

电缆终端搪铅涡流检测信号小波去噪参数选择方法

唐 军¹, 邵千秋², 任 亮¹, 陈 莉¹, 张 睿¹, 王然然¹, 邓 瑞¹, 冯 伟¹

(1. 国网四川省电力公司南充供电公司, 四川 南充 637000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 电缆终端搪铅质量直接影响高压电缆的安全稳定运行, 有必要对其进行脉冲涡流无损检测, 以排查是否存在缺陷。在实际检测时, 涡流检测信号容易受到白噪声干扰, 小波去噪是一种有效的白噪声滤除手段。然而, 以往的研究通常根据经验选取小波参数, 忽略了参数变化对涡流检测信号实际去噪效果的影响。因此, 提出了基于粒子群优化算法的电缆终端搪铅涡流检测信号小波去噪参数选择方法, 以归一化相关系数作为适应度函数, 通过量化去噪涡流检测信号在峰值附近的失真程度, 获得了最优小波去噪参数为 Sym25 小波基、10 层分解层数和中位数阈值函数, 保证了降噪涡流检测信号峰值大小与峰值时间的相对误差小于 3%。研究成果可为确定不同噪声干扰下的涡流检测信号小波去噪参数自动选择提供方法参考。

关键词: 电缆终端; 搪铅; 涡流检测; 小波去噪; 粒子群优化算法

中图分类号: TM 726.4 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)05-0076-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240511

Wavelet Denoising Parameter Selection Method for Eddy Current Detection Signals of Lead Sealings of Cable Terminal

TANG Jun¹, SHAO Qianqiu², REN Liang¹, CHEN Li¹, ZHANG Rui¹, WANG Ranran¹,
DENG Rui¹, FENG Wei¹

(1. State Grid Nanchong Electric Power Supply Company, Nanchong 637000, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The quality of lead sealings of cable terminal has a direct impact on safe and stable operation of high-voltage cables, so it is necessary to carry out the pulse eddy current non-destructive testing to avoid the defects. But the eddy current detection signals can be impacted by noise in actual engineering, and wavelet denoising is an effective measure to filter out the white noise. However, the previous researches on wavelet denoising have typically selected wavelet parameters based on experiences, ignoring the impact of parameter variations on actual denoising effect. Hence, a wavelet denoising parameter selection method for eddy current detection signals is proposed based on particle swarm optimization algorithm, which adopts an evaluation index called normalized correlation coefficient (NCC) as fitness function. Through quantifying distortion degree of denoising eddy current detection signals near the peak, the optimal wavelet denoising parameters are obtained, that is, Sym25 wavelet, ten-layer decomposition layer and median threshold function, which makes the relative error between peak value of eddy current detection signals after denoising and peak time be less than 3%. The research results can provide a method reference for automatically determining the optimal wavelet denoising parameters for eddy current detection signals under different noise interference.

Key words: cable termination; lead sealing; eddy current detection; wavelet denoising; particle swarm optimization algorithm

0 引言

高压电缆终端搪铅具有密封防水作用,并保证电缆金属外护层良好接地^[1],一旦在外力作用下形成缺陷,容易导致电缆终端进气、进水等,严重时会造成绝缘击穿、爆炸等恶性停电事故。2017年和2019年,浙江电网110 kV及220 kV高压电缆曾多次发生因搪铅开裂导致的故障跳闸事故,严重影响了电力负荷的安全稳定传输^[2]。因此,为提高电缆搪铅质量状态管理水平并降低搪铅缺陷造成断电的事故率,有必要对电缆搪铅开展无损检测与评估。

目前,具有高灵敏度和非接触式优势的脉冲涡流检测技术已被证明能有效检测搪铅开裂缺陷^[3-4]。但是,在现场检测过程中,脉冲涡流检测电压信号会混入检测装置固有噪声和检测环境噪声,这些噪声将会叠加到真实脉冲涡流检测电压信号中,难以准确提取出涡流检测信号最大峰值特征,导致缺陷检测的可靠性较低。

