第 50 卷 第 2 期：489-502 高电压技术 Vol.50, No.2: 489-502
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230862

高压断路器触头烧蚀及电寿命评估研究综述

赵书涛[1]，黄伟杰[1]，刘会兰[1]，杨嘉睿[2]，刘云鹏[1]
（1. 华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室，保定 071003；
2. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院，杭州 310000）

摘　要：随着高压断路器接近设计寿命年限其触头烧蚀情况越来越严重，评估高压断路器电寿命可提高利用效率同时保证其运行可靠性。根据近些年有关开关电器电寿命相关文献，首先从触头烧蚀数学模型出发剖析了断路器电寿命终结物理过程；然后对比了目前常用的断路器电寿命评估方法优缺点，指出数据模型是驱动设备寿命准确评估的关键，并借鉴其他类型开关电器电寿命相关研究为高压断路器靠性评估开拓了思路。最后指出高压断路器电寿命预测所面临挑战以及研究方向。

关键词：高压断路器；状态评估；电寿命；触头烧蚀；开关电器

Review of Research on Contact Ablation and Electrical Life Assessment of High-voltage Circuit Breakers

ZHAO Shutao[1], HUANG Weijie[1], LIU Huilan[1], YANG Jiarui[2], LIU Yunpeng[1]
(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Economic and Technological Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: As high-voltage circuit breakers approach their design life and their contact ablation becomes more and more serious, evaluating the electrical life of high-voltage circuit breakers can improve the utilization efficiency and ensure their operational reliability. According to the literature related to the electrical life of switchgear in recent years, the physical process of the end of electrical life of the circuit breaker is analyzed from the mathematical model of contact ablation. Then, the advantages and disadvantages of the current commonly-used assessment methods for circuit breaker electrical life are compared, and it is pointed out that the data model is the key to the accurate evaluation of the life of drive equipment, and the research on the electrical life of other types of switchgear electrical appliances is used to open up ideas for the reliability evaluation of high-voltage circuit breakers. Finally, the challenges and research directions of electrical life prediction of high-voltage circuit breakers are pointed out.

Key words: high voltage circuit breakers; status assessment; electrical life; contact ablation; switch electrical appliances

0　引言

高压断路器作为电力系统安全保障设备，其可靠性不容忽视，线路切合操作或快速响应短路故障瞬间产生强烈电弧，累积效应造成断路器触头烧蚀显著[1-2]。据统计，弧触头严重烧蚀造成 SF_6 断路器开断短路电流失败故障所比 10%左右[3-4]。高压断路器使用寿命由机械寿命和电寿命决定，而事实上，电寿命远远低于机械寿命[5]。断路器电寿命受到多种因素影响，与线路载流量、开断次数和负载情况，以及触头动作、接触电阻和灭弧室状态等息息相关，起决定作用的是弧触头烧蚀状况。断路器开断短路电流对弧触头烧蚀严重，尤其用于投切电容器组的断路器需要承受比工频分量大几倍甚至几十倍的关合涌流，因此，弧触头受到烧蚀程度更深[6]。弧触头侵蚀会使灭弧室压气不足，开断能力下降，触头间接触不良受到电动力作用会产生异常振动[7]。另一方面使灭弧室电场畸变，绝缘恢复特性下降易出现重击穿现象。严重情况下，断路器分、合时弧触头接触行程减小不能起到接通燃弧的作用，电寿命严重缩短[8]。每台断路器所处的工况不同，现场采用额定短路电流开断次数或额定电流开断次数来描述剩余电寿命，事实上难以准确评估断路器电寿命。

基金资助项目：国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JY22000V)。
Project supported by Science and Technology Project of State Grid Zhejing Electric Power Co., Ltd. (5211JY22000V).

国内外学者针对断路器电寿命终结过程展开了大量研究，根据触头烧蚀机理提出了各种断路器电寿命评估方法。目前，断路器电寿命非解体式的评估方法主要有[9-10]：基于电寿命曲线(N-I 曲线)、动态电阻、振动信号和电流转换过程的高压断路器电寿命评估方法、基于数据模型驱动的断路器综合电寿命预测方法等几种。

本文在分析触头烧蚀机理和数学模型的基础上，对高压断路器和其他开关电器电寿命的评估方法进行剖析，总结归纳了方法优缺点及优化过程。最后，参考目前开关电器劣化模型和信号处理算法特点，对未来高压断路器电寿命的研究进行展望。

1 触头烧蚀机理及数学模型

1.1 触头烧蚀过程及其特征

断路器分闸时动、静弧触头间恢复电压小于弧隙介质强度，而该阶段弧触头温度不高，只是由于摩擦而产生机械磨损，因弧触头材料硬度较高，因此该阶段产生的质量损失较少。

无论是合闸过程还是分闸过程都存在燃弧过程，燃弧阶段使得弧触头温度急剧升高，该阶段由于喷溅和蒸发表现为触头材料损失和表面形貌改变。在燃弧时和合闸过程的弧后机械磨损是造成触头质量损失的主要原因[11-12]。

断路器合闸燃弧时间较开断过程短，产生聚集短弧，会在触头局部产生较薄的层状结构[13]。由于经历了电弧烧蚀过程，触头材料变得柔软且粗糙。由于动、静弧触头高速运动是滑动摩擦，主要考虑粘着磨损与磨粒磨损[14-16]，燃弧过程结束后静弧触头受到抱紧力的作用，此时考虑摩擦剥落产生的质量损失。

文献[17]通过合成回路试验研究大电流燃弧对断路器触头的烧蚀过程。试验证明随着触头模拟烧蚀次数增加，弧触头电阻呈现明显增大趋势，弧触头作为长时间直接承受电弧烧蚀的元件，其劣化程度较主触头严重得多。同理，文献[18]也通过试验模拟自能式 LW36-126 型 SF_6 断路器触头烧蚀过程，通过动态电阻测量得到触头接触行程随每次烧蚀试验的减小量。图 1 的曲线表明断路器刚投时受到电弧烧蚀影响较小，随着开断次数的增加，触头烧蚀程度越来越严重，触头烧蚀累计过程呈现非线性。燃弧时间、电弧电流和电弧电压在每次开断时有差异，触头烧蚀累计非线性要求电寿命评估必须要考虑燃弧时间影响。最早根据触头烧蚀累计过程提出了多种电寿命评估方法，其中基于 N-I 寿命曲线评估方法得到了广泛应用。

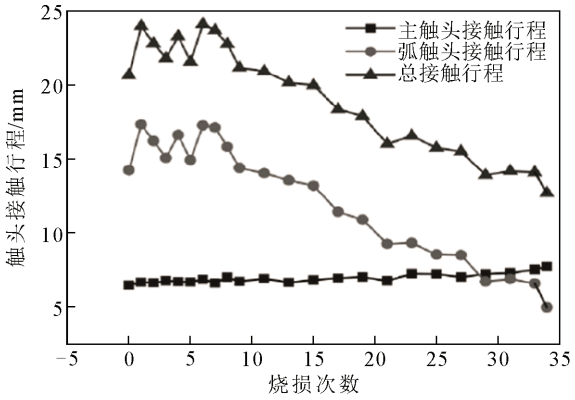


图 1 断路器触头接触行程随烧蚀次数变化曲线[18]

Fig.1 Curve of circuit breaker contact contact travel with number of ablations[18]

1.2 触头烧蚀数学模型

触头受到电弧烧蚀是造成断路器电寿命终结的主要原因。学者们通过数学建模对烧蚀方式和烧蚀过程进行了广泛的研究。

文献[13]根据断路器分闸时触头表面微观变化将电弧烧损质量分为期望喷溅总量以及触头烧蚀蒸发量，因此，质量总损失 M_T 为机械磨损 M_w 与期望喷溅总质量 M_s 和蒸发质量 M_v 之和，即：

$$M_T = M_w + M_s + M_v \tag{1}$$

根据 Tepper J 等人研究[19-20]，烧蚀为从触头表面输入的能量耗散致使材料蒸发与喷溅，内部热量传导与外界介质能量交换为辐射与对流这 2 种方式。从能量角度推导触头蒸发质量为：

$$M_v = Q(U_{arc}\eta - \frac{2CA\sqrt{t_{arc}}}{\int_0^{t_{arc}} I_m \sin(2\pi ft)\mathrm{d}t}) / h_{vap} \tag{2}$$

式中：η 为热效率，一般取 0.5；$C = \lambda T_v / \sqrt{\pi\chi}$，其中 λ 为热导率，T_v 为钨的沸点，χ 为热扩散系数；U_{arc} 为电弧电压；I_m 为电弧电流；t_{arc} 为燃弧时间；f 为频率；A 为触头烧蚀面积；h_{vap} 为材料的热焓；Q 为电荷量。

