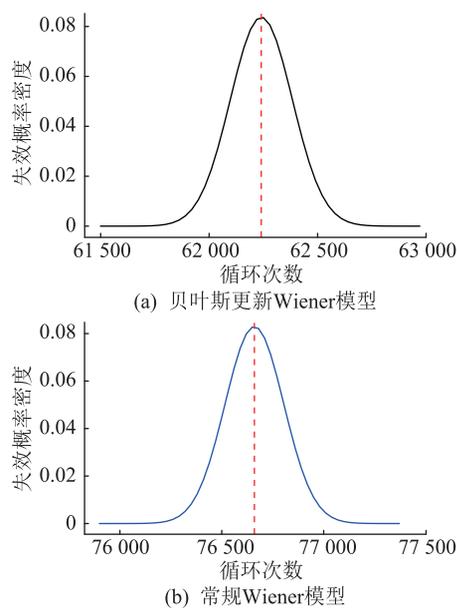


图 11 失效概率密度曲线(N₂)

Fig.11 The failure probability density curves (N₂)

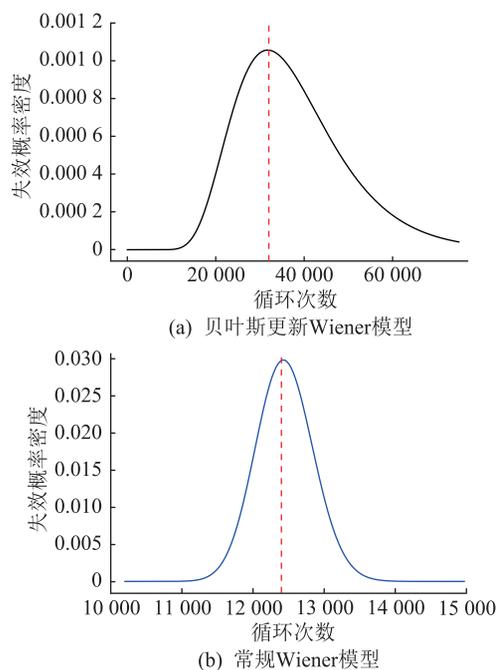
图 12 失效概率密度曲线(SF₆)Fig.12 The failure probability density curves (SF₆)

表 2 预测寿命值与实际寿命值

Table 2 The life prediction value and actual value

介质	实际寿命	预测寿命	
		有贝叶斯更新	无贝叶斯更新
空气	9 500	9 200	9 800
N ₂	61 300	62 240	76 660
SF ₆	32 200	32 000	12 400

由表 2 可知,对于空气和 N₂ 介质下的触头寿命预测,常规 Wiener 模型所预测的结果会比较保守。由于常规 Wiener 模型不对参数进行贝叶斯更新,没有考虑退化的随机性,其漂移系数为一常数,而从图 9 可知,SF₆ 介质下的电阻退化有很明显的下降趋势,存在很大的随机性,因此常规模型不适用于 SF₆ 介质下的触头寿命预测。文中将预测值与梅花触头的实际寿命进行对比,结果表明贝叶斯更新的 Wiener 退化模型具有更好的预测准确度,该模型适用于电、热、力作用下梅花触头的失效预测。

5 结论

文中对梅花触头进行了不同气体介质下的载流摩擦试验,分别对不同介质下的摩擦试样进行表面形貌分析,同时利用所获取的接触电阻退化数据验证了文中建立的失效预测模型的准确性,得出了以下结论:

(1) 接触电阻退化曲线呈现阶段性变化,空气介质下试样的电阻退化趋势最为剧烈,N₂ 介质和 SF₆ 介质下的试样接触电阻值在载流摩擦过程中退

化较为缓慢。

(2) 在气体介质下的载流摩擦过程中,试样表面存在化学反应物、粘着磨损和材料转移现象。空气介质下的试样表面状况最为恶劣,SF₆ 介质下的试样表面磨损程度最低。

(3) 对于大电流和机械位移作用下的梅花触头的失效预测,贝叶斯更新的 Wiener 退化模型具有较好的预测准确度。

参考文献:

