

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231427

基于多指标综合评价的配电网接地故障山火风险等级划分

欧阳帆¹, 余笑龙², 徐彪¹, 曾举鹏², 喻锟², 臧欣¹, 贺思林¹

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410208; 2. 长沙理工大学电网防灾减灾
全国重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 近年来由电力故障引发的森林火灾时有发生, 配电网接地故障若未被及时切除, 故障电弧可能引燃周边植被, 进而引发森林火灾。为开展差异化的防山火措施, 提出一种基于多指标综合评价的配电网接地故障山火风险等级划分方法。结合无人机巡线数据、配电线路历史故障数据、气象数据及自主设计的植被电弧燃烧性实验, 分析相关山火风险因子。利用德尔菲-网络分析法确定各山火风险因子权重及风险得分, 加权求和得到山火风险综合得分, 从而确定配电线路山火风险等级。对湖南电网某 10 kV 配电线路进行实际案例分析, 验证了该方法能较为准确地划分配电线路山火风险等级, 明确线路山火防治重要区段, 为面向山火防治的配电线路接地故障处置装置运行机理提供有力辅助参考。

关键词: 网络分析法; 配电线路; 接地故障山火; 森林火险等级划分

A method for dividing the forest fire risk levels caused by a ground fault risk levels on distribution lines based on multiple index comprehensive evaluation

OUYANG Fan¹, SHE Xiaolong², XU Biao¹, ZENG Jupeng², YU Kun², ZANG Xin¹, HE Silin¹

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha 410208, China; 2. National Key Laboratory of Power Grid Disaster Prevention and Mitigation, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In recent years, forest fires caused by power faults have occurred from time to time. If a ground fault in power distribution is not cut off in time, the fault arc discharge may ignite the surrounding vegetation, thereby leading to a forest fire. A method for dividing the forest fire risk levels (FFRLs) caused by a ground fault on distribution lines (DLs) based on multiple index comprehensive evaluation is proposed in order to carry out forest fire prevention measures in a differentiated manner. This paper analyzes the relevant forest fire risk factors based on the integration of unmanned aerial vehicle patrol data, the historical fault data of DLs, meteorological data and the self-designed experiment of an arc combustion characteristic parameter (ACCP). The weights and risk scores of various forest fire risk factors are determined by a Delphi technique network-analytic process. Then the comprehensive risk score is calculated by weighting and summing the factors. The FFRLs of DLs can be determined. An actual case analysis with a 10 kV DL in the Hunan power grid verifies that the method can divide FFRLs of DLs accurately, clarify the important sections of forest fire prevention and control of DLs, and a powerful reference can be provided for the ground fault disposal device of DLs facing forest fire prevention and control.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52037001 and 52177070).

Key words: analytic network process; distribution lines; forest fire caused by ground fault; division of forest fire risk levels

0 引言

输配电网是国家经济发展的重要脉络, 中国

每年在电力行业整体投资近千亿元^[1-3]。近年来, 输配电线路故障引发森林火灾呈逐年增多趋势^[4-6], 多是植被接触绝缘破损的导线引发线路接地故障所致——当输配电线路与周围植被间距超过最小安全距离时, 易因接地故障放电产生火源, 形成重大森林火灾, 轻则线路故障停运, 重则毁坏塔基或使塔架变形^[7-9]。故从电力防灾防险、设施运维和资源

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (52037001, 52177070); 国网湖南省电力有限公司科技项目资助 (5216A321N303); 湖南省自然科学基金项目资助 (2021JJ30729)

调度等各方面看, 都需要准确评估输配电线路山火风险等级, 实施高效精准的监测和预警^[10]。

2016年, 国家电网颁布了《架空输电线路山火分布图绘制导则》, 采用历史火点表征人类活动对山火的影响, 对输配电线路山火等级划分有一定指导意义^[10]。文献[11]利用地球同步轨道卫星获取不同分辨率的电力走廊山火气象监测数据, 实现不同尺度且具有高时效的精确气象数值预测, 然后结合降水、风场、植被等气象和环境因子实现输电线路山火跳闸概率实时计算, 并在湖南省进行了试验验证。文献[12]选取线路巡查结果、电力走廊气象信息、森林火灾监测数据、火情跟踪数据等多种山火因子, 利用基于BP神经网络的新型输电线路火险模型计算火险等级。文献[13]基于输电线路历史故障、实时监测数据和气象预报信息3个方面风险因子, 利用层次分析法对输电线路山火风险进行评估。文献[14]分析认为, 极端天气条件极易造成线路故障, 引发线路周边火灾。文献[15]结合短期气象因子与长期气候变化, 研究全球火险变化规律, 一定程度上揭示了火灾与气象、气候之间可能存在的关联机制, 强调在山火分析时除了要对山火发生规律进行统计分析, 还应对比各诱导因子之间的差异性。上述火险评估方法只考虑了线路附近气象及植被性质等因素, 忽视了山火因子间的相互影响, 既没有考虑到线路与植被距离对山火风险的影响, 也缺乏对不同植物在电弧作用下燃烧特性的深入研究。目前全球尚未建立专门的配电网山火风险等级划分体系, 仅通过采用单一快速跳闸的方式来预防山火, 存在降低山火隐患和可靠供电的博弈问题^[16-18]。