根据文献[21]的研究，期望喷溅总质量为：

$$M_s = k_v M_{melt} e^{(-k_b E_s / E_k)} \tag{3}$$

式中：E_s 为表面张力束缚能；E_k 为熔池动能；M_{melt} 为融化总量；k_v、k_b 为修正系数。

粘着磨损的模型以 20 世纪 50 年代的 Holm 模型及 Archard 模型为代表。Archard 用屈服应力与滑

动距离来表达金属的体积磨损。机械磨损质量的计算式为：

$$M_{\mathrm{w}}=\rho k\frac{F_{\mathrm{N}}}{H}x \tag{4}$$

式中：ρ 为材料的密度；F_{N} 为触头之间的正压力；H 为触头材料硬度；x 为触头之间的摩擦距离；k 为磨损系数。

文献[22]根据 Archard 磨损模型以及触头烧蚀过程将断路器触头磨损分为 3 段，考虑材料硬度受电弧烧蚀后温度的影响，引入材料温度系数的数学模型为：

$$m=\rho V=k_1\rho\frac{F_1x_1}{a\sigma_0}+k_2\rho\frac{F_2x_2}{b\sigma_0}+k_2\rho\frac{F_2x_3}{b\sigma_1} \tag{5}$$

式中：第 1 段碰撞接触磨损为电弧烧蚀区域的粘着磨损；第 2 段主要是电弧烧蚀区域向温度较低区域过渡的磨粒磨损；第 3 段为距离电弧烧蚀区域较远处的磨粒磨损。其中，V 为磨损材料的体积；k_1 为第一段磨损系数；k_2 为第 2、3 段磨损系数；x_1、x_2、x_3 分别为动、静弧触头第 1、2、3 段摩擦的距离；σ_0 为第 1、2 段材料的硬度；σ_1 为第 3 段材料的硬度；a 和 b 分别为由电流表征的弧触头材料硬度的温度系数；F_1 为弧触头间的第 1 段的碰撞力；F_2 为第 2 段与第 3 段弧触头间的法向作用力。

根据瑞士学者 Tepper J 建立的 CuW 弧触头电弧烧蚀质量损失数学模型[19]为：

$$\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}=\frac{\Delta U_{\mathrm{EFF}}\left|i_{\mathrm{arc}}(t)\right|}{h_{\mathrm{vap}}}-\frac{\sqrt{\lambda\rho c}AT_{\mathrm{v}}}{h_{\mathrm{vap}}\sqrt{t\pi}} \tag{6}$$

式中：t 为表面达到汽化温度后的时间；c 为比热容；ρc 为单位体积的物体温度升高 1 ℃所需的热量；T_{v} 为 W 材料汽化点；h_{vap} 为材料的热焓；$i_{\mathrm{arc}}(t)$为电弧电流；ΔU_{EFF} 为有效压降。

文献[22]考虑电弧烧蚀面积随电流变化，通过 10、20 与 30 kA 电流试验结果对电弧烧蚀质量损失数学模型进行改进。电弧烧蚀面积 A 表达式为：

$$A=-2.6262\times10^{-18}I^3+1.7525\times10^{-13}I^2+8.0136\times10^{-9}I \tag{7}$$

式中：I 为开断电流。

结合 CuW 弧触头电弧烧蚀质量损失数学模型，则断路器每次开合的总质量损失数学模型为：

$$m_{\mathrm{all}}=\frac{Q\Delta U_{\mathrm{ALLEFF}}}{h_{\mathrm{vap}}}-\frac{4A\sqrt{t_{\mathrm{arc}}}}{h_{\mathrm{vap}}}\cdot\frac{T_0\sqrt{\lambda\rho c}}{\sqrt{\pi}}+\frac{0.0016\rho F_1x_1}{a\sigma_0}+0.003\,938\rho F_2\left(\frac{x_2}{\sigma_0}+\frac{x_3}{\sigma_1}\right) \tag{8}$$

式中：$\Delta U_{\mathrm{ALLEFF}}$ 为总有效压降；Q 为电弧传送的电荷量。

文献[22]将触头烧蚀分为轴向侵蚀和径向侵蚀，提出了轴向侵蚀和径向侵蚀数学模型。轴向侵蚀反映接触行程的变化，径向侵蚀反映触头间接触压力变化进而影响接触电阻值。

线路断路器弧触头质量损失模型考虑机械磨损过程和分闸烧蚀过程中触头材料喷溅和蒸发量。电容器组用断路器存在关合涌流，相比于线路断路器需要另外考虑合闸烧蚀过程，式(8)建立改进后的合闸烧蚀过程质量损失模型。

触头烧蚀数学模型可根据测量数据对触头质量损失规律进行修正，借助模型通过理论计算大致刻画触头形态劣化趋势，但存在测量数据对早期烧蚀程度反映不明显的问题。电寿命评估的使命不仅仅是根据烧蚀数学模型估计断路器触头当前状态，更关注不同工况下剩余开断次数预测。此外，烧蚀模型会随数据样本积累和数字孪生等先进技术应用逐步完善，通过监测运行参数科学地展示触头三维形态，甚至结合历史运行数据和未来电网规划实现电寿命预测。

2 断路器触头烧蚀特征分析

触头烧蚀可反映在断路器分合闸时振动信号变化中，同时影响动、静触头间的接触电阻和动态电阻。

2.1 触头振动特性

断路器操作过程受力复杂，机械传动和电磁作用会引发振动。拉杆、齿轮和主轴的动作传递及动静弧触头的碰撞产生振动[23-24]。切合电流致使触头多次经历电弧变得粗糙，微观上接触斑点使得多点接触形成的多条电流线发生收缩致使方向发生改变，如图 2 所示。此时自身磁场作用下触头间产生电动力[25-26]。随着烧蚀程度增加，接触不良造成振动更加强烈。

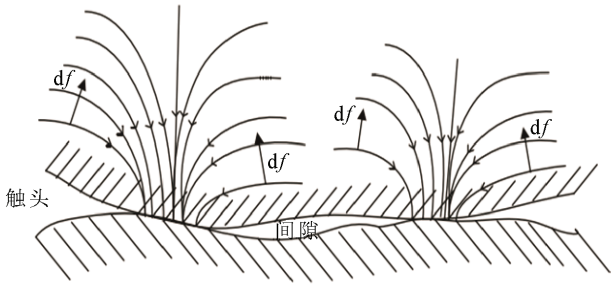


图 2 触头间表面微观图[6]

Fig.2 Microscopic diagram of the surface between the contacts[6]

根据文献[7]，触头间电动力 F_d 为：

$$F_d = \frac{\mu_0 I_0^2 (1+2\cos(2\omega t))}{8\pi} \ln(\frac{D}{2r}) \tag{9}$$

式中：$r = \sqrt{F_j / \pi \xi H_b}$ 为接触斑点半径，F_j 为触头上的压力，ξ 为触头形变系数，H_b 为布氏硬度；D 为触头接触面直径；μ_0 为空气导磁系数；I_0 为通过触头的电流。

根据式(9)可知，触头所受电动力和加速度幅值与流经触头的电流平方呈正比，并且频率为工频的 2 倍，由电动力引发的触头振动基频为 100 Hz。文献[7]通过试验模拟触头振动过程，测量触头接触不良时振动信号频谱图，如图 3 所示。当触头接触不良时将会产生 300、400 Hz 等高频分量，通过小波变换绘制的振动信号指纹图谱，能够有效判断断路器电接触故障。

当触头发生烧蚀时，触头间接触不良会产生数倍于基频的高频分量，高频分量占比是表征断路器触头接触不良程度的重要特征[27-29]，各频率的振动信号特征矩阵相似度可判别其接触状态。

振动信号多用于断路器机械故障诊断，将其用于电寿命评估是一个新的尝试，存在触头烧蚀对振动信号的影响规律尚不明确。

2.2 接触电阻变化

收缩电阻和表面膜电阻共同决定了断路器弧触头接触电阻[30]。微观层面看动静触头通过一个个小接触面连结[31]。由 n 个接触面的电流收缩电阻 R_s 为：

$$R_s = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4na} \tag{10}$$

式中：ρ_1、ρ_2 为材料电阻率；a 为接触点半径，其与接触点数目与接触导体的材料、接触压力、接触面大小和接触面平整程度有关，表达式为：

$$\xi = \frac{F}{HBn\pi a^2} \tag{11}$$

式中：H 为材料硬度；F 为接触压力。触头表面膜电阻与触头表面介质的氧化、硫化有关，由于 SF_6 气体的特性以及触头间接触力会破坏氧化膜[32-33]，表面膜电阻对接触电阻影响较小。因此，SF_6 断路器触头接触电阻主要由收缩电阻决定，即：

$$R_s = \frac{\rho}{2}\sqrt{\frac{\pi \xi HB}{nF}} \tag{12}$$

文献[22]通过研究接触电阻来分析触头形貌与接触电阻的物理关系，认为触头的径向侵蚀会导致接触压力减小，引起接触电阻变化。根据 Greenwood

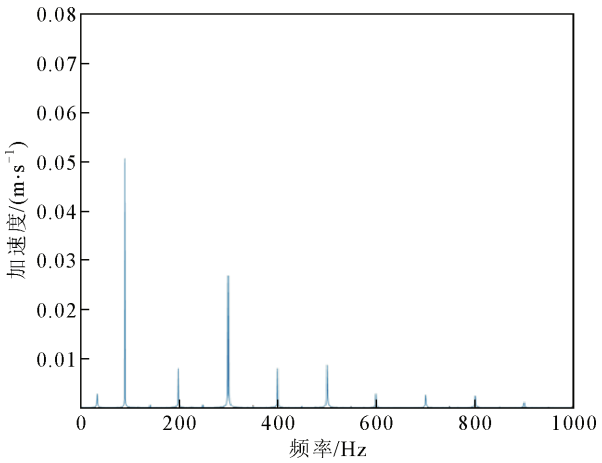


图 3 触头接触不良时振动信号频谱图[7]

