

[电线电缆]

基于惯性特征重构与深度学习的 电缆缓冲层烧蚀缺陷定位

文/谢宇 孙鹏 孟健
国网天津市电力公司电缆分公司

电缆缓冲层烧蚀程度的差异使得对应的缺陷特征也不同，定位难以达到较高水平，为此提出基于惯性特征重构与深度学习融合方法的电缆缓冲层烧蚀缺陷定位方法研究。测试结果表明，设计方法不仅实现对电缆缓冲层烧蚀缺陷的准确定位，并且表现出较高的效率和适用性。

电缆绝缘性能好，以及在实际敷设阶段应用简单。维修方便的属性^[1]，在10 kV及以上电压等级的电网系统中得到了较为广泛的应用。但是值得注意的是，在电力系统的规模不断扩大的背景下^[2]，无论是电网的复杂程度，还是在实际运行过程中受到运行工况、外界环境等因素的影响^[3]，都呈现出越来越高的发展趋势，这也使得电缆老化问题日益严重^[4]。为了最大限度保障电力系统安全，确保供电的稳定性和可靠性，对存在缺陷的电缆位置进行精准、高效的定位成为了备受关注的技术手段^[5]。其中，文献[6]提出一种以反射系数与核函数为基础的电缆缺陷定位方法，在极大程度上提高定位效率和准确度，但是具体的应用场景存在一定的局限性，具体的缺陷程度和缺陷状态都会引起定位效果的降低；文献[7]提出一种以调频连续波相位敏感特性为基础的电缆局部缺陷定位方法，其在严重缺陷情况的定位效果较好，但是当缺陷程度较低时，存在无法定位的情况。结合上述分析可以看出，进一步开展电缆缓冲层烧蚀缺陷定位的相关研究仍然具有重要的现实意义^[8]。

为此，本文提出基于惯性特征重构与深度学习融合方法的电缆缓冲层烧蚀缺陷定位方法研究，并在对比测试环境中对设计定位方法的综合性能进行

全面的分析。

电缆缓冲层烧蚀缺陷定位方法设计

1. 缓冲层烧蚀缺陷特征惯性重构

对于电缆缓冲层烧蚀缺陷而言，受具体的缺陷程度等因素影响，表现出的缺陷特征存在不同程度的差异，针对此，本文对缓冲层烧蚀缺陷特征进行重构，在具体的执行过程中^[9]，采用基于稀疏字典学习的岭回归方法。与其他类型的特征重构方式相比，本文采用的方法主要利用了岭回归模型为缓冲层烧蚀缺陷特征建立回归关系^[10]。对于隐性缓冲层烧蚀缺陷特征而言，其与显性缓冲层烧蚀缺陷特征之间具有相同的稀疏系数，以此为基础，通过求解岭回归模型^[11]，就可以得到对应的映射矩阵，实现对电缆缓冲层烧蚀缺陷特征的重构。

在具体的执行过程中，本文首先使用 K-SVD算法建立了特征显隐性完备字典，使用 OMP 算法建立了特征稀疏表示系数^[12]。其中，稀疏字典原子即为锚定点，从稀疏字典中选取邻域字典，得到的数据结果分别为显性缓冲层烧蚀缺陷特征邻域字典和隐性缓冲层烧蚀缺陷特征邻域字典^[13]。采用最小二乘对其进行求解，得到的求解公式可以表示为

$$\beta = (N_l^T N_l + \lambda I)^{-1} N_l y_i \quad (1)$$

式中， β 是电缆缓冲层烧蚀缺陷特征稀疏约束下的最小二乘映射求解结果； N_l 是显性缓冲层烧蚀缺陷特征邻域字典； N_h 是隐性缓冲层烧蚀缺陷特征邻域字典； λ 是最小二乘系数； I 是正交匹配投影下的电缆缓冲层烧蚀缺陷特征参量； y_i 是原始的电缆缓冲层烧蚀缺陷特征。