针对树枝碰线起火, 为开展差异化的防山火措施, 本文提出一种基于多指标综合评价的配电网接地故障山火风险等级划分方法, 结合无人机巡线数据、配电网历史故障数据以及气象数据, 分析相关山火风险因子。在此基础上, 通过植被电弧燃烧性实验, 提出电弧燃烧性参数^[19], 将其作为山火风险因子。利用德尔菲-网络分析法^[20]确定各山火风险因子权重, 通过加权求和方法得到配电网接地故障山火风险综合得分, 从而确定配电网山火风险等级。

1 配电网接地故障山火风险等级划分法

配电网附近植被接触到绝缘破损线路形成接地故障引发山火, 这一故障情景的发生需要4个条件: 线路与植被间距离较近、线路存在绝缘破损、植被本身易燃及气候适合火灾发生。据此, 本文提出了地理、历史、植被、气象等领域的8种风险因

子(如图1所示)。将风险因子按数值从小到大分成无火险、低火险、较高火险、高火险、极高火险5个山火风险等级, 每个区间对应不同的火险得分, 基于德尔菲-网络分析法理清各风险因子间的相互作用关系, 计算相应权值, 加权求和得到配电网山火风险综合得分, 据此得配电网山火风险等级。

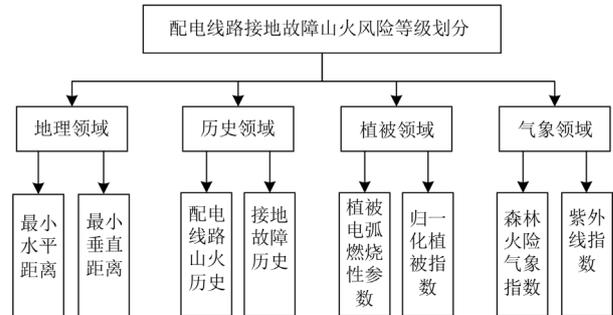


图1 风险因子结构图

Fig. 1 Structure diagram of risk factors

1.1 地理领域风险因子

在DL/T 5220-2021《10 kV及以下架空配电网线路设计规范》中指出, 10 kV及以下架空配电网线路通过林区应砍伐出通道, 通道宽度不宜小于线路两侧向外各延伸2.5 m, 即最小水平距离不小于2.5 m, 导线与树木(考虑自然生长高度)之间的垂直距离不小于3 m。我国配电网的巡线周期一般在一个季度到半年之间, 经数据统计, 除个别生长极为迅速的竹类树种以外, 我国绝大多数常见树种平均生长速度不超过2 m/半年, 因此导线与树木间最小垂直距离不宜小于5 m。

根据上述设计规范, 本文选取植被与配电网最小水平距离与最小垂直距离作为地理领域风险因子, 由等距间隔法和山火特性得到地理领域风险因子得分表, 如表1所示。

表1 地理领域风险因子得分表

风险因子	评分依据/m	风险得分	风险等级
最小水平距离	[2.5, +∞)	1	无火险
	[1.875, 2.5)	2	低火险
	[1.25, 1.875)	3	较高火险
	[0.625, 1.25)	4	高火险
	[0, 0.625)	5	极高火险
最小垂直距离	[5.0, +∞)	1	无火险
	[3.75, 5.0)	2	低火险
	[2.5, 3.75)	3	较高火险
	[1.25, 2.5)	4	高火险
	[0, 1.25)	5	极高火险

1.2 历史领域风险因子

当植被离配电线路过近甚至接触到线路时(如图 2 所示),若线路本身绝缘破损,则会发生接地故障,产生高温电弧引燃植被。线路绝缘破损原因十分复杂,既可能是环境高温、潮湿或腐蚀所导致,又可能是树枝反复碰线刚蹭掉绝缘层,甚至雷击线路导致的绝缘破损。历史绝缘破损信息能反映线路所处环境是否具备线路绝缘破损条件,而山火历史能反映周边气候环境是否满足形成大面积山火的条件。考虑到线路绝缘破损与山火历史在大数据下比较罕见,且相邻杆塔线路间气候、植被环境比较类似,杆塔线路段方圆 50 m 内出现过绝缘破损或山火都可算作有过相关历史。当线路有过绝缘破损与山火历史,未来再次发生灾祸的可能性将增大,综上得到历史领域风险因子得分表,如表 2 所示。

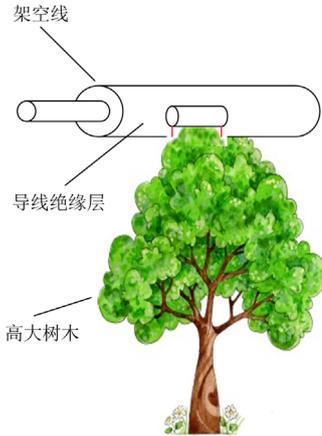


图 2 树枝碰线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the tree branch touching distribution line

表 2 历史领域风险因子得分表

Table 2 Score table for risk factors in historical field

风险因子	评分依据	风险得分	风险等级
绝缘破损历史	无	1	无火险
	有	5	极高火险
山火历史	无	1	无火险
	有	5	极高火险

1.3 植被领域风险因子

高温电弧引燃植被后,火势变大还需要满足两个条件:一是距离线路最近的植被本身易燃能形成大火;二是周围植被足够茂盛能使火势蔓延。对于前者,不同植被是否容易着火以及着火后蔓延速度均不相同,为准确评估植被在电弧作用下的燃烧特性,设计植被电弧燃烧性试验,试验装置由试验电源、植被枝叶、测量系统组成,如图 3 所示。