Fig.3 Spectrogram of vibration signal when the contact is in poor contact[7]

与 Williamson 面接触模型[34]，触头间可用大量小粗糙接触面与一个理想光滑平面表示，粗糙表面突丘服从指数分布，单个动弧触指与静弧触头间接触电导 G、实际接触面积 A_b 与接触压力 F 关系为：

$$\begin{cases} G = 2\eta A_a \rho_n^{-1} r_0^{1/2} \sigma^{1/2} e^{-h} \\ A_b = 3.14\eta A_a r_0 \sigma e^{-h} \\ F = \dfrac{4}{3}\eta E_r^{1/2} \sigma^{3/2} A_a e^{-h} \end{cases} \tag{13}$$

式中：A_a 为两接触面的视在接触面积；η 为视在接触面上凸丘的密度；σ 为接触面表面凸丘高度的标准偏差；r_0 为接触面微观起伏凸丘顶部的曲率半径；E_r 为接触材料的弹性模量；ρ_n 为材料电阻率；h 为归一化间距。

则单个动弧触头与静弧触头间接触电阻 R 为：

$$R = \frac{E\sigma\rho}{F} \tag{14}$$

由式(14)可知，接触压力与接触电阻呈反比。文献[35]通过电阻测量仪对同一对触头施加不同压力研究了接触电阻和压力间的关系。试验表明随着接触压力逐渐增大电阻不断减少。当压力施加到一定程度后，接触电阻变化变小，此时达到接触电阻极限值。当触头接触表面积到实际最大值，接触电阻就不再变化。烧蚀造成触头接触压力减小，导致接触电阻增大。

文献[36]利用接触面耦合面积法解决了多片触指下微小导电桥模型存在剖分和计算困难的问题，选取多个耦合面模拟触头电流收缩情况，且通过有限元仿真验证了该方法模拟计算接触电阻的可行性。

接触电阻直接表现触头状态，但接触电阻的变化并不只是由于触头烧蚀，当触头表面存在金属氟化物时将导致接触电阻变化但并不影响开断能力。对于断路器烧蚀过程中，接触电阻受到其他因素的影响规律需要深究。

2.3 动态接触电阻

不拆卸断路器可由动态电阻测量(dynamic resistance measurement，DRM)评估触头接触状态。合闸过程触头发生碰撞和弹跳，触头接触不稳定，一般在分闸阶段进行动态接触电阻测量[37-39]。

动态电阻曲线表征了触头接触失效水平[40]，但目前的研究对曲线数据挖掘仍不够充分。文献[41]认为动态接触电阻曲线峰值受到触头分离过程中接触部分影响。文献[39,42]认为动态接触电阻曲线面积与触头的磨损呈正比。将动态接触电阻曲线分为主触头接触阶段、弧触头接触阶段和主、弧触头分离阶段，常用诊断参数如表 1 所示。

动态接触电阻受到接触应力、负荷电流和开合速度等因素的影响，文献[43]认为接触应力保持恒定，只考虑电流和开合速度对动态接触电阻测量影响，验证了注入电流和开合速度与灭弧室接触区域状态关系，有效接触面积影响接触电阻。可通过大注入电流和低开启速度提高 DRM 测量准确性[44]。

文献[45]研究了接触压力变化对动态接触电阻曲线的影响。发现动态接触电阻随测量电流的增大而减小，当机械压力增大到一定程度时，测量电流对动态接触电阻影响会减小。这是由于增大接触压力会增加接触稳定性，弧触头间有效接触面积到最大值时压力趋于稳定，电导率逐渐趋于饱和，电阻值随之趋于稳定。

目前，从动态电阻曲线中提取的特征主要是断路器操动过程的时间、位移参数与接触电阻以及曲线的数学特征，能够发现触头烧蚀程度显著加剧，但不容易评估早期烧蚀程度。

表 1 常用诊断参数表

Table 1 Table of common diagnostic parameters

特征	描述
R_a	平均弧触头接触电阻
R_p	为平均主接触电阻
R_aT_a	弧触头接触阶段动态接触电阻达到最大值之前的动态接触电阻曲线下方累积面积
T_{ov}	主弧触头分离的时间差，即主、弧触头分离阶段的时间
R_{amax}	弧触头接触阶段之前的电阻最大值
V_a	弧触头接触阶段的平均接触速度
P_a	断路器触头在弧触头接触阶段的位置
D_p	为主触头接触距离
D_a	为弧触头接触距离

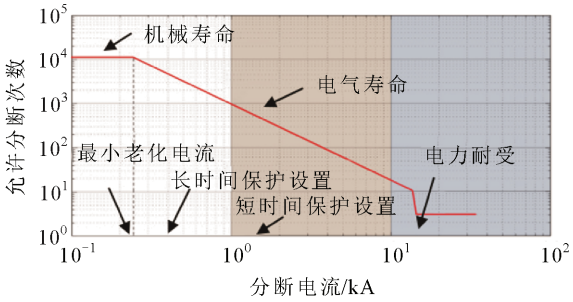


图 4 断路器 N-I 曲线[10]

Fig.4 Circuit breaker N-I curve[10]

3 高压断路器电寿命评估方法

3.1 基于 N-I 寿命曲线的经典电寿命算法

3.1.1 开断电流加权累计法及其改进方法

累计开断电流法估计的断路器电磨损量与实际电磨损量有较大误差，基于断路器电寿命曲线(N-I)，如图 4 所示提出的开断电流加权累计法考虑了触头材料、灭弧介质以及冷却条件等影响因素，开断电流越大则断路器触头的电磨损越严重，所允许开断次数就越少[46]。

N-I 曲线可以表示为：

$$Q_g = NI_b^{\alpha} \tag{15}$$

式中：Q_g 为允许电磨损总量的特征量；N 为断路器开断电流有效值为 I_b 时断路器允许的开断次数；α 为开断电流加权指数，其值一般在 1~2 之间。通过比较实际运行中断路器累计电磨损特征量 Q 来判断断路器触头烧蚀情况，Q 的表达式为：

$$Q=\sum_{i}^{N_0} I_{bi}^{\alpha}\sqrt{a^2+b^2} \tag{16}$$

式中：N_0 为断路器已开断次数；I_{bi} 为第 i 次开断对应的开断电流有效值。

断路器触头烧蚀程度不仅与开断电流有关，还受到燃弧时间影响。文献[47]考虑燃弧时间影响，改进了开断电流加权累计法，通过加权系数来衡量烧蚀过程中其他因素影响，且只考虑了开断磨损，忽略了闭合磨损，该方法存在一定误差。准确测量燃弧时间有一定难度，文献[48]利用小波理论寻找

信号奇异点进而确定燃弧时间，经过验证其与实际燃弧时间误差在 0.4 ms 以内。

该类方法计算过程简单，对烧蚀过程的影响因素考虑不全面，是对触头磨损的粗略估计，准确性较低。

3.1.2 触头磨损的相对电寿命法

触头的电磨损与开断电流、燃弧时间和开断次数有关。断路器在实际运行中受到随机因素影响燃弧时间不是固定的。随着开断次数增加可取平均燃弧时间，用开断电流作为评估电磨损程度参照量[9]。基于 N-I 寿命曲线文献[49]推导出触头的相对电寿命 L 为：

$$L = L_{\mathrm{N}} - \sum_{m=1}^{N_0} Q_m \tag{17}$$

式中：L_{N} 为断路器电寿命初始值，其值≤100%，根据断路器运行条件调整；Q_m 为第 m 次开断时电磨损量。该方法忽略了开断时燃弧时间的随机性，对于电磨损量评估具有一定误差，但是在诸多实践中得到了应用。

基于 N-I 寿命曲线的经典电寿命算法仅考虑开断过程电磨损，不适用于电容器组用断路器的电寿命评估。因此，提出基于动态接触电阻和电流转换过程等特征的电寿命评估方法，结合测量数据直接关注于当前触头状态，适用于不同用途的断路器电寿命评估。

3.2 基于动态接触电阻的电寿命评估方法

触头状态评估是对断路器当前健康程度的评价，而断路器电寿命评估则需要结合历史运行数据和后续运行工况，本质上预测剩余开断次数离不开断路器当前健康程度。因此，触头状态评估是实现电寿命评估的一个重要环节。

