

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.004

基于振动信号的断路器刚分刚合点计算方法

李浩¹, 龙启², 杨旭³, 王加磊¹, 邓劲东⁴,
胡桂平⁴, 梁洪章⁵, 段雄鹰⁵

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局, 昆明 650217; 2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广州 510663; 3. 中国南方电网超高压输电公司电力科研院, 广州 510663; 4. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102; 5. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对电力系统中无法直接在线监测断路器刚分刚合点的问题, 文中提出了一种基于短时能量与声压复合分析法的刚分刚合点计算方法。通过加速度传感器采集断路器的振动信号后, 首先利用声压信号确定刚分刚合点的区域范围, 再通过短时能量与预设阈值的首次交点精确定位刚分刚合点。此方法有效解决了传统计算方法由于操作机构、传感器安装位置、安装方式等的差异而失效问题。研究结合高压开关测试仪进行离线测量, 并统一时间坐标以获得准确的刚分刚合点作为实验对照。实验结果表明, 计算误差控制在1 ms以内, 验证了该方法的精确性和实用性。研究工作提供了一种高效、精确的计算方法, 为选相分合装置的控制性能优化提供了解决方案。

关键词: 高压交流SF₆瓷柱断路器; 在线监测; 振动信号; 短时能量; 刚分刚合点; 同步分合闸

Calculation Method of Contact Opening/Closing Moment of Circuit Breaker Based on Vibration Signals

LI Hao¹, LONG Qi², YANG Xu³, WANG Jialei¹, DENG Jindong⁴, HU Guiping⁴,
LIANG Hongzhang⁵, DUAN Xiongying⁵

(1. Kunming Bureau of EHV Power Transmission Company China Southern Power Grid, Kunming 650217, China; 2. EHV Power Transmission Company China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China; 3. Electric Power Research Institute of EHV Power Transmission Company China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China; 4. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 5. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

Abstract: Aiming at the problem that the contact opening and closing moment of the circuit breaker can not be directly monitored online in power system, in this paper a method for calculating these moments is proposed based on the composite analysis method of short-time energy and sound pressure. After collecting the vibration signal of the circuit breaker through the acceleration sensor, the sound pressure signal is firstly used to determine the area range of the instant opening and closing operation. Then, the contact opening and closing moments are accurately determined by the first intersection of the short-time energy and the preset threshold. The method effectively solves the problem that the traditional calculation method fails due to the differences in the operating mechanism, installation position and installation method of sensor. In this study the off line measurement is performed in combination with a high-voltage switch tester, and the time coordinates is unified to obtain the accurate contact opening and closing moments as the experimental reference. The experimental results show that the calculation error is controlled within 1 ms, which verifies both accuracy and practicality of the method. The study in this paper not only provides an efficient and accurate calculation method, but also a solution for optimization of the control performance of the phase-selection switching device.

Key words: high-voltage AC SF₆ live tank circuit breaker; on-line monitoring; vibration signals; short-time energy; contact opening and closing moment; synchronized opening and closing operation

收稿日期: 2026-02-26; 修回日期: 2026-04-15

0 引言

断路器是电网中至关重要的组件,它的主要职能是执行控制与保护的双重角色^[1],断路器不仅要根据运行需求进行线路以及电气设备的投入或退出运行,还要在发生故障时将故障部分从系统中切除。它的稳定性直接影响到整体电力网络的安全性能。

监测断路器的刚分刚合点具有选相控制与故障诊断的双重意义,一方面可以通过计算分合闸时间为选相分合装置的控制性能提升提供解决方法^[2],另一方面可以作为断路器的特征诊断断路器是否发生故障^[3]。

国内外针对断路器刚分刚合点的监测主要应用旋转光电编码器、差动变压器式位移传感器、电阻式直线位移传感器、振动传感器、激光式位移传感器等^[4-5]。此外还可以通过断路器线圈电流波形进行分合闸时间的估算^[6-11]。

旋转光电编码器体积较大,差动变压器式位移传感器、电阻式直线位移传感器安装难度较大^[6],激光式位移传感器价格较高,使用线圈电流估算分闸时间估算误差会随着分闸时间的增大而逐步增大,而振动传感器体积小,安装方便,监测过程中可以避免对断路器的影响^[12],且可安装在断路器关键部件表面^[13],常见的安装方式有螺栓连接、磁吸连接、粘结剂连接^[14]。前振动传感器常用来做电力设备的故障诊断工作^[15-18]。