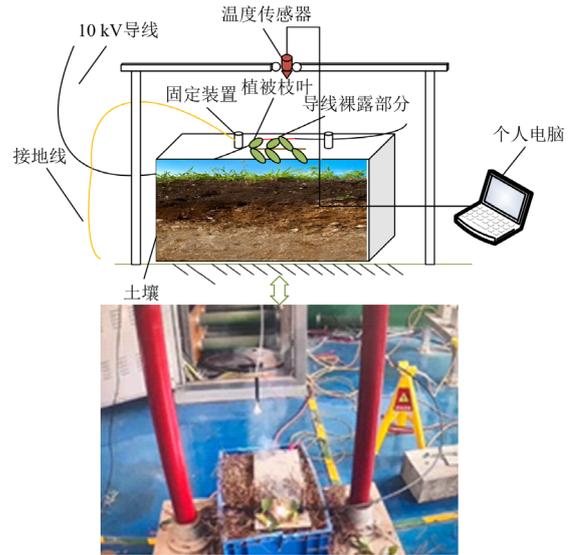


图 3 植被电弧燃烧性试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the apparatus of arc burning property experiment of vegetation

试验电源由一根部分绝缘层破损的通电 10 kV 的绝缘导线、固定装置以及接地线组成。为模拟树枝碰线引发山火,选取各种树木的新鲜枝叶。测量系统由温度传感器和个人计算机组成,温度传感器以每秒一次的频率测量植被燃烧所产生的烟雾的温度,计算机用来保存处理数据。

1) 试验方法与步骤

将已测量初始质量的植被新鲜枝叶与固定的绝缘导线裸露部分充分接触,接通 10 kV/35 kV 交流电,通电时长为 1 min,每次试验均用摄像机拍摄。试验过程中导线发生接地故障,产生的高温电弧引燃植被枝叶,燃烧所产生的白烟触碰到温度传感器,温度传感器记录白烟每秒的温度,将数据传输到计算机。通电结束后,测量每种植物枝叶燃烧后的剩余质量。

2) 试验结果分析

将温度传感器传输到计算机的数据处理成如图 4 所示的温升曲线。图 4 中: $t = 6\text{ s}$ 时通 10 kV 交流电; $t = 6\text{ s}$, 温度急速上升, 植被进入有焰燃烧阶段; $t = 88\text{ s}$, 温度开始下降, 有焰燃烧结束。

为综合评价植被的燃烧特性, 提出电弧燃烧性参数 P 这一评价指标。

$$P = A / (m \cdot t) \tag{1}$$

式中: A 为有焰燃烧阶段烟气温升时间与温度乘积, 即烟气温变化曲线上有焰燃烧阶段烟气温升峰所对应的面积; m 为样品植被枝叶燃烧前后质量差; t 为引燃时间, 即植被从被电弧作用到有焰燃

烧(烟气温度开始急剧升高)所需时间。

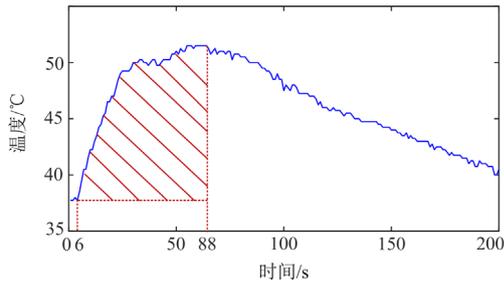


图 4 温升曲线图

Fig. 4 Temperature change curve

在 10 kV/35 kV 交流电下对 10 种植被进行试验, 得到电弧燃烧性参数如表 3、表 4 所示。

表 3 10 种植被在 10 kV 交流电下电弧燃烧性参数

Table 3 ACCP of ten vegetation types in 10 kV alternating current

植物名称	燃烧质量 m/g	引燃时间 t/s	烟气净温升曲线峰面积 $A/(^{\circ}C \cdot s)$	电弧燃烧性参数 $P/(^{\circ}C \cdot g^{-1})$
毛竹	17	6	874.93	8.58
柏树	12	8	681.66	7.10
松树	16	6	974.62	10.15
杉木	13	12	726.54	4.65
桉树	13	8	562.71	5.41
楠木	16	6	618.94	6.45
樟树	11	6	637.61	9.66
栎树	9	7	513.54	8.15
广玉兰	9	17	358.44	2.34
灯笼树	15	9	534.86	3.96

表 4 10 种植被在 35 kV 交流电下电弧燃烧性参数

Table 4 ACCP of ten vegetation types in 35 kV alternating current

植物名称	燃烧质量 m/g	引燃时间 t/s	烟气净温升曲线峰面积 $A/(^{\circ}C \cdot s)$	电弧燃烧性参数 $P/(^{\circ}C \cdot g^{-1})$
毛竹	25	4	913.42	9.13
柏树	15	7	785.46	7.48
松树	21	4	837.48	9.97
杉木	18	9	850.54	5.25
桉树	17	6	546.72	5.36
楠木	19	4	475.76	6.26
樟树	14	5	723.17	10.33
栎树	12	6	625.68	8.69
广玉兰	12	12	256.32	1.78
灯笼树	17	7	528.36	4.44

对比同一植被在 10 kV 和 35 kV 交流电下的实验结果, 发现在 35 kV 交流电下燃烧质量更多, 引燃时间更短。由此可见电压越高, 燃烧越充分。但从结果来看, 不同电压下同一植被的电弧燃烧性参

