

基于多重分形谱的交流输电线路运行故障识别方法

朱凌¹, 李国强², 刘琦¹, 周华敏²

(1. 广东电网有限责任公司, 广东 广州 510000;

2. 广东电网有限责任公司机巡管理中心, 广东 广州 510000)

摘要: 人工方法在检查输电线路是否存在运行故障时工作量极大, 且极易造成人员伤亡, 因此基于多重分形谱设计交流输电线路运行故障识别方法。通过均值滤波算法处理像素值, 去除交流输电线路图像中的噪声; 采用多重分形理论提取去噪后的交流输电线路图像特征; 最后, 根据图像特征提取结果, 计算故障节点之间的欧氏距离, 通过最小距离判别函数判断节点是否发生故障, 建立交流输电线路运行故障分类识别模型。实验结果表明, 该方法可以完成交流输电线路运行故障的识别工作, 与其他方法相比, 故障节点吻合, 能够准确识别交流输电线路中的故障节点。

关键词: 多重分形谱; 交流输电线路; 故障识别

中图分类号: TP206⁺.3:TM85 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)02-0044-05

Operation Fault Identification Method of AC Transmission Line Based on Multifractal Spectrum

ZHU Ling¹, LI Guo-qiang², LIU Qi¹, ZHOU Hua-min²

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000 China;

2. Machine Patrol Management Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000 China)

Abstract: The manual method has a huge workload when checking whether the transmission line has operational faults, and it is very easy to cause casualties. Therefore, based on the multifractal spectrum, the operation fault identification method of the AC transmission line is designed. The pixel value is processed by the mean filtering algorithm, and the noise in the AC transmission line image is removed. The multifractal theory is used to extract the denoised AC Transmission line image features. According to the results of image feature extraction, the Euclidean distance between faulty nodes is calculated, the minimum distance discriminant function is used to determine whether the node is faulty, and the AC transmission line operation fault classification and recognition model is established. The results show that this method can complete the operation fault identification of AC transmission lines. Compared with others, the fault nodes are consistent, so this method can accurately identify the fault nodes in AC transmission lines.

Keywords: multifractal spectrum; AC transmission line; fault identification

0 引言

绝缘子是交流输电线路中的主要组成结构, 由于输电线路长期暴露于大自然中, 遭受雨、雪、大风等天气的破坏, 而且北方地区冬季极为寒冷, 极低的温度也会对绝缘子造成破坏, 造成输电线路发生故障。为保证输电线路的工作能力, 就需要及时寻找到已经损坏或即将损坏的绝缘子。然而输电线路的长度以及高度, 使得人工检查的方式不仅危险, 且工作量极大。因此对于输电线路运行故障的机器识别技术就成为了图像识别领域的一项重要课题。

关于输电线路故障检测的研究早在上世纪50年代就开始展开了, 在上世纪70年代, 日本在该方面取得突破性成果, 在上世纪80年代日本东京电气公司研究出了基于

变压器的放电自动检测仪, 用于输电线路的故障检测, 目前大部分的欧美国家均采用智能传感器技术和通信技术实现电网故障的实时检测。我国从事该方面的研究较晚, 但也有一定的研究成果。在以往的研究中, 孙黎霞^[1]等人研究了基于双向长短期记忆网络的电力系统暂态稳定评估方法, 主要利用数字仿真模型获取系统的故障信号, 并通过双向长短期记忆网络识别电流数据, 又通过预处理将数据传输至隐含层不断优化提高评估的准确率, 这种故障识别方法可获得较好的识别效果, 但其计算较为复杂, 响应时间较长。缪希仁^[2]等人研究了基于深度卷积神经网络的输电线路防鸟刺部件识别与故障检测方法, 即先利用滤波器功率放大电力图像的锐化结构, 然后使用多尺度训练的特征提取进行识别准确率的计算, 该方法可较好地完成输电线路中一些相关部位的图像识

别,但其存在一定局限性,用户并发数不足,对图像的识别效率较差。杨杰^[3]等人突出提出了基于电路故障分量特征和随机森林的输电线路故障类别识别,通过三相电流的能量计算,将所有特征样本排序,以此表征故障类型,这种方法对数据的完整性要求不高,可在噪声的影响下识别出线路的故障节点,但其也存在响应时间较长的问题。鉴于上述方法的不足,本文提出基于多重分形谱的交流输电线路运行故障识别方法,该方法能够通过摄影图像准确识别交流输电线路运行故障。

