

基于聚类学习方法的新型电力系统重要输电通道 雷击故障特征分析研究

谷山强^{1,2,3,4}, 李健^{1,2,3,4}, 汤亮亮^{1,2,3,4}, 吴敏^{1,2,3,4}, 雷梦飞^{1,2,3,4}, 谢迎谱^{1,2,3,4}

(1. 南瑞集团有限公司, 江苏省 南京市 211106;

2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北省 武汉市 430206;

3. 国家能源雷电灾害监测预警与安全防护重点实验室, 湖北省 武汉市 430206;

4. 电网雷击风险预防湖北省重点实验室, 湖北省 武汉市 430206)

Analysis of Lightning Strike Fault Characteristics in Cluster Learning Method of New Power Systems

GU Shanqiang^{1,2,3,4}, LI Jian^{1,2,3,4}, TANG Liangliang^{1,2,3,4}, WU Min^{1,2,3,4}, LEI Mengfei^{1,2,3,4}, XIE Yingpu^{1,2,3,4}

(1. NARI Group Corporation Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu Province, China;

2. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430206, Hubei Province, China;

3. National Energy Key Laboratory of Lightning Disaster Detection, Early Warning and Safety Protection, Wuhan 430206,
Hubei Province, China;

4. Hubei Key Laboratory of Power Grid Lightning Risk Prevention, Wuhan 430206, Hubei Province, China)

ABSTRACT: With the development of ultra-high voltage power grid, the accuracy of tower wave impedance parameters is becoming increasingly important in tower design and analysis of lightning protection performance of large span transmission lines. This paper establishes the theoretical model of wave impedance of high tower, and the finite element electromagnetic field analysis of the split tower structure is carried out. The refined multi-wave impedance model of the tower is compared with the multi-wave impedance model obtained by the formula method, which verifies the effectiveness of finite element calculation of multi-wave impedance. The whole long-span transmission line's simulation model is built using the electromagnetic simulation software. The lightning withstand level and the lightning withstand level of the line are calculated. In this paper, the protection measures such as increasing the length of the insulator, modifying the protection angle of the lightning conductor, and the sag of ground wire are considered to improve the lightning withstand level of the large span line, and the safe operation years of the large span line before and after modification are calculated. Considering the coordination of insulator length and air gap, the insulator length is appropriately reduced to achieve the overall lightning withstand level of large span lines.

KEY WORDS: dense transmission lines; lightning strike fault factor; K-means cluster analysis; sigmoid function; simplified model

摘要: 随着新型电力系统迅速发展, 叠加全球气候变暖等背景, 导致新型电力系统面临雷电等极端灾害天气事件明显增多。重要输电通道是新型电力系统中大规模清洁能源电力外送的主要通道, 雷击故障频发已经严重威胁新型电力系统安全稳定运行。该文通过开展新型电力系统重要输电通道雷击故障特征研究和分析, 归纳雷击致灾因子和新型电力系统薄弱环节, 利用 K 均值(K-means)聚类数据驱动分析方法, 对雷击故障因子和雷击致灾机理进行分析。得到了雷电流幅值、保护角、地形地貌、海拔高度等 7 种主要因子, 选用 sigmoid 函数完成了对重要输电通道雷害形式进行拟合, 最终实现了对重要输电通道不同闪络形式完成判断, 同时, 建立了雷害简化模型, 数据模型验证表明, 该模型准确率高达 93.53%, 可以帮助现场运维人员准确判断何种雷击故障, 总结雷击故障和分析原因。

关键词: 重要输电通道; 雷击故障致灾因子; K-means 聚类分析; sigmoid 函数; 简化模型

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1157

0 引言

为积极应对气候变化等问题, 我国能源结构不断调整, 清洁能源占比逐渐增加。以风电、光伏发电等新能源为主体的新型电力系统得到了大力发展。然而, 随着全球气候不断变暖, 根据图 1 全球

雷电活动分布情况可知，雷电活动越来越频繁，雷电已经成为影响新型电力系统安全稳定运行的严重威胁之一。

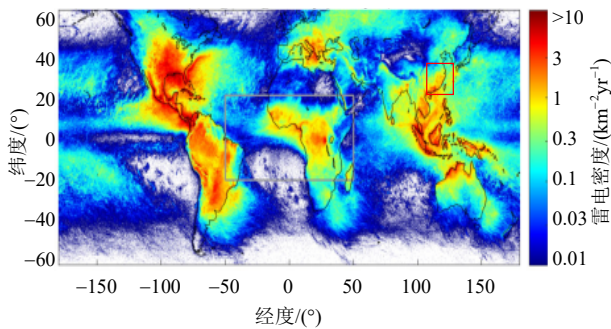


图1 全球雷电活动分布情况

Fig. 1 Global distribution of lightning activity

新型电力系统的迅速发展使得大规模新能源发电送出需要采用更多输电通道，受限于输电量需求和土地资源短缺，重要输电通道的出现就变得无可避免^[1]。所谓重要输电通道，即指输电走廊宽度限制在 600m 以内，且包含特高压或多重 500kV 及以上输电线路的区域。由于其狭窄的宽度和多种电压等级，出现了多线路并行、同塔多回路以及混压等复杂运行工况，相较于传统的单一输电线路通道，密集输电通道内的线路更容易遭受雷击。根据调研结果，雷击是造成输电线路和重要输电通道雷击跳闸的首要因素，在输电线路雷击跳闸预警与故障分析方面，有学者提出了如基于遗传算法和反向传播结合(genetic algorithm-backpropagation, GA-BP)的神经网络技术、泊松分布或微气象因素等雷击跳闸预警方法^[2-5]，也有学者针对输电线路某次雷击跳闸进行了反演与分析^[6-7]，上述研究对于输电线路雷击跳闸预警和故障分析提供了理论支撑；在输电线路雷击过电压与雷击故障识别方面，有学者提出了如基于多尺度广义 S 变换和深度残差网络、Logistic 回归模型或 Hilbert-Huang 变换等方法的雷击故障识别技术^[8-11]，也有学者提出了暂态波形特征或雷电行波时域特征的雷击过电压识别方法^[12-13]，上述研究为输电线路雷击故障识别也提供了广阔的思路。但对新型电力系统输电通道和重要输电通道雷击故障进行大量调研后发现^[14-18]，风电场和光伏电站存在着相似的雷击故障案例^[19-23]，即重要输电通道雷击跳闸故障在其成因和结果方面具有一定的相关性，如和地闪密度、海拔高度、绝缘强度等等因素相关^[24-30]，然而目前大量的雷击跳闸故障数据的分析结果并未应用于现场运维和检修分析。综上，随着新型电力系统遇到雷击故障的案例越来越多，亟需对大量的重要输电通道雷击故障数据开

展分析，以帮助现场运维人员准确判断雷击故障形式，寻找雷击故障原因，提升新型电力系统重要输电通道雷电防护效果。

本文通过对新型电力系统重要输电通道雷击故障进行总结和分析，利用相关性分析、K-means 聚类分析^[31]和回归分析等多种分析方法，确定重要输电通道雷击敏感致灾因子，并针对重要输电通道特殊场景，建立雷害简化模型，选取了雷电流幅值、保护角、地形地貌、海拔高度等 7 种因子，选用 sigmoid 函数完成了对重要输电通道雷害形式进行拟合，最终实现了对重要输电通道不同闪络形式完成判断，数据模型验证表面，该模型准确率高达 93.53%，可以帮助现场运维人员判断何种雷击故障，总结雷击故障和分析事故原因，从而更好地提升雷电防护水平。