- [1] 冯英,祁海洋,兰剑,等. 两种不同结构梅花触头的电接触性能分析[J]. 高压电器,2022,58(7):177-182.
FENG Ying, QI Haiyang, LAN Jian, et al. Electric contact performance analysis of tulip contact with two different structures [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 177-182.
- [2] 钱锡颖,金坤鹏,李杨,等. 高压隔离开关触头镀银层质量检测关键技术[J]. 浙江电力,2021,40(5):100-104.
QIAN Xiyang, JIN Kumpeng, LI Yang, et al. Key technology for silver coating quality inspection of high-voltage disconnecter contacts [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(5): 100-104.
- [3] 鲁旭臣,李爽,唐佳能,等. 550 kV GIS 内触头发热故障诊断方法与影响因素研究[J]. 高压电器,2021,57(11):220-226.
LU Xuchen, LI Shuang, TANG Jianeng, et al. Study on diagnosis method and influence factor of overheating of contacts in 550 kV GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 220-226.
- [4] 周鑫,鲁铁成,罗容波,等. 气体绝缘组合电器触头电接触状态检测与评估方法[J]. 高电压技术,2015,41(1):217-224.
ZHOU Li, LU Tiecheng, LUO Rongbo, et al. Detection and evaluation method of electrical contact state in gas insulated switchgear [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 217-224.
- [5] 王典浪,曹鸿,李国良,等. 换流变阀侧干式套管内部插接结构过热隐患分析及整治[J]. 电瓷避雷器,2021(2):100-106.
WANG Dianlang, CAO Hong, LI Guogen, et al. Analysis and treatment of the potential overheat problem of the inner plug connector for converter transformer RIP bushings [J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 100-106.
- [6] 张婧侯,张军强,李楠,等. 基于有限元分析的 GIS 断路器温度场仿真研究[J]. 电网与清洁能源,2021,37(8):53-61.
ZHANG Jingyu, ZHANG Junqiang, LI Nan, et al. Simulation research on the temperature field of GIS circuit breakers based on finite element analysis [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 53-61.
- [7] 刘凯,彭在兴,王颂,等. GIS 内部过热工程仿真技术研究[J]. 高压电器,2020,56(6):13-18,25.
LIU Kai, PENG Zaixing, WANG Song, et al. Research on GIS internal overheating engineering simulation technology [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 13-18, 25.
- [8] 金虎,彭在兴,王颂,等. GIS 触头过热故障实验及外壳红外热像分布特征研究[J]. 智慧电力,2017,45(11):37-41,95.
JIN Hu, PENG Zaixing, WANG Song, et al. Study on overheat experiment of GIS contact and infrared thermal image distribution on its shell [J]. Smart Power, 2017, 45(11): 37-41, 95.

- [9] 惠阳,刘贵民,闫涛,等. 载流摩擦磨损研究现状及展望[J]. 材料导报,2019,33(13):2272-2280.
HUI Yang, LIU Guimin, YAN Tao, et al. Research status and prospect of current-carrying friction and wear[J]. Materials Reports, 2019, 33(13): 2272-2280.
- [10] REN W B, DU Y W, CUI L, et al. Research on fretting regimes of gold-plated copper alloy electrical contact material under different vibration amplitude and frequency combinations[J]. Wear, 2014, 321: 70-78.
- [11] RAVELO B. Multiphysics analysis of pin-socket electrical dynamic contact susceptibility under vibration stress[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(2): 344-351.
- [12] LAPORTE J, FOUVRY S, PERRINET O, et al. Influence of large periodic sliding sequences on the electrical endurance of contacts subjected to fretting wear[C]//2013 IEEE 59th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm 2013). Newport, RI, USA. IEEE, 2013: 1-9.
- [13] 付文明. 电流对滑板/接触线载流滑动摩擦磨损性能影响的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
FU Wenming. Experimental study on the effect of current on the friction and wear behavior of pantograph strip/contact wire with electric current[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [14] 冯一桐. 弓网系统滑动电接触表面磨损特征研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2022.
FENG Yitong. Research on wear characteristics of sliding electrical contact in pantograph-catenary system[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [15] 魏江,宗天元,黄靖,等. 环境气氛对继电器触点性能影响的研究进展[J]. 电工材料, 2017(1): 23-28.
WEI Jiang, ZONG Tianyuan, HUANG Jing, et al. Study on influences of atmosphere on contact performance of relays: a review[J]. Electrical Engineering Materials, 2017(1): 23-28.
- [16] 纽春萍,熊乾村,徐丹,等. 大功率直流接触器在不同介质中开断电弧特性的实验研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3481-3486.
NIU Chunping, XIONG Qiancun, XU Dan, et al. Experimental study on arc breaking characteristics of high-power DC contactor in different gases[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3481-3486.
- [17] 秦靖舒,范淑薇,关向雨,等. 基于 Wiener 过程气体绝缘母线触头接触失效预测[J]. 电测与仪表, 2019, 56(24): 7-12, 38.
QIN Jingshu, FAN Shuwei, GUAN Xiangyu, et al. Contact failure prediction of gas insulated bus contact on Wiener process[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 7-12, 38.
- [18] 张振鹏,张明泽,刘骥,等. 振动条件下 XLPE 绝缘热老化的可靠性评估[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3726-3731.
ZHANG Zhenpeng, ZHANG Mingze, LIU Ji, et al. Reliability assessment on thermal aging of XLPE insulation under vibration condition[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3726-3731.
- [19] 魏婉梦. 基于 Wiener 退化过程的剩余寿命估计[D]. 南京:东南大学, 2018.
WEI Wanmeng. Remaining useful life estimation based on Wiener degradation process[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [20] ZHU J, CHEN N, PENG W W. Estimation of bearing remaining useful life based on multiscale convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 3208-3216.
- [21] 韩春阳. 银基触点材料电性能模拟实验与寿命预测方法研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2020.
HAN Chunyang. Research on electrical performance simulation experiment and life prediction method of silver-based contact materials[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.
- [22] SUN B, LI Y, WANG Z L, et al. Remaining useful life prediction of aviation circular electrical connectors using vibration-induced physical model and particle filtering method[J]. Microelectronics Reliability, 2019, 92: 114-122.
- [23] 刘杰,毛海波,姜涛,等. SF₆ 密度继电器监测 GIS 气室压力的误差分析[J]. 浙江电力, 2022, 41(2): 73-77.
LIU Jie, MAO Haibo, JIANG Tao, et al. Error analysis of SF₆ density relay in pressure monitoring of GIS chamber[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(2): 73-77.
- [24] 李威,张文明,吴西博,等. 500 kV SF₆ 气体绝缘电流互感器绝缘故障的分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(5): 54-59.
LI Wei, ZHANG Wenming, WU Xibo, et al. Insulation fault analysis of 500 kV SF₆ gas insulated current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(5): 54-59.
- [25] 任万滨,王鹏,马晓明,等. 电连接器镀金铜触点材料微动磨损特性的实验研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 119-124.
REN Wanbin, WANG Peng, MA Xiaoming, et al. Experimental research on fretting wear characteristics of Au-plated copper contacts used in electrical connectors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 119-124.
- [26] 黎斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社, 2019.
LI Bin. Design of SF₆ high voltage electrical apparatus[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [27] 王小林. 基于非线性 Wiener 过程的产品退化建模与剩余寿命预测研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2014.
WANG Xiaolin. Research of degradation modeling and residual life estimation for deteriorate products based on nonlinear Wiener process[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [28] SI X S, WANG W B, HU C H, et al. Remaining useful life estimation based on a nonlinear diffusion degradation process[J].