1 基于多重分形谱设计交流输电线路运行故障识别方法

1.1 交流输电线路图像噪声去除

通过摄像机拍摄得到的图像通常有较大的噪声,会干扰图像编辑与计算的准确性,因此在识别图像中的故障点前,需要去除交流输电线路运行图像中的噪声。通过均值滤波法得到的像素值可以代替原始图像中的像素值,使领域 R_i 得到一个 $N_a \times N_b$ 的正方形图像,此时像素点的数量表示为 $N_a \times N_b$ ^[4]。此时,如果将像素值平滑为一个等式,则可以得到:

$$\hat{H}(a,b) = \frac{1}{N_a \times N_b} \sum_{a,b \in R_i} H(a,b) \quad (1)$$

式中, $\hat{H}(a,b)$ 表示经过平滑处理后的像素值数量; $H(a,b)$ 表示平滑处理前的像素值数量; N_a 和 N_b 则表示方形窗口的长度单位。

这种低通滤波的近似值通常可以用来表示领域均值定理^[5]。在多重分形理念中,想要消除图像噪声,可以将多重分形谱 $g(\alpha_n)$ 作为图像的全局信息提供者,此时的信息有着不同等级的奇异度,对于 $\alpha_n \sim g(\alpha_n)$ 而言,可将一部分图像经过小波变换,作为小波系数 f_i^k 的尺度参数,其中 i 表示小比例的位置参数^[6]。继续调整 α_n 的参数值,可以将多重分形系数 $g(\alpha_n)$ 更接近 $g_{\max}(\alpha_n)$,如此一来, $g(\alpha_n)$ 就会变成变换后的 $g(\zeta_n)$,此时可得到多重分形谱的定义式为:

$$g(\alpha_n) = \zeta \{ g(\alpha_n) \} = g(\alpha_n + \alpha_0 - 1) \quad (2)$$

式中, α_0 表示 α_n 的最小值。在变换了小波系数的性质之后, f_i^k 就会趋近于正无穷。因此结合二维微局域分析理论,可以得到小波系数的调整方法,即令:

$$\hat{f}_i^k = f_i^k \cdot 2^{-pk} \quad (3)$$

式中, \hat{f}_i^k 表示经过二维微局域理论变换后的小波系数尺度参数; 2^{-pk} 可以作为视觉判定的最佳估计系数。

将式(3)带入到去噪算法中,减少图像中不必要的干扰,获取更清晰的图像。

1.2 基于多重分形理论的图像特征提取

根据上述操作去除噪声后的交流输电线路图像,采

用多重分形理论提取图像特征。在应用多重分形理论之前,需要测度多重分形的几何空间,假设 σ_h 是 h 维欧式空间的一部分,可以将每部分尺度划分为有限的测度单元 $(X-\mu_x)$, 并定义单元之间的子集集合 $\{G_i\}$, 这个 h 维的测度集合可以定义为:

$$\eta^h(X \sim \mu_x) = \lim_{h \rightarrow \infty} \eta_f^h(X \sim \mu_x) \quad (4)$$

式中, $\eta^h(X-\mu_x)$ 表示临界函数的多重分形谱特征值; $\eta^h(X-\mu_x)$ 则表示在第 h 维多重分形谱特征值。在子集的分形中,可以直接得到一个区间的维度定义:

$$g(\zeta_n) = \text{ing} \left\{ w \left| \liminf_{h \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n (hauG_i)^f = 0 \right. \right\} \quad (5)$$

式中, $(hauG_i)^f$ 表示在第 f 维的奇异谱中,临界指数的尺寸单元概率。因此在引入广义的维数矩阵后,可以得到广义维数的特征值:

$$K(w_n) = \begin{cases} \frac{1}{w_n - 1} \lim_{w \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^n k_i^h(w_n)}{\ln w_n}, w_n \neq 1 \\ \lim_{w \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^m k_i^h(w_n) \ln k_i^h(w_n)}{\ln w_n}, w_n = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中, w_n 表示 n 乘导数的阶矩参数; $K(w_n)$ 则表示这种阶矩参数的广义维数; k_i^h 表示在第 h 阶矩阵中的第 i 个分量。通过公式(6)可以得到质量指数的灰度图像特征参量,在不规则 $M_a \times N_b$ 的阶灰度图像中,可以让 $H(a,b)$ 代表该灰度图像的像素值,则像素点之间的平方和表示为:

$$G(a,b) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u(a,b) \times g(a,b)}{m_a \times n_b} \quad (7)$$

$$u(a,b) = \frac{1}{(a-x)^2 + (b+y)^2} \quad (8)$$

式中, $G(a,b)$ 表示质量指数覆盖图像的中心灰度值参数; $g(a,b)$ 表示所有被不规则图形覆盖的灰度值参数; $u(a,b)$ 表示中心点的坐标值,可以通过式(8)计算得到。此时对多重分形谱下去噪后的交流输电线路图像特征提取,可以通过式(9)获得。

$$\gamma(w_n) = \frac{\ln \left[\sum_{i=1}^n f_i^k(w_n) \right]}{\ln f} \quad (9)$$

式中, $\gamma(w_n)$ 表示多重分形谱中图像特征提取理论上的概率子集^[7]。

通过以上公式,可直接得到交流输电线路的摄影图像关于运行故障节点的特征值,可通过特殊的方法解读这类特征值,获取故障的具体位置。

1.3 交流输电线路运行故障识别模型构建

在以上被提取了特征值的图像样本中,可以计算特

征向量 D_n 到各类故障节点的欧氏距离,通过欧氏距离将这些图像分类处理^[8-9]。假设在被提取的图像样本中,有 n 幅图像,其中被多重分形谱提取的谱长 W_x 与谱宽 W_y ,可分别计算其方差 T_x^2 和 T_y^2 ,则在求解这两个方差的过程中,可以使用式(10)。

$$\begin{cases} T_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (W_x - W_n)^2}{n} \\ T_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (W_y - W_n)^2}{n} \end{cases} \quad (10)$$

式中, W_n 可以直接表示为谱长 W_x 与谱宽 W_y 在 n 个样本下的均值,则最小距离判别函数的表达式为:

$$|d_m - W_{x,y}| = \sqrt{\frac{(d_x - W_x)^2}{(d_y + W_y)}} \quad (11)$$

式中, d_m 表示在欧氏距离计算的过程中,被识别的图像与其特征值之间的距离; d_x 表示 x 轴到特征函数的欧氏距离; d_y 表示 y 轴到特征函数的欧氏距离。

根据这一类决策,可直接判定图像中某节点的类型,即判断该节点是否已发生故障。则交流输电线路运行故障分类识别模型构建的表达式为:

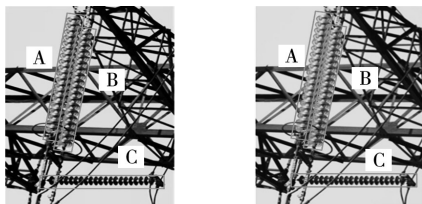
$$W_{x,y}^i = \frac{(W_x + W_y)^2}{D_{x,y}} \quad (12)$$

式中, $W_{x,y}^i$ 表示交流输电线路运行故障分类识别结果; $D_{x,y}$ 表示正在被识别的图像在 x 轴与 y 轴中的识别向量。

2 实验分析

为检测文中设计的输电线路运行故障识别方法,设计仿真实验,综合判断文中方法的识别效果。输电线路的故障主要分为绝缘子串故障以及线路故障两大类,线路故障又可分为短路故障、断线故障等,本实验主要对输电线路运行中的障碍识别。

2.1 输电线路图像采集与预处理



(a) 原始图像 (b) 灰度图像
图1 图像灰度效果

在实验中,采集输电线路不同故障的图像样本共100张,其中50张作为训练样本,剩余50张作为测试样本。先对图像进行预处理,获取的某运行故障的交流输电线路初始图像如图1(a)所示,在Matlab的环境下进行图像

的预处理,如图1(b)所示,将其转化为 256×256 格式的灰度图像,以减少图像特征中的杂乱信息。

如图1所示为输电线路故障中的绝缘子故障图像,以此为例进行方法的实用性实验。图中红色的方框内是高压输电线路中的绝缘子串,要想通过图像识别更准确地得到故障检测结果,需要去除图像中噪声的干扰。设图1(b)中灰度像素点为 (a, b) ,则在模板中的去噪处理中,将均值的目标像素点代替该图像上的像素点,即:

$$h(a, b) = \frac{\sum t(a, b)}{D_a \times D_b} \quad (13)$$

式中, $h(a, b)$ 表示经过去噪处理后的像素点坐标; $t(a, b)$ 表示原本图像中的灰度像素点坐标, $\sum t(a, b)$ 则表示所有像素值的和; D_a 和 D_b 表示以目标像素为中心的正方形在 a, b 两个方向的边长。