1 理论模型构建与求解

考虑重要输电通道和其它输电线路雷击跳闸故障类似，为扩充故障数据样本，对于不同区域下新型电力系统的集电线路和重要输电通道所发生的雷击故障统一进行统计分析。首先对重要输电通道雷击特征进行分析，本文采用相关性分析和聚类分析提取简化模型的影响因子。

相关性分析中，对于不同类型的数据采用不同的系数计算其之间的相关性，主要有 Cramer's V、Spearman、eta 和 Somers'D 相关系数。

Cramer's V 相关系数适用于判定两列离散无序型模型^[32]，取值范围为 0 到 1，从无相关性到完全相关递进。计算公式如下：

$$V = \sqrt{\frac{x^2 / n}{\min(k-1, r-1)}} \quad (1)$$

式中： x^2 表示卡方统计量的值； n 表示样本总数； k 表示列数； r 表示行数； \min 为最小值函数。

Spearman 相关系数使用单调函数来描述两个变量之间的关系程度^[33]，采用等级相关，属于非参数统计方法。它的等级相关系数计算公式如下：

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2)$$

式中： $d_i = R(x_i) - R(y_i)$ ，即变量按照大小或优劣排序的秩； n 是样本容量； R 为秩函数，它对原变量的分布没有限制，取值范围为 -1 至 1。在构建显著性测试时，即验证相关系数是否为 0，并计算统计量。在显著性水平为 α 时，若统计量落在否定域，则拒绝原假设，即 Spearman 等级相关性显著。

eta 相关系数常用于衡量分类变量和其他变量的关联强度，原理在于求取其他变量的组内离差均

值平方和占总离差均值平方和的百分比，表示定类变量无法解释其他变量的误差部分，因此越小则表示关联性越强。计算公式为

$$\eta = \sqrt{\frac{\sum(Y - \bar{Y})^2 - \sum(Y - \bar{Y}_k)^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中： \bar{Y} 表示因变量的平均值； \bar{Y}_k 表示类别下各组的变量平均值，以定类变量进行分组。

Somers'D 相关系数用于寻找两个有序变量之间的关联，计算公式为

$$R_d = \frac{N_c - N_d}{N_c + N_d + N_t} \quad (4)$$

式中： N_c 表示一致对的数量； N_d 表示不一致对的数量； N_t 表示并列对的数量。假设存在两个定序变量 X, Y ，对变量进行观测，产生 (x, y) 对组合。记 X 变量中有 n 个数据， Y 变量中有 m 个数据，则 (x, y) 共计 $m \times n$ 对。任取 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ， N_t 表示 $x_1 = x_2$ 且 $y_1 = y_2$ 的情况数， N_c 表示除去全等情况下 $x_1 x_2$ 大小关系与 $y_1 y_2$ 一致的情况数， N_d 表示大小关系不一致的情况数。

聚类分析中，K-means 聚类认为数据集中存在聚类中心，因此在初始化时从数据集中选取 k 个质心，其余点计算与各个质心的欧式距离，选取最小值并加入该类别。之后重新选取簇类中心，更新距离。迭代上个步骤直至新旧质心距离和变化不大，即认为达到稳定状态，聚类结束。即目标函数为

$$\min_{(C_1, C_2, \dots, C_k)} \sum_{i=1}^n d^2(X_i, C(X_i)) \quad (5)$$

式中： C_k 表示类中心点； X_i 表示样本点； d^2 表示距离函数。

其计算流程如下：

给定预处理后的数据集合 $D = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ ， D 包含 N 个变量；对于每个 X_N ，有 $X_N = \{m_1, m_2, \dots, m_Q\}$ ， X_N 包含 Q 个维度，与具体实施例中的变量所对应。

第 1 步，随机初始化 K 个聚类中心 $\{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ ， $1 < K \leq N$ ， K 具体的取值依据分析采用手肘法确定， C_k 代表第 k 个聚类的中心。

第 2 步，计算每个对象到每个聚类中心的欧氏距离，计算公式为 $d(X_n, C_k) = \sqrt{\sum_{q=1}^Q (X_{n,q} - C_{k,q})^2}$ ，其中 $d(X_n, C_k)$ 代表对象 X_n 到 C_k 的欧式距离， $X_{n,q}$ 代表 X_n 中第 q 维的属性， $C_{n,q}$ 代表 C_n 中第 q 维的属性。

第 3 步，对于每个 X_n ，依据 $d(X_n, C_k)$ 将其分配到欧式距离最小的 C_k 中，得到更新后的 K 个类簇

$\{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ 。并重新确定每个类簇的聚类中心 C_k ， $C_k = \frac{1}{S_{k,n}} \sum_{i=1}^n X_i$ ， $S_{k,n}$ 代表属于 S_k 类簇的 X_n 有 N_s 个。

第 4 步，重复第 2 步、第 3 步，直至 C_k 不发生改变。

本文用 F 值作为评估聚类质量的指标。 F 值由数据点所在聚类中心的方差以及聚类中心之间的方差计算得到，用于评估聚类效果的显著性， F 值越大表示聚类间的差异越显著，聚类效果越好^[34]。其计算公式如下。

$$F = \frac{S_W / (n - k)}{S_B / (k - 1)} \quad (6)$$

式中： S_W 表示数据点所在聚类组内的平方和； S_B 表示聚类中心距离的平方和。

以上是本文选择的针对新型电力系统重要输电通道故障特征分析时所采用的相关分析和聚类分析方法。

2 算例分析

2.1 数据来源与预处理

由于不同重要输电通道下的致灾因子之间存在着差异特征，在分析雷击故障和致灾因子的相关性时，需要采用 K-means 聚类分析对致灾因子之间的差异特征进行聚类处理，进一步分析致灾因子对雷击故障的影响。不同重要输电通道之间的差异特征主要有省份、电压等级、跳闸月份、闪络形式、同塔回数、雷电流幅值、防雷措施、塔型、塔高、接地电阻、保护角、大号侧挡距、小号侧挡距、地形地貌、地面倾角、海拔高度、地闪密度(主放电)、地闪密度(回击)和雷暴日 19 个属性，采用 K-means 聚类分析对上述致灾因子进行聚类。其中分类数据为：省份、电压等级、跳闸月份、闪络形式、同塔回数、防雷措施、塔型和地形地貌；定序数据为雷电流幅值、塔高、接地电阻、保护角、大号侧挡距、小号侧挡距、地面倾角、海拔高度、地闪密度(主放电)、地闪密度(回击)和雷暴日。采用欧式距离来衡量数据与聚类中心之间的距离。

本文选择来自能源企业相关数据进行算例分析，收集的数据为重要输电通道雷击事故统计，原始数据为纯文本类型无法直接进行分析统计。因此对存在单种类别的变量，通过编码的方式进行处理，具体的，对于塔型、防雷措施等不具备序列特征的变量，使用 Dummy Encoding 方法将其编码为 Dummy Variable；对于放电痕迹数量直接进行序列