动态接触电阻测量法具有不拆卸断路器评估触头烧蚀程度的优点，国内外学者深入研究了动态电阻曲线的数据挖掘和影响因素。

文献[50]通过测量断路器开断电流变化，结合速度探头测量断路器分、合闸速度，计算断路器弧触头行程曲线。文献[51]利用测量弧触头超出主触头长度波形，结合动态电阻-时间曲线，与典型曲线对比触头超程与出厂值，判断断路器是否需要检修。文献[42]提取动态电阻-行程曲线的 6 个烧蚀程度特征量——平均主接触电阻、平均弧触头接触电阻、主触头接触距离、弧触头接触距离、断路器触点在弧触头接触部分的位置和动态电阻曲线下方面积。文献[52]通过测试 126 kV SF_6 断路器得出动态电阻-行程曲线，可提取更多表征断路器触头烧蚀特征量，如图 5 所示。动态电阻-时间曲线对断路器动作速度敏感，无法直观反映触头运动的接触电阻，不易发现弧触头过短、触头接触不良等缺陷。

文献[53]指出动态电阻-行程曲线中弧触头接触阶段积分面积是对弧触头状态评估最重要的参数。文献[54]建立了断路器触头状态评估模型，将动态电阻-行程曲线弧触头接触阶段积分作为触头烧蚀的特征量，弧触头平均电阻与超出主触头长度乘积反映弧触头烧损状态。随着模拟烧损试验次数增加，动态电阻-行程曲线积分逐渐减小，将动态电阻积分面积补偿到初始超程，表示为：

$$S_{\mathrm{b}} = S_{\mathrm{a}} + (L_{\mathrm{b}} - L_{\mathrm{a}})R_{\mathrm{b}} \tag{18}$$

式中：S_{b} 为补偿后的动态电阻积分面积；S_{a} 为真实的动态电阻积分面积；L_{b} 为初始的超程；L_{a} 为真实的超程；R_{b} 为补偿电阻，取 1 mΩ。通过试验发现补偿后的积分面积随着烧损次数增加而增加，最后稳定于一个定值。

文献[55]研制了 SF_6 断路器动态电阻测量、分析与诊断系统，其中电寿命诊断使用补偿后动态电阻积分面积和皮尔逊相关系数作为特征量，实测动态电阻集 $x=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$ 与典型初始曲线电阻集 $y=\{y_1,y_2,\cdots,y_n\}$ 间皮尔逊相关系数 ρ_{m} 为：

$$\rho_{\mathrm{m}} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}x_j)(y_i - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}y_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}x_j)^2}\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(y_i - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}y_j)^2}} \tag{19}$$

动态接触电阻曲线是断路器触头状态评估的有效手段，但由于其他机械故障的存在，会导致动

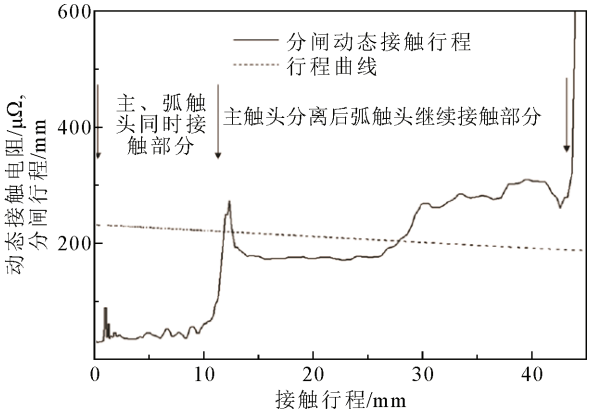


图 5 分闸行程与动态电阻-行程曲线[45]

Fig.5 Opening stroke and dynamic resistance-stroke curve[45]

态电阻测量结果不准确，如操动机构的故障影响开合速度。从实验电流和开合速度的角度进一步探究动态电阻测量的条件。通过补偿到初始超程控制单一变量，或者通过单一电阻参数和时间、位移特征比较固定阈值来确定触头烧蚀程度，容易受到其他机械故障和生成物质的影响，导致可靠性降低。

3.3 基于电流转换过程的电寿命评估方法

电流转换时间是指断路器分闸时电流由主触头回路完全转换至弧触头回路流通所需要的时间，重叠时间是指断路器分闸过程中弧触头单独接触运动的时间。文献[17]通过合成回路试验模拟断路器烧蚀过程，建立电流转换仿真模型进行仿真计算，发现 SF_6 断路器电流转换时间随弧触头电阻增大而增大。断路器分闸过程如图 6 所示。

断路器行程曲线能够观察到触头运动的位置，时间信息如表 2 所示。

电流转换时间必须小于重叠时间，否则电弧将通过主触头燃烧，表明电寿命终结。设定主触头电阻、弧触头电阻、触头超程、重叠时间的失效阈值，当有 2 个及以上参数达到失效阈值，认为电寿命严重退化，当电流转换时间大于等于重叠时间，则认为电寿命完全失效，需要更换触头。

事实上，根据文献[17]试验发现，电流转换时间受到开断电流、转换起始点和分闸速度的影响，可能会出现电寿命已完全失效，但电流转换时间仍小于重叠时间。

3.4 基于振动信号的断路器触头状态评估

非侵入式测量可获得断路器振动信号，由振动信对断路器进行故障诊断逐渐成为研究热点，有学者从振动信号角度尝试寻找触头状态评估方法。

电寿命终结是由于触头烧蚀导致接触行程变短、接触电阻变大等，不能开断短路电流。如上文所述，机械和电气因素耦合作用导致电寿命终结，从振动信号提取触头烧蚀程度特征量可以实现断路器触头状态评估[56-57]。断路器操作过程多个机构部件动作均会产生振动信号，触头碰撞时阶段振动信号最为关键，在多源振动信号中分解出表征触头状态的有效信号特征是一个关键点也是一个难点。

文献[58]构建了一种多通道卷积自编码器长短期记忆网络的断路器寿命预测模型，引入基于短时能量的变分模态分解和双阈值法标定有效振动段，引入卷积自编码器构建多通道卷积自编码器单元，获取有效振动信号段的时间序列特征，并输入

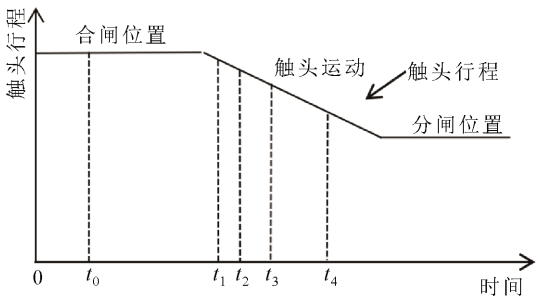


图 6 断路器分闸过程曲线[17]

Fig.6 Circuit breaker opening process curve[17]

表 2 断路器分闸过程时间表

Table 2 Schedule of circuit breaker opening process

时间段	时间信息
0~t_4	电流流通时间
t_0~t_3	分闸时间
t_1~t_2	电流转换时间
t_1~t_3	重叠时间
t_3~t_4	燃弧时间

LSTM 网络实现寿命预测[59-61]。文献[62]通过提取振动信号本征模态函数 Hilbert 边际谱能量，作为能够表征触头超程的特征量，探究该特征量随触头超程的变化规律，为高压断路器触头状态评估提供了新方法。

相比于触头碰撞产生的振动，由于电动力导致的触头振动较为微弱，从时域角度未必能够清楚地反映触头烧蚀程度。有学者针对断路器接触不良而产生振动现象，研究信号频域变化特征。

断路器触头电接触产生振动在整个振动信号占比较小，振动信号采集存在干扰和传播过程衰减，分离断路器触头烧蚀程度的有关振动特征较困难。

4 基于数据模型驱动的断路器综合电寿命预测方法

前述方法是基于单一数据的电寿命评估方法，基于数据模型驱动的电寿命预测方法通过引入模糊理论、退化模型和人工智能算法结合多种测量数据综合评估电寿命。

限于高压断路器电寿命有关的数据匮乏，目前基于数据驱动的电寿命预测方法多参照低压断路器和开关电器研究成果，有学者尝试将该类方法运用于高压断路器电寿命预测。

4.1 基于模糊理论的电寿命预测方法

断路器触头烧蚀具有复杂性和随机性，许多学

者在测试数据积累的基础上，引入模糊理论对断路器电寿命评估方法进行改进。

文献[63]给出多级模糊综合评判研究真空断路器电寿命。文献[64]探讨了模糊理论应用于 SF_6 断路器状态评估存在的问题：影响因素分类不够合理、隶属度确定和主观因素相关、用层次分析法(analytical hierarchy process，AHP)来确定权重分配将导致判断矩阵与实际决策者思维存在不一致性[65]。文献[66]经过风险估计利用模糊聚类分析对评估因素进行分类，利用模糊层次分析法(fuzzy analytical hierarchy process，FAHP)建立的模糊互补判断矩阵优化评估因素的权重分配，解决 AHP 中判断矩阵与实际决策者思维的不一致性问题，进而通过模糊综合评估方法判断断路器状态。

文献[67]引入灰色模糊理论结合层次分析法，建立灰色模糊判别矩阵对高压断路器运行状态进行综合评估。利用层次分析法确定权重集模部，通过专家打分求均值法确定灰部权重。灰色模糊判别矩阵具有模部和灰部两部分，模部以模糊隶属度来表征各评估因素与评估状态之间的模糊关系，灰部以点灰度来表征相应模糊隶属关系的可信度，通过灰色模糊运算给出断路器运行状态。该方法的灰色模糊判别矩阵的模部和灰部的确定都需要专家打分确定，受主观因素的影响较大，可能会影响最终评判结果。