小波去噪算法的出现为抑制固有噪声、环境噪声等白噪声提供了一种有效方法^[5],它需根据以下两个基本原则对小波去噪参数进行选择:1)去噪后信号的信噪比高;2)去噪后信号的畸变小^[6]。小波去噪参数包括小波基、分解层数和阈值函数。然而,除去一些支撑长度过长不利于实际使用的小波基外,仍有112个小波基能够用于涡流检测信号去噪;单个周期信号采样点数为2000的前提下,最大的分解层数为10层;此外,还有4种不同类型的阈值函数:平均阈值、中位数阈值、硬阈值和软阈值。这些小波去噪参数的不同组合情况可多达4000多种,采样传统枚举法对每种组合情况进行讨论不符合工程实际要求^[7-8]。

因此,下面提出了基于粒子群优化算法的涡流检测信号小波去噪参数选择方法。该方法分别利用信噪比、均方根误差、相对平滑度和归一化相关系数作为适应度函数,通过量化去噪涡流检测信号与原始涡流检测信号在峰值附近的相似程度,获得了最优小波去噪参数,以期确定不同情况下涡流检测信号小波去噪参数的自动选择提供方法参考。

1 基于粒子群优化算法的涡流检测信号小波去噪参数选择方法

1.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法是一种基于群体合作的随机搜索算法,算法的实现原理如图1所示。当前迭代中粒子的速度和位置可表示^[9]为

$$V_{i+1} = \omega V_i + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (p_{\text{best}_i} - S_i) + c_2 \cdot \text{rand} \cdot (g_{\text{best}_i} - S_i) \quad (1)$$

$$S_{i+1} = S_i + V_{i+1} \quad (2)$$

式中: ω 为权重系数,取值0.8; p_{best_i} 与 g_{best_i} 分别为第*i*次迭代中粒子个体最优适应度函数值与种群最优适应度函数值; c_1 与 c_2 为学习因子,均值均为2; rand 为0~1的随机函数; V_i 为第*i*次迭代中目标粒子的速度; V_{i+1} 为第*i+1*次迭代中目标粒子的速度; S_i 为第*i*次迭代中目标粒子的位置; S_{i+1} 为经过向上取整后的第*i+1*次迭代中目标粒子的位置。

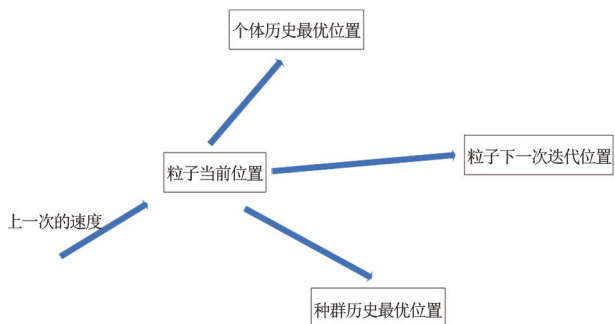


图1 粒子寻优

由于粒子群优化算法目的是得到针对含白噪声涡流检测信号的最优小波去噪参数,从而得到理想的去噪涡流检测信号。因此,选择使用评估信号质量的指标,即分别将信噪比(signal noise ratio, SNR)、均方根误差(root mean squared error, RMSE)、相对平滑度*r*和归一化相关系数(normalized cross correlation, NCC)作为粒子群优化算法的适应度函数,这4个指标分别表示^[10]为

$$S_{\text{NR}} = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} \quad (3)$$

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (Y_k - X_k)^2}{n}} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} (X_{k+1} - X_k)^2}{\sum_{k=1}^{n-1} (Y_{k+1} - Y_k)^2} \quad (5)$$

$$N_{cc} = \frac{\sum_{k=1}^n Y_k \cdot X_k}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^n Y_k^2\right) \left(\sum_{k=1}^n X_k^2\right)}} \quad (6)$$