编码处理；其他定类变量按类别赋予数字编码；保护角和地面倾角使用比例归一化进行归一化处理，定量变量使用 min-max 归一化进行归一化处理，数据公式如下。

$$A_i = X_i / 360 \tag{7}$$

$A_i = [X_i - \min(X)] / [\max(X) - \min(X)]$ ，为了将定量数据映射到[-1,1]，使用如下公式进行再次处理，最终得到标准化结果，如表 1 所示。

$$A_i = (A_i - 0.5) \times 2 \tag{8}$$

对于闪络形式，重要输电通道直雷击故障主要分为绕击故障与反击故障，绕击故障是由于雷电绕过避雷线直击线路，抬高线路电位导致绝缘子闪络进而导致线路故障，反击故障是由于雷击杆塔塔顶或避雷线，抬高塔顶电位导致线路绝缘子闪络进而导致线路故障。对于重要输电通道中 500kV 电压等级以上的输电线路，由于其反击耐雷水平已经达到较高的数值，绕击是引起大部分 500kV 电压等级以上输电线路跳闸事故的原因。将反击、绕击以及其他这 3 种不同的闪络形式进行数字编码。

表 1 重要输电通道雷击故障特征及关联性分析处理版
Table 1 Characteristics and correlation analysis of lightning strikes in dense channels, processed version

变量名称	数据表示
省份	见附录
电压等级	1 为 500kV, 2 为±500kV, 3 为±800kV, 4 为 1000kV, 5 为±1100kV
跳闸月份	以 yyyy-m-dd 表示月份，其中 m 为变量，取值为 1 到 12
闪络形式	1 为反击，2 为绕击，其余为 3
同塔回数	以具体数值表示同塔回数，其中 0 表示空值
雷电流幅值	以具体数值表示雷电流幅值大小
防雷措施	基准类型为无，1 表示有
塔型	基准类型为直线塔，1 表示耐张塔
塔高	以实际数值表示杆塔高度
接地电阻	以实际数值表示接地电阻
保护角	以实际角度表示保护角
大号侧档距	以实际距离数值表示大号侧档距
小号侧档距	以实际距离数值表示小号侧档距
地形地貌	1 为爬坡，2 为平地，3 为山顶，4 为沿坡，其余为 5
地面倾角	以实际角度表示地面倾角
海拔高度	以实际数值表示海拔高度
地闪密度(主放电)	以实际数值表示地闪密度(主放电)
地闪密度(回击)	以实际数值表示地闪密度(回击)
雷暴日	以实际数值表示雷暴日次数
放电痕迹数量	以实际数值表示放电痕迹数量

2.2 相关性分析

省份、跳闸月份、闪络形式、同塔回数、防雷措施、塔型、地形地貌为定类变量；电压等级、放电痕迹数量为定序变量；雷电流幅值、塔高、接地电阻、保护角、大号侧档距、小号侧档距、地面倾

角、海拔高度、地闪密度(主放电)、地闪密度(回击)、雷暴日为定量变量。根据相关性分析的方法，为每种变量选择合适的方法。具体设置为：定类变量之间使用 Cramer’s V 系数计算相关性；定序变量和定量变量之间使用 Spearman 秩相关计算相关性；定序变量之间使用 Somer’s D 计算相关性；定类变量与定量变量之间使用 eta 系数计算相关性；由于定类变量和定序变量无相关性计算方法，故将定序变量视为定类变量，使用 Cramer’s V 系数计算两者的相关性。最终计算结果如图 2 所示。

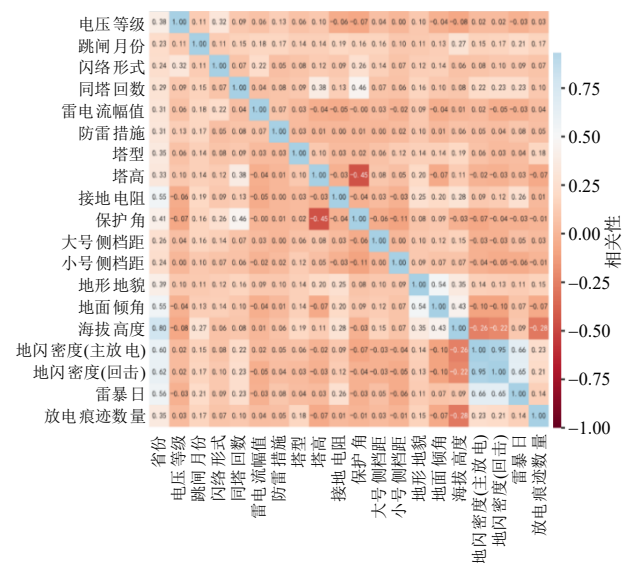


图 2 变量相关性分析结果

Fig. 2 Results of variable correlation analysis

按照图 2 右侧的颜色指示条，相关性方格的颜色越接近指示条两端的颜色表示对应变量之间的相关性越强。按照各变量与闪络形式相关性绝对值大小进行排序^[35]，得出闪络形式与电压等级、保护角、省份、雷电流幅值、大号侧档距、地面倾角、地形地貌、塔高、跳闸月份、地闪密度(回击)相关性较强。

将相关性分析结果与实际防雷工程进行对比可以得出，在常规重要输电通道的防雷评估中，除了工程上常见的保护角、雷电流幅值、地面倾角、地形地貌、塔高、地闪密度(回击)致灾因子以外，电压等级、省份、大号侧档距和跳闸月份这些同样对闪络形式存在较强相关性的致灾因子会被忽略。因此，在后续聚类分析时，需要考虑上述不同重要输电通道下常见致灾因子的差异特征对聚类结果的影响，更加全面地研究各种致灾因子对闪络形式的影响程度。

2.3 聚类分析

2.3.1 变量与闪络形式之间的聚类分析

依据相关性分析的结果，K-means 聚类分析对

电压等级、保护角、雷电流幅值、大号侧档距、地面倾角、地形地貌、塔高、跳闸月份、地闪密度(回击)9个属性进行聚类。其中分类数据为:电压等级、跳闸月份和地形地貌;定序数据为雷电流幅值、塔高、保护角、大号侧档距、地面倾角和地闪密度(回击)。采用欧式距离来衡量数据与聚类中心之间的距离,由于只想要找出变量与闪络形式中绕击和反击的关系,因此闪络形式剔除“其他”类别,并设定聚类簇数为2。

本节在进行聚类分析时,针对于初步处理后的数据,对所有数据进行归一化处理,使用 K-means 聚类方法进行聚类分析后,有效数据有 570 条,无效数据 0 条,设定迭代次数为 10 次,实际迭代 3 次后达到收敛。经过计算,方差分析(analysis of variance, ANOVA)结果如表 2 所示。

由表 2 可以得出:地形地貌、地面倾角、塔高、大号测档距和保护角对闪络形式的聚类结果 F 值较高,即显著性高。其中地形地貌、地面倾角、塔高和保护角是在防雷评估中重点关注的致灾因子,可知分析表结果基本和工程实际相一致。而大号测档距对闪络形式的显著值高,具有较大影响,但大号