为了减小主观因素的影响，文献[68]将 AHP 与灰色相关分析运用于真空断路器电寿命评估中，通过 AHP 结合专家经验建立专家判断矩阵作为主观权重。利用灰色关联分析指标，计算相关系数得到相关矩阵和相关度，建立客观权重。通过组合权重公式将主观权重和客观权重相结合，对断路器电寿命进行评估。组合权重的方式相比于单一主观权重更加合理，提高了评估模型的置信度。

文献[69]正态云模型结合了随机性和模糊性的理论，相对于传统的主观确定隶属函数，正态云模型考虑了事物随机性，放宽了形成正态分布和隶属函数的条件，增加了其普适性。由于高压断路器状态评估指标具有较强的不确定性，文献[70]除了针对权重的确定进行了改进，还通过引入梯形云模型求取各评估因素的隶属度，减少隶属度确定的主观性和随机性。

为了克服模糊评判模型依赖专家主观经验的局限性，文献[71]基于物元可拓理论构造关联函数，根据关联函数计算的评估指标的等级关联度计算信任分配函数，最后通过证据融合理论对断路器状态进行评估。证据融合理论能够有效融合不同的数据源和专家信息，提高评估结果的可靠性。文献[72]通过关联规则法利用实例样本数据，根据计算反映故障征兆状态的综合性能指标的置信度大小来分配其权重，通过实际数据来确定指标权重，相比于根据经验确定权重可信度更高[73]。但是，所采用的实例数据是运行环境相近的同类型断路器，并且需要大量的运行数据。在工程上，获得不同类型断路器在不同工况下的大量运行数据是非常困难的。此类方法从克服主观影响出发，限于断路器的燃弧时间、行程曲线等实测数据匮乏，应用于高压断路器电寿命评估的普适性不高。

模糊理论的应用离不开专家打分系统，通过克服主观经验影响来增强基于模糊理论的评估方法的可靠性，是对触头烧蚀程度的大致估计，难以准确预测断路器剩余开断次数。

4.2 数据驱动和退化模型的电寿命预测方法

仅通过当前断路器测试数据实现电寿命准确评估比较困难，这往往是由于缺乏表征断路器触头烧蚀程度的数据造成的。随着各类监测数据和测试数据完善，基于数据驱动的电寿命预测方法逐渐成为研究热点。主要有人工智能方法、概率统计模型的退化建模方法和数据与退化模型融合方法[74-76]。

断路器的人工智能电寿命评估研究主要集中于继电器的动作数据，文献[77]基于改进 Shannon 信息熵的代价函数来改进小波包最优基算法，通过改进的小波包算法对超程时间序列处理，得到平稳项和随机项，同时考虑平稳项和了非平稳时间序列随机项的影响，对平稳项采用 AR 模型预测，对非平稳项则建立基于相空间重构的 RBF(径向基函数)神经网络预测模型，最后通过小波包重构法对平稳项和非平稳项预测结果重构，实现继电器电寿命预测[78]。

文献[79]将提出了一种基于量子粒子群优化和支持向量回归(quantum particle swarms optimization and support vector regression，QPSO-SVR)的 SF_6 断路器评估方法，通过电弧烧蚀实验获取 3、8、13 与 20 kA 电流下的 164 组有效实验数据，训练参数验证了预测准确性，构建了基于 QPSO-SVR 算法的触头烧蚀状态评估系统，实现预测弧触头接触电阻增量和质量损失。为人工智能方法在高压断路器电

寿命应用开拓了思路，证明了其可行性。

高压断路器受到制造工艺、应用环境、退化过程中不确定因素的影响，退化过程具有随机性。人工智能法虽然准确度高，但是通常需要大量样本，目前难以获得足够的训练样本。为获得 SF_6 断路器触头烧蚀特性，一些学者进行了专门的烧蚀试验积累数据[13,22]。

为了克服数据不足的问题，有学者提出了基于概率统计模型的退化建模方法，目前多用于交流接触器和万能式断路器。断路器寿命退化过程不是单调退化，这期间伴随着多种不确定性，可能由于外界因素导致寿命退化过程加速。应用广泛的随机过程有 Markov 过程、Gamma 过程、Wiener 过程等。其中 Markov 过程无记忆性，认为断路器的劣化程度仅与当前状态有关；Gamma 过程只含有非负增量，具有严格单调性质；Wiener 过程由标准布朗运动驱动，带有线性漂移项。相比之下，Wiener 过程最符合断路器的劣化规律，它可以较好地描述非单调性能退化的过程[80-82]。文献[83]建立了基于 Wiener 过程的交流接触器电性能退化模型，基于 Wiener 过程的的电寿命预测流程如图 7 所示。Wiener 过程首次达到某个点的时间分布为逆高斯分布，所以在失效阈值 L 下交流接触器运行到 T_i 时刻的剩余电寿命概率密度函数为：

$$f(t;L)=\frac{L-L_0}{\sqrt{2\pi\sigma^2t^3}}\mathrm{e}^{\frac{-(L-L_0-\mu t)^2}{2\sigma^2 t}} \tag{20}$$

式中：L 为失效阈值；L_0 为交流接触器运行到 T_i 时刻其性能的实际累积退化量；μ 为漂移参数；σ 为扩散参数。通过多台交流接触器进行电寿命试验，获取累积电弧侵蚀量数据，通过极大似然估计确定相关参数，参加电寿命试验的交流接触器越多，最后预测模型越精确。对于高压断路器，若只是根据生产厂家的试验数据确定的预测模型可能误差较大。在用户自己进行相关试验基础上，结合厂家数据确定预测模型更具有实用性。

另一种解决方式是考虑了设备间的差异性，结合历史运行数据确定预测模型，提高预测结果的实时性[84]。文献[85]利用序贯贝叶斯式的后验分布递归融合历史数据与在线监测数据中退化程度相关知识并且结合 Wiener 过程理论实现剩余寿命计算。但是，该方法目前用于监测断路器二次回路和操作机构状态。引入表征触头烧蚀量的特征量——累计电弧烧蚀量、接触电阻等特征等进行处理也是一种新思路。这类方法是否适用于高压断路器电寿命预测还需要进一步探索[86-89]。

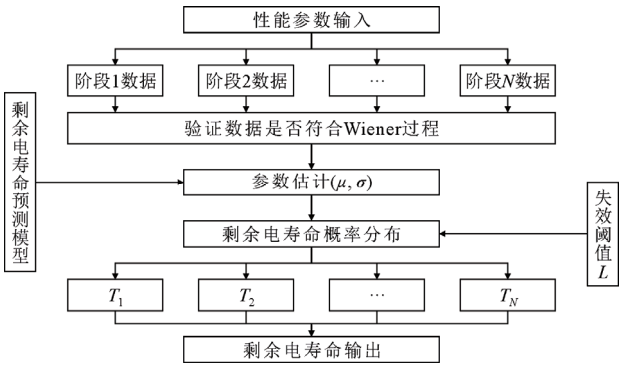


图 7 基于 Wiener 过程评估电寿命流程图[85]

Fig.7 Flow chart for evaluating electrical life based on the Wiener process[85]

通过 Wiener 模型实现电寿命预测存在着实时性不高、失效阈值确定时忽视断路器个体差异性以及断路器处于恶劣环境中，劣化过程加速导致可靠性降低等问题。

5 断路器剩余电寿命预测的关键问题

高压断路器剩余寿命关系到检修计划安排，实现高压断路器在线非拆卸电寿命估计，目前存在一些关键问题亟待解决，如下所述。

1）燃弧时间的准确测量。断路器触头烧蚀与开断电流和燃弧时间有直接关系。事实上，首开相存在随机性，因此在每次开断时，各相燃弧时间并不相同，这就导致了三相触头烧蚀程度也不相同。因此，燃弧时间的确定是量化单次磨损的关键也是难点。在通过大量试验数据找到首开相的分布规律基础上，根据燃弧过程中的暂态电流畸变、电磁场变化、高频分量改变以及辐射电磁波等开发燃弧时间监测设备，为未来实现多源数据监测电寿命提供数据保障。

2）动态电阻-行程曲线的测量条件的确定和方法创新。动态电阻-行程曲线是目前实现电寿命评估的有效手段，保证动态电阻测量的可重复性是关键，需要确定实验电流大小和开合速度来保证测量准确性。动态电阻的在线测量是目前的技术瓶颈。限于电压电流互感器测量的同步性以及准确性，需要利用光纤电流传感器、光纤电压传感器等高精度传感器，开发能够满足现场复杂运行条件的动态电阻测

量设备。

3）从振动信号中挖掘触头烧蚀更具鉴别力的特征，是实现非侵入式评估电寿命的关键一步。振动信号评估电寿命的方法难点在于触头烧蚀引起振动信号变化规律不明确，以至于振动信号中提取的烧蚀程度特征量鉴别力不高。触头烧蚀直接影响触头碰撞时的振动信号，触头碰撞区间的确定需要考虑到振动信号的衰减情况以及存在其他机械故障的可能，保证碰撞区间内触头烧蚀信息的完整。进而在碰撞区间中从时、频域等角度挖掘触头烧蚀特征。

