

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.006

快速机械开关合闸振动与形变特性研究

莫永鹏¹, 游雨欣¹, 邹灏^{1,2}, 郑武纬^{1,3}, 史宗谦¹

(1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 西安 710049; 2. 国网重庆市电力公司市北供电分公司, 重庆 401147; 3. 安徽省人民政府办公厅, 合肥 230091)

摘要: 快速机械开关合闸过程电磁驱动力较小, 较分闸过程更易受外部因素干扰, 长期运行下可能导致合闸性能下降甚至失败。然而当前对合闸特性的研究较为有限。该文对某快速机械开关样机展开深入实验研究, 从振动及形变角度研究其长期运行下的合闸特性。首先, 搭建了合闸特性实验平台, 获取其长期运行下的运动、振动与形变数据。其次, 研究了电容电压与摩擦系数对合闸运动的影响, 结果表明合闸电容电压小幅下降会显著降低合闸平均速度, 电压下降约3%时速度降低约23%。接着, 对合闸振动信号进行了时频域分析, 发现分合闸线圈所在平面的振动信号最为明显, 信号冲击主要集中在0~5 kHz频段, 其中0~2 kHz频段的冲击较强, 且合闸电容电压与摩擦增大均会减小信号频谱峰值。最后, 结合应力仿真对形变数据进行分析, 结果表明保持装置连杆形变随开关动作次数增加而缓慢增大, 左侧形变程度及速率均大于右侧, 机构连杆未出现明显形变。
关键词: 快速机械开关; 合闸特性; 电容电压; 振动信号; 形变特性

Study on Closing Vibration and Deformation Characteristics of Fast Mechanical Switches

MO Yongpeng¹, YOU Yuxin¹, ZOU Hao^{1,2}, ZHENG Wuwei^{1,3}, SHI Zongqian¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company Shibe Power Supply Branch, Chongqing 401147, China; 3. General Office of the People's Government of Anhui Province, Hefei 230091, China)

Abstract: The electromagnetic driving force of fast mechanical switches during the closing process is relatively small compared to that during the opening process, making it more susceptible to external disturbances. The long-term operation in this condition may lead to degradation or even failure of closing performance. However, the studies on the closing characteristics at present are still limited. In this paper, an in-depth experimental study is carried out on a prototype of a fast mechanical switch, investigating its closing characteristics under long-term operation from perspectives of vibration and deformation. First, a closing characteristic experimental platform is established to acquire motion, vibration, and deformation data of the switch under long-term operation. Then, the influence of capacitive voltage and friction coefficient on the closing operation is studied. The result shows that a slight decrease in the closing capacitive voltage can significantly reduce the average closing speed. When the voltage drops by approximately 3%, the speed decreases by about 23%. Then, time-frequency analysis of the closing vibration signals is conducted. It is found that the vibration signals on the plane of the opening/closing coils are the most prominent, with the impulse energy primarily concentrated within the 0~5 kHz, and particularly stronger in the 0~2 kHz range. Furthermore, both the reduction of closing capacitive voltage and the increase of friction resistance tend to diminish the spectral peak values of the vibration signals. Finally, the deformation data is analyzed in combination with stress simulation. The result shows the deformation of the link in the holding mechanism gradually increase with the number of switching operations. The degree and rate of deformation on the left side are both greater than on the right side, while the link of the actuating mechanism does not exhibit significant deformation.

Key words: fast mechanical switch; closing characteristics; capacitive voltage; vibration signals; deformation characteristics

收稿日期:2026-03-20; 修回日期:2026-05-20

0 引言

随着大规模可再生能源接入电网^[1-2], 柔性直流输电技术迅速发展, 目前国内已投运的柔性直流工程总输电容量接近全球总量的一半^[3-5]。然而, 柔性直流输电系统线路阻抗小, 短路故障发生后电流上升速度快, 这要求直流断路器需在几个毫秒内完成开断^[6]。为满足快速动作要求, 直流断路器中常采用基于电磁斥力机构的快速机械真空开关熄弧, 其分闸时间可缩短至2~5 ms^[7-10]。

近年来, 国内外学者围绕快速机械开关开展了大量研究。由于电磁斥力机构在分闸瞬间会产生极大的电磁力, 其性能直接影响开关的快速性和可靠性。温伟杰^[11]等采用等效电路法分析电磁斥力机构特性, 提出了参数设计原则。Zhu Zhexiao^[12-13]等发现斥力盘变形会限制其与线圈间的电磁耦合, 基于Ansys平台分析了斥力盘结构参数与分闸运动特性、应力分布之间的关系, 并提出了新的斥力盘结构。王汝凡^[14]等多场协同仿真分析了销钉、连杆、斥力盘的应力分布及振动现象, 优化了斥力盘参数并完成分闸试验测试。董润鹏^[15]等基于Comsol有限元软件分析了分闸过程中斥力盘内的洛伦兹力及应力分布, 指出在不均匀洛伦兹力作用下的弹塑性形变是斥力盘振动或弯折的原因。可见, 由于快速机械开关对分闸要求较为严格, 现有研究多聚焦于分闸过程, 通过分析应力、振动、形变来优化斥力机构参数, 从而改善开关分闸性能。

相比之下, 针对快速机械开关合闸特性的研究相对较少。田宇^[16]等通过电磁—机械联合仿真, 优化储能电容参数来调整合闸时间, 减小了触头合闸弹跳。熊杰^[17]等利用LS-DYNA软件仿真了分合闸全过程机械运动特性和构件瞬态冲击强度, 并通过试验验证, 提出了降低合闸弹跳及冲击应力的措施。Heidary P^[18]等采用Comsol软件仿真了合闸过程中斥力盘的行程、受力及碰撞情况, 基于应力分布评估了开关的机械耐久性。上述研究主要通过仿真优化参数来抑制合闸弹跳, 对开关合闸特性的实验研究较少, 特别是长期运行工况下合闸特性变化规律方面。合闸时的电磁驱动力比分闸时小得多, 快速机械开关的运动特性更易受零部件老化、磨损等因素影响, 可能导致合闸速度过慢造成合闸失败。因此, 面向工程实际, 研究开关长期运行下的合闸特性具有重要的意义。

基于此, 文中依托某工程直流断路器中的60 kV快速机械开关单元, 从振动及形变特性两个角度对

其长期运行下的合闸特性开展了实验研究。首先搭建合闸特性实验平台, 对开关进行1 000多组分合闸操作, 获取其长期运行下的运动、振动、形变数据。其次, 分析影响合闸运动特性的关键因素。随后对开关不同位置采集到的振动信号进行时频域分析, 并研究上述关键因素对振动特性的影响规律。最后, 结合应力仿真结果, 定量分析零部件形变随开关动作次数增加的演变趋势。