此时对缓冲层烧蚀缺陷特征映射矩阵的构建方式如图1所示。

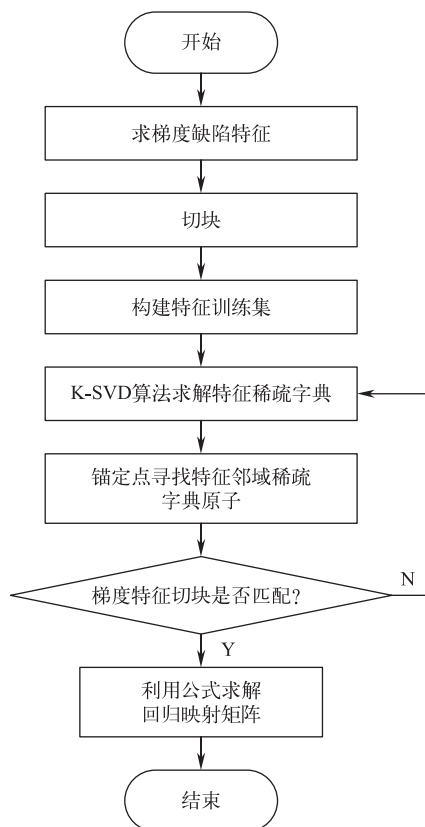


图1 缓冲层烧蚀缺陷特征映射矩阵构建方式

以上述求解结果为基础，重构后的缓冲层烧蚀缺陷特征可以表示为

$$P = N_h(N_l^T N_l + \lambda I)^{-1} N_l^T y_i = \frac{N_l \beta}{N_h} \quad (2)$$

式中， P 是重构后的缓冲层烧蚀缺陷特征。

2. 基于深度学习的缺陷定位

以得到的缓冲层烧蚀缺陷特征惯性重构结果为基础，利用深度学习中的Faster R-CNN网络，实现对电缆缓冲层烧蚀缺陷的定位。

其中，候选区域网络损失函数的设置情况可以表示为

$$f(P_x) = \frac{k(p_i) + \gamma(t_i)}{n} \quad (3)$$

式中， f 是Faster R-CNN网络算法中候选区域网络的损失函数； P_x 是待检测电缆的特征参量； p_i 和 t_i 分别是待检测电缆的状态参数和状态对应时间信息； k 和 γ 分别是缓冲层烧蚀缺陷特征的显性系数和隐性系数； n 是待检测电缆的所有运行参数信息。

在分类回归网络设置阶段，利用均值池化和最大池化操作避免出现定位结果与实际缺陷位置存在较大偏差的情况的，可以表示为

$$d(P_x) = \frac{p_{i\max}}{p_i} + \frac{t_{i\max}}{t_i} \quad (4)$$

式中， k 是分类回归网络基础单元的大小； $p_{i\max}$ 和 $t_{i\max}$ 分别是对应参数的最大值； $\bar{p}_i$ 和 $\bar{t}_i$ 分别是对应参数的均值。

当Faster R-CNN网络输出结果存在匹配的缓冲层烧蚀缺陷特征时，则匹配数据对应的区段即为最终的定位结果。

测试与分析

1. 测试环境构建

在对本文设计的基于惯性特征重构与深度学习融合方法的电缆缓冲层烧蚀缺陷定位方法应用性能进行分析时，构建了以高压 XLPE 电缆为基础的等值电路模型作为具体的测试环境。其中，参与测试的具体电缆型号为 YJLW03 64 /110 皱纹铝护套电缆，通过为其设置缓冲层缺陷，开展相关的定位测试。其中，测试YJLW03 64 /110 皱纹铝护套电缆相关参数信息见表1。

表1 测试YJLW03 64 /110 皱纹铝护套电缆参数信息统计

编号	结构	参数配置
1	导体/mm	34.2
2	导体屏蔽层/mm	37.2
3	主绝缘层/mm	69.3
4	绝缘外屏蔽层/mm	72.0
5	缓冲层/mm	76.9
6	铝护套厚度/mm	2.15
7	铝护套内径/mm	83.6
8	铝护套外径/mm	92.0
9	接触面宽度/mm	10.0
10	接触面对应的圆心角(°)	135
11	皱纹铝护套螺距/mm	26.0

对表1中的参数配置对应信息进行进一步细化

分析，其中，导体屏蔽层的主要材料为半导体材料，其对应的电阻率达到了 $500\ \Omega/\text{m}$ ；主绝缘层的主要材料为交联聚乙烯，对应的相对介电常数能够达到2.5；绝缘外屏蔽层的主要材料也同样为半导体材料，对应的电阻参数为 $500\ \Omega/\text{m}$ ，与导体屏蔽层一致；缓冲层的材料为半导电阻水材料，对应的阻值达到了 $1\ 000\ \Omega/\text{m}$ 。除此之外，在YJLW03 64/110皱纹铝护套电缆的缓冲层与铝护套之间，存在以碳酸钠为主要材料的白色粉末层，具体的厚度为1.0 mm，对应的介电常数为8.4。