4）基于数据和退化模型的电寿命预测方法主要限制于积累的测试数据样本较少，各类高压断路器的劣化规律还不明确，失效阈值的确定缺乏科学性，建立具有较高普适性的预测模型比较困难。单一退化模型难以适应高压断路器的复杂运行环境。需要积累各类断路器运行数据，研究劣化规律，考虑断路器之间的差异性，动态地确定各断路器的失效阈值。在实测断路器燃弧时间、振动信号和动态电阻等特征量的基础上，建立电寿命预测模型。

5）通过单一数据预测高压断路器电寿命缺乏科学性，基于多源数据监测电寿命是未来的发展趋势。研究数据间的关系是必要工作，振动信号与动态电阻曲线之间的相关性表现在触头烧蚀后，有效接触面积减小从而导致接触压力减小，接触电阻和振动信号之间的表现关系需要进一步探究。在退化模型的建立中更多地考虑现场测量数据的影响，在传感器技术发展的基础上建立符合实际退化过程的模型，实现多源数据在线监测电寿命。

6 结论

断路器电寿命预测是断路器状态评估中关键一环，学者对有关高压断路器触头烧蚀模型和电寿命评估进行了大量研究。本文全面梳理剖析了电寿命评估方法原理和相关研究发展情况，指出现阶段断路器电寿命预测所面临的问题，并提出来一些重点研究方向如下：

1）目前断路器电寿命预测瓶颈在于难以获得表征电寿命现场参数。提出的触头撞击振动信号能够反映烧蚀劣化，但对烧蚀程度难以准确估计。近期提出的高频响应和辐射电磁波状态评估方法，需要进一步验证复杂环境下的适用性。今后需在测量燃弧时间、电弧电压、动态接触电阻的专用传感器上加大研发力度，融合多种传感器信息的数据挖掘可望实现高压断路器电寿命预测科学性。

2）不同电压等级、灭弧原理和操动类型的高压断路器触头劣化规律存在较大差异，目前研究对劣化机理和影响因素的考虑并不全面，普遍存在实验数据样本不足或与实际触头运行状况存在偏差的情况。今后重要任务之一就是继续通过大量试验研究断路器劣化规律，建立电弧烧蚀过程的普适性劣化模型。

3）目前高压断路器电寿命预测和可靠性评价方法尚不完善。断路器分合闸瞬间的电磁和机械混合过程带来严重干扰，表征电寿命信号捕捉和处理，以及微弱特征信号提取和时频联合分析仍需深挖细究。在建立多种高压断路器触头烧蚀试验数据库基础上，应用人工智能技术和机器学习方法判断断路器触头状态是未来电寿命预测的发展方向。

4）在传感器测量技术发展和劣化规律研究的基础上引入数字孪生技术、多物理场耦合仿真技术和虚拟现实仿真技术，结合行程曲线、线圈电流、振动信号和辐射波等特征信号，建立高压断路器的多源、多态三维数字模型。且在数字孪生模型上科学地展现断路器触头劣化过程和实现电寿命的在线非拆卸预测。

参考文献 References

[1] 姜 楠. 交流接触器触点材料电性能模拟与退化机理的实验研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2018.
JIANG Nan. Experimental investigation of electrical performance simulation and degradation mechanisms for contact materials used in AC contactor[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2018.

[2] HEISING C R, JANSSEN A L J, LANZ W, et al. Summary of CIGRE 13.06 Working Group world wide reliability data and maintenance cost data on high voltage circuit breakers above 63 kV[C]// Proceedings of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Denver, USA: IEEE, 1994: 2226-2234.

[3] MOHAMMADHOSEIN M, NIAYESH K, SHAYEGANI-AKMAL A A, et al. Online assessment of contact erosion in high voltage gas circuit breakers based on different physical quantities[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 580-587.

[4] LINDQUIST T M, BERTLING L, ERIKSSON R. Circuit breaker failure data and reliability modelling[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(6): 813-820.

[5] 郭贤珊，王章启. 高压断路器触头电寿命预测的研究[J]. 高电压技术，1999，25(3)：43-44.
GUO Xianshan, WANG Zhangqi. Research on expectancy of electrial endurance of HV circuit breaker contact[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(3): 43-44.

[6] 傅 中，陈维江，李志兵，等. 大容量电容器组用断路器弧触头侵蚀状态的评价方法[J]. 中国电机工程学报，2016，36(20)：5668-5677.
FU Zhong, CHEN Weijiang, LI Zhibing, et al. Assessment method of arcing contacts erosion condition of circuit breakers used for large ca-

pacity capacitor banks[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5668-5677

[7] 王昕宇. 基于振动信号的 GIS 电接触故障特性的研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2021.
WANG Xinyu. Study of electrical contact fault characteristics of GIS based on vibration signals[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2021.

[8] 林　莘，李鑫涛，王飞鸣，等. 触头烧损对 SF_6 断路器介质恢复特性的影响[J]. 高电压技术，2014，40(10)：3125-3134.
LIN Xin, LI Xintao, WANG Feiming, et al. Dielectric recovery characteristics of SF_6 circuit breaker considering contact burning loss[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3125-3134.

[9] 狄美华，李震彪，吴细秀. 开关电器触头电寿命诊断方法综述[J]. 高压电器，2004，40(3)：201-204.
DI Meihua, LI Zhenbiao, WU Xixiu. Review on diagnostic techniques for electrical endurance of switchgear contact[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(3): 201-204.

[10] 郭　娇. 开关类设备寿命预测方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2020.
GUO Jiao. Research on life prediction method of switching equipment[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2020.

[11] 吴细秀，李震彪. 电器电极材料喷溅侵蚀的理论计算[J]. 中国电机工程学报，2003，23(6)：96-101.
WU Xixiu, LI Zhenbiao. Theoretic analysis on sputter erosion of electrode[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 96-101.

[12] SHEA J J. High current AC break arc contact erosion[C]// Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Orlando, USA: IEEE, 2008: xxii-xlvi.

[13] 邢高启. 252 kV SF_6 断路器关合侵蚀特性试验研究[D]. 北京：北京交通大学，2016.
XING Gaoqi. Test research on close erosion characteristics of 252 kV SF_6 circuit breakers[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2016.

[14] 温诗铸，黄　平. 摩擦学原理[M]. 3 版. 北京：清华大学出版社，2008：308-364.
WEN Shizhu, HUANG Ping. Principles of tribology[M]. 3rd ed. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2008: 308-364.

[15] 瓦伦丁 L. 波波夫. 接触力学与摩擦学的原理及其应用[M]. 李强，雒建斌，译. 北京：清华大学出版社，2011：208-220.
POPOV V L. Contact mechanics and friction physical principles and applications[M]. LI Qiang, LUO Jianbin, translated. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2011: 208-220.

[16] 刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性[M]. 北京：清华大学出版社，1993：92-238.
LIU Jiajun. Principle of material wear and its wear resistance[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 1993: 92-238.

[17] 吴　杨. SF_6 断路器主弧触头电流转换过程及电寿命评估[D]. 武汉：武汉大学，2017.
WU Yang. Study of main and arcing contact current commutation and electrical lifetime assessment in SF_6 circuit breaker[D]. Wuhan, China: Wuhan University, 2017.

[18] 陈　功，程　壮，陈昌旭. 高压断路器弧触头烧蚀试验及理论分析计算[J]. 水利水电快报，2019，40(12)：69-73.
CHEN Gong, CHENG Zhuang, CHEN Changxu. High voltage circuit breaker arc contact ablation test and theoretical analysis calculation[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2019, 40(12): 69-73.

[19] TEPPER J, SEEGER M, VOTTELER T, et al. Investigation on erosion of Cu/W contacts in high-voltage circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(3): 658-665.

[20] 程礼椿，王章启，王付战. 旋弧喷溅侵蚀的理论分析[J]. 中国电机工程学报，1989，9(5)：9-15.
CHENG Lichun, WANG Zhangqi, WANG Fuzhan. A theoretical analysis on erosion of metal droplet ejection in rotating arcing[J]. Proceedings of the CSEE, 1989, 9(5): 9-15.

[21] 吴细秀. 开关电器触头材料喷溅侵蚀模型研究及其试验[D]. 武汉：华中科技大学，2005.
WU Xixiu. Investigate on the sputter erosion model of electrical arcing contact and its experimental[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2005.

[22] 傅　中. 电容器组用 SF_6 断路器弧触头关合侵蚀研究[D]. 北京：华北电力大学，2018.
FU Zhong. Research on erosion of arcing contacts in making process in SF_6 circuit breakers used for capacitor banks[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2018.

[23] 李　哲. 断路器触头系统非线性振动特性研究及参数优化[D]. 西安：西安建筑科技大学，2021.
LI Zhe. Research on nonlinear vibration characteristics of circuit breaker contact system and parameter optimization[D]. Xi'an, China: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.