该公式可使该像素点代替原有的像素点,从而实现输电线路图像的降噪。

2.2 提取图像多重分形谱特征值

通常情况下,可通过多重分形谱 α_n 的平均值进行估计,得到分形集的近似值,公式为:

$$\alpha_n(p) = \lim_{\phi \rightarrow 0} \frac{\ln p_i}{\ln u_i} \quad (14)$$

式中, $\alpha_n(p)$ 表示绝缘子串中第 p 个绝缘子的多重分形谱估计值; p_i 表示第 i 块区域内线形的生成概率; u_i 表示第 i 个标度指数。通过式(14)可以计算多重分形谱的表达式:

$$g(\alpha_n) = p_x \cdot \alpha_n(p) - \frac{\ln m_q}{\ln u_q} \quad (15)$$

式中, p_x 表示配分函数的阶乘; m_q 表示理论上的子集求和概率; u_q 表示无标度分区内的幂律关系。

在给出多重分形谱曲线的 $g(\alpha_n)$ 特征值后,可将 $g(\alpha_n) > 0$ 的奇异指数记为最大值 $\alpha_{n, \max}^n$, 将 $g(\alpha_n) < 0$ 的奇异指数记为最小值 $\alpha_{n, \min}^n$, 与估计值相对应的是特征值的最大值 $g_{\max}(\alpha_n)$ 和最小值 $g_{\min}(\alpha_n)$ 。

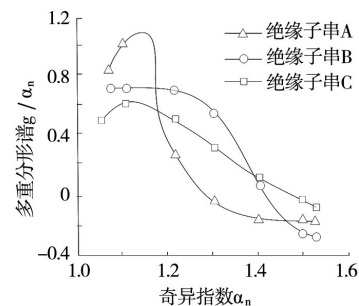


图2 多重分形谱曲线

计算图1中的三个绝缘子串的多重分形谱曲线,使用Matlab编写多重分形谱的计算程序,得到多重分形谱 $\alpha_n \sim g(\alpha_n)$ 的曲线如图2所示。

在绝缘子串A中,当奇异指数为1.085时多重分形谱参数约为0.814,奇异指数为1.538时,多重分形谱参数约为-0.176。在绝缘子串B中,奇异指数为1.091时多重分形谱参数约为0.723,奇异指数为1.541时多重分形谱参数约为-0.293。在绝缘子串C中,奇异指数最小为1.065,最大为1.536,此时对应的多重分形谱参数分别为0.488和-0.096。由以上数据可知,在三个绝缘子串中,三个绝缘子串在提取图像多重分形谱特征值时,都呈现出“钩形”,这表明多重分形谱的分形特征相对较为显著。其中 α_{\min}^n 均小于 α_{\max}^n ,且二者均大于0, $g_{\min}(\alpha_n)$ 均大于 $g_{\max}(\alpha_n)$,

$g_{\min}(\alpha_n)$ 均小于0。由此可见,多重分形谱可完成对交流输电线路运行故障的识别。

2.3 故障识别测试

在实际的输电线路故障检测中,可以通过人工的方式寻找故障位置,利用多重分形谱方法识别故障节点,将二者综合对比分析。选取10个区域利用本文方法进行多重分层图谱特征提取,如图3所示。

