

架空输电线路施工作业中绝缘缺陷放电风险预警方法

顾 宝

(宁夏送变电工程有限公司)

摘要: 在架空输电线路的施工作业中,会受到各种复杂的环境因素的影响,例如天气变化、温度变化、湿度等。这些环境因素可能导致放电特征的变化,并增加了对真实放电信号与环境噪声进行准确区分的难度。为此,研究新的架空输电线路施工作业中绝缘缺陷放电风险预警方法。利用输电线缺陷放电信号的梯度值和温度特征数据来获取缺陷放电的位置。利用 EMD 方法分解缺陷放电信号,提取绝缘层缺陷放电信号瞬态响应特征。结合电晕信号和放电脉冲行为,构建架空输电线路施工作业中绝缘层缺陷放电风险预警模型。实验结果显示,本文方法的放电位置定位结果与实际情况一致,输电线缺陷放电预警精度更高,始终保持在 0.97 以上。

关键词: 架空输电线路; 施工作业; 绝缘缺陷; 放电风险; 预警方法

0 引言

在架空输电线路施工作业中,绝缘缺陷是一种常见的隐患。绝缘缺陷可能由于材料老化、物理损伤、设备故障等原因而产生,并且会导致电场强度集中和放电现象的发生。这些放电现象可能引发电力系统的故障甚至事故,对人身安全和设备运行稳定性产生严重影响^[1]。为了提高架空输电线路施工安全性以及预防潜在的放电风险,研究绝缘缺陷放电风险预警成为一个重要课题和挑战。通过准确预测和识别绝缘缺陷放电的风险,可以实施有效的控制和安全措施,保障架空输电线路的施工质量和人员安全。

文献 [2] 研究一种基于改进 XGBoost 算法的 XLPE 电缆局部放电模式识别方法。但是, XGBoost 算法对

输入数据具有一定的限制,需要将数据转换为数组形式,并且对缺失数据的处理相对较弱。文献 [3] 研究一种基于深度学习融合的高压电缆局部放电诊断算法。虽然深度学习算法在许多领域取得了显著成就,但也存在着一些缺点。首先,深度学习算法通常需要大量的数据进行训练,因此对于数据集较小的问题可能不太适用。其次,深度学习算法对于超参数的选择较为敏感,不同的超参数组合可能会导致不同的模型性能,需要进行耗时的调参过程。该研究旨在探索先进的检测和诊断技术,开发高效的预测模型和算法,以实现绝缘缺陷放电风险的实时监测和准确预警。通过提供可靠的预警系统和控制策略,可以大大降低架空输电线路施工作业中的放电风险,保障电力系统的

稳定运行和施工人员的安全。

1 输电线绝缘缺陷放电风险预警

1.1 输电线缺陷放电定位

在架空输电线路施工作业中，绝缘缺陷放电风险预警的一个重要环节是对输电线缺陷放电位置进行定位。这是因为准确确定缺陷放电的位置，可以帮助施工人员更好地了解故障的具体情况，并采取精确的控制和修复措施，以有效降低风险并保障施工安全^[4]。首先，定位缺陷放电的位置可以帮助识别存在问题的具体区域，而不是盲目地进行整体的修复或检查。通过精确定位放电位置，可以准确判断缺陷的类型、大小和所处位置，从而有针对性地采取相应的处理方案，提高维修的效率和准确性。其次，精确定位缺陷放电位置还可以预测和评估潜在的风险和危害。根据缺陷放电的位置，可以推断出其导致的电场强度分布情况，确定可能引发的放电等级和紧迫程度。这有助于施工人员及时采取必要的安全措施，防止潜在的故障或事故发生，并保证施工作业的顺利进行。

