

基于小波包分解的断路器 振动信号能量谱和能量熵分析

王璐, 彭彦军*, 潘宁波, 滕本科, 陈健禧
(广西电网桂林供电局, 广西 桂林 541002)

摘要: 为了获取断路器在多次分合闸动作机械性能劣化过程中振动信号的差异, 基于小波包分解理论, 提取 SF₆ 断路器在分合闸动作 4 000 次过程中的振动信号, 并进行小波包分解, 计算各个节点的能量谱和能量熵。计算结果表明, 在合闸与分闸过程振动信号能量谱中, 能量主要分布在节点(4,0)与节点(4,1), 占比达到 95%。随着断路器动作次数增加, 分闸振动信号节点(4,0)的能量占比增加, 节点(4,1)能量占比减少, 能量分布向低频转移。合闸振动信号节点(4,0)与节点(4,1)的能量比均在一定范围内波动, 未呈现出明显的变化趋势, 合闸振动信号与分闸振动信号各个节点的小波包-能量熵均保持不变。

关键词: 振动信号; 能量谱; 能量熵; 小波包

中图分类号: TM 561 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2023)01-0032-06

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2023.01.006>

Energy spectrum and energy entropy analysis on vibration signal of circuit breaker based on wavelet packet decomposition

WANG Lu, PENG Yanjun*, PAN Ningbo, TENG Benke, CHEN Jianxi
(Guilin Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Guilin Guangxi 541002, China)

Abstract: To obtain the difference in vibration signal during the mechanical performance deterioration of circuit breaker in multiple breaking and closing actions, this paper extracted the vibration signal of SF₆ circuit breaker in the process of breaking and closing actions for 4 000 times based on wavelet packet decomposition theory. Besides, it carried out wavelet packet decomposition to calculate the energy spectrum and energy entropy of each node. The calculation results show that the energy spectrum of the vibration signal in the process of closing and breaking is mainly distributed in node(4, 0) and node(4, 1), which account for 95% of the energy. As the number of circuit breaker actions increases, the energy share of the breaking vibration signal node(4, 0) increases, the energy share of node(4, 1) decreases, and the energy distribution shifts to lower frequencies. The energy ratios of node(4, 0) and node(4, 1) of the closed vibration signal fluctuate within a certain range and show no obvious trend, the wavelet packet-energy entropy of each node of the closed vibration signal and the split vibration signal remain unchanged.

Keywords: vibration signal; energy spectrum; energy entropy; wavelet packet

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2023.01.006

基金项目: 广西电网公司科技项目资助(GXKJXM20200249)

0 引言

高压断路器在电力系统中起着保护和控制的重要功能,其运行状况对于电力系统的稳定可靠运行具有重要意义。在断路器的各种故障中,机械故障是最为常见的故障,机械故障会导致断路器分合闸动作不能正常进行,对电网的安全可靠性具有严重危害。因此,及早发现断路器潜在的机械故障,加强机械故障诊断和在线监测方法的研究具有十分重要的意义。

传统的高压断路器运行检修不仅会耗费巨大的人力物力,还会在拆卸检修中造成不必要的二次伤害^[1-3]。目前对于断路器机械故障的诊断,主要是通过分合闸线圈电流、触头行程、机械振动信号等方式进行操动机构状态的检测^[4]。

近年来,已有不少学者针对断路器分合闸过程中的振动信号进行了研究:文献[5]采用时域分析方法,对机械振动信号的包络进行了分析;文献[6]中采用频谱分析技术,对断路器动作时产生的振动信号进行频域分析。此外,国内外学者还对机械振动信号进行了特征提取^[7-10],如利用短时傅里叶分析、小波分析、小波包分析和经验模态分解等方法提取指标作为特征参数。小波包分析是其中一种得到广泛运用的特征提取方法,具有良好的时频分辨率,从而能够有效提取振动信号的特征。通过对小波包分解后的分量构建熵集或能量谱等可以准确地区分断路器的各种状态,从而进行故障的检测诊断。这些研究往往通过人工设置断路器机械故障来进行后续的测量分析,故障的模拟方式与设置的程度也与断路器实际运行过程中产生的故障形式有所区别。断路器在实际运行过程中反复动作产生的机械性能劣化会导致这些特征参数如何变化的研究较少。