1 快速机械开关工作原理及实验平台

快速机械开关样机结构示意图见图1。图1状态下开关处于分闸位置, 其合闸原理为: 合闸电容 C_1 由充电机预先充电至额定电压, 当触发信号使晶闸管 SCR_1 导通后, 合闸电容 C_1 向合闸线圈放电, 形成放电电流。合闸线圈通入电流后, 斥力盘中感应出涡流, 在线圈与斥力盘之间产生电磁斥力, 在该斥力驱动下, 斥力盘、斥力盘连杆及超程簧筒克服弹簧保持装置施加的分闸保持力向上运动, 进而带动触头活塞、机构连杆及动触头完成合闸动作。快速机械开关的触头开距为 (21 ± 1) mm, 主要参数见表1。

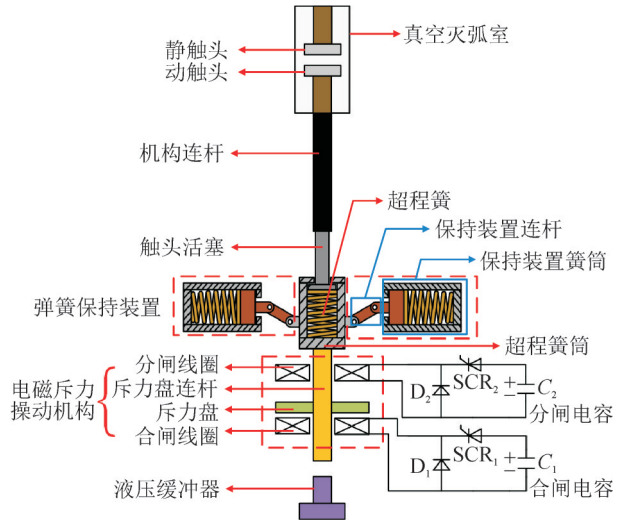


图1 快速机械开关样机结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of the fast mechanical switch prototype

表1 快速机械开关主要参数表

Table 1 Main parameters of the fast mechanical switch

参数	数值	参数	数值
合闸电容电压/V	1 320	合闸线圈电阻/mΩ	31.60
合闸电容容值/μF	1 200	合闸线圈电感/μH	89.30
分闸电容电压/V	1 320	分闸线圈电阻/mΩ	34.61
分闸电容容值/μF	3 700	分闸线圈电感/μH	85.35

为探究快速机械开关样机的合闸特性, 搭建实验平台见图2。实验中, 由快速机械开关控制柜发出指令, 控制快速机械开关执行合闸操作; 同步信

号发生器接收到控制柜的光信号后,将其转化为电信号,同步触发高速摄像机和上位机,高速摄像机开始拍摄机构连杆的运动图像,上位机通过数据采集卡记录由罗氏线圈配合电流积分器采集到的电流信号;经过数据后处理可得快速机械开关的动触头合闸位移曲线及合闸线圈电流变化曲线。实验过程中,高速摄像机的拍摄帧率设定为15 000 fps,曝光时间为47 μs ,罗氏线圈测量精度为 $\pm 1\%$ 。

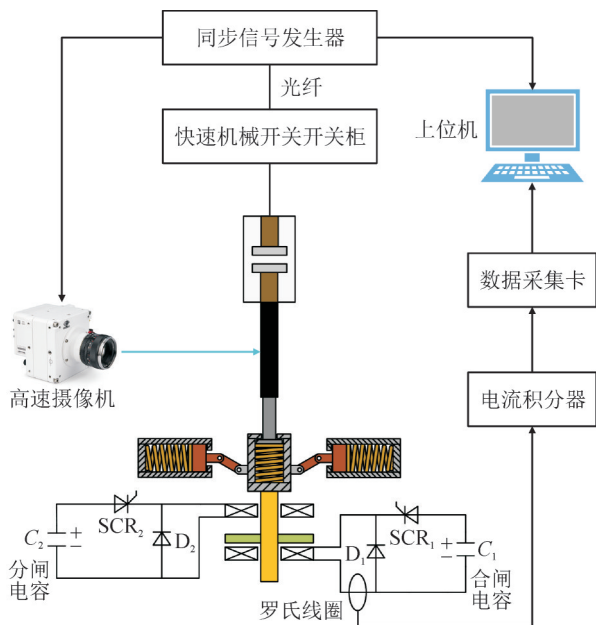


图2 合闸特性实验平台原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the closing characteristics experimental platform

2 合闸运动关键影响因素

长期运行后,开关零部件性能下降将影响合闸可靠性。为此,对电容充电机老化与零部件摩擦增大两类老化现象展开研究。

充电机部件老化会引起合闸电容的预充电电压下降,而该电压的大小影响着开关的分合闸时间和同步性^[19-20]。为模拟该老化工况,实验中逐步降低合闸电容的预充电电压,分别测量了1 320、1 300、1 280 V 3种电压下的线圈电流和动触头位移,结果见图3。

由图3(a)可知,当合闸电容电压从1 320 V下降至1 280 V时,线圈电流峰值从4.457 kA下降至4.354 kA。由图3(b)可知,合闸平均速度从2.03 m/s下降至1.57 m/s。这是由于电容电压降低导致电容储能减少,使得斥力盘动能减少,从而降低开关合闸平均速度。经式(1)计算得到,当合闸电容电压下降约3%时,线圈电流峰值下降约2%,合闸平均速度下降约23%,说明合闸电容电压的微小波动会引起

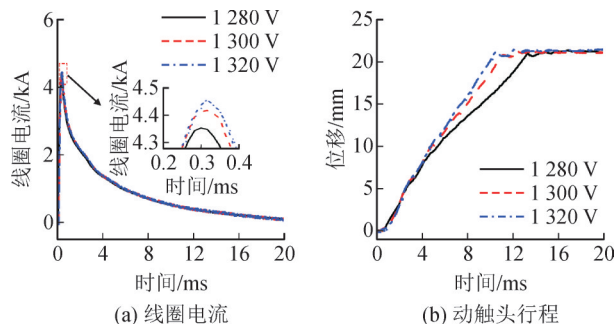


图3 不同合闸电压下的实验结果

Fig. 3 Experimental results under different closing voltages

合闸平均速度的大幅变化。进一步结合 Ansoft Maxwell 和 Adams 软件开展电磁—机械耦合仿真,得到开关合闸的临界电压为1 230 V,当合闸电容电压低于该临界值时,开关合闸失败。研究人员通过 Ansoft Maxwell 软件仿真及正交试验对电容参数的研究也表明,充电电压对斥力盘运动的影响显著^[21-22]。因此,在工程运维中需对合闸电容电压进行重点监测。

$$\Delta X\% = \frac{X_0 - X_1}{X_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: $\Delta X\%$ 为参量 X 的相对变化率, $X=\{U, I, v\}$, U 为电容电压, I 为线圈电流峰值, v 为合闸平均速度; X_0 为参量 X 初始值; X_1 为参量 X 变化后的数值。