本节利用输电线缺陷放电信号的梯度值和温度特征数据来获取缺陷放电的位置。其中，梯度值可用于确定放电信号的变化趋势和强度分布，而温度特征数据则可以提供额外的信息来辅助定位。首先，通过计算缺陷放电信号的梯度值，可以获得信号变化的速率和斜率等相关信息。放电信号的梯度值通常表现为峰值或波峰，并且随着距离放电源的远离而逐渐减小。通过分析梯度值的变化情况，可以推测出放电源的大致位置，进而确定缺陷放电的位置。另外，温度特征数据也能提供有关缺陷放电位置的线索。由于放电过程产生的局部高温效应，温度变化在缺陷放电的附近通常较为明显。通过对输电线周围的温度进行监测和分析，可以发现异常的热点区域，并进一步确定缺陷放电的位置。综合利用梯度值和温度特征数据，可以

有效地获取缺陷放电的位置。通过分析放电信号的梯度值，结合温度数据的辅助判断，可以精确定位缺陷放电的区域。这为后续的施工修复和维护工作提供重要依据，帮助实施准确的修复措施，并减少对输电线路正常运行的影响。

利用电磁波角频率 u 和灰度重映射系数 \aleph ，计算输电线缺陷放电信号梯度值如下式所示：

$$\aleph = u\sqrt{B/\aleph} \quad (1)$$

式中， B 为梯度初始系数。

假定输电线疑似缺陷放电范围的温度数据以 T 标注，则缺陷放电部位的温度梯度特征数据可表示为：

$$T' = T \frac{\aleph}{C_T} \quad (2)$$

式中， C_T 为环境温度数据集。

基于此计算缺陷放电位置到输电线测试端的实际距离为：

$$D = T' \times \eta(d) / \aleph \quad (3)$$

式中， $\eta(d)$ 为温度梯度变化高斯窗函数； \aleph 为每单位距离的温度变化系数。

根据计算得到的距离数据，即可判断出输电线缺陷具体位置。

1.2 绝缘层缺陷放电信号瞬态响应特征提取

瞬态响应特征能够反映放电事件的瞬间性质和动态变化，为准确识别和评估风险提供关键信息。缺陷放电信号的瞬态响应特征能够提供放电事件的频率、幅值、持续时间等关键指标。通过分析这些特征，可以了解放电行为的特点和严重程度，判断是否存在高风险的放电情况。例如，高频放电事件可能表示严重的绝缘损坏，需要及时采取措施防止进一步故障的发生。瞬态响应特征还能提供更详细的放电信号波形信息，包括放电的上升时间、下降时间以及脉冲宽度等参数。这些特征可以帮助确定放电源的位置和类型，如局部放电或表面放电，并提供放电形态的图像化描述。通过对这些特征进行分析，可以定位缺陷放电的

具体位置，并辅助后续的修复和维护工作。瞬态响应特征还对放电事件的动态变化具有敏感性。通过连续监测和提取信号的变化特征，可以实时跟踪放电活动的演变和趋势，及时发现异常情况并预警潜在风险。这有助于实施及时、精确的控制措施，防止故障扩大和事故发生。利用 EMD 方法提取架空输电线路绝缘层缺陷放电信号波形特征中的瞬态响应特征。EMD 方法是信号处理方法中的重要方法，EMD 方法可以将信号分解为独立成分，更加有利于缺陷放电信号的分析。EMD 方法无需基函数即可实现信号处理，具有较高的自适应性。EMD 方法依据信号的时间尺度特征，将缺陷放电信号分解为多个本征模态分量 IMF 分量。