本文基于小波包分解法,对 SF₆ 断路器进行 4 000 次以上的分合闸动作,并在此过程中提取机械振动信号,进行小波包分解,从能量谱和能量熵两个角度进行特征参数的分析,从而得到随着动作次数增多,机械性能逐渐劣化过程中的小波包能量谱和能量熵的变化趋势。

1 振动信号的小波包分解

小波包分析是在小波分析的基础上延伸出的一种比小波分析更准确的分解和重构方法。小波包分解不仅对振动信号的低频进行分解,并且对其高频部分也同样进行了分解^[11]。

对于一组正交小波基 $h = \{h_n\}$ 满足:

$$\begin{cases} \sum h_{n-2k} h_{n-2l} = \delta_{kl} \\ \sum h_n = \sqrt{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n = 0, 1, 2, \dots, N$, 为滤波器阶数。

令 $g_k = (-1)h_{1-k}$, g_k 为小波包的低通滤波器,用 $W_0(t)$ 表示多尺度分析生成元 $\varphi(t)$, $W_1(t)$ 表示小波基函数 $\varphi(t)$, 则定义 $\{W_n(t)\}$, $n \in \mathbf{N}$, 是由 $\varphi(t)$ 确定的小波包,其中 $\{W_n(t)\}$ 递归定义为

$$\begin{cases} W_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum h_k W_n(2t - k) \\ W_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum g_k W_n(2t - k) \end{cases} \quad (2)$$

根据小波包理论,对原始振动信号进行时频分析,其原理如图 1 所示。将原始信号进行分层处理,其结构为二叉树形式,将每层的子频带均一分为二。分层后不会丢失原始信号所包含的频率信息,分解的层数越多,对于频域的分辨率越高;相应的,时域的分辨率就越低。

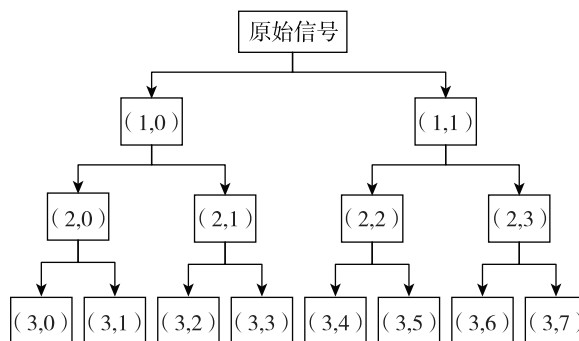


图1 信号小波包分解

若原始信号采样频率为 500 kHz,则经过三层小波包分解,得到的频带分辨率为 62.5 kHz。其中第一个节点所包含的频段为 0 ~ 62.5 kHz,之后的节点所包含的频率依次类推。每一层都可表征原始振动信号中所有频率的信息,通过不同层数的节点组合也可以表示原有信号,如(1,0),(2,

2), (3,6), (3,7)。

在选择合适的分层数后,对小波基函数进行选择,常见的小波基有 Haar 小波、Daubechies 小波系、Morlet 小波系和 Meyer 小波系等。本文中采用的小波基函数为 Db10 小波。

断路器的振动信号会随着断路器的机械状态发生改变,信号中的各个频率成分及时间信息都会随之变化,通过对信号中特征量的选取,使用小波包-能量谱与小波包-能量熵进行分析。利用小波包分解,将原始振动信号分解成各个频段的信息,得出断路器在反复多次分合闸动作时上述两个特征量的变化。

2 振动信号特征量的提取

2.1 小波包-能量谱

小波包-能量谱为选定合适的分层数及小波基完成对信号的小波包分解后,对各个节点频段内的能量进行求和^[12]。计算公式为

$$E_i = \sum x^2(t), \quad (3)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, (2^i - 1)$$

式中: i 为分层数。

由于不同分合闸动作中信号的幅值略有差异,因此比较能量的绝对值没有意义,将各个频段内的能量与原始信号的能量进行归一化处理,即

$$I_i = \frac{E_i}{\sum_{i=0}^{2^i-1} E_i} \quad (4)$$

式中: I_i 表示第 i 层中每个节点频段内的能量与总能量之比。

2.2 小波包-能量熵

小波包-能量熵是将小波包分解后的各个节点频段内的信号进行重构,得到在对应频段下的振动信号,将处理得到的信号进一步分段处理,积分计算各时间段内的能量^[13],其表达式如式(5)。