当前由振动信号计算刚分刚合点的方法主要分为3种:①刚分点通过取振动信号最大值,刚合点由分闸数据与基于位置与时间的自适应算法确定^[19];②是使用短时能量分析法,通过分析振动信号的短时能量并设置阈值找到刚分刚合点^[20];③是将短时能量开始剧烈变化前的局部最小值时刻作为刚合点,将第一个峰值时刻作为刚分点^[21]。

由于实际系统中操作机构、传感器安装位置、安装方式等的差异,这3种方法都可能出现失效问题。为了解决这个问题,文中提出了一种基于短时能量与声压复合分析法的刚分刚合点计算方法,此方法通过计算声压并设定阈值范围来确定刚分刚合点的所在区域,然后在该区域内寻找短时能量与阈值的第一个交点作为刚分刚合点。该方法成功实现通过振动信号在线监测该型号断路器刚分刚合点的效果,还通过与高压开关测试仪的离线数据进行比对,验证了算法的准确性。此外,该方法为刚分刚合点的计算提供了一种新的计算断路器刚

分刚合点的思路,即先确定区域范围,再确定准确的时间点。

1 振动信号处理

加速度传感器测得的是振动信号,具有语音信号特征,因此,文中采用语音信号分析领域的算法与特殊值来处理断路器振动信号。

1.1 分帧与窗函数

语音信号具有短时稳态性。因此,分析和处理语音信号必须基于短时表现,并将语音信号划分为一段段小的时间区间来分析其特性参数,每一段被称为“帧”,所以对于完整的语音信号,分析的结果其实就是这些帧特性参数时序的集合^[22]。

语音的分帧一般采用交叠分段的方式,这是为例使帧与帧之间平滑过渡,保持其连续性,前一帧与后一帧的交叠部分称为帧移。将数据分帧后,该帧的时间坐标选用该帧包含的时间区间中点表示。

分帧是用可移动的有限长度窗口进行加权的方法来实现的,这就是用一定的窗函数 $\omega(n)$ 乘 $s(n)$,从而形成加窗语音信号 $s_w(n)=s(n)\cdot\omega(n)$,窗函数 $\omega(n)$ 的选择对于短时分析参数的特征影响很大,一般常用的窗函数有3种:矩形窗、汉明窗、汉宁窗。文中选用汉宁窗作为窗函数,汉宁窗相较于其他窗函数有更平滑的窗口边缘,有助于减少频谱的泄露,汉宁窗的数学表达式为

$$\omega(n)=0.5-\{1-\cos[2\pi n/(M-1)]\} \quad (1)$$

式(1)中, M 为窗口的长度,即窗口中的采样点数。

1.2 短时能量

短时能量法是一种信号分析技术,该方法基于时间窗函数。他旨在通过计算信号在短时间范围内的能量变动,以此捕捉并提取出时域特性^[23]。对于振动信号而言,短时能量的计算可以突出显示能量较大的振动事件,而削弱数值较小的噪声信号。通过短时能量法可以捕捉到这种能量的突变,从而识别出分合闸的时刻。短时能量的计算方式为

$$E(n)=\sum_{i=-\infty}^{\infty} x^2(i)\omega(n-1)=x^2(n)\omega(n) \quad (2)$$

式(2)中: $x(n)$ 为振动信号的时间序列; $\omega(n)$ 为窗函数。

1.3 声压

声压是是空间位置和时间的函数。通常讲的声压指的是有效声压,即在一定时间间隔内将瞬时声压对时间求方均根值所得^[24],声压幅值的大小可以反映声源的强度,即能量分布情况。通过分析不同位置的声压幅值,可以识别出声源的能量分布特

征,有效声压的计算公式为

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{n=1}^N x^2 \Delta t} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2} \quad (3)$$