开关在长期运行后会出现零部件磨损或润滑油劣化等现象,这将增大零部件之间的摩擦,影响开关合闸运动。基于此,文中还研究摩擦系数变化对开关合闸特性的影响程度。为模拟长期运行形成的自然磨损与正常润滑两种状态下的不同摩擦系数,在开关完成1 175组分合闸操作后,对弹簧保持装置簧筒内壁及其连杆轴孔处涂抹润滑油(具体涂抹位置见图1),使部件恢复正常润滑状态。不同摩擦条件下的动触头位移曲线见图4。

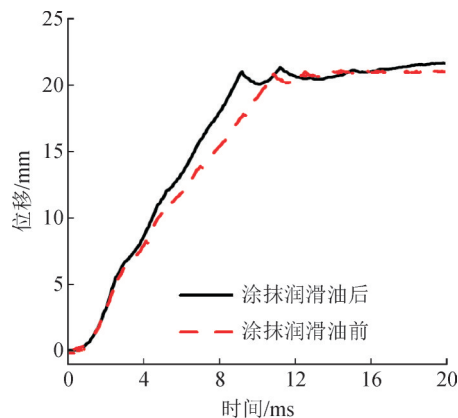


图4 不同摩擦条件下的实验结果

Fig. 4 Experimental results under different friction conditions

由图4可知,涂抹润滑油后,快速机械开关的合闸平均速度从1.89 m/s提升至2.28 m/s,提高了20%。润滑油通过减小保持装置内壁的摩擦阻力,使合闸电磁驱动力更高效地转化为动能,从而提升合闸速度。从合闸速度的提升幅度来看,保持装置的摩擦对合闸运动特性影响较大,摩擦力增大会明显降低开关的合闸平均速度。因此,在开关实际运维中,也需密切关注保持装置等机械部件的润滑及磨损情况,避免因机械阻力过大造成开关合闸卡滞。

3 合闸振动特性分析

快速机械开关在电磁斥力作用下会发生高速碰撞,引发零部件剧烈振动,由此产生的振动信号一定程度上可以反映开关的动态响应、零部件健康状况及潜在故障^[23]。为获取开关合闸状态信息,对合闸振动信号进行采集与时频域分析。

3.1 振动信号采集方法

实验采用LC0157T型压电式加速度传感器采集振动信号。该加速度传感器利用压电效应将测得的振动力转换为电信号,随后经恒流源模块传输至数据采集卡转换为数字信号,最终储存于上位机中,采集流程见图5。实验用加速度传感器灵敏度为1.6 mV/g,测量量程3 000g,谐振频率55 kHz,测量频率范围5 Hz~20 kHz,数据采集卡采样频率为60 kHz。

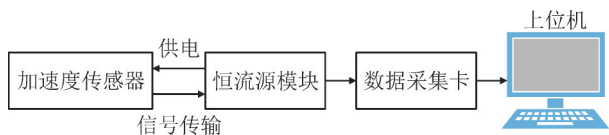


图5 振动信号采集流程

Fig. 5 Vibration signal acquisition procedure

3.2 振动信号时频域分析

由于开关各零部件受力情况、结构刚度及连接方式不同,从不同位置采集到的振动信号也存在差异。为明确不同位置合闸振动特征的差异,在快速机械开关上选取6个测点,见图6,分别安装加速度传感器同步采集振动信号并进行比较。各测点振动数据采集结果见图7。从图7可以看出,位置1与位置4的振动信号幅值高于其他测点,这是由于位置1靠近动静触头,位置4靠近电磁斥力机构,在合闸过程中这两个区域均会发生机械碰撞,表明越靠近机械碰撞区域,振动信号越明显,其中位置4的振动信号最明显。