[24] 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)：8004-8015.
ZHAO Chengchen, LI Kui, HU Bokai, et al. Residual electrical life prediction of low-voltage circuit breakers under varied stress[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 8004-8015.

[25] 李兴文，陈德桂，向洪岗，等. 低压塑壳断路器中电动斥力的三维有限元非线性分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报，2004，24(2)：150-155.
LI Xingwen, CHEN Degui, XIANG Honggang, et al. 3-D finite element nonlinear analysis and experimental investigation of electro-dynamic repulsion force in molded case circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 150-155.

[26] 刘颖异，陈德桂，李兴文，等. 用三维有限元方法研究影响框架断路器电动斥力的因素[J]. 中国电机工程学报，2005，25(16)：63-67.
LIU Yingyi, CHEN Degui, LI Xingwen, et al. Research on factors affecting electro-dynamic repulsion force in air circuit breaker with the method of 3-D finite element[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 63-67.

[27] 钟　尧，郝　建，丁屹林，等. GIS 设备典型机械缺陷的非线性振动行为表征参量分析和诊断模型研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(19)：7248-7259.
ZHONG Yao, HAO Jian, DING Yilin, et al. Nonlinear vibration behavior characterization parameter analysis and diagnosis model of typical mechanical defects of GIS equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7248-7259.

[28] 吴玖汕，赵壮民，杨玥坪，等. GIS 隔离开关接触状态振动-温度联合检测方法[J]. 高电压技术，2023，49(1)：207-214.
WU Jiushan, ZHAO Zhuangmin, YANG Yueping, et al. Vibration-temperature joint detection method for GIS disconnector connection state[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 207-214.

[29] 臧　旭，马宏忠，吴金利，等. 基于振动原理的 GIS 母线导电杆松动故障分析与诊断[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(9)：12-20.
ZANG Xu, MA Hongzhong, WU Jinli, et al. Analysis and diagnosis of a GIS bus conductor loosening based on mechanical vibration[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 12-20.

[30] 陈杏灿，程汉湘，彭　湃，等. 带电测量断路器接触电阻方法的研究[J]. 电工电气，2015(4)：46-48，52.

CHEN Xingcan, CHENG Hanxiang, PENG Pai, et al. Design of electrified measuring contact resistance in circuit breakers[J]. Electrotechnics Electric, 2015(4): 46-48, 52.

[31] 张海泉. 接触电阻的分析研究[J]. 商丘师范学院学报，2004，20(5)：40-43.
ZHANG Haiquan. An analysis and research on contact resistance[J]. Journal of Shangqiu Teachers College, 2004, 20(5): 40-43.

[32] GOMEZ M R, FRENCH D M, TANG W, et al. Experimental validation of a higher dimensional theory of electrical contact resistance[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(7): 072103.

[33] 刘 鹏，任 汀，谢 韬，等. 换流变阀侧套管表带触指接触电阻数值计算[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1184-1193.
LIU Peng, REN Ting, XIE Tao, et al. Numeral calculation of contact resistance of strap contacts of bushing on the side of converter valve[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1184-1193.

[34] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1966, 295(1442): 300-319.

[35] 吴国华，周 洲，涂春华. 高压断路器接触电阻的研究[J]. 华中电力，2011，24(6)：80-82.
WU Guohua, ZHOU Zhou, TU Chunhua. Research on contact resistance of high voltage circuit breaker[J]. Central China Electric Power, 2011, 24(6): 80-82.

[36] 纽春萍，强若辰，王小华，等. 高压断路器接触电阻的耦合面积法分析[J]. 高压电器，2015，51(2)：18-23.
NIU Chunping, QIANG Ruochen, WANG Xiaohua, et al. Simulation of high-voltage circuit breaker contact resistance via contact area coupling method[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 18-23.

[37] BHOLE A A, GANDHARE W Z. An overview of dynamic contact resistance measurement of HV circuit breakers[J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B, 2016, 97(2): 219-226.

[38] SODHA N S, SINGH S, VICTOR S, et al. Condition assessment of EHV class circuit breakers using dynamic contact resistance measurement technique[M]//Paris Session. Paris, France: CIGRE, 2012: 1-11.

[39] DE SOUZA R T, DA COSTA E G, DE OLIVEIRA A C, et al. Characterization of contacts degradation in circuit breakers through the dynamic contact resistance[C]// Proceedings of the IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition. Medellin, Colombia, 2014: 1-6.

[40] KHODDAM M, SADEH J, POURMOHAMADIYAN P. Performance evaluation of circuit breaker electrical contact based on dynamic resistance signature and using health index[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2016, 6(10): 1505-1512.

[41] TYAGI R K, SODHA N S. Condition-based maintenance techniques for EHV-class circuit breaker[C]// Presented at the Doble Client Conference. Boston, USA:[s. n.], 2001.

[42] LANDRY M, TURCOTTE O, BRIKCI F. A complete strategy for conducting dynamic contact resistance measurements on HV circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 710-716.

[43] LIU Y K, ZHANG G G, QIN H, et al. Prediction of the dynamic contact resistance of circuit breaker based on the kernel partial least squares[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(8): 1815-1821.

[44] STANISIC Z. Method for static and dynamic resistance measurements of HV circuit breaker[C]// 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. Manchester, UK: IEEE, 2011: 1-5.

[45] 傅 中，陈维江，李志兵，等. SF_6 断路器动态接触电阻测量方法及影响因素[J]. 高电压技术，2017，43(5)：1535-1542.
FU Zhong, CHEN Weijiang, LI Zhibing, et al. Measurement method and influencing factors of the dynamic contact resistance of SF_6 circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1535-1542.

[46] MA S H, XU J Y, WANG J M. A method for intellectualized detection and fault diagnosis of vacuum circuit breakers[C]// 19th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Xi'an, China: IEEE, 2000: 771-774.

[47] 关永刚，黄瑜珑，钱家骊. 真空断路器电磨损监测技术的改进[J]. 高压电器，2001，37(4)：1-3，6.
GUAN Yonggang, HUANG Yulong, QIAN Jiali. On-line monitoring of the electrical wear of high voltage circuit breaker using an improvement method[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(4): 1-3, 6.

[48] 彭 搏，肖登明. 断路器电寿命的在线监测[J]. 电网与清洁能源，2012，28(12)：38-41，50.
PENG Bo, XIAO Dengming. Online monitoring of the breaker's electrical life[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(12): 38-41, 50.

[49] 李 娟，焦邵华. 基于 DSP 的高压断路器状态在线监测装置[J]. 电力自动化设备，2004，24(8)：44-47.
LI Juan, JIAO Shaohua. Online monitoring device for high voltage circuit breaker based on DSP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(8): 44-47.

[50] 李六零，丁卫东，石月春，等. 动态电阻测量法用于评估 SF_6 断路器灭弧室状况的探讨[J]. 高压电器，2002，38(2)：54-55，57.
LI Liuling, DING Weidong, SHI Yuechun, et al. Dynamic resistance measurement: a new method for online condition assessment of SF_6 circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(2): 54-55, 57.

[51] 毛文奇，黎治宇，邓 集. 动态电阻法评估 SF_6 断路器灭弧室状况初探[J]. 湖南电力，2010，30(4)：43-44.
MAO Wenqi, LI Zhiyu, DENG Ji. Discussion on dynamic resistance measurement for online condition assessment of SF_6 circuit breaker[J]. Hunan Electric Power, 2010, 30(4): 43-44.

[52] 毛文奇，陈 功，范 敏，等. 126 kV SF_6 断路器触头状态诊断方法研究[J]. 水电能源科学，2015，33(5)：190-192.
MAO Wenqi, CHEN Gong, FAN Min, et al. State diagnostic method analysis of 126 kV SF_6 circuit breaker[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(5): 190-192.

[53] LANDRY M, MERCIER A, OUELLET G, et al. A new measurement method of the dynamic contact resistance of HV circuit breakers[C]// IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Dallas, USA: IEEE, 2006: 1002-1009.

[54] 范 敏，毛文奇，段肖力，等. 基于动态电阻技术的 SF_6 断路器灭弧室状态评估方法[J]. 水电能源科学，2016，34(10)：189-192.
FAN Min, MAO Wenqi, DUAN Xiaoli, et al. Arcing chamber state assessment of SF_6 breaker based on dynamic resistance technology[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(10): 189-192.

[55] 蓝 磊，吴 杨，文习山，等. SF_6 断路器动态电阻测量、分析与诊断系统[J]. 高压电器，2018，54(1)：82-89.
LAN Lei, WU Yang, WEN Xishan, et al. Measurement, analysis and diagnosis system of SF_6 circuit breakers dynamic resistance[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 82-89.

[56] SUN S G, WEI S, WANG J Q, et al. Remaining useful life prediction for circuit breaker based on opening-related vibration signal and SA-CNN-GRU[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(23): 23009-23022.

[57] YANG Q Y, RUAN J J, ZHUANG Z J, et al. Condition evaluation for opening damper of spring operated high-voltage circuit breaker using

vibration time-frequency image[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(18): 8116-8126.