$$Q_j = \sum_{m_1}^{m_2} y^2 \quad (5)$$

式中: j 为段数, m_1 和 m_2 为第 j 段内的起始点数和终止点数, y 为重构后的信号。

对每一段内的频段能量进行归一化处理。

$$\varepsilon(j) = \frac{Q_j}{\sum_{j=1}^N Q_j} \quad (6)$$

式中: $\varepsilon(j)$ 为归一化参数,表示频段 j 能量与总能量之比, N 为重构后信号所分段数。

根据上述分析,定义小波包分解后第 i 个节点的能量熵 H_i 为

$$H_i = - \sum_{j=1}^N \varepsilon(j) \lg \varepsilon(j) \quad (7)$$

2.3 数据处理步骤

对 SF₆ 断路器进行 4 000 次的分合闸动作,将所采集到的振动信号进行小波包分解处理,并计算分解后信号的能量谱和能量熵。具体的数据处理步骤^[14]如下:

- 1) 对观测到的分合闸振动信号进行小波去噪处理;
- 2) 对去噪处理后的信号进行 4 层小波包分解,并计算第四层每个节点内的能量,得到小波包-能量谱;
- 3) 对分解后前四个节点的信号进行重构,并对每个节点的信号进行分段处理;
- 4) 对分段后的信号进行能量计算,求取每个节点的能量熵,得到前四个节点的能量熵向量 $H = [H_1, H_2, H_3, H_4]$ 。

2.4 试品参数及试验布置

本试验的试品断路器为额定电压 126 kV 的 LW30-126 自能式 SF₆ 瓷柱式断路器,该断路器采用 CT30 型弹簧操动机构。振动信号采用压电式传感器进行采集,传感器采用胶黏与磁性底座相结合的安装方式,安装位置见图 2。

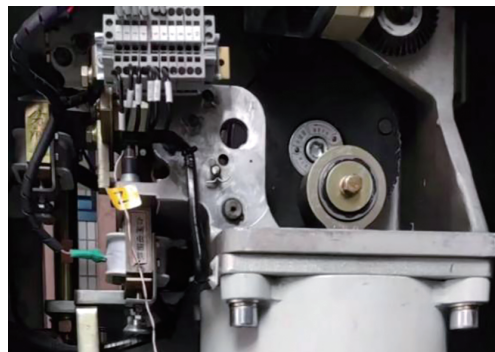


图 2 传感器安装位置

3 试验结果分析

3.1 小波包能量谱分析

本次用于采集振动信号的示波器采样时长为 200 ms,共采集了 1 Ms 个数据点,即采样频率为 5 000 kHz。在数据处理中,为简化计算,并考虑到不丢失原有信号信息,采用 500 kHz 作为采样频率。原始振动信号经过四层小波包分解后得到 16 个节点频段。图 3、图 4 为第 901 次合闸动作时的原始信号与前四个节点频段内的信号经过重构后的信号。

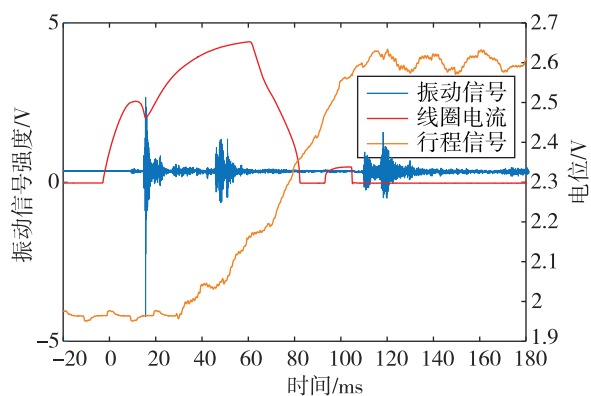
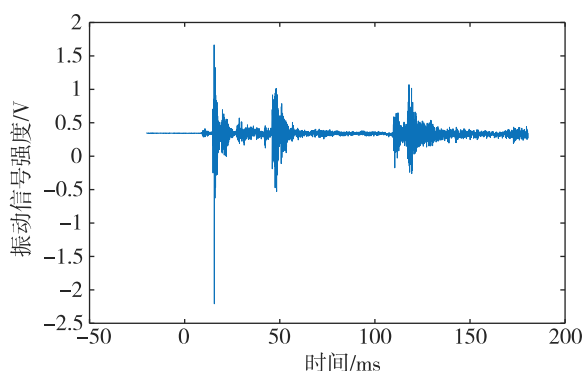
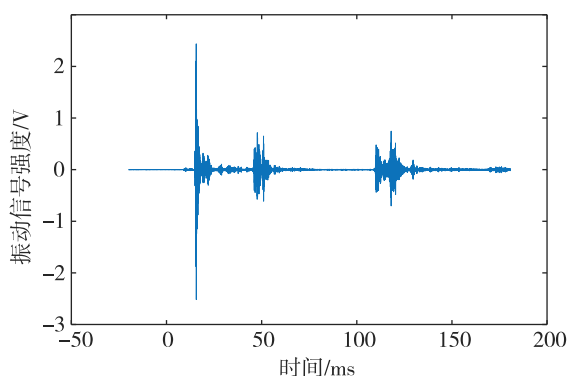