测档距是工程实际中相对忽略的致灾因子。

变量名称	聚类		误差		F 值
	均方	自由度	均方	自由度	
电压等级	0.041	1	0.011	568	3.811
跳闸月份	0.007	1	0.020	568	0.338
雷电流幅值	0.115	1	0.040	568	2.907
塔高	0.035	1	0.004	568	9.764
保护角	0.157	1	0.041	568	3.854
大号侧档距	0.014	1	0.003	568	4.103
地形地貌	20.504	1	0.019	568	1074.451
地面倾角	5.135	1	0.026	568	199.136
地闪密度(回击)	0.056	1	0.021	568	2.700

本文采用聚类方法对闪络形式的具体类别:绕击和反击进行进一步分析。考虑到原始数据的大小和样本特点,拟采用传统机器学习的聚类方法进行分析,经过初步实验,基于原型的聚类(K-means)、基于密度的聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)和基于层次的聚类(Ward)聚类结果如图 3 所示,K-means 的效果最优,下面将详细介绍 K-means 聚类分析的过程。

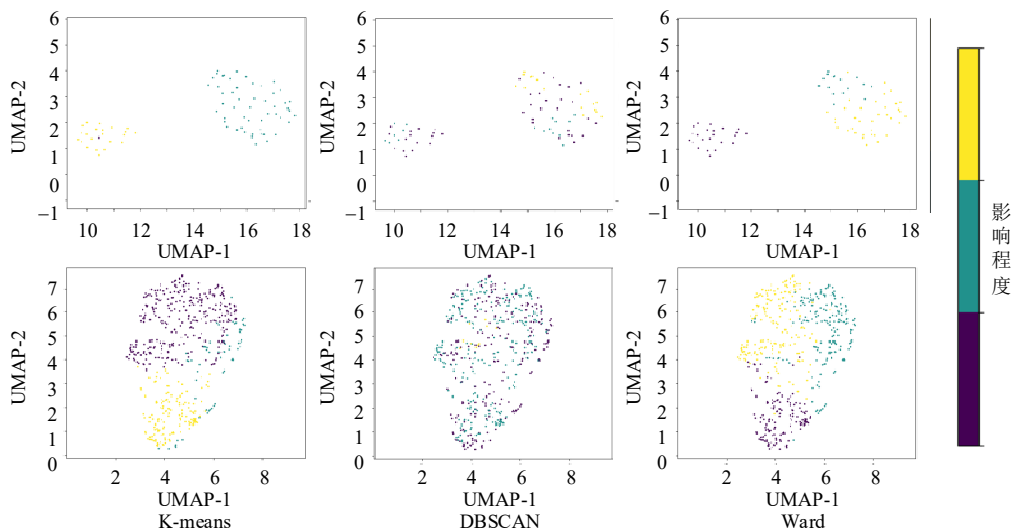


图 3 传统聚类方法结果

Fig. 3 Results of traditional clustering methods

2.3.2 变量与闪络形式(绕击)之间的聚类分析

为进一步研究变量与闪络形式(绕击)之间的关系,本节在 2.3.1 节数据的基础上,挑选出闪络形式类别为绕击的数据,进行 K-means 聚类分析。

对原始数据采用肘部法确定最佳聚类簇数,如图 4 所示,由计算结果可知,最佳簇数为 3。

设定迭代次数为 10 次,实际迭代 3 次后达到收敛。经过计算,方差分析结果如表 3 所示。

由表 3 可以得出:雷电流幅值、大号侧档距、

跳闸月份、地形地貌和地面倾角对闪络形式(绕击)的聚类结果 F 值较高,即显著性高。上述致灾因子的差异性对于闪络形式(绕击)的影响程度更大,其中针对雷电流幅值和地形地貌进行进一步细分,研究这两种致灾因子的差异性对闪络形式(绕击)的具体影响状况。

通过统一流形逼近与投影(uniform manifold approximation and projection, UMAP)方法进行聚类分析,如图 5 所示。可以看出聚类效果较好,但出现一个簇只有 1 条数据的情况。

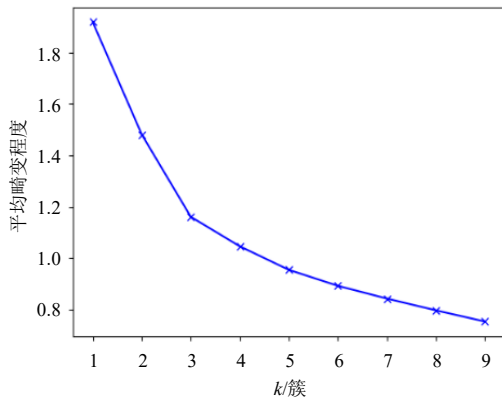


图 4 肘部法确定最佳聚类簇数

Fig. 4 Elbow method for determining the optimal number of clusters

表 3 绕击数据 ANOVA 结果

Table 3 Result of shielding data ANOVA

变量名称	聚类		误差		F 值
	均方	自由度	均方	自由度	
电压等级	0.001	2	0.003	72	0.396
跳闸月份	0.071	2	0.014	72	4.992
雷电流幅值	8.292	2	0.035	72	234.229
塔高	0.001	2	0.002	72	0.742
保护角	0.103	2	0.061	72	1.672
大号侧档距	0.408	2	0.002	72	197.802
地形地貌	0.116	2	0.063	72	1.821
地面倾角	0.060	2	0.033	72	1.818
地闪密度(回击)	0.001	2	0.013	72	0.107

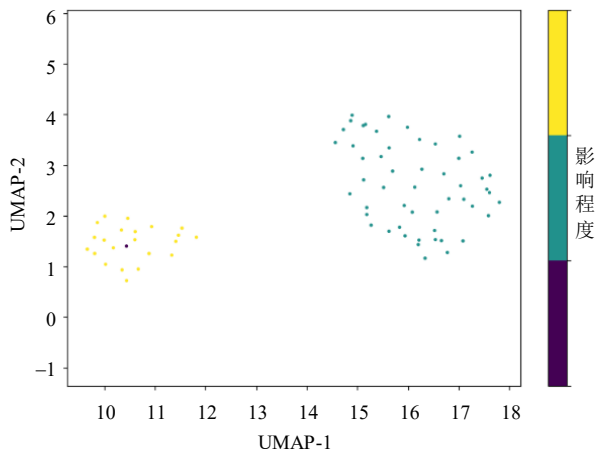


图 5 UMAP 聚类结果降维可视化

Fig. 5 Visualization of UMAP clustering result dimensionality reduction

2.3.3 变量差异特征与闪络形式(绕击)之间的聚类分析

1) 雷电流幅值与闪络形式(绕击)之间的聚类分析。

为进一步研究雷电流幅值这一重要输电通道致灾因子的差异性对闪络形式(绕击)的具体影响状况。对收集的重要输电通道雷击事故统计数据按照不同的雷电流幅值进行分类划分,进行 K-means 聚类分析,对于数据中所出现的大于 400kA 正负极性

雷电流所造成的绕击事故,一方面考虑测量误差的存在,同时不排除实际情况下真实存在的大雷电流发生的绕击事故。经过计算,方差分析结果如表 4 所示。

表 4 大范围雷电流幅值 ANOVA 分析表

Table 4 ANOVA of large range lightning current amplitude

雷电流幅值/kA	聚类		误差		F 值
	均方	自由度	均方	自由度	
(-∞, -400)	0.023	2	0.026	72	0.884
[-400, -200)	2.573	2	0.139	72	18.568
[-200, 0)	8.893	2	0.000	72	-
[0, 200)	2.760	2	0.000	72	-
[200, 400)	1.493	2	0.133	72	11.200
[400, ∞)	0.006	2	0.014	72	0.431