式中： P_s 和 P_n 分别为信号和噪声的功率； Y_k 为第 k 个信号采样点去噪后的信号； X_k 为第 k 个信号采样点原始带噪信号。

1.2 小波去噪参数选择方法

小波去噪参数选择的具体过程如图 2 所示，步骤如下：

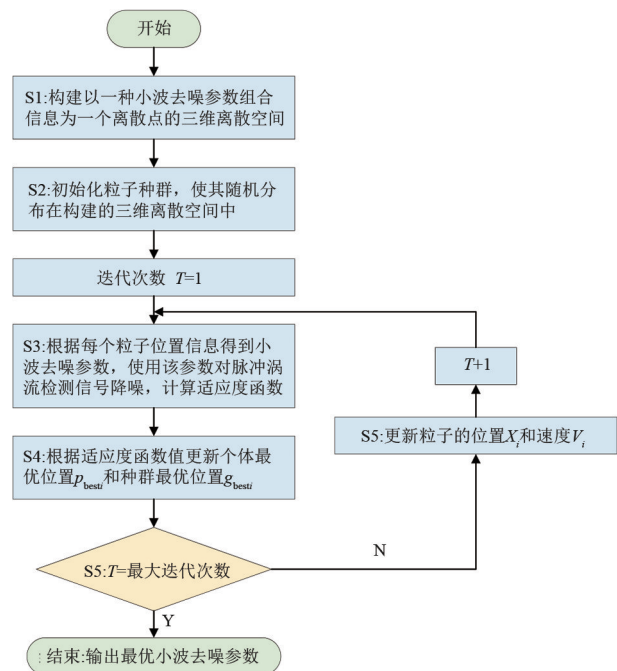


图 2 去噪参数寻优流程

1) 小波去噪参数包括小波基类型、层数和阈值函数, 需对上述 3 个参数进行数字编码使其能够被用于粒子群优化算法, 112 个小波基类型、10 种分解层数和 4 类阈值函数分别编码为 $[1, 2, 3 \dots 112]$ 、 $[1, 2, 3 \dots 10]$ 和 $[1, 2, 3, 4]$; 创建包含 4480 个离散点的三维离散空间。

2) 将种群数目初始化为 100, 并使其随机分布在步骤 1 创建的三维离散空间中。

3) 根据每个粒子的位置信息得到对应的小波去噪参数, 再使用该参数对含噪涡流检测信号降噪, 并计算具体的适应度函数。

4) 根据适应度函数值更新个体和种群的最优位置, 即若当前的适应度函数值优于粒子个体适应度函数值的历史最优值, 则更新粒子个体最优适应度函数值 p_{best} ; 若当前的适应度函数值优于种群适应度函数值的历史最优值, 则更新种群最优适应度函数值 g_{best} 。

5) 判断迭代是否完成: 如果当前迭代次数未达到最大迭代次数 (设置为 30 次), 则根据式 (1) 一式 (2) 更新粒子个体的速度和位置, 再重复步骤 3 和步骤 4, 值得注意的是, 由于在进行数字编码后, 每个粒子的输入参数是离散的, 因此, 在确定当前粒子的位置后, 应该再对粒子对应的位置进行向上取整处理; 如果当前迭代次数达到最大迭代次数, 则停止迭代, 输出最优小波去噪参数和利用所述最优小波去噪参数去噪后的涡流检测信号。

2 粒子群优化算法寻优和去噪结果分析

2.1 粒子群优化算法寻优结果

通过实验得到的原始脉冲涡流检测信号如图 3(a) 所示, 但由于现场检测工况中外界干扰较实验室环境更强, 因此在其基础上通过人为加白噪声的方式得到信噪比为 10 dB 的带噪脉冲涡流检测信号, 将其作为研究对象, 如图 3(b) 所示。加噪的模型可表示为

$$x(t) = x^*(t) + e(t)$$

式中: $x^*(t)$ 为实验信号; $e(t)$ 为噪声。值得注意的是, 虽然在一定的工作环境中, 噪声的能量是额定的, 但是在细节上却有所区别。因此为了增加优化结果的适用性, 每次均在图 3(a) 中原始涡流检测信号的基础上加入不同的功率噪声进行寻优。

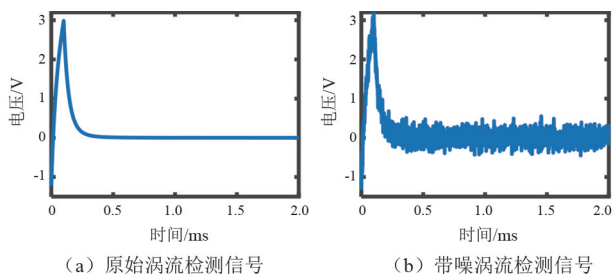


图 3 涡流检测信号

粒子群优化算法收敛的结果如图 4 所示, 以不同的信号评估指标作为适应度函数进行寻优, 在 30 次迭代后均能较好地收敛。同时, 将寻优的最佳适应度与对应的小波去噪参数列于表 1。