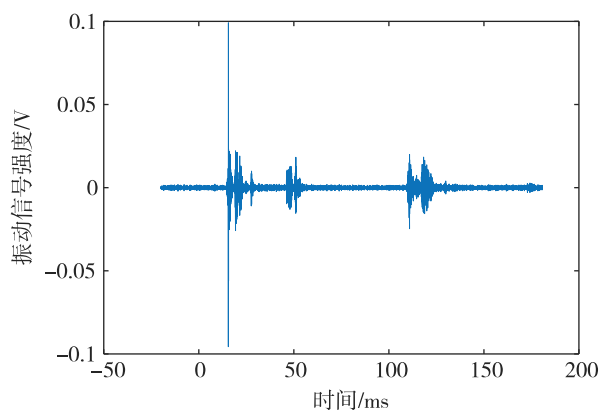
图3 典型合闸动作原始振动信号



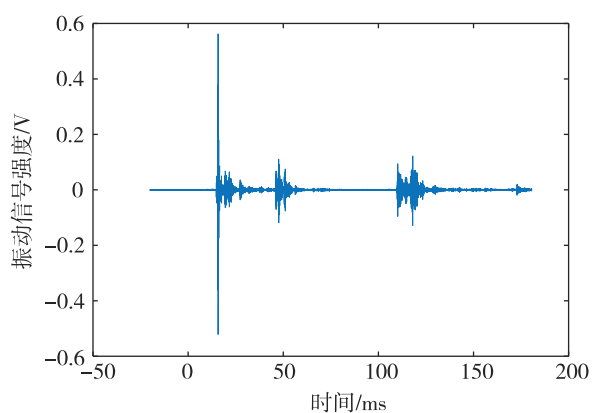
(a) 节点(4,0)



(b) 节点(4,1)



(c) 节点(4,2)



(d) 节点(4,3)

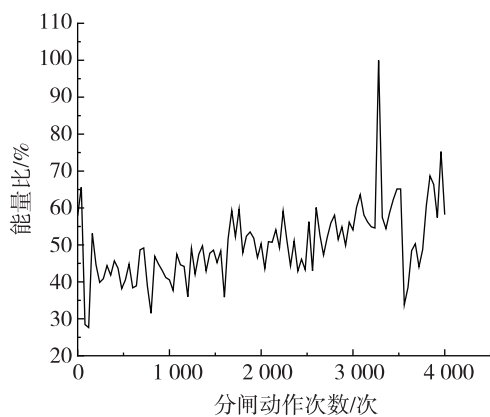
图4 典型合闸振动信号小波包分解

在断路器正常分合闸动作下进行超过 4 000 次的开合操作,对检测到的振动信号进行小波包分解。从统计得到的数据来看,不同分合闸次数的振动信号经过小波包分解后的能量谱在第四层每个节点的分布情况相同。

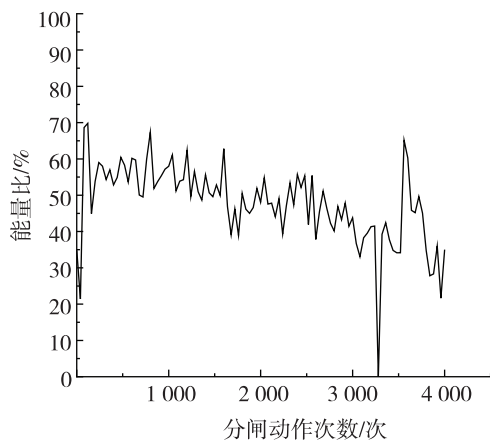
由小波包分解四层后得到的单个节点内的能量谱主要分布在前四个节点频段内,尤其是第一、二、四个频段,即对应的频率为 0 ~ 125 kHz。对分闸过程中的振动信号经过四层小波包分解后的前四个节点中的能量谱随着分合闸动作次数增多的变化趋势进行了统计。由于第一、二个节点内能量占比达到了第四层所有节点信号能量的 95% 以上,因此,这里只分析了第一、二节点内的能量变化趋势。节点(4,1)与节点(4,0)的变化趋势相反。