利用 EMD 方法对解析后缺陷放电信号 $f(t)$ 进行分解的表达式如下：

$$f(t) = \sum_{j=1}^n G_j(t) + H_j(t) \quad (4)$$

式中， $G_j(t)$ 与 $H_j(t)$ 分别为第 j 个 IMF 分量以及完成各 IMF 分量提取后的余量。

利用 EMD 方法提取架空输电线路绝缘层缺陷放电信号瞬态响应特征的流程图如图 1 所示。

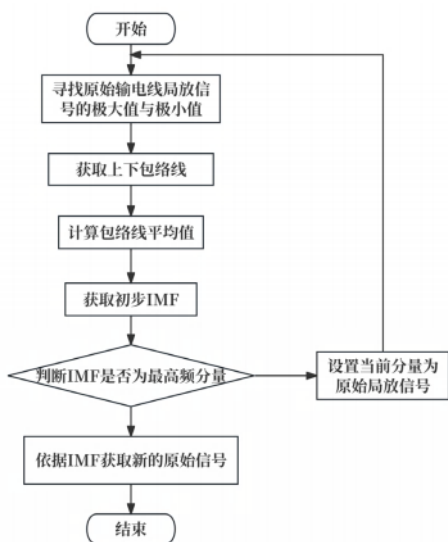


图 1 瞬态响应特征提取流程图

2 架空输电线路施工作业中绝缘层缺陷放电风险预警方法设计

在提取出瞬态响应特征后，利用该特征，结合电晕信号和放电脉冲行为，构建架空输电线路施工作业中绝缘层缺陷放电风险预警模型。电晕信号是指导线周围空气中发生电晕放电过程中产生的高频信号。通过监测和分析电晕信号的频谱特征和幅值变化，可以探测到绝缘层缺陷附近存在的放电活动，从而起到预警的作用。放电脉冲行为是指绝缘层缺陷放电过程中的瞬态行为，如放电幅值、放电时延等。通过对放电脉冲行为的监测和分析，可以判断缺陷的性质和严重程度，并将其作为预测绝缘层缺陷放电风险的关键参数。结合电晕信号和放电脉冲行为，可以建立绝缘层缺陷放电风险预警模型。该模型通常采用机器学习、统计分析等方法，根据历史数据和监测结果，通过训练和优化，建立预测模型并进行实时预测。预警模型可以对绝缘层缺陷放电风险进行分类和评估，并给出相应的预警级别和建议措施，以指导施工人员采取相应的防范和处置措施。

电晕信号用下式表达式：

$$\delta = E[G_j(t) + H_j(t)] \sqrt{\chi \frac{\gamma}{\lambda}} \quad (5)$$

式中， E 为绝缘层电晕信号的实时放电强度； χ 为电晕信号的传输方向定义系数； γ 为基于深度学习模型的信号串描述参数； λ 为放电行为预警特征。

绝缘层脉冲描述了架空输电线路施工作业中绝缘层缺陷放电风险行为在单位预警周期内的表现强度，其取值越大，表示电晕信号的放电能力越强。

设 d_1 、 d_2 、...、 d_n 表示 n 个不相等也不为零的放电脉冲行为向量，其定义式如下：

$$\begin{cases} d_1 = K_1 \times |\Delta\delta| \\ d_2 = K_2 \times |\Delta\delta| \\ \vdots \\ d_n = K_n \times |\Delta\delta| \end{cases} \quad (6)$$

式中, K_1 、 K_2 、...、 K_n 分别为与脉冲行为向量匹配的绝缘层电量信号输出等级参量。

构建架空输电线路施工作业中绝缘层缺陷放电风险预警模型为:

$$\eta = \exp\left(-\frac{\|e - L\mu\|^2}{d_n^2}\right) \quad (7)$$

式中, e 为缺陷放电风险情况下的电量场强值; L 为电感参数; μ 为缺陷放电风险的行为等级。

3 实验设计与结果分析

为对比验证不同方法的输电线绝缘放电风险预警的效果, 本文设计一次验证实验如下。文献 [4] 方法和文献 [5] 方法为对比方法, 将其测试结果与本文方法的应用结果进行比较。本文选用的架空输电线路施工作业中输电线结构与尺寸如图 2 所示。