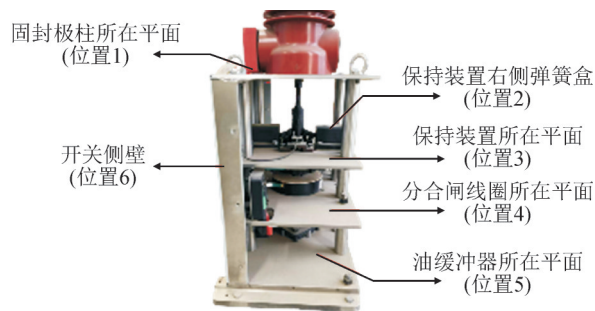


图6 加速度传感器安装位置

Fig. 6 Accelerometer mounting locations

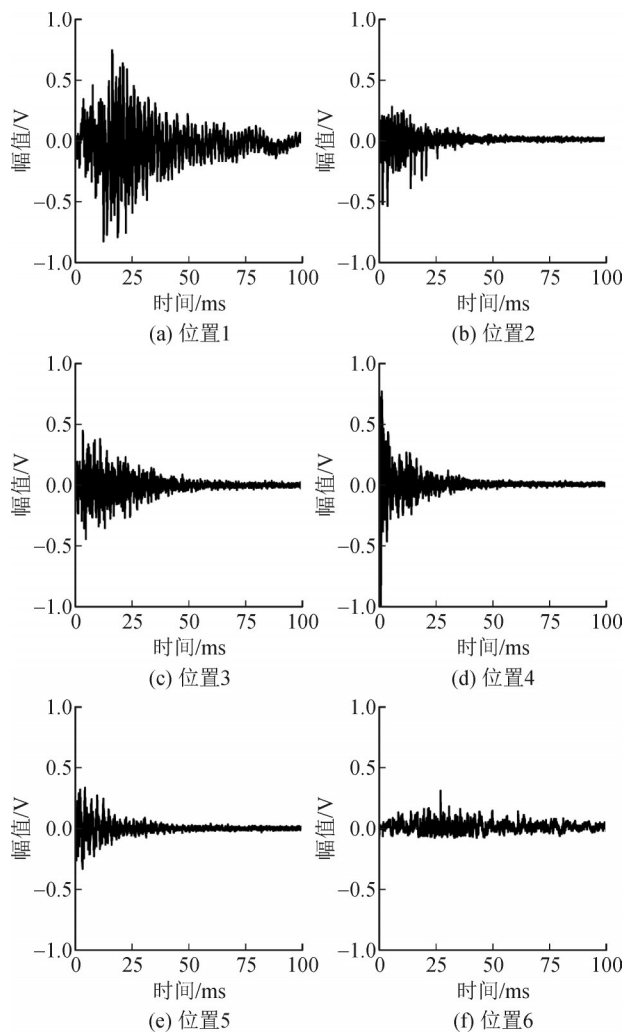


图7 不同位置的合闸过程振动信号

Fig. 7 Vibration signals during the closing process at different locations

评估振动信号的时域特征通常采用均方根值、峰值因子、峭度因子作为对比指标^[24-26]。均方根值能够衡量信号整体能量大小,峰值因子能够反映信号瞬时冲击特性,峭度因子是描述信号概率分布形状的统计量,其值越大表示信号中包含的冲击成分越多,对应的开关运动状态也越不稳定。3个指标的计算公式如下:

$$e_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)^2} \quad (2)$$

$$C = \frac{\max[|x(i)|]}{e_{\text{RMS}}} \quad (3)$$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N [x(i) - x_{\text{mean}}]^4}{(N-1)\sigma_x^4} \quad (4)$$

式(2)-(4)中: e_{RMS} 为均方根值; C 为峰值因子; K 为峭度因子; x_{mean} 为均值; σ_x 为标准差。

各测点振动信号的时域指标计算结果见表2, 位置1的振动信号均方根值最大, 位置4次之; 位置4的振动信号峰值因子为18.8, 峭度因子为76.04, 均高于其他测点。这表明位置1的振动信号能量最强, 位置4的振动信号瞬态冲击最大、冲击成分最多。因此, 位置4的振动信号包含的冲击特征信息更加丰富。

表2 6个测点振动信号的时域指标

Table 2 Time-domain indices of vibration signals from six locations

振动信号	均方根值/V	峰值因子	峭度因子
位置1	0.112 6	7.16	10.46
位置2	0.044 2	12.34	40.83
位置3	0.047 6	9.46	18.11
位置4	0.060 6	18.80	76.04
位置5	0.034 3	9.73	24.77
位置6	0.032 6	9.09	7.14

为进一步分析振动信号的频域特征, 对位置4的信号进行傅里叶变换, 得到频谱图见图8。振动冲击主要集中在0~5 kHz频段内, 图8中0~2 kHz低频段的振动冲击较强, 频谱峰值出现在1.1 kHz附近, 对应幅值为8.2 mV。

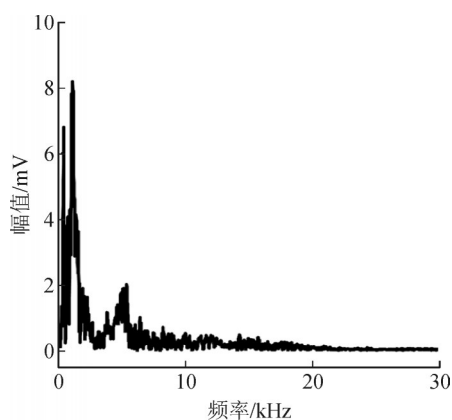


图8 位置4振动信号的频谱图

Fig. 8 Frequency spectrum of vibration signal at location 4

3.3 不同参数对振动特性的影响

由第2章可知, 合闸电容电压和零部件间的摩擦是影响快速机械开关合闸运动特性的两个重要

因素。除此之外, 开关多次动作后出现的部件松动、保持装置弹簧疲劳、传动杆偏移等机械结构劣化问题, 同样会改变系统刚度与传动配合状态, 引起合闸振动信号发生改变。本节选取位置4(分合闸线圈所在平面)的振动信号表征开关的合闸振动特性, 重点探究前述合闸电容电压、零部件摩擦两个参数对振动特性的影响规律。

为探究合闸电容电压的影响, 实验分别测量了1 320、1 300、1 280 V 3种电压下的合闸振动信号。对应电压下振动信号的时域指标见表3, 当电容电压从1 320 V降低至1 280 V时, 振动信号的均方根值从0.062 5 V减小至0.055 3 V, 减小约12%; 峭度因子则从70.28增大至79.66, 增大约13%。这表明, 随着合闸电容电压降低, 振动信号的整体能量减弱, 冲击成分增多。这是因为电容电压降低会引起电磁驱动力下降, 而该驱动力用于直接驱动机构完成竖直向上的合闸运动。驱动力下降使机构整体能量减弱, 在运动过程中更易受其他因素干扰, 运动平稳性降低, 表现为振动信号冲击成分增多。不同电压下振动信号频谱图见图9, 当电压从1 320 V降至1 300 V时, 频谱变化较为明显, 全频段的幅值整体降低, 峰值从9.97 mV减小至7.23 mV, 减小约27%, 且位于10~20 kHz频段的冲击消失; 当电压从1 300 V降至1 280 V时, 二者的频谱相差不大, 峰值从7.23 mV减小至6.9 mV, 减小约5%。这表明, 合闸电容电压降低会减小振动信号的频谱峰值, 明显减弱10~20 kHz频段的振动冲击。

表3 不同合闸电容电压下振动信号的时域指标

Table 3 Time-domain indices of vibration signals under different closing capacitor voltages

振动信号/V	均方根值/V	峰值因子	峭度因子
1 320	0.062 5	18.62	70.28
1 300	0.059 1	18.92	78.04
1 280	0.055 3	17.98	79.66

为探究零部件间摩擦的影响, 实验分别测量了保持装置涂抹润滑油前后的合闸振动信号。不同摩擦条件下振动信号的时域指标见表4, 涂抹润滑油后, 振动信号的均方根值变化不大, 但峭度因子均明显增大。说明摩擦力增大对振动能量影响较小, 而对冲击成分影响较大。这可能是由于摩擦力的增大增强了部件的运动阻尼, 抑制了冲击幅值, 使得机构运动平稳性更好, 从而减少了冲击成分。为不同摩擦力下振动信号的频谱图见图10。由图10可知, 涂抹润滑油后, 峰值从9.2 mV增大至10.09 mV。这表明摩擦力增大会减小振动信号的频谱峰值, 但冲击集中的频段未发生明显变化。