2.2 去噪效果分析

为了进一步分析表 1 每组参数的去噪效果, 使用去噪参数对带噪的脉冲涡流检测信号进行小波去噪, 去噪后的涡流检测信号如图 5 所示。可以看出,

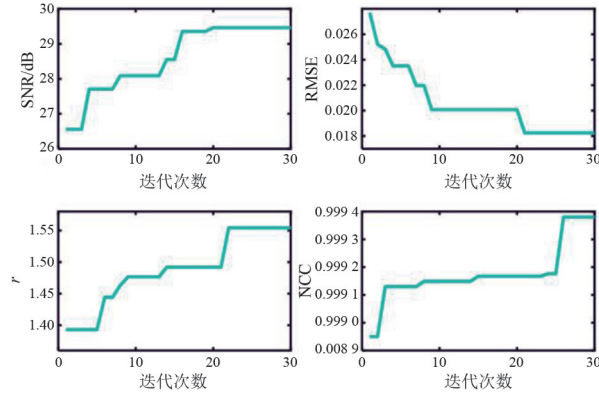


图 4 粒子群优化算法寻优收敛

表 1 粒子群优化算法寻优结果

参数	SNR	RMSE	r	NCC
最优值	29.463 dB	0.018	1.554	0.999
小波基	Bior4.4	Sym11	Bior1.5	Sym25
分解层数	9	8	7	10
阈值函数	中位数	中位数	软阈值	中位数

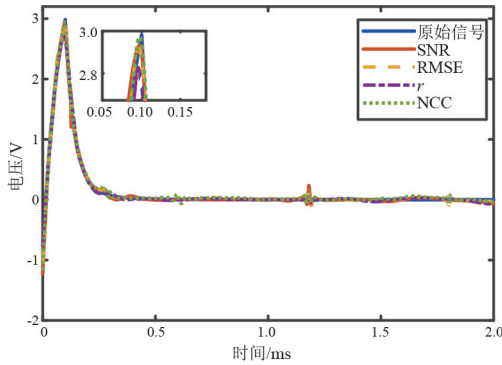


图 5 采用不同适应度函数时的去噪涡流检测信号

采用不同适应度函数时均能滤除大部分噪声,相对于原始脉冲涡流检测信号仅在局部有细微的失真和抖动。分别采用 SNR、RMSE、 r 和 NCC 作为适应度函数时,去噪涡流检测信号的信噪比分别为 21.2 dB、22.8 dB、20.6 dB 和 23.3 dB,与带噪脉冲涡流检测信号的 10 dB 信噪比相比,去噪脉冲涡流检测信号的信噪比显著提高。

由于不同的适应度函数所体现的数学意义不同,因此得到的去噪涡流检测信号在细节上也有所区别。因此,根据一定的标准来判断去噪涡流检测信号的优劣是有必要的。涡流检测信号在峰值附近所包含的信息较多,故根据降噪涡流检测信号在峰值附近的失真程度评估去噪质量。将去噪涡流检测信号与原始涡流检测信号作差,得到残差信号以更直观地反映信号降噪后的失真程度,并将峰值点对应的位置用红线标记,如图 6 所示。

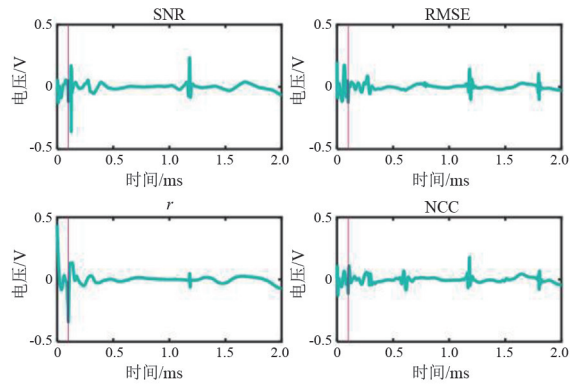


图 6 采用不同适应度函数时的涡流检测信号残差

从图 6 可以看出,使用 SNR、RMSE 和 r 作为适应度函数时,去噪涡流检测信号与原始涡流检测信号总体上匹配较好,但在峰值处存在明显的失真;SNR 和 r 作为适应度函数时的峰值大小最大失真度分别为 5.87% 和 10.19%,RMSE 作为适应度函数时的峰值时间最大失真度为 5.94%。而使用 NCC 作为适应度函数时,去噪涡流检测信号仅在后半部分有波动,其余高信息密度部分的失真程度均在可接受范围内;较使用其他指标作为适应度函数时,去噪涡流检测信号的平滑程度相对更优,峰值失真程度相对更小。