由表 4 可以得出:当雷电流处在[-400, -200)以及[200, 400)区间时对闪络形式(绕击)的聚类结果 F 值较高,即显著性高。即雷电流处在[-400, -200)以及[200, 400)区间时更容易造成重要输电通道发生绕击,在实际防雷工程当中采用的电气几何模型(electro-geometric model, EGM),使用与雷电流成正相关的击距公式来计算导线击距圆半径,以及地面的击距高度,当雷电流为[-400, -200)以及[200, 400)区间内的大电流时,地线的击距圆与地面击距会将导线的击距圆完全包围,认为不会发生绕击,与上文分析表的结论相反,因此在后续采取防雷措施时需要适当考虑大雷电流发生绕击这一情形。

2) 地形地貌与闪络形式(绕击)之间的聚类分析。

为进一步研究地形地貌这一重要输电通道致灾因子的差异性对闪络形式(绕击)的具体影响状况。对收集的重要输电通道雷击事故统计数据按照不同的地形地貌按照爬坡、平地、山顶、沿坡和平原进行分类划分,进行 K-means 聚类分析。经过计算,方差分析结果如表 5 所示。

表 5 地形地貌 ANOVA 分析表

Table 5 ANOVA of topographic features

地形地貌	聚类		误差		F 值
	均方	自由度	均方	自由度	
爬坡	1.576	2	0.114	72	13.776
平地	0.394	2	0.077	72	5.102
山顶	1.359	2	0.112	72	12.183
沿坡	9.333	2	0.000	72	-
平原	2.760	2	0.000	72	-

由表 5 可以得出:当地形地貌为爬坡,平地和山顶时对闪络形式(绕击)的聚类结果 F 值较高,即显著性高。即重要输电通道处爬坡、平地和山顶时更容易造成重要输电通道发生绕击,实际防雷工程

当中，在平原地形下，因导线受到避雷线及大地的屏蔽作用较好，发生雷电绕击导线的概率很低；在山坡地形下，雷电发展路径明显向山体侧倾斜；在山顶地形下，由于地面屏蔽作用减弱，导致发生绕击事故概率增大；在山谷地形下，由于山体良好的保护作用，使得线路不会遭受绕击事故。与聚类分析结果相一致，因此在后续输电杆塔选址中需要考虑爬坡、平地和山顶地形地貌对输电线路绕击耐雷性能的影响。

2.3.4 变量与闪络形式(反击)之间的聚类分析

为进一步研究变量与闪络形式(反击)之间的关系，本节在 2.3.1 节数据的基础上，挑选出闪络形式类别为反击的数据，进行 K-means 聚类分析。

对原始数据采用肘部法确定最佳聚类簇数，如图 6 所示，由计算结果可知，最佳簇数为 3。

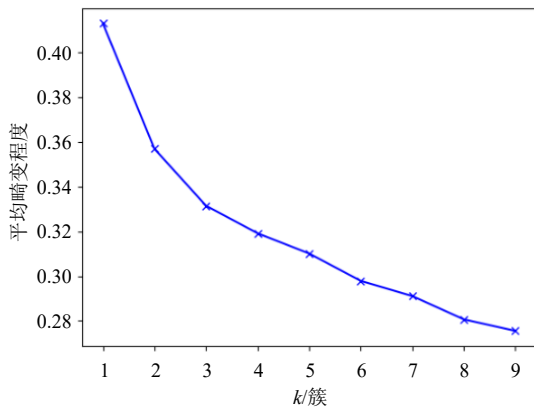


图 6 典型线路肘部法确定最佳聚类簇数

Fig. 6 Elbow method for determining the optimal number of clusters for typical transmission line

设定迭代次数为 10 次，实际迭代 3 次后达到收敛。经过计算，方差分析结果如表 6 所示。

变量名称	聚类		误差		F 值
	均方	自由度	均方	自由度	
电压等级	0.361	2	0.011	492	33.768
跳闸月份	0.116	2	0.020	492	5.812
雷电流幅值	0.002	2	0.005	492	0.375
塔高	0.037	2	0.004	492	9.798
保护角	3.773	2	0.021	492	181.456
大号侧档距	0.004	2	0.002	492	2.301
地形地貌	8.259	2	0.020	492	405.798
地面倾角	2.051	2	0.026	492	77.626
地闪密度(回击)	0.113	2	0.022	492	5.211

由 ANOVA 分析表可以得出：地形地貌、保护角、地面倾角、电压等级和塔高对闪络形式(反击)的聚类结果 F 值较高，即显著性高。上述致灾因子的差异性对于闪络形式(反击)的影响程度更大，其中针对雷电流幅值和地形地貌进行进一步细分，研

究这两种致灾因子的差异性对闪络形式(反击)的具体影响状况。

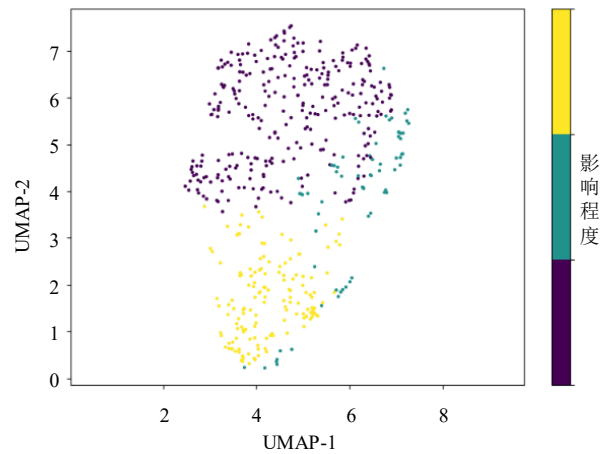


图 7 典型线路 UMAP 聚类结果降维可视化
Fig. 7 Visualization of UMAP clustering result dimensionality reduction for typical transmission line

由图 7 可以看出聚类效果较好，3 个簇直接中心距离都比较大。

2.3.5 变量差异特征与闪络形式(反击)之间的聚类分析

1) 雷电流幅值与闪络形式(反击)之间的聚类分析。

为进一步研究雷电流幅值这一重要输电通道致灾因子的差异性对闪络形式(反击)的具体影响状况。对收集的重要输电通道雷击事故统计数据按照不同的雷电流幅值进行分类划分，进行 K-means 聚类分析。经过计算，方差分析结果如表 7 所示。

雷电流幅值/kA	聚类		误差		F 值
	均方	自由度	均方	自由度	
(-∞, -150)	0.011	2	0.002	492	5.348
[-150, -50)	6.116	2	0.022	492	283.744
[-50, 0)	46.717	2	0.000	492	-
[0, 50)	34.208	2	0.000	492	-
[50, 150)	3.440	2	0.021	492	161.734
[150, ∞)	0.000	2	0.000	492	-