在上述材料准备的基础上，本文构建的等值电路模型如图2所示。

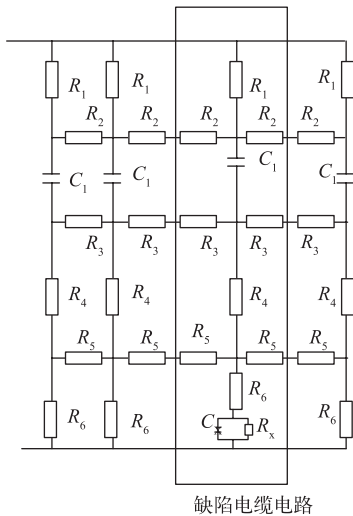


图2 缓冲层烧蚀缺陷情况下等值电路模型

在图2所示的等值电路模型中，相关参数信息的配置情况见表2。

表2 测试等值电路模型参数配置

编号	参数	配置
1	C_1/F	268.3
2	R_1/Ω	5.59×10^{-12}
3	R_2/Ω	99.9
4	R_3/Ω	4.2×10^4
5	R_4/Ω	7.3×10^4
6	R_5/Ω	5.3×10^4
7	R_6/Ω	485.2
8	C_x/F	6.25×10^{-11}
9	电源/kV	110
10	电源电压幅值/kV	89.9
11	电源频率/Hz	50.0
12	电源加载位置	1、2 端口之间

在上述基础上，本文在对电缆缓冲层烧蚀缺陷

进行设置时，具体的设置方式如图3所示。

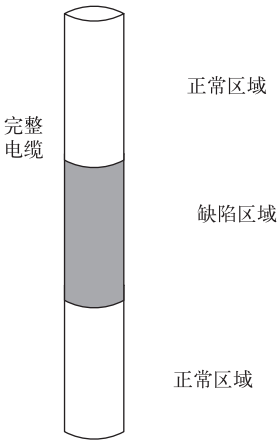


图3 电缆缓冲层烧蚀缺陷设置方式示意图

按照图3所示的方式实现对电缆缓冲层烧蚀缺陷的设置后，本文在具体的测试过程中设置了对比测试环境。其中，参与测试的对照组分别为文献[6]提出的以反射系数与核函数为基础的电缆缺陷定位方法，以文献[7]提出的以调频连续波相位敏感特性为基础的电缆局部缺陷定位方法。

2. 测试结果与分析

在对不同方法的测试结果进行分析时，本文分别将定位的准确性，定位的效率以及定位方法的适用性作为评价指标。

其中，对于定位准确性的分析，本文设置具体的缺陷位置为4.5~6.1 m区段，以电缆宽频阻抗谱的幅值频谱为基准，对不同方法的定位结果进行分析，具体如图4所示。

结合图4所示的测试结果对三种方法的电缆缓冲层烧蚀缺陷位置定位效果进行分析，其中，反射系数与核函数定位方法对于缺陷位置的定位误差较为明显，显示的缺陷区段为4.8~5.7 m范围。其中，起始端与实际缺陷位置的差异为0.3 m，终止端与实际缺陷位置的差异为0.4 m，整体缺陷区段的定位结果与实际缺陷区段相比，误差达到0.7 m。在调频连续波相位敏感特性定位方法的测试结果中，对于电缆缓冲层烧蚀缺陷位置定位与实际情况的一致，但是通过电缆宽频阻抗谱的幅值频谱状态可以看出，其波动程度与反射系数与核函数定位方法相比明显偏低，这就意味着当实际电缆缓冲层烧蚀缺陷程度较低时，其存在无法有效定位的可能性。相比之下，在本文设计定位方法的测试结果中，对于缺陷