通过图3可以看出,本文方法能够较好完成图谱特征提取,有利于后文的对应识别过程。下面用文献[6]的方式进行对比识别,对比结果如图4所示。

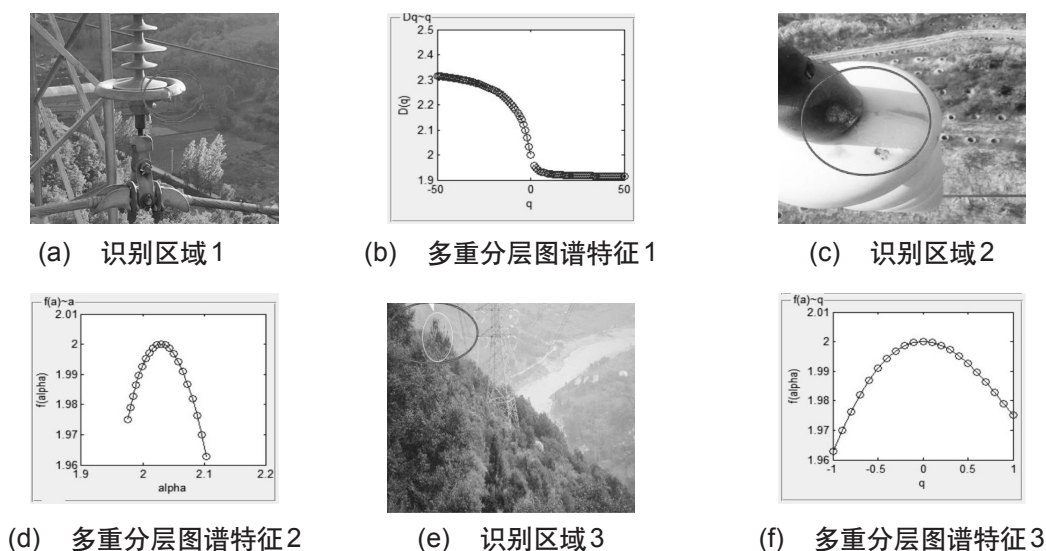


图3 故障区域对应的分形后曲线

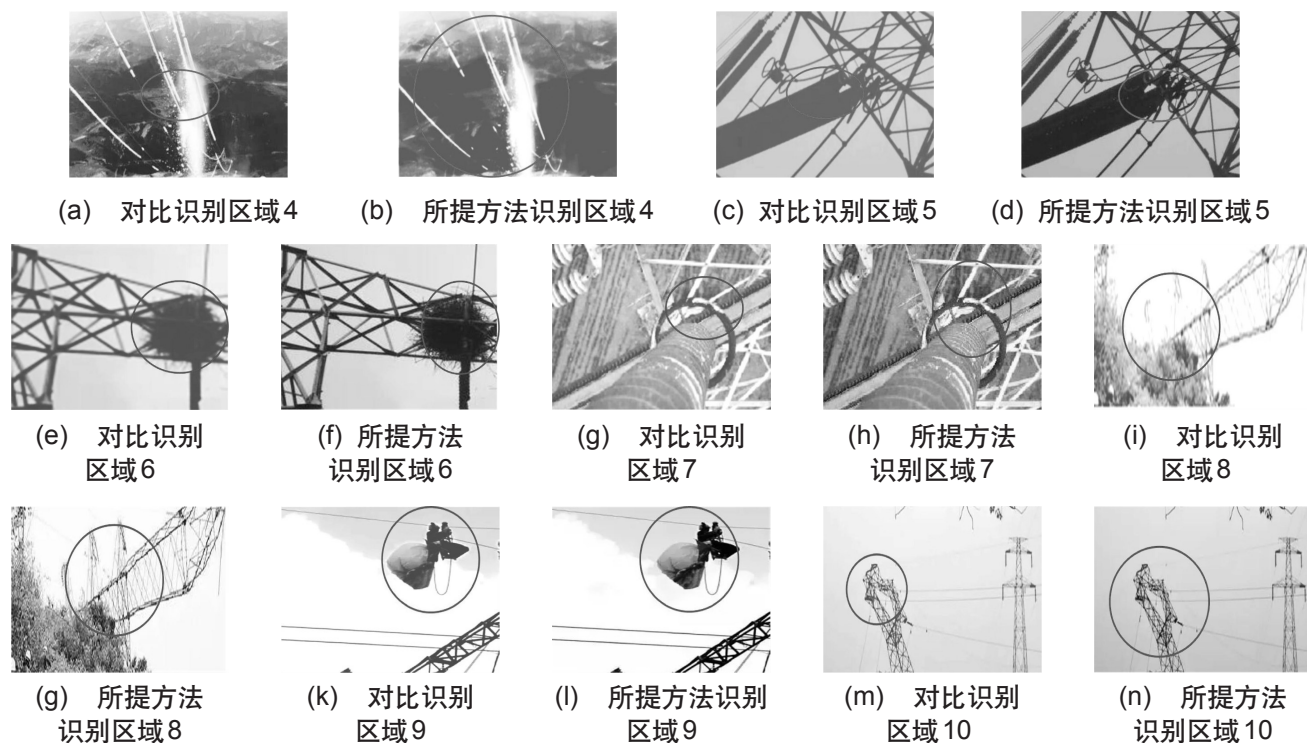


图4 输电线路故障识别

(下转第51页)