由表 7 可以得出：当雷电流处在[-150, -50)以及[50, 150)区间时对闪络形式(反击)的聚类结果 F 值高，即显著性高。即雷电流处在[-150, -50)和[50, 150)区间时更容易造成重要输电通道发生反击，在实际防雷工程当中根据《架空输电线路雷电防护导则 (DL/T 2209—2021)》采取防雷措施后的 500kV 以上的输电线路反击耐雷水平为 150kA 以上，而 110kV 以及 220kV 输电线路的反击耐雷水平在 59~96kA 之间，结合聚类分析得到的结果，表

明雷电流幅值在[-150, -50)和[50, 150)区间时更容易发生反击,是由于重要输电通道当中 110kV 以及 220kV 输电线路的反击耐雷水平较低。因此在对重要输电通道进行防雷措施时需考虑适当提高 110kV 以及 220kV 输电线路的反击耐雷水平。

2)地形地貌与闪络形式(反击)之间的聚类分析。

为进一步研究地形地貌这一重要输电通道致灾因子的差异性对闪络形式(反击)的具体影响状况。对收集的重要输电通道雷击事故统计数据按照不同的地形地貌按照爬坡、平地、山顶、沿坡和平原进行分类划分,进行 K-means 聚类分析。经过计算,方差分析结果如表 8 所示。

表 8 典型线路地形地貌 ANOVA 分析表
Table 8 ANOVA of typical transmission lines topographic features

地形地貌	聚类		误差		F 值
	均方	自由度	均方	自由度	
爬坡	2.925	2	0.092	492	31.734
平地	34.541	2	0.000	492	-
山顶	51.469	2	0.000	492	-
沿坡	22.262	2	0.130	492	171.78
平原	2.004	2	0.080	492	25.058

由表 8 可以得出:当地形地貌为爬坡、沿坡和平原时对闪络形式(反击)的聚类结果 F 值较高,即显著性高。即重要输电通道处爬坡、沿坡和平原时更容易造成重要输电通道发生反击,在实际防雷工程当中,更多考虑杆塔接地电阻对输电线路反击耐雷性能的影响,相对忽略地形地貌的影响。因此,在后续输电杆塔选址中需要考虑爬坡、沿坡和平原地形地貌对输电线路反击耐雷性能的影响。

根据对上述聚类结果进行分析,可以得出重要输电通道雷击故障的闪络形式主要受地形地貌、地面倾角、塔高、大号侧档距和保护角的影响,对上述致灾因子的差异特征进行分析即可得出重要输电通道雷击故障闪络形式的规律特性。进一步针对反、绕击的闪络形式,雷电流幅值、大号侧档距、跳闸月份、地形地貌和地面倾角对绕击闪络形式影响最大;地形地貌、保护角、地面倾角、电压等级和塔高对反击闪络形式影响最大。最后通过对雷电流幅值和地形地貌来研究致灾因子差异特征对闪络形式(反、绕击)的影响,得出雷电流幅值处于[-400,-200)和[200,400)区间以及地形地貌为爬坡、平地 and 山顶时更容易造成重要输电通道发生绕击;雷电流幅值处于[-150,-50)以及[50,150)区间以及地形地貌为爬坡、沿坡和平原时更容易造成重要输电通道发生反击。

3 新型电力系统重要输电通道雷害简化模型

针对重要输电通道按照雷击敏感致灾因子选定结果,结合数据分析方法,对不同典型场景下雷害简化模型构建,提出各致灾因子在雷击故障中所占权重,按照数据量和模型方法,对重要输电通道场景雷击故障特征各因子关联性开展分析。

本分析中因变量闪络形式的类别分为绕击、反击两种,是一个二分类问题,因此选用 sigmoid 函数将自变量关系函数的值映射到 0 至 1 之间,建立如下所示模型。

$$f(X) = \frac{1}{1 + e^{-\sum_{n=1}^7 w_n x_n + b}}, X = \{x_1, \dots, x_7\} \quad (9)$$

式中: b 为常参数; x_n 为自变量, $n=1,2,\dots,7$ 。

在相关性分析中,闪络形式与省份、雷电流幅值、保护角、大号侧档距、地形地貌、地面倾角、海拔高度以及地闪密度这 8 个变量相关性呈显著性且相关性较强,但省份编码不完整(数据集中仅包含部分省份),不具有普遍性,因此最终选择不包含省份。自变量 x_n 的选取情况如表 9 所示。

表 9 自变量选取情况
Table 9 Selection of independent variables

变量名	变量意义
x_1	雷电流幅值
x_2	保护角
x_3	大号侧档距
x_4	地形地貌
x_5	地面倾角
x_6	海拔高度
x_7	地闪密度

模型采用 LevenBerg-Marquardt 算法进行拟合,计算方法如下。

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}) \mathbf{h}_{LM} = \mathbf{J}^T ((f(a_n) - \hat{f}_i)) \quad (10)$$

式中: \mathbf{J} 表示雅克比行列式; \mathbf{I} 表示单位矩阵; λ 为阻尼因子; a_n 为模型的参数。

损失函数使用残差平方和(R_S),计算方法如下。

$$R_S = \sum (f_i - \hat{f}_i)^2 \quad (11)$$

式中: f_i 表示实际值; \hat{f}_i 表示预测值。

将 70% 的数据用作训练集, 30% 的数据用作测试集进行模型的拟合,在经过迭代后,找到模型的最优解, b 的估计值为-75.279, w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、 w_5 、 w_6 、 w_7 的估计值分别为-75.279、-1260.554、36.823、216.962、-24.253、-238.731、141.658、-258.589。

根据表 10 模型的方差分析结果,表中回归的平方和代表该回归模型所能解释的模型的方差变化,而残差的平方和代表该非线性回归模型所不能

解释的方差变化。二者的和即为未修正的总计，如式(12)所示，它是总的残差平方和。

源	平方和	自由度	均方
回归	38.000	8	4.750
残差	2.000	392	0.005
修正前总计	40.000	400	
修正后总计	35.855	399	

如表 11 所示，模型最终在训练集与测试集上都取得了较高的正确率。

数据集	正确率/%
训练集	96.00
测试集	93.53

闪络形式	雷电流幅值	保护角	大号侧档距	地形地貌	地面倾角	海拔高度	低山密度	计算结果	最终结果
1	-0.396	0.435	0.152	3	0.425	0.267	0.101	1	1
1	-0.271	0.435	0.128	4	0.566	0.306	0.059	1	1
0	0.073	0.671	0.142	4	0.566	0.437	0.104	1.4098E-134	0
0	0.080	0.788	0.145	3	0.377	0.340	0.110	4.6545E-113	0
0	0.085	0.435	0.119	4	0.566	0.412	0.147	1.1.027E-153	0
0	0.085	0.435	0.059	2	0.000	0.234	0.070	4.24503E-82	0
0	0.059	0.435	0.079	1	0.000	0.394	0.138	3.15566E-53	0
0	0.074	0.435	0.087	4	0.566	0.344	0.071	2.1931E-146	0
0	0.194	0.435	0.072	2	0.000	0.234	0.114	1.358E-145	0
0	0.075	0.732	0.085	2	0.000	0.385	0.132	4.18835E-67	0