位置的定位结果为4.5~6.1 m区段，与设置值完全一致，且对应的电缆宽频阻抗谱的幅值频谱状态反馈明显，能够有效定位。

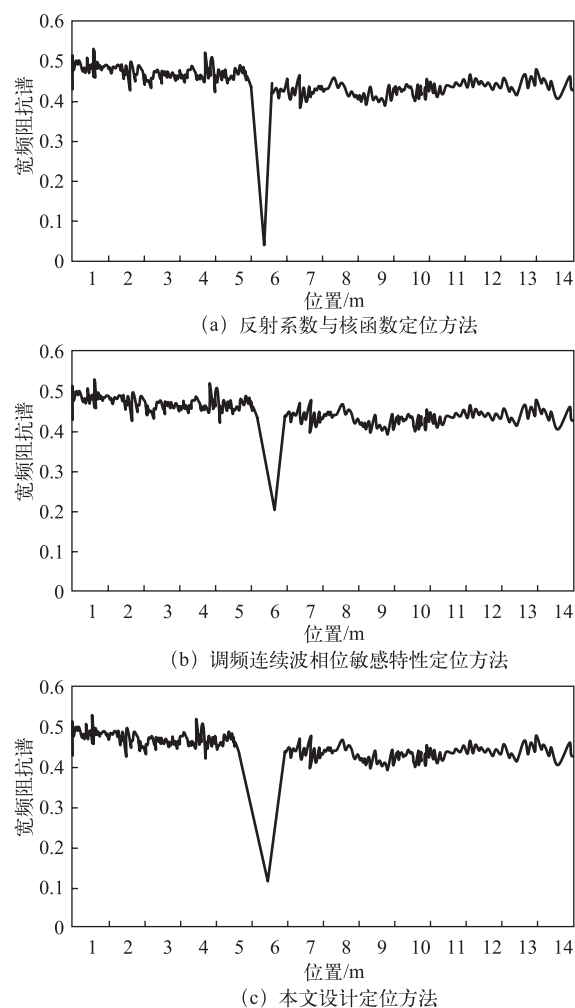


图4 不同方法定位精确性对比图

对于定位效率的分析，本文对比分析了不同缺陷程度下，三种方法定位的时间开销，得到的数据结果见表3。

表3 不同方法定位效率对比表

(单位: min)

缺陷程度 (%)	反射系数与核函数定位方法	调频连续波相位敏感特性定位方法	本文设计定位方法
100	1.45	1.20	1.26
80	1.86	1.49	1.29
75	2.03	1.85	1.33
50	2.45	2.00	1.34
30	2.99	2.94	1.25
20	3.65	3.89	1.27
10	4.12	4.92	1.32

结合表3所示的测试结果对三种不同定位方法的效率进行分析可以看出，在反射系数与核函数定位方法下，对于缺陷位置的定位效率与电缆缓冲层烧蚀缺陷程度之间存在较为明显的线性相关关系，电缆缓冲层烧蚀缺陷程度越高，缺陷位置的定位效率越高，对应的时间开销越低，最小值仅为1.45 min（电缆缓冲层烧蚀缺陷程度为100%时）；相反地，电缆缓冲层烧蚀缺陷程度越低，缺陷位置的定位效率越低，对应的时间开销越高，最大值达到了4.12 min（电缆缓冲层烧蚀缺陷程度为100%时）。在调频连续波相位敏感特性定位方法的测试结果中，当电缆缓冲层烧蚀缺陷程度在50.0%及以上时，均可以在2.0 min以内完成对缺陷位置的定位，但是当电缆缓冲层烧蚀缺陷程度在50.0%以下时，对应的定位效率明显下降，最长时间达到了4.92 min。相比之下，在本文设计定位方法的测试结果中，对于电缆缓冲层烧蚀缺陷的定位效率与缺陷程度之间不存在直接相关，具体的时间开销始终稳定在1.5 min以内，具有较高的效率。

对于定位方法适用性的分析，本文设置了不同的电缆缓冲层烧蚀缺陷状态（具体的自变量为缺陷数量），以此分析不同方法对于不同情景下的适用性。其中，具体的评价指标为综合定位误差，具体的计算方式可以表示为

$$\Delta = \sum |x_{i0} - x'_{i0}| + |x_{in} - x'_{in}| \quad (5)$$

式中， Δ 是综合定位误差； x_{i0} 是缺陷的起始位置； x'_{i0} 是定位方法输出的缺陷起始位置； x_{in} 是缺陷的终止位置； x'_{in} 是定位方法输出的缺陷终止位置。