式(3)中: T 为语音长度; N 为离散点数; x 为语音信号的采样点。

分闸与合闸的短时能量与声压曲线见图1、2。

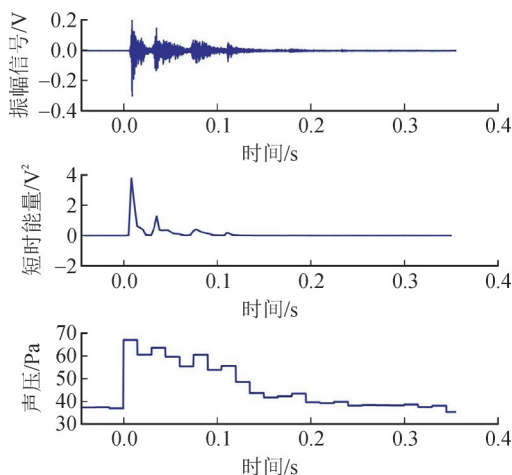


图1 分闸振动信号短时能量与声压曲线

Fig. 1 Short-time energy v.s. sound pressure curves of tripping vibration signals

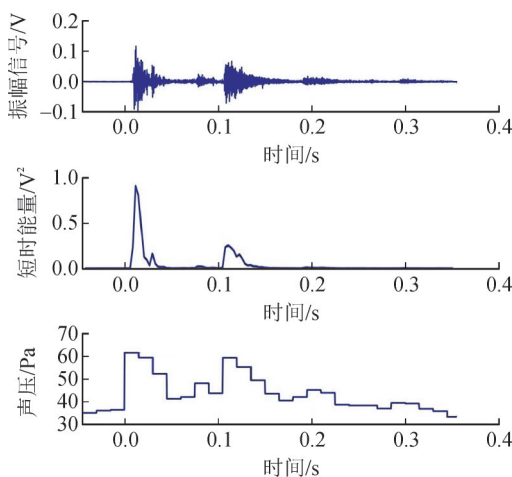


图2 合闸振动信号短时能量与声压曲线

Fig. 2 Short-time energy v.s. sound pressure curves of closing vibration signals

2 实验测试平台

2.1 断路器测试平台

实验平台采用某220 kV高压交流SF₆瓷柱断路器,他整体采用了自能式的灭弧室构造,并搭配了液压弹簧操作机构。高压断路器的主要组成部分包括灭弧室、传动箱、汇控箱、液压弹簧操作机构。其中,在高压断路器的上部位置是灭弧室瓷套。在中间部分是支柱瓷套和机构传动部分。而在B相的

下方位置是操作机构。该操作机构的输出拉杆和B相的曲臂互相连接,通过水平拉杆实现了三相的机械联动。文中实验所用的高压断路器的实体见图3,采集平台见图4。



图3 实验用高压断路器

Fig. 3 Experimental high-voltage circuit breaker



图4 断路器开合试验信号采集平台

Fig. 4 Signal acquisition platform for circuit breaker opening and closing test

2.2 振动传感器的选择

文中选用YK-YD5000型压电式加速度传感器并通过磁吸底座与断路器相连,当外部有加速度时传感器会产生一定的电压,将传感器的输出端与示波器相连即可测得加速度变化,该传感器量程可达5 000g($g=9.8 \text{ m/s}^2$),灵敏度1 mV/g,频率范围为1~15 000 Hz。

2.3 振动传感器安装位置选择

振动信号的收集位置不同,反映出的断路器信息也有所区别。文中在断路器的多个位置安装了加速度传感器,这些传感器均通过磁吸底座固定。不同安装位置的振动信号波形呈现可见差异见图5。