IEEE Transactions on Reliability, 2012, 61(1):50-67.

- [29] 李柏椿. EM 算法及其改进算法在参数估计中的应用研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2017.

LI Baichun. Application of EM algorithm and its improved algorithm to parameter estimation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.

- [30] 陈敏. 基于 Wiener 过程的锂离子电池剩余寿命预测方法研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2020.

CHEN Min. Research on remaining useful life prediction method of lithium-ion battery based on Wiener process [D].

Chongqing: Chongqing University, 2020.

作者简介:



林镛兴

林镛兴(1999),男,硕士在读,研究方向为电气设备状态监测与故障诊断(E-mail:16326-16462@qq.com);

王扬程(1999),男,硕士在读,研究方向为电气设备状态监测与故障诊断;

陈志鹏(1997),男,硕士,研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。

Current-carrying friction characteristics and electrical contact life prediction of plum blossom contacts under the influence of gas medium

LIN Rongxing, WANG Yangcheng, CHEN Zhipeng, GUAN Xiangyu, LIU Jiang, CAI Kaiming
(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Overheating fault caused by poor contacts of plum blossom contact is one of the typical defects of switchgear and gas insulation combined appliances. The study of current-carrying friction characteristics and remaining life prediction of plum blossom contacts in different gas medium is of great theoretical and applied significance for the accurate evaluation of the health status of this type of equipment. The test samples are processed according to the real plum blossom contact materials and process. The current-carrying tests in air, N_2 and SF_6 gas medium are carried out by using a self-built current-carrying table, and the contact resistance degradation curves are obtained. The analysis of the surface morphology of the contact shows that the sample surface shows obvious adhesive wear under the effect of large current and mechanical displacement, the gas medium affects the degradation process of the contact by changing the morphology and element composition of the wear region. The contact resistance failure threshold is determined according to the $V-T$ relationship of the contact. The Savitzky-Golay filter is used to smooth the original curves of the contact resistance. The life of plum blossom contacts in three gas medium is predicted by using Wiener degradation model updated by Bayesian. The results show that the model is more accurate than the conventional Wiener model. The remaining life of the plum blossom contact in the air is 9 500 cycles. The life of the plum blossom contact in N_2 is 61 300 cycles. The life of the plum blossom contact in SF_6 is 32 200 cycles.

Keywords: plum blossom contact; gas medium; current-carrying friction; degradation curves; surface morphology; failure prediction

(编辑 方晶)