可以看出，将测试集中实际案例的致灾因子(自变量)带入本文所提出的模型进行计算后所得出的闪络形式(因变量)与实际案例中的闪络形式相符，因此，结合表 12 可以说明模型在测试集上取得了正确率达到了 93.5%，表现优秀。证明本文所提出的雷害形式判断简化模型具有实际的参考意义。

进一步地，为了提高模型计算的准确率，本文对模型计算错误的数据进行了统计分析。其中，将雷害形式为反击类型错误分类为绕击类型的错误数量约占总错误数量的 81.82%，说明模型对反击类型的数据分类较不准确。而在全部数据中，雷害形式为反击类型的数据仅占总数据量的 12.35%，因此可以推测是由于雷害形式为反击类型的数据量有限，影响了模型的准确性。在未来的工作中，我们将继续进行输电通道雷击故障数据的收集，制作雷害形式分布更为平衡的数据集，以实现模型的优化。

4 结论

本文通过对新型电力系统雷击故障进行总结

本节从测试集中随机选取若干实际案例对闪络形式分析模型进行计算说明。如表 12 所示，第一列闪络形式为因变量，即实际雷击的形式(绕击或反击)，第 2 列到第 8 列为表 6 中所对应的自变量，需特别说明，参与计算的所有数据进行预处理。

选取第 3 行数据作为典型进行详细计算说明。

$$f(X) = \frac{1}{1 + e^{-a}} \quad (12)$$

$$\begin{cases} a = -1260.554x_1 + 36.823x_2 + 216.962x_3 - \\ 24.253x_4 - 238.731x_5 + 141.658x_6 - \\ 258.589x_7 - 75.279 \\ f(X) = 1.4098 \times 10^{-134} \approx 0 \end{cases} \quad (13)$$

和分析，研究低耐受设施雷击故障特性，归纳雷击故障薄弱环节，利用 K-means 聚类分析等多种分析方法，确定典型场景下(以重要输电通道为例)致灾因子的雷害建模和分析，结论如下：

1) 在闪络形式上，对闪络形式的具体类型(绕击和反击)进行 K-means 聚类分析，然后采用 UMAP 可视化降维，可以看到聚类无论是最终聚类簇的分布还是点的聚类类别都比较合理，聚类效果较好，可以认为，地形地貌、地面倾角、塔高、大号侧档距和保护角对闪络形式的类别影响较大，在相关重要输电通道防雷评估的工程实际当中可以增加对大号侧档距考虑。其中，雷电流幅值、大号侧档距、跳闸月份、地形地貌和地面倾角对闪络形式(绕击)的划分影响较大；地形地貌、保护角、地面倾角、电压等级和塔高对闪络形式(反击)的划分影响较大。通过分别对反、绕击中影响较大的致灾因子进行进一步划分，研究致灾因子的差异特征对反、绕击的影响程度，可以得出雷电流幅值处于[-400, -200)和[200,400)区间以及地形地貌为爬坡、平地和山顶时更容易造成重要输电通道发生绕击；雷电流

幅值处于[-150,-50]以及[50,150]区间以及地形地貌为爬坡、沿坡和平原时更容易造成重要输电通道发生反击。

2) 在雷害形式上, 为了帮助现场运维人员进行判断雷击形式, 在考虑到线路雷击故障特征分布和致灾因子等多种因素。将闪络形式与省份、雷电流幅值、保护角、大号侧挡距、地形地貌、地面倾角、海拔高度以及地闪密度等 8 种因子进行拟合, 得出最终的雷害形式判断简化模型。

3) 为确保本文所建立的雷害形式判断简化模型具有实际的参考意义, 把收集到的实际雷击案例随机分为训练集和测试集, 对模型进行训练, 将雷电流幅值、保护角、大号侧挡距、地形地貌、地面倾角、海拔高度与地闪密度作为自变量输入模型, 得到具体的雷害形式(绕击、反击), 模型最终的测试集正确率达到了 93.5%, 表现优秀, 证明本文所提出的雷害形式判断简化模型具有实际的参考意义。

参考文献

- [1] 谷山强, 李健, 吴敏, 等. 计及邻近线路架设方向和屏蔽影响的密集输电通道防雷性能仿真分析[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 3075-3083.
GU Shanqiang, LI Jian, WU Min, et al. Simulation of lightning protection effects in dense transmission channels considering erection directions and shielding effects of adjacent lines[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 3075-3083(in Chinese).
- [2] 王乐, 杨帅, 朱时阳, 等. 基于泊松分布的输电线路跳闸概率预测方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3777-3783.
WANG Le, YANG Shuai, ZHU Shiyang, et al. Prediction method of transmission line trip probability based on Poisson distribution[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3777-3783(in Chinese).
- [3] 邓红雷, 唐崇旺, 刘刚, 等. 基于 GA-BP 神经网络技术的雷击跳闸实时预警[J]. 电瓷避雷器, 2021(1): 38-44, 50.
DENG Honglei, TANG Chongwang, LIU Gang, et al. Lightning trip warning based on GA-BP neural network technology[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(1): 38-44, 50(in Chinese).
- [4] 欧阳森, 陈义森, 杨墨缘, 等. 输电线路微气象跳闸预警及成因量化分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 102-110.
OUYANG Sen, CHEN Yisen, YANG Moyuan, et al. Microclimate-based tripping warning of transmission line and quantitative analysis of causes[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2022, 50(2): 102-110(in Chinese).
- [5] 袁涛, 王肖田, 司马文霞, 等. 山区输电线路雷击跳闸预警的融合算法研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2528-2540.
YUAN Tao, WANG Xiaotian, SIMA Wenxia, et al. Research on fusion algorithm of lightning strike trip warning for mountain transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2528-2540(in Chinese).
- [6] 周伟绩, 李凤婷, 解超, 等. 基于准两相跳闸的同杆双回输电线路跨线故障跳闸策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(11): 130-137, 147.
ZHOU Weiji, LI Fengting, XIE Chao, et al. Quasi two-phase tripping based line-to-line fault tripping strategy on double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 130-137, 147(in Chinese).
- [7] 冯志强, 李籽剑, 周学明, 等. 500kV 同塔双回线路雷电反击同跳故障分析[J]. 湖北电力, 2022, 46(1): 113-118.
FENG Zhiqiang, LI Zijian, ZHOU Xueming, et al. Analysis of simultaneous trip fault caused by back flashover of 500 kV double circuit on the same tower[J]. Hubei Electric Power, 2022, 46(1): 113-118(in Chinese).
- [8] 刘宇舜, 朱太云, 耿屹楠, 等. 基于多尺度广义 S 变换和深度残差网络的雷击跳闸故障类型识别方法[J]. 电瓷避雷器, 2021(6): 94-101.
LIU Yushun, ZHU Taiyun, GENG Yinan, et al. Lightning tripping fault type identification method based on multi-scale generalized S-transform and deep residual network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(6): 94-101(in Chinese).
- [9] 苏浩辉, 陈彦州, 陈岳. 基于 Logistic 回归模型的超高压输电线路雷击跳闸识别[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 85-89.
SU Haohui, CHEN Yanzhou, CHEN Yue. Identification for lightning tripping of EHV transmission lines based on Logistic regression model[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 85-89(in Chinese).
- [10] 罗日成, 李稳, 陆毅, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的 1000kV 输电线路雷电绕击与反击识别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 232-239.
LUO Richeng, LI Wen, LU Yi, et al. Identification method of shielding failure and back striking over-voltage of 1000kV transmission line based on Hilbert-Huang transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 232-239(in Chinese).
- [11] 缪希仁, 林瑞聪. 基于关联维数与极端学习机的高压输电线路雷击过电压故障识别[J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1519-1526.
MIAO Xiren, LIN Ruicong. Lightning over-voltage fault identification of high-voltage transmission line based on correlation dimension and extreme learning machine[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(5): 1519-1526(in Chinese).
- [12] 吕哲, 王增平. 基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 18-26.
LV Zhe, WANG Zengping. Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 18-26(in Chinese).
- [13] 代杰杰, 刘亚东, 姜文娟, 等. 基于雷电行波时域特征的输电线路雷击类型辨识方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 242-250.
DAI Jiejie, LIU Yadong, JIANG Wenjuan, et al. Identification of back striking and shielding failure on transmission line based on time domain characteristics of traveling wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 242-250(in Chinese).
- [14] 苏继森. 风电机组的防雷接地研究及其在乳源大布风电场中的应用[D]. 长沙理工大学, 2018.
- [15] 张伟. 大龙潭风电机组及风电场防雷系统设计研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [16] 刘昌衡. 风电场风机组和架空线路防雷设计的研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.
- [17] 张学威. 风电场集电线路雷击事件分析及防雷策略[J]. 中国设备工程, 2020(22): 152-153.
- [18] 周歧斌, 王振兴, 边晓燕, 等. 风电场内集电线路雷击过电压的研究与防护[J]. 电瓷避雷器, 2019(6): 31-36.