图 5 所示为节点(4,0)的能量谱随分闸动作次数的变化规律。可以看到第一个节点的能量百分比基本处于 40% ~ 60% 之间,并且随着

分闸动作次数的增多,节点(4,0)的能量比随动作次数的增多有着明显的增长趋势。针对其中出现的数值极大的异常点,通过排查,出现能量比极大的原因有两个:一是未采集到正常的振动信号,示波器中原始数据存在明显异常;二是数据采集时设置的采样率远远高于本实验中设定的5 000 kHz采样率,因此出现了明显的异常点数。



(a) 节点(4,0)

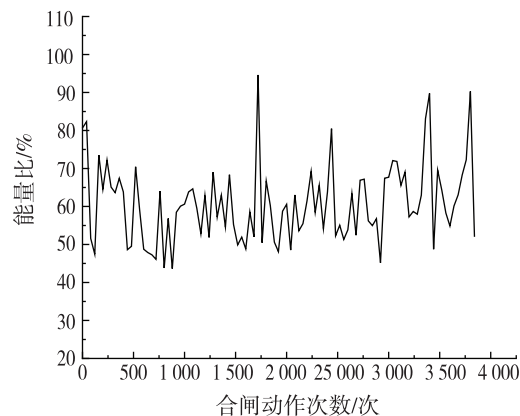


(b) 节点(4,1)

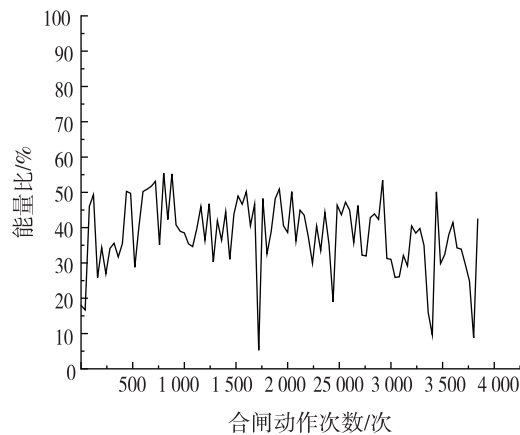
图5 分闸动作能量谱变化

合闸过程中的能量谱分析思路与分闸过程中相同,依旧选择节点(4,0)和(4,1)作为分析对象,分析能量比随着合闸动作次数增多而产生变化趋势。通过对图6的观察,可以发现节点(4,0)的能量谱随着合闸动作的进行,并未呈现出明显的变化规律。这是由于合闸弹簧存储的能量大于分闸弹簧,合闸弹簧疲劳后的能量仍能够在合闸过程中产生同样振动频率的振动冲击,因此振动信号在节点(4,0)内的频段能量并未呈现明显的变化趋势。

在分析过程中,同样出现了由于上述分闸过程中出现突变值原因的数据。如图6所示,节点(4,0)中的能量比变化范围为40%~80%,并未出现明显的变化趋势,节点(4,1)中的能量比则分布在20%~60%之间。在图6中可以看出在排除上文提到的两点原因后,还存在第1 720次合闸的情况无法用这两个原因解释,初步分析是因为合闸过程中振动信号出现了幅值过大的脉冲,因此影响到能量比的分布。



(a) 节点(4,0)



(b) 节点(4,1)

图6 合闸动作能量谱变化

3.2 小波包-能量熵分析

根据2.3节中的步骤处理,统计得到反复分合闸动作中小波包-能量熵的变化规律。本文选取了超过4 000次分合闸动作断路器中98次的振动信号进行小波包-能量熵的计算,选取第四层中的前四个节点的能量熵进行分析,如图7所示。不论是分闸动作还是合闸动作,其各个节点的能量熵基本保持不变,并且分合闸过程中的前四个节点的能量熵都为2.565,保持一致。