如图5所示,可以看出驱动箱底座位置和其他

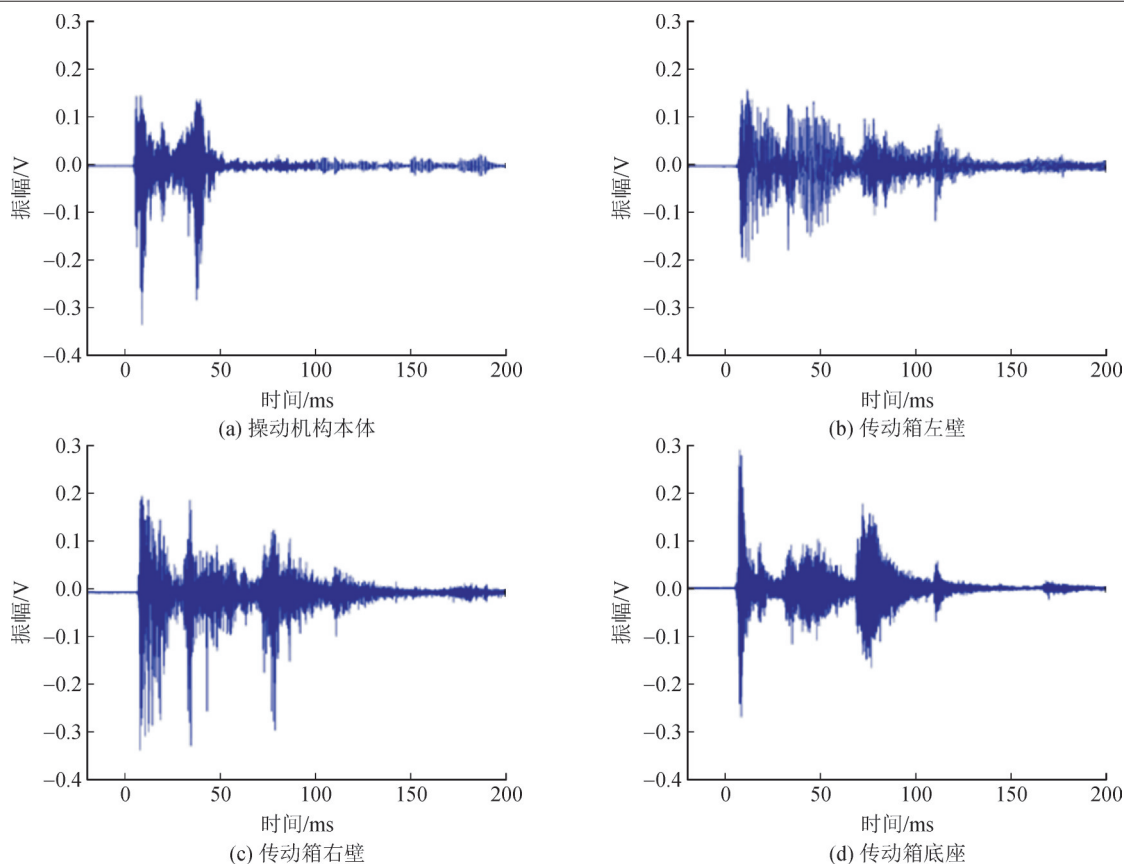


图5 不同安装位置的振动信号波形

Fig. 5 Vibration signal waveforms at different mounting positions

传感器安装位置的振动信号波形。特别是在驱动箱底座位置收集的振动波形,显示出较高的分辨率和识别度,各个振动事件的界限清晰可辨。这表明该位置的振动信号更接近理想状态。因此选择在驱动箱底座安装加速度传感器,以确保获得最优质的振动信号。传感器的安装位置见图6。



图6 加速度传感器的安装位置

Fig. 6 Mounting position of the acceleration sensor

2.4 振动信号采集及时间坐标统一

文中的行程曲线和触头接触状态等测试数据由高压开关测试仪测量,见图7。加速度传感器的振动信号则通过示波器获得,见图8。这两种测量结果的时间坐标并不一致,文中希望通过以上实验数据得到刚分刚合点在振动信号中的时间坐标,以测试基于振动信号的断路器刚分刚合点计算方法的准确性。