- ZHOU Qibin, WANG Zhenxing, BIAN Xiaoyan, et al. Research and protection of lightning overvoltage of collection line in wind farm[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2019(6): 31-36(in Chinese).
- [19] 施广全, 张义军, 陈绍东, 等. 风力发电机组防雷技术进展综述[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2477-2487.
- SHI Guangquan, ZHANG Yijun, CHEN Shaodong, et al. Review of lightning protection technique progress of wind turbines[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2477-2487(in Chinese).
- [20] 王超群. 山区风电场集电线路雷击风险精细化评估及防护技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [21] 陈磊. 大型风电场 35kV 集电线路防雷保护的研究——以“小箐山风电场”为例[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [22] 王耀武. 大型光伏阵列雷电暂态研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [23] 张明军. 雷击对光伏发电系统的危害及防范[J]. *农村电工*, 2019, 27(1): 38.
- [24] 窦志鹏. 光伏发电系统雷电危害及防护研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [25] 沈思远, 刘亚坤, 张毅龙. 三种风电机组拓扑下风光储混合系统的雷电过电压仿真分析[J]. *高电压技术*, 2022, 48(11): 4506-4515.
- SHEN Siyuan, LIU Yakun, ZHANG Yilong. Analysis on lightning overvoltage in wind-photovoltaic-battery hybrid system with three topologies of wind turbine[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(11): 4506-4515(in Chinese).
- [26] 张毅龙, 沈思远, 杨冬阳, 等. 风光储混合系统的雷电过电压仿真[J]. *高电压技术*, 2023, 49(2): 738-746.
- ZHANG Yilong, SHEN Siyuan, YANG Dongyang, et al. Simulation of overvoltage in wind-photovoltaic-energy storage hybrid system induced by lightning stroke[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(2): 738-746(in Chinese).
- [27] 吴敏, 王韬, 赵淳, 等. 基于过程的输电线路雷电活动描述新方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(3): 989-995.
- WU Min, WANG Tao, ZHAO Chun, et al. A new description method of lightning activity around transmission line based on process[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(3): 989-995(in Chinese).
- [28] 鲍捷, 王昕, 张峰, 等. 基于雷电定位数据驱动的紧密输电通道连续雷击跳闸预警方法[J]. *电网技术*, 2022, 46(3): 1194-1205.
- BAO Jie, WANG Xin, ZHANG Feng, et al. Data-driven early warning for continuous lightning trip-out of compact power corridors based on lightning location data[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(3): 1194-1205(in Chinese).
- [29] 陈华晖, 金玲, 杨清, 等. 地闪密度在雷电防护中的应用探讨[J]. *建筑电气*, 2022, 41(7): 17-20.
- CHEN Huahui, JIN Ling, YANG Qing, et al. Discussion on application of ground flash density in lightning protection[J]. *Building Electricity*, 2022, 41(7): 17-20(in Chinese).
- [30] 宋喃喃, 刘邕, 李霞, 等. 天津地区雷电流幅值及累积概率分布特征[J]. *气象与环境学报*, 2022, 38(3): 137-143.
- SONG Nannan, LIU Yong, LI Xia, et al. Distributions of lightning current amplitude and cumulative probability in the Tianjin area[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2022, 38(3): 137-143(in Chinese).
- [31] 薛健侗, 马宏忠, 倪一铭, 等. 基于混沌理论与蜉蝣优化 K-means 算法的变压器绕组松动故障特征分析方法[J]. *高电压技术*, 2024, 50(8): 3783-3792.
- XUE Jiantong, MA Hongzhong, NI Yiming, et al. Analysis method of transformer winding looseness fault based on chaos theory and k-means algorithm optimized by mayfly optimization algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(8): 3783-3792(in Chinese).
- [32] 郭启铭, 樊玮. 基于 Cramer's V 的连续属性离散化算法[J]. *计算机工程*, 2008, 34(4): 111-112, 115.
- GUO Qiming, FAN Wei. Discretization algorithm of continuous attributes based on Cramer's V[J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(4): 111-112, 115(in Chinese).
- [33] 伍英伟, 庞万禄, 黄一晟, 等. 基于电厂同步多点测量数据的相关聚类分析[J]. *电子设计工程*, 2024, 32(10): 83-86, 91.
- WU Yingwei, PANG Wanlu, HUANG Yisheng, et al. Correlation clustering analysis based on synchronous multi-point measurement data of power plants[J]. *Electronic Design Engineering*, 2024, 32(10): 83-86, 91(in Chinese).
- [34] 谢娟英, 周颖. 一种新聚类评价指标[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(6): 1-8.
- XIE Juanying, ZHOU Ying. A new criterion for clustering algorithm[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(6): 1-8(in Chinese).
- [35] 周文毅, 高红均, 郭明浩, 等. 考虑历史数据筛选及关键断面约束的电力系统运行灵活性评估方法[J]. *高电压技术*, 2025, 51(1): 180-190.
- ZHOU Wenyi, GAO Hongjun, GUO Minghao, et al. Operational flexibility evaluation method of power system considering historical data screening and key section constraints[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(1): 180-190(in Chinese).



谷山强

在线出版日期: 2024-12-12。

收稿日期: 2024-06-26。

作者简介:

谷山强(1980), 男, 博士(后), 教授级高级工程师, 长期从事雷击灾害防治和智能输电领域科技创新、技术和装备研发、工程应用、标准制修订等工作, E-mail: gushanqiang@sgepri.sgcc.com.cn;

汤亮亮(1984), 男, 通信作者, 博士(后), 长期从事电力系统雷电防护工作, E-mail: 332028514@qq.com。

(编辑 李健一)