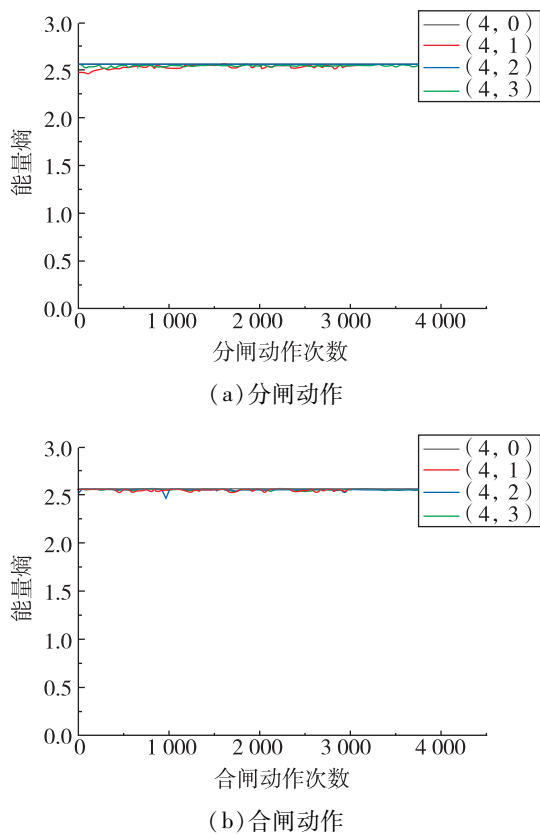


图7 小波包-能量熵随断路器动作次数变化规律

4 结 论

1) 分闸振动信号的能量谱能够较好地体现机械性能的退化,随着断路器动作次数的增多,节点(4,0)的能量呈现出逐渐增大的趋势。合闸振动信号的能量谱未呈现出明显的变化趋势。

2) 随着断路器动作次数的增多,分合闸过程的小波包能量熵未发生明显改变,说明振动信号经小波包分解后各分量的能量在时域上的分布未发生明显改变。

参考文献

- [1] 曹荣江. 交流高压断路器的运行条件[M]. 北京:水力电力出版社,1985.
- [2] 郭贤珊,李仲夫,陈轩恕. 断路器操动机构在线监测参数的选择[J]. 高压电器,2002(1):24-26.
- [3] 李建基. 高压断路器可靠性调查[J]. 电工电气,2010(6):58-59.
- [4] 唐专敏,范兴明,黄知超,等. 高压断路器机械状态的评估与诊断方法[J]. 桂林电子科技大学学报,2011,31(1):78-81.

- [5] 沈力,钱家骊. 断路器操动机构振动信号的分析[J]. 高压电器,1996,32(4):11-13.
- [6] 赵洋,刘汉宇,曾庆军. 基于机械振动信号的高压真空断路器故障诊断研究[J]. 高压电器,2010,46(2):46-51.
- [7] OKUTSU N, TAKAHASHI Y, MATSUDA S, et al. Pattern recognition of vibrations in metal enclosures of gas insulated equipment and its application[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981(6):2733-2739.
- [8] 胡晓光,戴景民,纪延超,等. 基于小波奇异性检测的高压断路器故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2001,21(5):68-71.
- [9] 陈伟根,邓帮飞,杨彬. 基于振动信号经验模态分解及能量熵的高压断路器故障识别[J]. 高压电器,2009,45(2):90-93.
- [10] 赵书涛,许文杰,刘会兰,等. 基于振动信号谱形状熵特征的高压断路器操动状态辨识方法[J]. 电工技术学报,2022,37(9):2170-2178.
- [11] 孙抗,刘永超. 基于小波包和 EMD 的断路器机械故障诊断研究[J]. 测控技术,2017,36(2):20-23.
- [12] YANG Q, RUAN J, ZHUANG Z, et al. Chaotic analysis and feature extraction of vibration signals from power circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019,35(3):1124-1135.
- [13] 孙来军,胡晓光,纪延超. 改进的小波包-特征熵在高压断路器故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报,2007(12):103-108.
- [14] 钟建英,刘洋,林莘,等. 基于振动信号特征的高压断路器机械故障诊断技术研究[J]. 高压电器,2013,49(9):49-54.

收稿日期:2022-08-22 修回日期:2022-12-20

作者简介:王璐(1992),女,工程师,主要从事电力系统高压设备运维与管理工作,E-mail:309945579@qq.com。

通信作者:彭彦军(1980),男,高级工程师,主要从事电力系统高压设备运维与管理,E-mail:2367517690@qq.com。