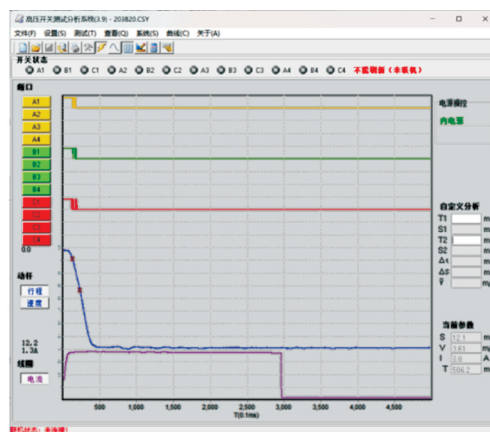


图7 高压开关测试仪数据图

Fig. 7 High voltage switch tester data sheet

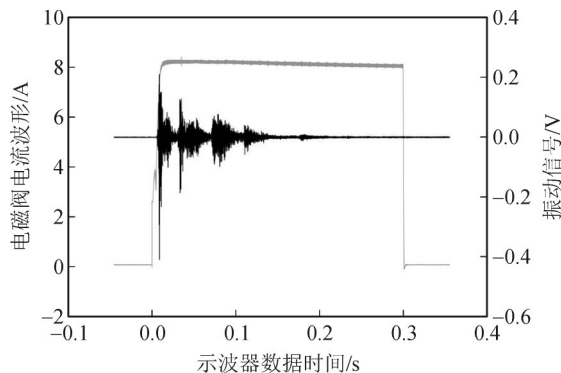


图8 示波器测得振动信号图

Fig. 8 Graph of vibration signal measured by oscilloscope

通过比对高压开关测试仪测得的电磁阀电流(图7中的紫色部分)与示波器测得的电磁阀电流(图8中的灰色部分),将两台设备的时间坐标对齐,以电流突变点为统一参考点,统一结果见图9。

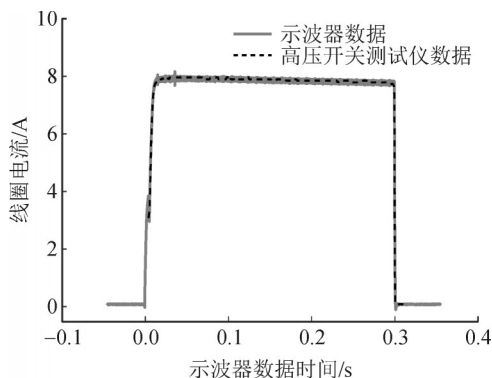


图9 时间坐标统一效果图

Fig. 9 Time coordinate harmonization effect

由于B相最先响应操动机构的操作,并且高压开关测试仪在断口两端接收的是低压信号,从而避免了预击穿与重燃现象的影响,文中选择B相断口电压信号的第一个突变点作为刚分刚合点的标志,据此,刚分点和刚合点在振动信号中的位置分别见图10、11。

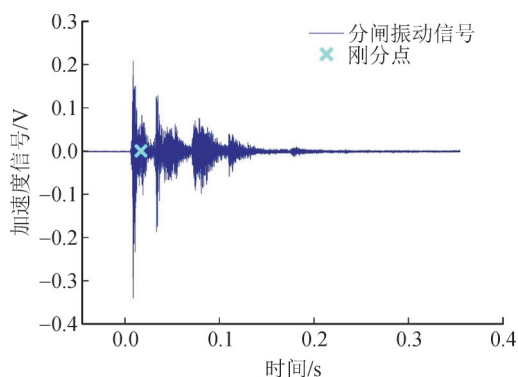


图10 刚分点在振动信号中的位置

Fig. 10 Position of the just closing moment in the vibration signal

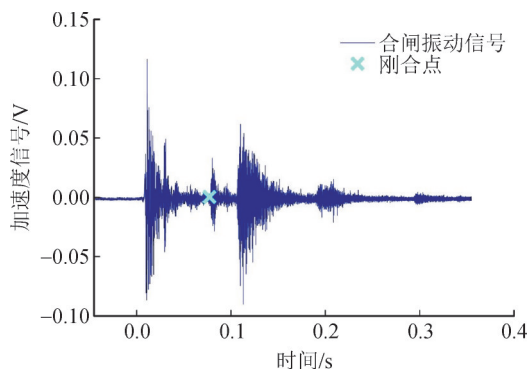


图11 刚合点在振动信号中的位置

Fig. 11 Position of the just closing moment in the vibration signal

3 刚分刚合时刻的确定

3.1 短时能量与声压计算参数的选择

在应用短时能量与声压计算刚分刚合点的方法中,文中固定采样频率为250 kHz并选择合适的窗长,窗长过长虽能使曲线平滑,但可能掩盖振动信号中的关键特征,而过短的窗长虽然能够有更多的细节,但曲线的平滑度较差,曲线不平滑,一方面会提高特征点提取的难度,另一方面会增大噪声对曲线的影响。使用MATLAB测试不同窗长对计算效果的影响后,文中选择将声压的帧长设置为15 ms,而短时能量的帧长设置为6 ms,帧移3 ms,这样设置一方面可以使刚分刚合时刻的声压与短时能量数据与其他时刻数据有较为明显的差异,另一方面可以使用声压进行粗筛确定时间范围,用短时能量进行精确计算确定刚分刚合点。