数差值小于 1, 而电弧燃烧性参数的风险得分以每间隔 2.5 为一个数值区段, 同一区段对应同一风险得分, 可见不同电压下的电弧燃烧性参数在综合风险评估中得分相同, 因此在整个山火风险等级划分体系下该误差可以接受。由于山区配电网中 10 kV 中压交流电占比更高, 以该电压下的电弧燃烧性参数试验结果为植被领域山火风险因子, 得到植被因素风险得分表, 见表 5。

表 5 植被领域风险因子得分表

Table 5 Score table for risk factors in vegetation field

风险因子	评分依据	风险得分	风险等级
电弧燃烧性参数	[0, 2.5)	1	无火险
	[2.5, 5)	2	低火险
	[5, 7.5)	3	较高火险
	[7.5, 10)	4	高火险
	[10, +∞)	5	极高火险
归一化植被指数	(-1, 0)	1	无火险
	[0, 0.25)	2	低火险
	[0.25, 0.5)	3	较高火险
	[0.5, 0.75)	4	高火险
	[0.75, 1)	5	极高火险

归一化植被指数(H_{NDVI})作为植被健康遥感测量领域的通用定量公式, 能表征区域植被生长状况与茂盛程度, 与山火蔓延、火势扩大高度相关。归一化植被指数为近红外(H_{NIR})与红光(H_{RED})之差与之和的比值, 即

$$H_{NDVI} = \frac{H_{NIR} - H_{RED}}{H_{NIR} + H_{RED}} \quad (2)$$

归一化植被指数数值介于(-1,1)之间, 若为负值, 则说明地面覆盖为云、水、雪等对可见光高反射物质; 归一化植被指数接近 0, 说明地面上为岩石或裸土等; 归一化植被指数为正值, 说明地面有植被覆盖, 且随覆盖度增大而增大。

综上, 地理领域风险因子有植被电弧燃烧性参数与归一化植被指数, 据此分析得植被领域风险因子得分表, 如表 5 所示。

1.4 气象领域风险因子

气象条件对可燃物燃烧特性影响较大, 高温、低湿、多风等气象条件会使可燃物含水率明显降低、易燃性显著增大。风速和风向更是直接决定火灾传播方向、蔓延速度和扑灭难易程度。森林火险指数是基于综合指标法将多种气象因子融合而建立的复合型森林火险指数^[21]。依据火灾发生前气象数据, 计算森林火险指数, 具体过程如下。

从配电线路附近气象站实时获取气象变量风速 v 、气温 T 、相对湿度 r_{RH} 及连续无降水日数 M 等线

路气象信息，通过表 6 获取上述变量对应的函数值 $f(v)$ 、 $f(T)$ 、 $f(r_{RH})$ 、 $f(M)$ 。

将已获取的函数值 $f(v)$ 、 $f(T)$ 、 $f(r_{RH})$ 、 $f(M)$ 代入式(3)，计算森林火险气象指数函数 U 。

$$U = f(v) + f(T) + f(r_{RH}) + f(M) \quad (3)$$

表 6 气象变量函数取值表

Table 6 The table of meteorological function value

气象变量	变量取值范围	变量对应函数值
风速 v (m/s)	[0,1.5]	4
	(1.5,3.5]	8
	(3.5,5.6]	12
	(5.6,8.1]	15
	(8.1,10.9]	19
	(10.9,14.0]	23
	(14.0,17.2]	27
	>17.2	31
气温 T (°C)	[0,5]	0
	(5,10]	5
	(10,15]	6
	(15,20]	9
	(20,25]	13
	>25	15
相对湿度 r_{RH}	[0,30)	15
	[30,40)	12
	[40,50]	9
	[50,60]	6
	[60,70)	3
	≥ 70	0
连续无降水日数 M	0	0
	1	8
	2	12
	3	19
	4	23
	5	27
	6	31
	7	35
	≥ 8	38

结合森林气象火险指数函数 U ，据式(4)计算森林火险气象指数 I_{FFDI} 。

$$I_{FFDI} = U \times C_r \times C_s \quad (4)$$

式中： C_r 为降水量修正系数，24 h 降水量大于 1 mm 时 C_r 取 0，小于 1 mm 时 C_r 取 1； C_s 为积雪修正系数，24 h 雪深大于 0 cm 时， C_s 取 0，24 h 雪深等于 0 时， C_s 取 1。

据统计，山火灾害多发于天气晴朗干燥地区，而森林火险气象指数忽视了日照的影响，存在一定的局限性。阳光中有大量紫外线，紫外线指数能侧面反映地区日照强度，其数值变化范围为 0~15。

综上，据国家标准 GB/T36743-2018 与世界气象指数规定，将森林火险气象指数和紫外线指数分为 5 个等级，由此得到气象领域风险因子得分表，如表 7 所示。

表 7 气象领域风险因子得分表

Table 7 Score table for risk factors in meteorologic field

风险因子	评分依据	风险得分	风险等级
森林火险气象指数	(4,42]	1	无火险
	(42,50]	2	低火险
	(50,69]	3	较高火险
	(69,73]	4	高火险
	(73,100)	5	极高火险
紫外线指数	0,1,2	1	无火险
	3,4	2	低火险
	5,6	3	较高火险
	7,8,9	4	高火险
	10 以上	5	极高火险