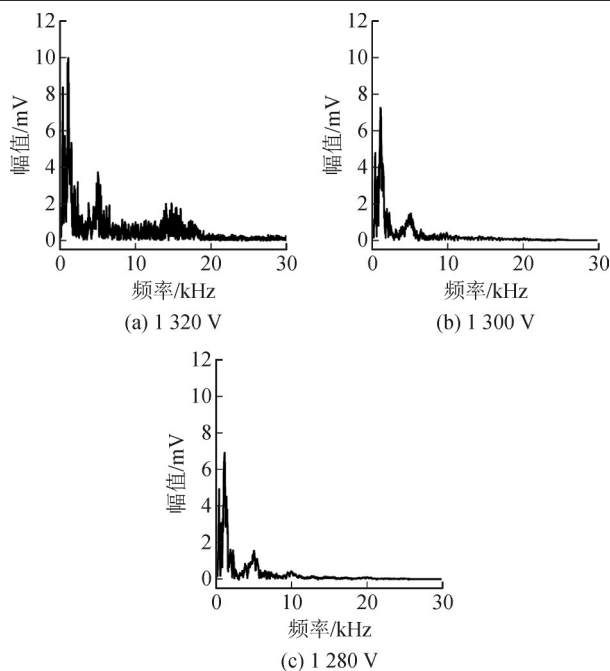


图9 不同合闸电容电压下振动信号的频谱图

Fig. 9 Frequency spectra of vibration signals under different closing capacitor voltages

表4 不同摩擦条件下振动信号的时域指标

Table 4 Time-domain indices of vibration signals under different friction conditions

振动信号	均方根值/V	峰值因子	峭度因子
涂抹润滑油前	0.064 1	17.81	67.70
涂抹润滑油后	0.063 1	18.17	72.61

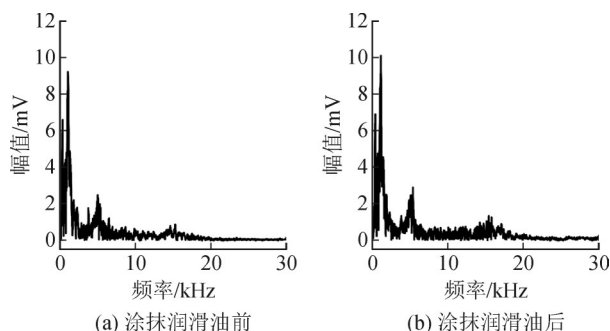


图10 不同摩擦力下振动信号的频谱图

Fig. 10 Frequency spectra of vibration signals under different friction forces

综上,合闸电容电压下降、零部件摩擦力增大均会减小振动信号频谱峰值,但对信号冲击成分的影响相反。因此,通过监测该位置的振动信号,能够在一定程度上反映机构动作过程中的参数变化,可为实际运维检测提供有益参考。

4 合闸形变特性分析

在快速机械开关的合闸过程中,零部件在机械冲击下会发生变形,从而影响其疲劳寿命,长期累

积的形变还可能导致开关动作失效^[27-28]。因此,对快速机械开关的关键零部件形变情况开展进一步研究。

4.1 零部件应力分布

当材料受到外力作用时,其内部的应力会引起材料形变。为明确形变机理,首先对保持装置连杆和机构连杆的应力分布进行仿真研究。

研究基于 Ansys Workbench 平台,结合 Maxwell 电磁模块和 Transient Structural 瞬态力学模块进行联合仿真。首先在 Maxwell 中建立电磁斥力机构模型,见图 11(a),计算得到合闸时的瞬态电磁斥力。然后在 Transient Structural 中建立快速机械开关的简化模型,见图 11(b),在完成材料定义、约束设置等前处理操作后,将 Maxwell 计算所得的电磁斥力导入,作为动态载荷施加到斥力盘上,最终求解得到开关在合闸运动过程中各零部件的应力分布结果。

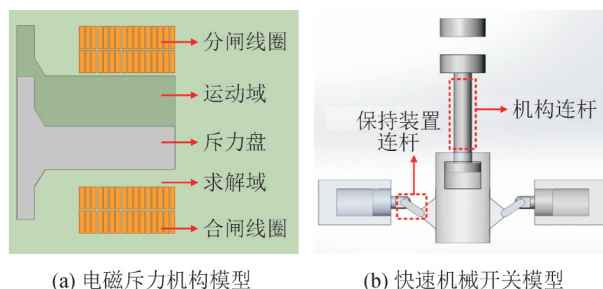


图11 应力分布仿真模型

Fig. 11 Stress distribution simulation model

保持装置连杆在合闸过程中的应力分布情况见图 12。开关合闸运动初期,当电磁斥力达到峰值时,保持装置连杆的应力分布见图 12(a),此时保持装置连杆承受的等效应力较小,集中分布于连杆两端的轴孔内侧,最大等效应力达到 47.392 MPa。当超程簧筒与触头活塞发生碰撞时,保持装置连杆的应力分布见图 12(b),此时保持装置连杆受到强烈的机械冲击,保持装置连杆承受的最大等效应力达到合闸全过程中的峰值,达到 263.47 MPa。当保持装置连杆处于水平位置时,其应力分布见图 12(c),此时保持装置对开关施加的保持力为零,保持装置连杆承受的等效应力较大,最大等效应力达到 235.24 MPa。当合闸末期动静触头发生碰撞时,保持装置连杆的应力分布见图 12(d),最大等效应力达到 71.21 MPa。仿真结果表明,在开关合闸全过程中,保持装置连杆的轴孔部位存在较为明显的应力集中。

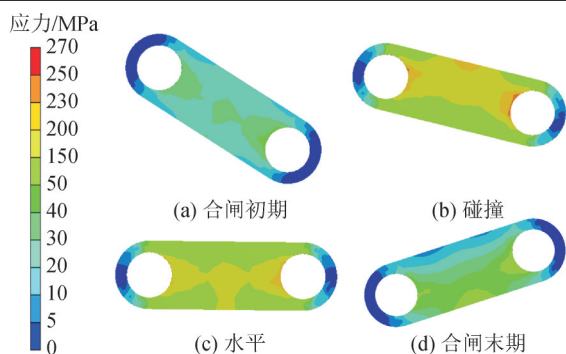


图12 保持装置连杆合闸应力分布图

Fig. 12 Stress distribution diagram of the holding device linkage during the closing process

机构连杆在合闸过程中的应力分布情况见图13。开关合闸运动初期,当电磁斥力达到峰值时,机构连杆应力分布见图13(a),机构连杆仅受超程弹簧的作用,其等效应力较小,最大值为4.26 MPa;当超程簧筒与触头活塞发生碰撞时,机构连杆应力分布见图13(b),碰撞力通过触头活塞传递至机构连杆,使机构连杆等效应力明显升高,最大值达到654.85 MPa;合闸末期动静触头发生碰撞时,机构连杆应力分布见图13(c),由于碰撞较为剧烈,机构连杆的最大等效应力为合闸全过程峰值,达到877.92 MPa,且最大应力位于连杆中部。仿真结果表明,在开关合闸全过程中,机构连杆承受的应力变化幅度大,特别是在碰撞阶段应力显著升高。由于机构连杆采用42CrMo合金结构钢,其抗拉强度为1 080 MPa,屈服强度为930 MPa,对比可知合闸峰值应力低于材料屈服强度,满足强度要求。