3.2 短时能量与声压复合分析法

通过大量实验记录断路器分合闸过程中的振动信号及其对应的短时能量与声压,记录了B相断口突变信号对应的短时能量与声压值,并发现B相断口的声压值始终处于一个特定范围内,因此将这一范围内的声压值记录为声压数值范围,而与之对应的短时能量值几乎一致,文中将这时的短时能量记录下来作为阈值用于计算刚分刚合点的准确时刻。

文中先通过声压数值范围,确定刚分刚合点存在的时间范围,在该时间范围内找到短时能量第一个达到阈值的时间点,用该时间点作为本算法计算的刚分刚合点。

分别展示了刚分时刻和刚合时刻的计算示意图见图12、13。

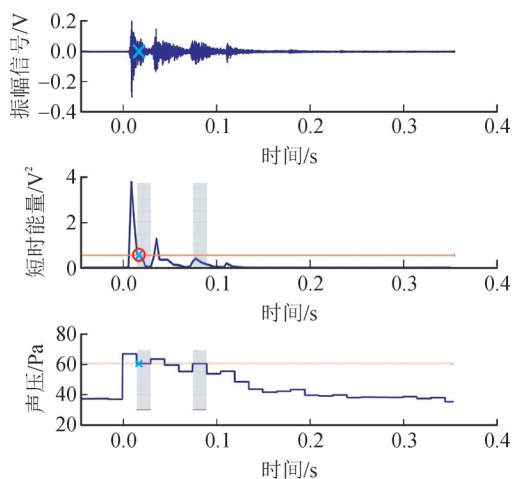


图12 刚分时刻计算示意图

Fig. 12 Schematic calculation of the just opening moment

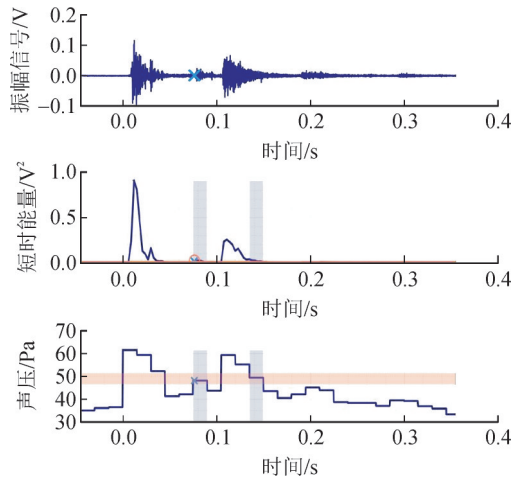


图13 刚合时刻计算示意图

Fig. 13 Schematic diagram for calculating the just closing moment

图12中“x”标记为实际刚分点，“o”为本方法计算的刚分点。设置短时能量阈值，在图中以横置半透明粗线标记，声压在该时间范围内的部分以浅紫色标记，设置短时能量阈值，在图中以横置实线标记，竖置半透明时间范围内的短时能量曲线与阈值的首个交点则标定为文中确定的刚分点。由于短时能量曲线是由离散的数据点构成，所以交点坐标的计算是用线性插值完成的。

设置分闸过程数值范围为60~61.5 Pa，短时能量阈值为0.551 2。

可计算刚分时间点，经高压开关测试仪测得数据分析，该断路器在正常运行状态下的刚分时刻为17 ms左右，将短时能量与声压复合分析法计算结果与高压开关测试仪通过辅助回路测得的刚分时间点比较，结果见表1。

表1 刚分时刻实验测试结果

Table 1 Experimental test results of just opening moments

实验序号	算法计算值/ms	高压开关测试仪测得值/ms	误差/ms
1	16.670	17.119	0.449
2	14.704	14.819	0.115
3	17.649	17.019	0.630
4	16.376	17.119	0.744