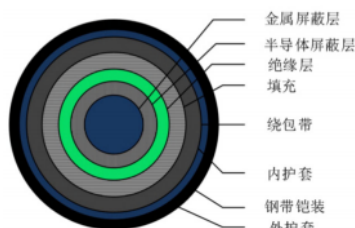


图 2 输电线结构与尺寸情况

在上述输电线上人为设置 5 处缺陷使其发生放电故障。位置信息如表 1 所示。

表 1 缺陷放电定位结果

编号	预设缺陷放电位置/m	本文方法	文献[4]方法	文献[5]方法
		定位位置/m	定位位置/m	定位位置/m
1#	12~12.11	12.10	13.21	13.52
2#	15~15.21	15.20	15.89	16.21
3#	16~16.11	16.10	16.97	17.55
4#	17~17.21	17.20	19.52	18.07
5#	18~18.23	18.22	20.33	19.65

由表 1 所示的实际缺陷放电位置与本文方法的放电位置定位结果一致性更高, 说明研究方法能够更准

确地定位出输电线缺陷放电风险位置。本文方法通过分析输电线缺陷放电信号的梯度值, 即放电信号的变化率以及温度特征数据来获取缺陷放电的位置。由于缺陷放电会导致放电信号的异常变化, 通过分析梯度值可以准确地定位放电位置。同时, 温度特征数据可以提供额外的信息来补充对放电位置的定位。因此, 结合这些特征能够准确地确定缺陷放电的位置。

为突出本文方法在输电线缺陷放电预警精度方面的准确性, 利用研究方法、文献 [4] 方法和文献 [5] 方法分别对实验中的输电线缺陷放电风险完成 700 次预警, 统计预警精度数据, 具体结果如图 3 所示。

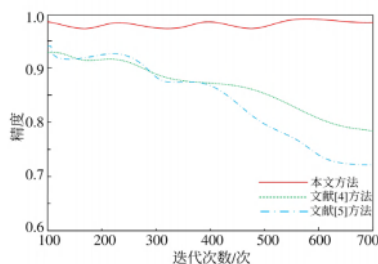


图 3 不同方法的输电线缺陷放电预警精度对比

如图 3 所示, 在 700 次的迭代预警中, 本文方法的输电线缺陷放电预警精度明显高于文献方法, 且精度更稳定, 始终保持在 0.97 以上。本文方法关注绝缘层缺陷放电的瞬态响应特征, 以及电晕信号和放电脉冲行为。这些特征能够有效地反映缺陷放电的实际行为, 有助于更准确地预警缺陷放电风险。

4 结束语

本研究针对架空输电线路施工作业中绝缘缺陷放电风险预警问题, 提出了一种新的方法。通过利用输电线缺陷放电信号的梯度值和温度特征数据, 结合 EMD 方法对缺陷放电信号进行分解, 提取绝缘层缺陷放电信号的瞬态响应特征。同时, 结合电晕信号和放电脉冲行为, 构建了针对架空输电线路施工作业中

(下转第 66 页)

(上接第 61 页)

绝缘层缺陷放电风险的预警模型。虽然该研究取得了较好的结果，但仍然存在改进空间。未来的研究可以进一步优化算法，提高预警模型的性能和鲁棒性。此外，还可以考虑结合其他的监测技术和方法，如红外热像检测等，进一步提升绝缘缺陷放电风险预警的准确性和可靠性。

参考文献

[1] 孙宇微, 吕安强, 谢志远. 电缆及其附件局部放电超声波检测技术研究进展 [J]. 电工电能新技术, 2022, 41 (9): 47-57.

[2] 刘维功, 王昊展, 时振堂, 等. 基于改进 XGBoost 算法的 XLPE 电缆局部放电模式识别研究 [J]. 电测与仪表, 2022, 59 (4): 98-106.

[3] 杨朝锋, 王敏, 赵胜男, 等. 基于深度学习融合的高压电缆局部放电诊断算法研究 [J]. 高压电器, 2023, 59 (11): 65-73.

[4] 吴昊, 王东山. 基于变分模态分解和凹凸型阈值小波的电缆局部放电信号降噪方法 [J]. 现代电力, 2022, 39 (5): 579-586.

(收稿日期: 2024-02-02)