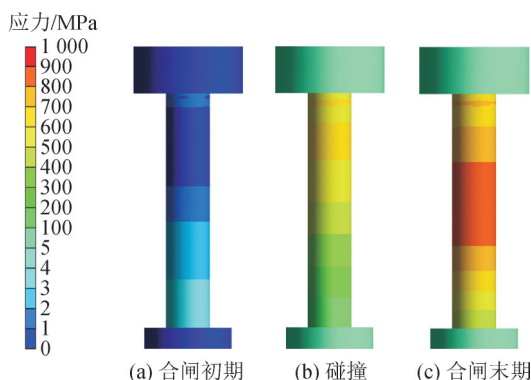


图13 机构连杆合闸应力分布图

Fig. 13 Stress distribution diagram of the mechanism linkage during the closing process

4.2 形变测量方法

从上一小节可以看出,保持装置轴销和机构连杆在开关机构动作过程中承受较大的应力冲击。在快速机械开关进行1 000多组分合闸操作过程中,按固定间隔测量上述零部件的形变。每10组分别

测量一次保持装置连杆在分闸与合闸状态下的形变;每40组分别测量一次机构连杆在两种状态下的形变。保持装置连杆的形变由连杆处两螺母圆心连线与水平方向的夹角 θ 表示,机构连杆的形变由开关遮光板到上层挡板的距离 d 表示,各参数测量位置见图14。

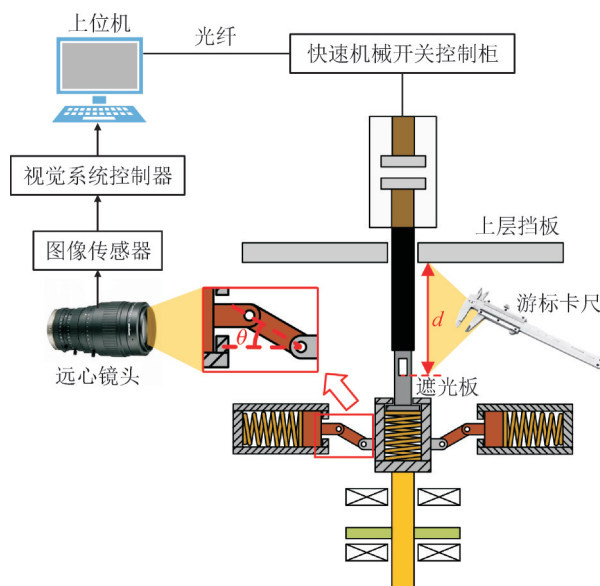


图14 形变测量实验平台

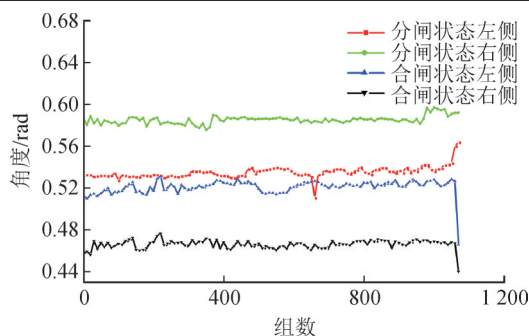
Fig. 14 Deformation measurement experimental platform

实验过程中,上位机首先通过快速机械开关控制柜使快速机械开关执行分合闸操作,随后使用基恩士CA-200MS图像传感器搭配远心镜头拍摄保持装置连杆,图像数据经由视觉系统控制器传输至上位机中进行分析处理,从而得到保持装置连杆的形变数据。机构连杆的形变则使用游标卡尺测量。游标卡尺分辨率为0.01 mm,测量误差为 ± 0.03 mm。

4.3 零部件形变测量结果

保持装置连杆形变测量结果见图15。随动作次数增加,两侧连杆的夹角 θ 在分闸与合闸状态下均呈缓慢增大趋势,整体变化幅度不超过0.01 rad。此外观察发现,在第1 070组分合闸动作后,保持装置一侧连杆发生断裂,断裂位置位于连杆轴孔处,与第4.1节仿真结果中保持装置连杆的应力集中区域相符。在后续进行结构优化时可考虑适当增加轴孔厚度来减小该处应力,提高保持装置连杆的结构强度。

进一步对夹角 θ 的测量数据进行统计分析及线性拟合,结果分别见表5、6,各组数据的形变趋势稳定,标准差与极差均较小,表明测量误差和环境波动等因素对测量结果影响较小。

图 15 保持装置连杆夹角 θ 测量结果Fig. 15 Measurement results of the included angle θ for the holding device linkages表 5 夹角 θ 的统计分析结果Table 5 Statistical analysis results of the included angle θ

位置	连杆夹角 θ /rad		
	均值	标准差	极差
分闸状态左侧	0.535 4	0.005 5	0.052 7
分闸状态右侧	0.585 2	0.003 8	0.021 4
合闸状态左侧	0.520 9	0.006 9	0.065 1
合闸状态右侧	0.466 2	0.004 3	0.036 2

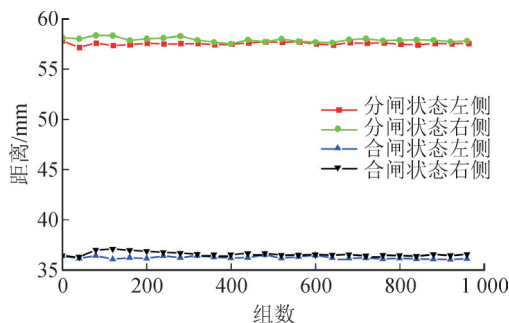
表 6 夹角 θ 的线性拟合结果Table 6 Linear fitting results of the included angle θ

位置	线性拟合曲线
分闸状态左侧	$\theta=9.72 \times 10^{-6}x+0.531 2$
分闸状态右侧	$\theta=5.78 \times 10^{-6}x+0.582 1$
合闸状态左侧	$\theta=4.65 \times 10^{-6}x+0.518 4$
合闸状态右侧	$\theta=1.32 \times 10^{-6}x+0.465 5$