设置合闸过程声压数值范围为46.5~51.5 Pa，短时能量阈值为0.012 2。

可计算刚合时间点，经高压开关测试仪测得数据分析，该断路器在正常运行状态下的刚分时刻为77 ms左右，将短时能量声压复合分析法与高压开关测试仪通过辅助回路测得的刚合时间点比较，结果见表2。

刚分点实验结果误差均在1 ms以内，具有实用价值。

表2 刚合时刻实验测试结果

Table 2 Experimental test results of just closing moments

实验序号	算法计算值/ms	高压开关测试仪测得值/ms	误差/ms
1	77.834	77.219	0.615
2	77.384	76.619	0.765
3	77.185	76.519	0.666
4	76.024	76.119	0.095

4 结论

1)设计了一个针对断路器的振动信号测试平台，将示波器检测的振动信号与高压开关测试仪检测的刚分点统一时间坐标获得离线测量的刚分点以检验算法的准确性。

2)提出了短时能量与声压的复合分析法，利用振动信号的独特特性，首先利用声压确定了精确的范围，然后再利用短时能量确定具体的时间点。实验结果验证了该方法能够精准判断断路器的刚分点，其误差在1 ms以内。

3)该方法找到了解决由于操作机构、传感器安装位置及方式差异导致振动信号分析算法失效问题的途径，并成功实现了断路器刚分点的在线监测。

参考文献:

- [1] 郎福成. 真空断路器机械特性在线监测[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2005.
Lang Fucheng. On-line monitoring for mechanical characteristics of vacuum circuit breaker[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2005.
- [2] 邓劲东,李海涛,刘东超,等. 一种断路器分合闸时间估算装置及方法:CN201911321796. X[P]. 2023-05-12.
Deng Jindong, Li Haitao, Liu Dongchao, et al. Device and method for estimating opening and closing time of circuit breaker: CN201911321796. X[P]. 2023-05-12.
- [3] 梁艳群. 126 kV 永磁真空断路器在线监测技术研究[D]. 南京:东南大学, 2017.
LIANG Yanqun, Research on on-line monitoring of 126 kV permanent magnet vacuum circuit breaker[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [4] 张伟,王冠霖,谭佳明,等. 基于振动信号的超程变化情况下断路器刚分时刻识别方法研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 184-190.
Zhang Wei, Wang Guanlin, Tan Jiaming, et al. Identification method of opening/closing Instant of circuit breaker under over-travel variation based on vibration signal[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 184-190.
- [5] 张显聪,喻冬梅,杨柳,等. 位移传感器在中压断路器机械特性监测中的应用研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 37-41.