1.5 基于德尔菲-网络分析法风险因子权值计算

配电线路山火风险的评估复杂程度高、综合性强，各风险因子权重是影响最终火险评估准确性的关键。本文基于网络分析法(analytic network process, ANP)进行风险因子权值的分析和计算，典型结构如图 5 所示。

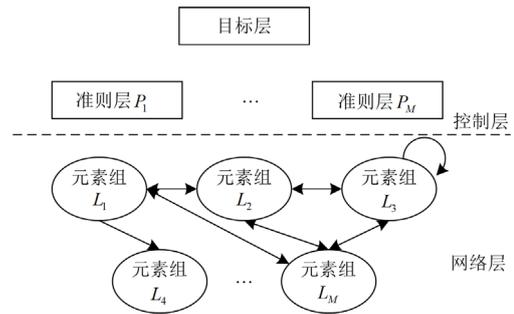


图 5 网络分析法典型结构图

Fig. 5 Typical structure diagram of ANP

如图 5 所示，设网络层中有 M 个元素组 (L_1, \dots, L_M)，每个元素组中有 N 个风险因子。各元素组间相互作用，没有明确的层次关系。图中单箭头表示某元素集中风险因子对箭头所指元素集中风险因子有影响，双箭头表示互有影响，循环箭头表示元素集中风险因子相互影响。当 M 较小时，元素组间影响关系较为简单，可由专家经验主观认定。

而风险因子往往数量众多, 影响关系复杂, 需要众多专家借助九级标度法(见表 8)^[22]认定, 两两比较各风险因子间的直接影响程度, 间接判断各风险因子优先度关系, 构建判断矩阵来进行评估。

表 8 九级标度法

Table 8 Nine-scale method

标度	含义
1	两元素对目标具有相同影响性
3	x 元素比 y 元素对目标具有稍微更高影响性
5	x 元素比 y 元素对目标具有明显更高影响性
7	x 元素比 y 元素对目标的影响性高得多
9	x 元素远高于 y 元素的影响性
2、4、6、8	相邻判断中值

为解决网络分析法中专家决策主观随意, 导致判断矩阵数据基数不一致、缺失等问题, 利用德尔菲法比较各元素组间直接影响程度。在专家判断完各元素组间直接影响程度之后, 整理、归纳、统计, 匿名反馈给各专家, 再次征求意见、集中、反馈, 直至得到一致的意见, 确定各元素组间关系与非归一化判断矩阵 W_{ij} , 进而求得各元素组间相互影响的未加权超矩阵 W , 如式(6)所示。

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1,j1} & w_{i1,j2} & \cdots & w_{i1,jn} \\ w_{i2,j1} & w_{i2,j2} & \cdots & w_{i2,jn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{im,j1} & w_{im,j2} & \cdots & w_{im,jn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $w_{im,jn}$ 为元素组 i 中第 m 个风险因子对元素组 j 中第 n 个风险因子的直接影响程度, 若 i 元素组中的风险因素对 j 元素组中的风险因子无影响, 则 $W_{ij} = \mathbf{0}$ 。

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1M} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W_{M1} & W_{M2} & \cdots & W_{MM} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, W_{M1} 代表元素组 M 与元素组 1 风险因子间判断矩阵。

对 W 作归一化处理得到加权超矩阵 \overline{W} , 当矩阵阶数 M 趋于无穷大, 极限收敛且唯一时, 即可得各元素的稳定权重向量 \overline{W}^∞ , 如式(7)所示。

$$\overline{W}^\infty = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \overline{W}_k = (\overline{W}_{11}^\infty, \overline{W}_{12}^\infty, \cdots, \overline{W}_{1N}^\infty, \overline{W}_{21}^\infty, \cdots, \overline{W}_{MN}^\infty)^T \quad (7)$$

式中: \overline{W}_k 为 \overline{W} 的 k 阶子矩阵; \overline{W}_{MN}^∞ 为第 M 个元素组中的第 N 个元素的稳定权重向量。

1.6 配电线路接地故障山火风险等级划分

为表征网络层各元素组中风险因子对目标层山火风险评估的综合影响, 山火风险等级综合得分如式(8)所示。

$$S = \sum_{a=1}^M \sum_{b=1}^N \overline{W}_{ab}^\infty \times R_{ab} \quad (8)$$

式中: S 为山火风险等级综合得分; M 为网络层总元素组数; N 为该元素组所含的风险因子数; \overline{W}_{ab}^∞ 为元素组 a 中第 b 个风险因子的稳定权重; R_{ab} 为元素组 a 中第 b 个风险因子的风险得分。

根据山火风险等级划分表(见表 9)确定配电线路接地故障山火风险等级。

表 9 配电线路接地故障山火风险等级划分表

Table 9 The table of dividing the FFRLs

山火风险等级	无火险	低火险	较高火险	高火险	极高火险
综合得分	1	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,5]

1.7 软硬件实现

配电网接地故障山火风险等级预测可通过无人机巡线收集目标地区地理、历史、植被、气象等领域风险因子相关信息, 流程如下。

1) 基于无人机激光雷达^[23-24](light detection and ranging, LiDAR)巡线数据的配电线路地理领域风险因素信息提取。

无人机巡线时, 激光雷达测量地表植被与杆塔线路的三维点云, 从而获取目标高精度三维坐标, 计算处理后得到目标配电线路与附近植被的最小水平距离与最小垂直距离, 基于无人机激光雷达巡线数据的配电线路地理领域风险因素信息提取流程图如图 6 所示。