同时,为了增加研究结果的普适性,通过人为加噪的方式得到另外三组不同的带噪涡流检测信号并重复上述去噪过程,去噪涡流检测信号的峰值大小相对误差和峰值时间相对误差见表 2。可以看出,以 NCC 作为适应度函数时,去噪涡流检测信号峰值大小和峰值时间的相对误差最小,最大相对误差小于 3%。因此,在以峰值失真程度为判断标准的情况下,由 NCC 作为适应度函数可得到最优去噪涡流检测信号,对应的最佳小波去噪参数分别为 Sym25 小波基、10 层分解层数、中位数阈值函数。

表 2 采用不同适应度函数时的去噪信号

组别	相对误差	峰值失真程度			
		SNR	RMSE	r	NCC
1	峰值大小	-4.75	-4.06	-9.22	-2.95
	峰值时间	-2.97	-5.94	-7.92	-2.97
2	峰值大小	-5.87	-2.14	-10.19	-2.49
	峰值时间	-2.97	-3.96	-9.90	-2.96
3	峰值大小	-4.26	-2.97	-9.09	-2.39
	峰值时间	-2.98	-3.96	-6.94	-2.97

送端换流母线电压上升影响受端换相的机理及抑制措施

马星^{1,2}, 尹纯亚³, 王利超^{1,2}, 马健^{1,2}, 槽伟红^{1,2}, 段玉^{1,2}

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 新疆电力系统全过程仿真重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要:为避免由送端换流母线电压上升引起逆变器关断角减小导致换相失败, 分别从电气量变化特性和无功交换特性研究了其发生机理。基于推导建立的关断角表达式, 分析发现送端换流母线电压上升会引起直流电流增大从而导致关断角减小; 同时直流电流的增大会引起逆变器无功消耗增加, 导致受端换流母线电压跌落, 进一步导致关断角减小, 诱发换相失败。因此, 提出了一种通过改进送端控制器以抑制换相失败的措施。该措施在送端换流母线电压上升时增大整流器触发角以抑制直流电流的上升, 同时增大整流器无功消耗从而减缓送端换流母线电压的上升。基于PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真平台, 利用CIGRE HVDC标准测试模型仿真验证了理论分析的正确性和抑制措施的有效性。

关键词:换相失败; 换流母线电压; 直流电流; 无功功率; 高压直流输电

中图分类号: TM 721 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)05-0080-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240512

Mechanism and Suppression Measures for Receiving-end Commutation Affected by Voltage Rise of Sending-end Converter Bus

MA Xing^{1,2}, YIN Chunya³, WANG Lichao^{1,2}, MA Jian^{1,2}, ZAO Weihong^{1,2}, DUAN Yu^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011,

Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Whole Process Simulation for Power System,

Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. School of Electrical Engineering,

Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract: In order to avoid the commutation failure due to the decrease of extinction angle of inverter caused by voltage rise of converter bus at sending end, the occurrence mechanism is studied from the variation characteristics of electrical quantity and the exchange characteristics of reactive power respectively. Based on the derived expression of extinction angle, it is found that the voltage rise of converter bus at sending end will increase DC current, which will lead to the decrease of extinction angle. At the same time, the increase of DC current will lead to the increase of reactive power consumption of inverter, resulting in voltage drop of converter bus at receiving end, further leading to the decrease of extinction angle and inducing commutation failure. Therefore, a measure to suppress commutation failure by improving controller at sending end is proposed. This measure increases the trigger angle of rectifier when the voltage of converter bus rises at sending end to suppress the rise of DC current and increases the reactive power consumption of rectifier, so as to slow down the voltage rise of converter bus at sending end. Based on PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation platform, CIGRE HVDC benchmark model is used to verify the correctness of theoretical analysis and the effectiveness of suppression measures.

Key words: commutation failure; converter bus voltage; DC current; reactive power; high voltage direct current transmission

对策[J].电瓷避雷器,2021(4):209-214.