- Zhang Xiancong, Yu Dongmei, Yang Liu, et al. Application study of the displacement sensor used for testing the mechanical properties of medium voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 37-41.
- [6] 吴振升, 王 玮, 杨学昌, 等. 基于小波算法的SF₆断路器动作时间在线监测[J]. 中国电力, 2006, 39(6): 26-29.
- Wu Zhensheng, Wang Wei, Yang Xuechang, et al. On line monitoring of operation time for SF₆ high-voltage circuit breakers based on wavelet algorithm[J]. Electric Power, 2006, 39(6): 26-29.
- [7] 郎福成, 徐建源, 林 莘. 真空断路器机械特性的在线监测技术[J]. 华通技术, 2004(3): 10-14.
- Lang Fucheng, Xu Jianyuan, Lin Xin. On - line monitoring technique on mechanical characteristics of vacuum circuit breaker [J]. Huatong Technology, 2004(3): 10-14.
- [8] 王俊波, 李国伟, 何胜红, 等. 基于激光位移传感器的真空断路器机械特性机器人试验平台的研究[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 56-64.
- Wang Junbo, Li Guowei, He Shenghong, et al. Research on robot test platform for mechanical characteristics of vacuum circuit breaker based on laser displacement sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 56-64.
- [9] 高 淇. 高压断路器的机械特性劣化趋势分析及寿命预测[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2021.
- Gao Qi. Analysis of mechanical characteristic deterioration trend and life prediction of high voltage circuit breaker[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2021.
- [10] 李佐胜, 彭 佳, 董 凯, 等. 基于断路器线圈电流波形的分合闸时间估算方法[J]. 高压电器, 2016, 52(9): 46-49.
- Li Zuosheng, Peng Jia, Dong Kai, et al. Method to estimate the opening/closing time of circuit breaker based on coil current waveform[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 46-49.
- [11] 马小荣, 马 晟, 赵小平. 高压断路器机械振动信号特征与故障诊断方式[J]. 石河子科技, 2023(5): 36-38.
- Ma Xiaorong, Ma Sheng, Zhao Xiaoping. High - voltage circuit breaker mechanical vibration signal characteristics and fault diagnosis mode[J]. Shihezi Science and Technology, 2023(5): 36-38.
- [12] 刘明亮. 高压断路器机械振动信号特征提取及故障诊断研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- Liu Mingliang. Research of mechanical vibration signal feature extraction and fault diagnosis of high voltage circuit breaker[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [13] 朱 丽. 振动传感器安装方式对频响的影响[J]. 中国科技信息, 2017(14): 56-57.
- Zhu Li. Effect of vibration sensor mounting method on frequency response[J]. China Science and Technology Information, 2017(14): 56-57.
- [14] 朱 明, 黄勤清, 齐用卡, 等. 基于振动信号总离散频谱的高压并联电抗器健康评估方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 114-120.
- Zhu Ming, Huang Qinqing, Qi Yongka, et al. Healthy assessment method of high voltage shunt reactor based on total discrete spectrum of vibration signal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8): 114-120.
- [15] 彭晓晗, 马宏忠, 许洪华, 等. 基于振动的储能电池异常工况预警新方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 167-171.
- Peng Xiaohan, Ma Hongzhong, Xu Honghua, et al. A novel method of early warning for abnormal working conditions of energy storage batteries based on vibration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 167-171.
- [16] 付 铭, 朱 明, 梅 杰, 等. 基于多元振动序列共性特征的电抗器故障诊断[J]. 电测与仪表, 2025, 62(3): 198-207.
- Fu Ming, Zhu Ming, Mei Jie, et al. Reactor fault diagnosis based on common feature of multivariate vibration sequences[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(3): 198-207.
- [17] 罗 兵, 徐 立, 王婷婷, 等. 基于CEEMDAN-GAF的变压器机械故障检测方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 169-176.
- Luo Bing, Xu Li, Wang Tingting, et al. Mechanical faults detection method for transformers based on CEEMDAN-GAF[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 169-176.
- [18] 陈建平, 胡占强, 苏晓东. 智能化断路器机械特性在线监测关键技术设计[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 108-112.
- Chen Jianping, Hu Zhanqiang, Su Xiaodong. Key technology design to on - line monitoring of mechanical characteristics for intelligent vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 108-112.
- [19] 谭佳明, 陈玲玲, 蒋佳成, 等. 交流中压真空断路器机械特性在线监测装置的研制[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 69-76.
- Tan Jiaming, Chen Lingling, Jiang Jiacheng, et al. Development of on-line monitoring device for mechanical characteristics of AC medium voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 69-76.
- [20] 陈 盟, 郎 兵, 牟 黎. 真空断路器在线监测中分合闸时间的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 86-91.
- Chen Meng, Lang Bing, Mu Li. Study on opening and closing time of online monitoring for the vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 86-91.
- [21] 赵 力. 语音信号处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- Zhao Li. Speech signal processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [22] 王静君, 王 飞, 杨元威, 等. 短时能量法在断路器机械振动信号分析中的应用[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 14-19.
- Wang Jingjun, Wang Fei, Yang Yuanwei, et al. Application of short-time energy method in the analysis of mechanical vibration signal of circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 14-19.
- [23] 孟永鹏, 贾申利, 荣命哲. 短时能量分析法在断路器机械状态监测中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(12): 1301-1305.
- Meng Yongpeng, Jia Shenli, Rong Mingzhe. Application of short-time energy analysis in condition monitoring of circuit breakers[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(12): 1301-1305.
- [24] 姜 函. 语音信号识别技术与实践[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2019.
- Jiang Nan. Speech signal recognition technology and practice[M]. Shenyang: Northeast University Press, 2019.
- 李 浩(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高压直流与柔性直流输电控制保护(E-mail: 463309586@qq.com)。
- 段雄英(1974—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事智能化电器装备、高电压技术研究工作(通信作者)(E-mail: xyduan@dlut.edu.cn)。