以此为基础，不同定位方法的具体测试结果见表4。

表4 不同定位方法适用性对比表

(单位: m)

缺陷数量/段	反射系数与核函数定位方法	调频连续波相位敏感特性定位方法	本文设计定位方法
1	0.62	0.02	0
2	0.79	0.05	0
3	0.93	0.63	0.03
4	1.16	1.26	0.03
5	1.33	1.59	0.04

结合表4所示的测试结果对三种不同定位方法的适用性进行分析，其中，在反射系数与核函数定位方法下，对应的定位误差随着电缆缓冲层烧蚀缺陷

数量的增加呈现出稳定上升的发展趋势，对应的最大误差和最小误差分别为1.33 m和0.62 m。在调频连续波相位敏感特性定位方法下，当电缆缓冲层烧蚀缺陷数量低于2段时，综合定位误差始终稳定在0.05 m以内，但是当电缆缓冲层烧蚀缺陷数量达到3段以上时，综合定位误差最大值达到了1.59 m（电缆缓冲层烧蚀缺陷为5段时），对其具体的误差分布情况进行分析发现，其存在部分缺陷电缆区段未识别的情况。相比之下，在本文设计定位方法的测试结果中，电缆缓冲层烧蚀缺陷数量的增加并未对定位效果造成影响，对应的综合定位误差是稳定在0.05 m以内。

结束语

从电力安全保障和供电稳定性的角度出发，本文提出基于惯性特征重构与深度学习融合方法的电缆缓冲层烧蚀缺陷定位方法研究，在充分分析电缆缓冲层烧蚀缺陷情况下的反馈特征基础上，采用深度学习融合的方式实现对具体缺陷位置的确定，表现出较高的可靠性和适用性，并能够在效率上得到有效保障。借助本文对电缆缓冲层烧蚀缺陷定位的研究，希望能够为实际的电缆维护管理工作的开展提供有价值的参考，保障电力安全。EA

（收稿日期：2024-08-29）

参考文献

- [1] 纪晓妍，方春华，游海鑫. 基于多元非线性回归模型的220kV电缆油终端缺陷场强预测[J]. 智慧电力, 2023, 51(8): 96-103.
- [2] 祝贺，何峻旭，郑亚松，等. 电缆终端应力锥错位缺陷时界面温度及应力分布仿真研究[J/OL]. 电工技术学报, 2012, 7(38): 1-12.
- [3] 赵岩，郑书生. 基于损耗电流谐波特征分析的XLPE电缆局部尖刺缺陷诊断[J/OL]. 电工技术学报, 2023, 6(36): 1-14.
- [4] 张雨婷，李策，孔飞飞，等. 基于ZigBee的电缆接头压接缺陷监测系统[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(5): 87-90.
- [5] 张瑞祥，李欢，张延伟，等. 热老化对电缆接头中典型缺陷引发的电场畸变的影响[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2023, 39(2): 14-21.
- [6] 饶显杰，徐忠林，刘翔宇，等. 基于反射系数与核函数构建的新型电缆缺陷诊断方法[J/OL]. 电工技术学报, 2023, 8(5): 1-9.
- [7] 赵书静，詹博博，龚梁涛，等. 基于调频连续波相位敏感特性的电缆局部缺陷检测方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(11): 3009-3021.
- [8] 杨森，陈璐，李光茂，等. 一起干式配电变压器接线端子烧蚀缺陷分析[J]. 变压器, 2023, 60(1): 53-58.
- [9] 何维晟，吴照国，邓帮飞，等. 高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声检测技术仿真研究[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 230-237+260.
- [10] 王蔚言，付前刚，胡逗，等. C/C复合材料表面SiC-ZrB₂涂层的缺陷修复与抗烧蚀性能[J]. 中国表面工程, 2022, 35(6): 214-221.
- [11] 刘凤莲，夏荣，李文杰，等. 高压交联电缆缓冲层烧蚀缺陷检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 259-266+274.
- [12] 刘顺满，王健，程皓，等. 高压XLPE电缆缓冲层烧蚀缺陷特征气体分析[J]. 广东电力, 2022, 35(6): 116-125.
- [13] 刘维可，谢亿，刘三伟，等. 高压电缆阻水缓冲层烧蚀缺陷的射线检测工艺参数研究[J]. 电线电缆, 2021(2): 28-32.