- [2] 冀辉,刘连升,焦洪涛,等.220 kV 油浸式电流互感器缺陷案例分析[J].国网技术学院学报,2020,23(3):14-16.
- [3] 王晓辉,朱永利,王艳,等.基于深度学习的电容器介损角在线辨识[J].电工技术学报,2017,32(15):145-152.
- [4] 赵廷志,冯新岩,李承振,等.基于套管高频和特高频电流监测的换流变局放监测[J].变压器,2020,57(9):33-37.
- [5] 于大洋,张聪聪,王磊,等.变电站工频磁场干扰对泄漏电流传感器准确度影响研究[J].高压电器,2021,57(6):107-114.
- [6] 电力行业电力变压器标准化技术委员会.变压器油中溶解气体分析与判断导则:DL/T 722—2014[S].北京:中国电力出版社,2015.
- [7] 徐勇.互感器的内部压力测量[J].高电压技术,1993(2):38-41.
- [8] 陈凌,苏长华,吴晓晖,等.基于内部压强响应的变压器套管在线监测装置研制[J].高电压技术,

(上接第 79 页)

3 结 论

上面针对脉冲涡流检测信号白噪声干扰的小波去噪参数选择,提出了基于粒子群优化算法的脉冲涡流检测信号小波去噪参数选择方法,分别利用信噪比、均方根误差、相对平滑度和归一化相关系数作为适应度函数,通过量化去噪脉冲涡流检测信号与原始脉冲涡流检测信号在峰值附近的相似程度,发现采用归一化相关系数作为适应度函数时,可得到最优去噪脉冲涡流检测信号,其峰值大小和峰值时间的相对误差均小于 3%,对应的最佳小波去噪参数分别为 Sym25 小波基、10 层分解层数和中位数阈值函数。

参考文献

- [1] 周路遥,曹俊平,王少华,等.基于多状态量特征及变化规律的高压电缆状态综合评估[J].高电压技术,2019,45(12):3954-3963.
- [2] 曹俊平,王少华,任广振,等.高压电缆附件铅封涡流探伤方法试验验证及应用[J].高电压技术,2018,44(11):3720-3726.
- [3] 曹俊平,孙兴涛,王少华,等.基于涡流技术的高压电缆

2020,46(2):569-575.

- [9] 贺兴容,尹佳,张国治,等.过热缺陷下少油设备的压力变化特性研究[J].高压电器,2021,57(8):99-104.
- [10] 唐炬,尹佳,张晓星,等.基于压力和特高频的少油设备绝缘联合在线监测[J].高电压技术,2020,46(2):546-553.
- [11] 全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会.高电压试验技术分技术委员会.高电压测试设备通用技术条件 第 16 部分:电力少油设备压力检测装置:DL/T 846.16—2021[S].北京:中国电力出版社,2022.
- [12] 全国互感器标准化技术委员会.互感器用金属膨胀器:JB/T 7068—2015[S].北京:机械工业出版社,2016.

作者简介:

吴晓晖(1974),男,高级工程师,主要从事变压器类设备技术管理以及电力设备在线监测技术研究;

汪晓华(1988),男,硕士,工程师,主要从事电力设备在线监测技术、非电量监测在电网中的应用研究工作。

(收稿日期:2023-12-03)

铅封裂纹缺陷检测研究[J].高压电器,2020,56(8):168-175.

- [4] 马诚佳,张浩,陆晓依.铅封涡流探伤在高压电缆线路现场检测中的应用[J].高电压技术,2019,45(增刊2):118-121.
- [5] 米翰宁,王昕,任广振,等.自适应小波阈值去噪算法用于局部放电白噪声去噪[J].高压电器,2021,57(6):94-101.
- [6] 陆小鹏,吴炬卓,牛海清,等.基于改进小波变换阈值估计法去除电缆绝缘局部放电信号白噪声[J].电器与能效管理技术,2021(3):24-28.
- [7] 何平,何若冰,陈佳,等.基于小波阈值的局部放电白噪声去噪方法综述[J].广东电力,2020,33(11):83-90.
- [8] 范佳兴,范杰清.基于多重自相关的局部放电信号小波去噪分解层数确定方法[J].河北师范大学学报(自然科学版),2022,46(6):582-586.
- [9] 聂文梅,宋晓霞.基于自适应粒子群优化算法的无线传感器网络覆盖控制[J].沈阳工业大学学报,2023,45(4):459-464.
- [10] 朱新山,丁杰.一种采用随机归一化相关系数调制的量化水印[J].计算机学报,2012,35(9):1959-1970.

作者简介:

唐 军(1991),男,硕士,研究方向为电力系统及其自动化、分布式电源并网技术;

邵千秋(1991),男,博士,研究方向为电缆缺陷检测。

(收稿日期:2023-11-10)