从表5的统计结果可以看出,无论在分闸还是合闸状态下,左侧连杆夹角 θ 的均值均与右侧存在明显差异,且左侧方差和极差均大于右侧。分析认为这一差异主要来源于开关实际装配过程中两侧连杆的初始位置不对称。该不对称性导致两侧连杆在运动过程中受力不均,使得左侧连杆的夹角 θ 波动更大,形变更明显。表6的拟合结果也验证了上述趋势,左侧连杆的拟合斜率大于右侧,表明左侧连杆的形变速率更快。此外,结合第1070组连杆断裂时的数据分析发现,断裂侧(左侧)连杆的夹角 θ 变化幅度显著大于未断裂侧(右侧)。基于此,根据线性拟合曲线确定连杆在正常工况下的夹角 θ 变化阈值区间,当连杆夹角 θ 变化幅度超出该区间,则说明连杆处于异常状态,存在开裂风险。现场运维时,通过监测连杆夹角 θ 变化幅度,并与阈值区间进行比对,即可评估连杆健康状态,为保持装置的检修与维护提供量化参考。

机构连杆形变测量结果见图16。分闸状态下超程簧筒两侧距离 d 均约为57.5 mm,合闸状态下均

约为36.5 mm;分闸与合闸状态下距离 d 均未发生明显变化。结合第4.1节应力仿真结果可知,开关的动静触头碰撞会使机构连杆承受较大的瞬时应力,但长期运行后机构连杆未出现明显形变,这说明机构连杆的结构强度能够承受开关动作过程中的剧烈机械冲击。

图 16 遮光板到上层挡板的距离 d 测量结果Fig. 16 Measurement results of the distance d from the light-blocking plates to the upper baffle

综上,在长期服役条件下,保持装置两侧连杆的受力不平衡问题会随着动作次数增加而进一步加剧,不利于机构稳定运行。因此,在实际运维中,可定期检查并校正保持装置两侧连杆的位置偏差,以抑制形变发展,保障机构可靠运行。

5 结论

1)合闸电容电压的微小波动会引起合闸平均速度的大幅变化,当电容电压降低约3%时,合闸平均速度降低23%;零部件间摩擦力增大同样会降低开关合闸平均速度。

2)越靠近动静触头和电磁斥力机构的机械碰撞区域,合闸振动信号越明显,分合闸线圈所在平面的振动信号最为明显,信号冲击主要集中在0~5 kHz频段内,其中0~2 kHz低频段内冲击较强;合闸电容电压下降、零部件摩擦力增大均会减小振动信号频谱峰值,但对信号冲击成分的影响相反,前者增加冲击成分,后者减少冲击成分。

3)保持装置轴销和机构连杆在开关机构动作过程中承受较大的应力冲击;长期运行后,保持装置连杆的形变缓慢增大,两侧连杆的不对称性使得左侧连杆的形变程度及速率均比右侧大,机构连杆未出现明显形变。

参考文献:

- [1] 和 萍,刘 鑫,宫智杰,等.高比例可再生能源电力系统源荷储联合调峰分层优化运行[J].电力系统保护与控制,2024,52(18): 112-122.

- He Ping, Liu Xin, Gong Zhijie, et al. Hierarchical optimization operation model for joint peak-load regulation of source-load-storage in a high proportion of renewable energy power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 112-122.
- [2] 赵浩然, 张卓文, 杨震, 等. 数字中国与碳中和战略下数字经济对可再生能源发展的影响研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(8): 54-61.
- Zhao Haoran, Zhang Zhuowen, Yang Zhen, et al. Research on impact of digital economy on renewable energy development under digital china and carbon neutrality strategy[J]. Smart Power, 2025, 53(8): 54-61.
- [3] 饶宏, 黄伟煌, 郭知非, 等. 柔性直流输电技术在大电网中的应用与实践[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3347-3355.
- Rao Hong, Huang Weihuang, Guo Zhifei, et al. Practical experience of VSC-HVDC transmission in large grid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3347-3355.
- [4] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
- Tang Guangfu, Luo Xiang, Wei Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [5] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.
- Rao Hong, Zhou Yuebin, Li Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [6] 魏晓光, 周万迪, 张升, 等. 模块化混合式高压直流断路器研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 2038-2046.
- Wei Xiaoguang, Zhou Wandi, Zhang Sheng, et al. Research and application of modular hybrid high voltage DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 2038-2046.
- [7] 何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2353-2361.
- He Junjia. Research on key technologies of high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2353-2361.
- [8] 何俊佳, 袁召, 经鑫, 等. 电磁斥力机构研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3809-3818.
- He Junjia, Yuan Zhao, Jing Xin, et al. Review of research on repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3809-3818.
- [9] 黄瑜珑, 张祖安, 温伟杰, 等. 高压直流断路器中电磁斥力快速驱动器研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3171-3178.
- Huang Yulong, Zhang Zu'an, Wen Weijie, et al. Research on an ultrafast driver for HVDC circuit breaker with electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3171-3178.
- [10] Al D M, Cui Jian, Sun Shuai, et al. A review on thomson coil actuators in fast mechanical switching[J]. Actuators, 2022, 11(6): 154.
- [11] 温伟杰, 李斌, 李博通, 等. 电磁斥力机构的参数匹配与优化设计[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17): 4102-4112.
- Wen Weijie, Li Bin, Li Botong, et al. Parameters matching and optimal design of the electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 4102-4112.
- [12] Zhu Zhexiao, Yuan Zhao, Chen Lixue, et al. Impact stress analysis and structural optimization design of thomson coil actuators[C]// 2019 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID), 2019: 1-5.
- [13] Zhu Zhexiao, Yuan Zhao, Chen Lixue, et al. Vibration characteristics of thomson coil actuator based on simulation and experiments[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1228-1237.
- [14] 王汝凡, 王德全, 邱军, 等. 快速开关多场协同仿真下的应力与形变研究[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2913-2923.
- Wang Rufan, Wang Dequan, Qiu Jun, et al. Research on stress and deformation under multi-field cooperative simulation of fast switch[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2913-2923.
- [15] 董润鹏, 庄劲武, 袁志方, 等. 电磁斥力机构的弹塑性形变分析与实验[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 7080-7088.
- Dong Runkeng, Zhuang Jinwu, Yuan Zhifang, et al. Elastoplastic deformation analysis and experiment of electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 7080-7088.
- [16] 田宇, 王利, 田阳, 等. 直流断路器用快速开关多场联合仿真优化方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 55-62.
- Tian Yu, Wang Li, Tian Yang, et al. Multi-field co-simulation optimization method for high-speed switch in DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 55-62.
- [17] 熊杰, 刘彬, 于海波, 等. 快速机械开关机械特性和结构强度研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 68-75.
- Xiong Jie, Liu Bin, Yu Haibo, et al. Research on mechanical characteristics and structural strength of high-speed mechanical switch[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 68-75.
- [18] Heidary P, Khalkhali S H, Kejani M T, et al. Design and simulation of an electromagnetic actuator for a linear ultra-fast disconnecter (UFD) with mechanical stress consideration[C]// 2023 27th International Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC), 2023: 136-141.
- [19] 陈龙龙, 周万迪, 张升, 等. 适用于高压直流断路器的多断口串联高速机械开关同步性研究[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(8): 148-154.
- Chen Longlong, Zhou Wandi, Zhang Sheng, et al. Research on synchronization of series multi-break high-speed mechanical switch for HVDC circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(8): 148-154.
- [20] 魏争, 文卫兵, 杨勇, 等. 500 kV 直流断路器快速机械开关典型故障特性及可靠性提升方法研究[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(1): 54-63.
- Wei Zheng, Wen Weibing, Yang Yong, et al. Research on typical fault characteristics and reliability improvement methods of high-speed mechanical switch used in 500 kV DC circuit breaker[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 54-63.
- [21] 姜东飞, 谢文刚, 宫瑞磊. 基于有限元法的电磁斥力机构仿真分析与设计[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 109-113.
- Jiang Dongfei, Xie Wengang, Gong Ruilei. Simulation analysis and design of the electromagnetic repulsion mechanism based on finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 109-113.
- [22] 高峰, 任力, 张博健, 等. 基于正交试验设计的 40.5 kV 真空断路器电磁斥力机构储能电容优化设计研究[J]. 高压电器,