[58] SUN S G, WEN Z T, DU T H, et al. Remaining life prediction of conventional low-voltage circuit breaker contact system based on effective vibration signal segment detection and MCCAE-LSTM[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(19): 21862-21871.

[59] WAN S T, CHEN L. Fault diagnosis of high-voltage circuit breakers using mechanism action time and hybrid classifier[J]. IEEE Access, 2019, 7: 85146-85157.

[60] MENG Y P, JIA S L, SHI Z Q, et al. The detection of the closing moments of a vacuum circuit breaker by vibration analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 652-658.

[61] REN L, DONG J B, WANG X K, et al. A data-driven auto-CNN-LSTM prediction model for lithium-ion battery remaining useful life[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(5): 3478-3487.

[62] 杨秋玉，阮江军，黄道春，等. 基于 VMD-Hilbert 边际谱能量熵和 SVM 的高压断路器机械故障诊断[J]. 电机与控制学报，2020，24(3)：11-19.
YANG Qiuyu, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Mechanical fault diagnosis for high voltage circuit breakers based on VMD-Hilbert marginal spectrum energy entropy and SVM[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(3): 11-19.

[63] 林 辛，张冠生，洪 翠. 基于模糊理论的真空断路器开断电寿命综合评判的研究[J]. 中国电机工程学报，2000，20(2)：15-18.
LIN Xin, ZHANG Guansheng, HONG Cui. A study of fuzzy theory based comprehensive judgement on the interrupted electrical endurance of vacuum circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 15-18.

[64] 陈伟根，李 伟，陈新岗，等. SF_6 高压断路器状态分析的模糊综合评判方法[J]. 高压电器，2004，40(5)：361-363.
CHEN Weigen, LI Wei, CHEN Xingang, et al. The fuzzy comprehensive evaluation method for condition analysis of SF_6 high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(5): 361-363.

[65] 李 宇，张国钢，耿英三. 基于模糊理论的高压断路器状态评估研究[J]. 高压电器，2007，43(4)：274-277.
LI Yu, ZHANG Guogang, GENG Yingsan. The condition assessment method for HV circuit breakers based on fuzzy theory[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 274-277.

[66] 张国钢，李 宇，汤 翔，等. 模糊聚类分析用于断路器状态评估因素分类[J]. 高电压技术，2008，34(2)：350-354.
ZHANG Guogang, LI Yu, TANG Xiang, et al. Clustering analysis in condition assessment factor classification of circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 350-354.

[67] 国连玉，李可军，梁永亮，等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备，2014，34(11)：161-167.
GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 161-167.

[68] LIU S X, LIU Z C, ZHANG Y J, et al. Application of AHP and grey correlation analysis in the study of electric life of vacuum circuit breaker[C]//28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Greifswald, Germany: IEEE, 2018: 555-558.

[69] 张镱议，廖瑞金，杨丽君，等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报，2012，27(5)：13-20.
ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.

[70] 刘锦杰，叶 波，罗赞琛，等. 一种基于云模型的 SF_6 高压断路器状态评估方法[J]. 高压电器，2019，55(4)：31-38，45.
LIU Jinjie, YE Bo, LUO Zanchen, et al. State assessment method for SF_6 high-voltage circuit breaker based on cloud model[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 31-38, 45.

[71] 常怡东，张开轩，金 潇. 基于物元可拓理论的高压断路器状态评估方法[J]. 高压电器，2017，53(9)：107-113.
CHANG Yidong, ZHANG Kaixuan, JIN Xiao. Condition assessment of high voltage circuit breaker based on matter-element extension theory[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(9): 107-113.

[72] 黄绪勇，孙 鹏，耿苏杰，等. 基于关联规则和变权重系数的 SF_6 高压断路器状态综合评估[J]. 电力系统保护与控制，2018，46(2)：50-56.
HUANG Xuyong, SUN Peng, GENG Sujie, et al. An assessment method of SF_6 high-voltage circuit breaker based on association rules and variable weight coefficients[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 50-56.

[73] 谢龙君，李 黎，程 勇，等. 融合集对分析和关联规则的变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报，2015，35(2)：277-286.
XIE Longjun, LI Li, CHENG Yong, et al. A fault diagnosis method of power transformers by integrated set pair analysis and association rules[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 277-286.

[74] 胡姚刚，李 辉，廖兴林，等. 风电轴承性能退化建模及其实时剩余寿命预测[J]. 中国电机工程学报，2016，36(6)：1643-1649.
HU Yaogang, LI Hui, LIAO Xinglin, et al. Performance degradation model and prediction method of real-time remaining life for wind turbine bearings[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1643-1649.

[75] 王兆强，胡昌华，王文彬，等. 基于 Wiener 过程的钢厂风机剩余使用寿命实时预测[J]. 北京科技大学学报，2014，36(10)：1361-1368.
WANG Zhaoqiang, HU Changhua, WANG Wenbin, et al. Wiener process-based online prediction method of remaining useful life for draught fans in steel mills[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(10): 1361-1368.

[76] RUDSARI F N, RAZI-KAZEMI A A, SHOOREHDELI M A. Fault analysis of high-voltage circuit breakers based on coil current and contact travel waveforms through modified SVM classifier[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1608-1618.

[77] 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)：233-240.
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): 233-240.

[78] 唐 炬，谢颜斌，周 倩，等. 基于最优小波包变换与核主分量分析的局部放电信号特征提取[J]. 电工技术学报，2010，25(9)：35-40.
TANG Ju, XIE Yanbin, ZHOU Qian, et al. Feature extraction for partial discharge signals based on the optimal wavelet packet basis transform and kernel principal component analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 35-40.

[79] 王振兴，刁目鑫，肖光宇，等. 基于 QPSO-SVR 算法的 SF_6 断路器触头烧蚀状态评估[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3907-3917.
WANG Zhenxing, DIAO Muxin, XIAO Guangyu, et al. SF_6 circuit breaker contact state assessment based on QPSO-SVR algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3907-3917.

[80] 刘帼巾，李 想，王 泽，等. 基于 Wiener 过程电子式漏电断路器的剩余寿命预测[J]. 电工技术学报，2022，37(2)：528-536.
LIU Guojin, LI Xiang, WANG Ze, et al. Remaining life prediction of electronic residual current circuit breaker based on wiener process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 528-536.

[81] 韩翔宇，纽春萍，何海龙，等. 电磁式断路器状态监测与智能评估

技术综述[J]. 电工技术学报，2023，38(8)：2191-2210.
HAN Xiangyu, NIU Chunping, HE Hailong, et al. Review of condition monitoring and intelligent assessment of electromagnetic circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(8): 2191-2210.

[82] PENG C Y, TSENG S T. Mis-specification analysis of linear degradation models[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, 58(3): 444-455.

[83] 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)：3978-3986.
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): 3978-3986.

[84] 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 Shuguang, LI Qin, WANG Jiaxing, 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.

[85] 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 Yang, LI Yongli. 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.

[86] 孙曙光，王佳兴，王景芹，等. 基于 Wiener 过程的万能式断路器附件剩余寿命预测[J]. 仪器仪表学报，2019，40(2)：26-37.
SUN Shuguang, WANG Jiaxing, WANG Jingqin, et al. Remaining useful life prediction of accessories for the conventional circuit breaker based on Wiener process[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 26-37.

[87] 孙曙光，张 伟，王景芹，等. 基于动作过程振动检测的低压断路器机械寿命预测[J]. 仪器仪表学报，2020，41(12)：146-157.
SUN Shuguang, ZHANG Wei, WANG Jingqin, et al. Mechanical life prediction of low-voltage circuit breaker based on vibration detection during operation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 146-157.

[88] 董华军，孙 鹏，李东恒，等. 12 kV 真空灭弧室触头电动斥力计算与结构优化[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3602-3611.
DONG Huajun, SUN Peng, LI Dongheng, et al. Electro-dynamic repulsion force calculation and structure optimization of the contacts in 12 kV vacuum interrupter[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3602-3611.

[89] 刘树鑫，高士珍，刘 洋，等. 基于 LSTM 的交流接触器剩余寿命预测[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3210-3220.
LIU Shuxin, GAO Shizhen, LIU Yang, et al. Residual life prediction of AC contactor based on long short-term memory[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3210-3220.



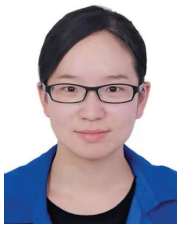
赵书涛
1968—，男，博士，教授
主要从事电气设备状态检测与智能图像识别技术方面的研究工作
E-mail: shuotaozhao@163.com

ZHAO Shutao
Ph.D., Professor



黄伟杰(通信作者)
1999—，男，硕士生
主要从事方向为电力设备故障诊断与电寿命预测
E-mail: huangweijie0813@163.com

HUANG Weijie
Corresponding author



刘会兰
1986—，女，博士生，工程师
主要从事电力设备故障诊断、智能电器监测技术及分布式电源并网技术的研究工作
E-mail: liuhuilan111@163.com

LIU Huilan
Ph.D. candidate

收稿日期 2023-05-16 修回日期 2023-11-17 编辑 曾文君