2) 基于无人机多光谱相机^[25]的配电线路植被领域风险因子信息提取。

无人机多光谱相机能同时获取多光谱带图像, 分辨率高, 所拍图像数据精准。无人机巡线时先在高处利用多光谱相机采集目标区域近地遥感数据, 提取 NDVI 数据。根据 LiDAR 数据获取目标线路最近植被精确位置, 无人机移动到该位置拍摄植被图像, 上传数据终端, 通过卷积神经网络识别图像信息, 识别植被种类。该算法选用自主学习能力强的 VGGNet-16 卷积神经网络进行特征提取, 以双线性内插算法实现数据采样, 采用稳定性强、学习速度快的动量改进随机梯度下降算法进行模型训练, 图像识别成功率高达 95%, 满足现场要求, 基于无人机多光谱相机的配电线路植被领域风险因子信息提取流程图如图 7 所示。

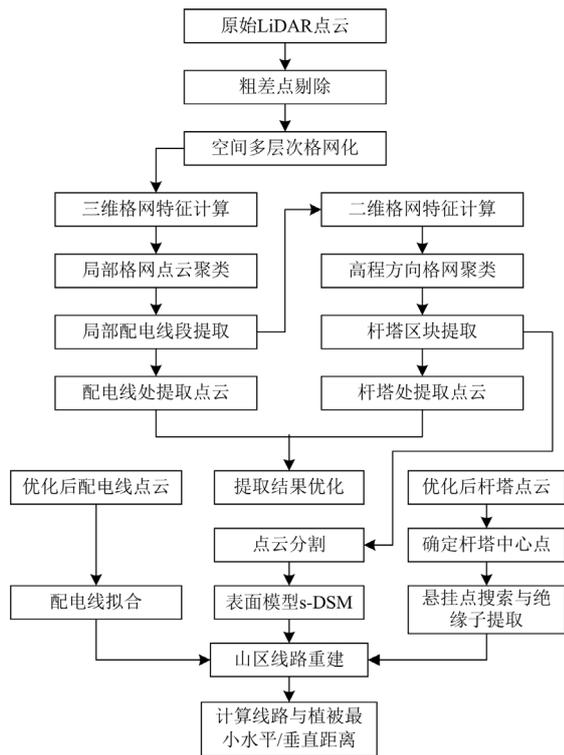


图 6 基于无人机激光雷达巡线数据的配电网地理领域风险因素信息提取流程图

Fig. 6 Flowchart of risk factors in geography field information extraction for distribution line based on unmanned aerial vehicle LiDAR patrol data

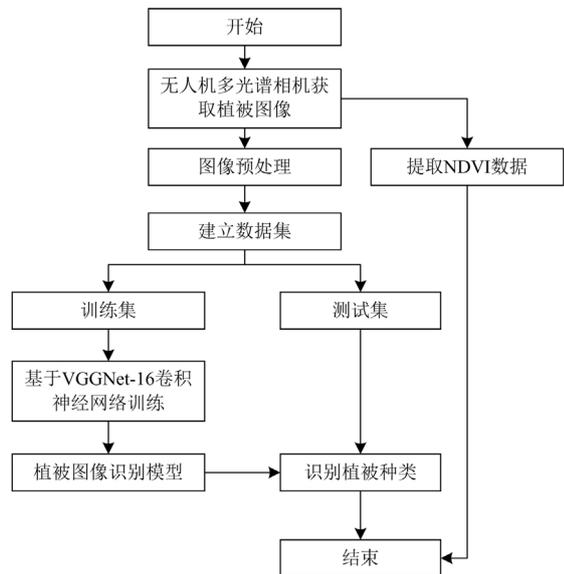


图 7 基于无人机多光谱相机的配电网植被领域风险因素信息提取流程图

Fig. 7 Flowchart of risk factors in vegetation field information extraction for distribution line based on multi-spectral camera in unmanned aerial vehicle

3) 基于国家专业数据库的配电线路气象与历史领域风险因子信息提取。

风速、降水/雪量、相对湿度、连续无降水日、紫外线指数等目标区域气象监测数据由国家气象科学数据信息中心提供，经计算可得地区森林火险气象指数；目标配电线路山火以及接地故障历史数据可由当地电业局提供。

4) 基于超级决策软件的山火风险因子网络分析法权值计算。

由于网络分析法的原理和过程较为复杂，在所需元素较多时手工计算十分困难，如不利用计算程序，其运用于现场的可能性有限。超级决策软件(Super Decisions)将网络分析法的计算程序化，使用简单，运算准确。将基于德尔菲法所得元素组间影响关系与风险因素判断矩阵输入超级决策软件中，即可得到整个系统的未加权超矩阵、加权超矩阵和权值结果。

2 算例分析

以湖南电网为例，该地区为亚热带季风气候，夏热冬温、四季分明、植被茂盛，配电网分布广泛，因树竹碰线所引发的火灾频发^[26-27]。选择湖南省某 10 kV 配电线路进行山火风险等级划分，以期间某段杆塔间配电线路为例，计算山火风险等级。