2017, 53(3):223-229.

Gao Feng, Ren Li, Zhang Bojian, et al. Optimal design of storage capacitor of electromagnetic repulsion mechanism in 40.5 kV vacuum circuit breaker based on orthogonal test design[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):223-229.

- [23] 张 宇, 毕 凡, 苏海博, 等. 基于最大奇异值能量熵和随机森林的真空快速开关机械故障诊断[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 184-192.

Zhang Yu, Bi Fan, Su Haibo, et al. Mechanical fault diagnosis of vacuum fast switch based on energy entropy of maximum singular value and random forest algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 184-192.

- [24] 赵双乐, 刘志峰, 侯晓鑫, 等. 逆变器启动工况下光伏直流串联电弧故障识别方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(10):4691-4702.

Zhao Shuang, Liu Zhifeng, Hou Xiaoxin, et al. Diagnosis of photovoltaic DC series arc fault under inverter startup conditions [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10):4691-4702.

- [25] 张芷寒, 高 亮, 郭志鹏, 等. 基于熵权法的CA砂浆脱空位置对单元式无砟轨道动力状态影响评价研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(1):125-135.

Zhang Zhihan, Gao Liang, Guo Zhipeng, et al. Evaluation of

impact of CA mortar void position on dynamic state of unit ballastless track based on entropy weight method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(1): 125-135.

- [26] 范伟军, 翟俭超, 李 君, 等. 电动助力器传动故障在线振动检测系统的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(3):78-83.

Fan Weijun, Zhai Jianchao, Li Jun, et al. Design of on-line vibration detection system for transmission faults in electric booster [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(3):78-83.

- [27] 朱哲晓, 袁 召, 陈立学, 等. 电磁斥力机构结构应力分析与优化设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(8):2692-2699.

Zhu Zhexiao, Yuan Zhao, Chen Lixue, et al. Structural stress analysis and optimization design of electromagnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2692 - 2699.

- [28] Guan Chen, Yao Xiaofei, Ding Jiangang, et al. Study on dynamic characteristics of a repulsion mechanism in superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8):1-5.

莫永鹏(1989—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为电力开关设备状态评估方向(通信作者)(E-mail: yongpeng.mo@xjtu.edu.cn)。

(上接第 49 页)

Plasma Science, 2007, 35(4):856-865.

- [10] 贾申利, 史宗谦, 王立军. 真空断路器用于直流开断研究综述[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 12-16.

Jia Shenli, Shi Zongqian, Wang Lijun. Review on DC interruption research of vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):12-16.

- [11] 刘晓明, 赵媛媛, 陈 海, 等. 直流横磁真空灭弧室电弧运动特性影响因素分析[J]. 真空科学与技术学报, 2025, 45(3):197-204.

Liu Xiaoming, Zhao Yuanyuan, Chen Hai, et al. Analysis of influencing factors of arc motion characteristics of DC transverse magnetic vacuum interrupter[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2025, 45(3): 197-204.

- [12] 刘 珊, 袁 召, 刘黎明, 等. 真空拉弧起始收缩过程实验研究[J]. 高压电器, 2023, 59(6):33-39.

Liu Shan, Yuan Zhao, Liu Liming, et al. Experimental study on the initial contraction process of vacuum arc drawing[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6):33-39.

- [13] Niwa Y, Palad R, Sasage K, et al. Vacuum arc behavior in transversal magnetic field electrode of vacuum interrupter[C]//2012 25th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), 2012:505-508.

- [14] Wolf C, Kurrat M, Lindmayer M, et al. Arcing behavior on different TMF contacts at high-current interrupting operations[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(6):1284-1290.

- [15] Hanashiro S, Nikadori Y, Kaneko E. Investigation on small DC

vacuum arc characteristic under transverse magnetic field[C]//2016 International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST), 2016:138-141.

- [16] Emtage P R, Kimblin C W, Gorman J G, et al. Interaction between vacuum arcs and transverse magnetic fields with application to current limitation[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1980, 8(4):314-319.

- [17] Ma H, Wang J, Liu S, et al. Vacuum arc transient behaviors and voltage characteristics in low-current DC interruption under rotating TMF[J]. AIP Advances, 2020, 10(8):085018.

- [18] Schulman M B, Schellekens H. Visualization and characterization of high-current diffuse vacuum arcs on axial magnetic field contacts [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(2):443-451.

- [19] Schulman M B, Bindas J A. Evaluation of AC axial magnetic fields needed to prevent anode spots in vacuum arcs between opening contacts[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A, 1994, 17(1):53-57.

- [20] Watanabe K, Kaneko E, Yanabu S. Technological progress of axial magnetic field vacuum interrupters[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(4):609-616.

李 强(1983—), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要研究方向为高压电器产品及技术(通信作者)(E-mail: hisnelee@163.com)。

刘 伟(1980—), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向为高压电器产品及技术(E-mail: huzi13145@163.com)。