无人机巡线时，先用激光雷达扫描整条线路，构建配电线路三维点云，计算得出线路与附近植被最小水平距离和最小垂直距离。同时用搭载的多光谱相机采集目标配电线路的近地遥感数据，提取出归一化植被指数数据。无人机移动到离线路最近植被处，拍摄多张该植被照片，将照片上传至互联网的互联网终端，通过训练好的 VGGNet-16 卷积神经网络识别图像植被种类。若有多处植被在水平距离或垂直距离上离线路最近，则拍摄所有符合条件的植被照片进行识别，取燃烧性参数最高的植被为最终结果。结果显示，最小水平距离为 1.52 m，最小垂直距离为 0 m(植物本身高度与线路相当或超过时取 0 值)，植被为樟树，归一化植被指数为 0.43。查表 1 得到该杆塔线路最小水平距离得分为 3 分，最小垂直距离得分为 5 分；查表 3 和表 5 得到该树种燃烧性参数为 9.66，电弧燃烧性参数得分为 4 分，归一化植被指数得分为 3 分。

通过气象局得到该杆塔线路该日的气象数据：风速为 5.28 m/s，温度为 36 ℃，湿度为 48%。连续 7 天无降水，紫外线指数为 12，24 h 降水量和 24 h 降雪量均为 0 mm。根据式(3)、式(4)计算其森林火险气象指数，结果为 47。查表 7 得到森林火险气象

指数得分为 4 分, 紫外线指数得分为 5 分。

由电力局数据得到该杆塔线路无绝缘破损记录和山火历史记录, 据表 2 得到接地故障历史与山火历史得分均为 1 分。

将配电线路山火风险划分为控制层, 地理、历史、植被、气象等领域风险因子为控制层。为保证评价体系的客观性, 组织 10 名相关领域专家基于德尔菲法对各元素集及其风险因子关系进行评判, 将结果输入超级决策软件中, 如图 8 所示。

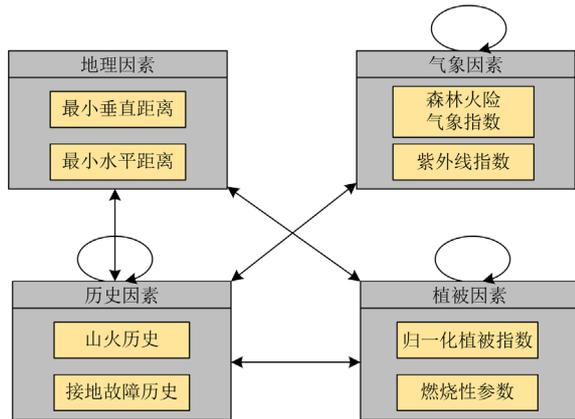


图 8 超级决策软件中各元素集关系图

Fig. 8 Graph of element clusters relation in super decisions

将基于德尔菲法与九级标度法所得的判断矩阵输入超级决策软件中, 即可得到权值结果, 如表 10 所示。

表 10 超级决策软件所计算的风险因子权值结果表

Table 10 The table of weight of risk factors calculated by super decisions

风险因子名称	未归一化权值	归一化稳定权值
最小垂直距离	0.483 90	0.128 597
最小水平距离	0.516 10	0.137 155
山火历史	0.586 68	0.129 574
接地故障历史	0.413 32	0.091 287
森林火险气象指数	0.733 33	0.093 965
紫外线指数	0.266 67	0.034 169
归一化植被指数	0.328 11	0.126 406
燃烧性参数	0.671 89	0.258 848

根据各风险因子风险得分与权值结果, 加权求和得到该杆塔线路山火风险等级综合得分, 如式(9)所示。

$$S = \sum_{a=1}^M \sum_{b=1}^N W_{ab} \times R_{ab} = 0.128597 \times 3 + 0.137155 \times 5 + 0.129574 \times 1 + 0.091287 \times 1 + 0.093965 \times 4 + 0.034169 \times 5 + 0.126406 \times 3 + 0.258848 \times 4 = 3.253742 \quad (9)$$

据表 9 得到, 该杆塔线路的山火风险等级为高风险。同理计算其他杆塔间线路的山火风险等级, 该 10 kV 配电线路山火风险分布图如图 9 所示。

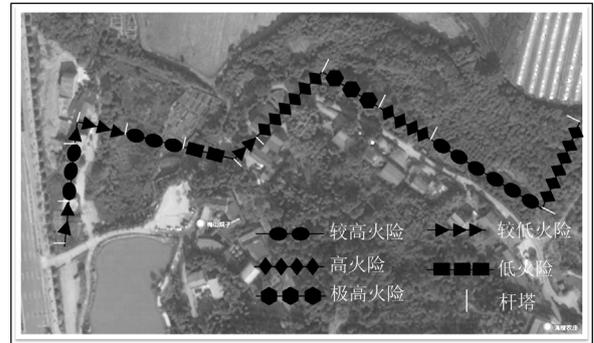


图 9 某 10 kV 配电线路山火风险分布图

Fig. 9 Forest fire risk distribution map of a 10 kV distribution line

3 结论

本文针对树枝碰线产生电弧引发山火这一配电线路故障情景, 充分考虑地理、历史、植被、气象等因素, 基于德尔菲-网络分析法提出一种配电线路山火风险等级划分方法。

1) 以线路与附近植被最小水平距离与最小垂直距离为地理因素评价指标, 线路历史绝缘破损信息与山火历史信息为历史因素评价指标, 森林火险指数、紫外线指数为气象因素评价指标, 并给出相应的风险得分表。

2) 设计植被电弧燃烧性试验, 提出燃烧性参数这一植被因素评价指标。对柏树、松树、杉木、毛竹、灯笼树、楠木、樟树、栎树、广玉兰、桉树等 10 种常见植被进行试验, 计算燃烧性参数。以植被燃烧性参数与归一化植被指数为植被因素评价指标, 根据其数值给出相应的风险得分表。

3) 用基于德尔菲法的网络分析法分析元素组间关系, 计算各风险因子权重, 给出配电线路山火风险综合评分计算方法及相应的风险等级划分表。

4) 以湖南省某 10 kV 配电线路为例, 计算山火风险等级, 得到山火风险分布图。实际证明本文所提配电线路山火风险等级划分方法能确定线路山火防治重要区段, 高风险情况跳闸, 低风险情况告警, 以此减少跳闸次数, 降低山火隐患的同时提高供电可靠性, 为面向山火防治的配电线路接地故障处置装置提供有力辅助参考。

参考文献

[1] 杨张斌, 李钢, 王仙荣, 等. 应用于海上风电柔性直流输电系统的灵活调压策略[J]. 供用电, 2022, 39(9): 76-82.

- YANG Zhangbin, LI Gang, WANG Xianrong, et al. Flexible voltage regulation strategy for offshore wind farm with VSC-HVDC[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(9): 76-82.
- [2] 朱海勇, 吴小丹, 王宇, 等. 风电机组经低频输电系统并网的故障穿越协调控制[J]. *供用电*, 2022, 39(11): 11-17, 31.
- ZHU Haiyong, WU Xiaodan, WANG Yu, et al. A coordinated fault ride-through control for wind turbine through LFTS[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(11): 11-17, 31.
- [3] 陈志永, 张倩茅, 秦梁栋, 等. 考虑大规模区外来电接入的输电网扩展规划方法[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(10): 87-97.
- CHEN Zhiyong, ZHANG Qianmao, QIN Liangdong, et al. A transmission expansion planning method considering of large-scale external power access[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(10): 87-97.
- [4] MILLER C, PLUCINSKII M, SULLIVAN A, et al. Electrically caused wildfires in Victoria, Australia are over-represented when fire danger is elevated[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 167: 267-274.
- [5] 张睿卓. 基于多源数据的林区电力走廊安全风险评估方法[J]. *测绘学报*, 2022, 51(5): 784-784.
- ZHANG Ruizhuo. Risk assessment of power transmission corridors in forestry area based on multisource data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(5): 784-784.
- [6] 赵法强, 黄洪松, 胡琴, 等. 输配电设备发热故障温度指示技术研究综述[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(5): 14-22.
- ZHAO Faqiang, HUANG Hongsong, HU Qin, et al. A review of temperature indication technology for heating failure of power transmission and distribution equipment[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(5): 14-22.
- [7] 王开正, 付一桐, 钱国超, 等. 基于时空上下文的输电线路山火自动识别算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(18): 83-91.
- WANG Kaizheng, FU Yitong, QIAN Guochao, et al. An automatic identification algorithm for wildfire occurrences near transmission line corridors based on spatio-temporal context[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(18): 83-91.
- [8] 张奇星, 李籽剑, 张强. 压缩气流灭弧条件下配网线路雷击跳闸率计算[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(7): 64-71.
- ZHANG Qixing, LI Zijian, ZHANG Qiang. Calculation of lightning strike tripping rate of distribution line under condition of CDPD[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(7): 64-71.
- [9] 张路, 熊张恣, 王建, 等. 考虑一二次耦合多重故障的电力系统风险评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(14): 95-105.
- ZHANG Lu, XIONG Zhangmin, WANG Jian, et al. Power system risk assessment considering primary and secondary coupled multiple faults[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(14): 95-105.
- [10] 刘明军, 邵周策, 上官帖, 等. 输电线路山火故障风险评估模型及评估方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(6): 82-89.
- LIU Mingjun, SHAO Zhouce, SHANGGUAN Tie, et al. Study on models and methods of risk assessment of transmission line fault caused by fire[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(6): 82-89.
- [11] 周志宇. 山火灾害下电网输电线路跳闸风险评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- ZHOU Zhiyu. Research on risk assessment of power grid transmission-line trips due to wildfire disasters[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [12] 刘春翔, 范鹏, 王海涛, 等. 基于 BP 神经网络的输电线路山火风险评估模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(17): 100-105.
- LIU Chunxiang, FAN Peng, WANG Haitao, et al. Modeling forest fire risk assessment based on BP neural network of transmission line[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(17): 100-105.
- [13] 朱奇, 郭江, 曾兵, 等. 基于层次分析法的输电线路防山火预警评估模型[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(6): 71-75, 88.
- ZHU Qi, GUO Jiang, ZENG Bing, et al. An early-warning evaluation model against mountain fire of transmission line based on analytic hierarchy process[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(6): 71-75, 88.
- [14] MITCHELL W J. Power line failures and catastrophic wildfires under extreme weather conditions[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 35: 726-735.
- [15] SHEN H, TAO S, CHEN Y, et al. Global fire forecasts using both large-scale climate indices and local meteorological parameters[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019, 33(8): 1129-1145.
- [16] 杨淳岚, 宁鑫, 徐会凯, 等. 电网山火监测及风险预警技术研究综述[J/OL]. *电网技术*: 1-13[2023-11-02]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2267>.
- YANG Chunlan, NING Xin, XU Huikai, et al. Overview of mountain fire monitoring and early warning for power

- grid demand[J]. Power System Technology: 1-13[2023-11-02]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2267>.
- [17] 田晓瑞, MCRAE D J, 张有慧. 森林火险等级预报系统评述[J]. 世界林业研究, 2006, 19(2): 39-46.
TIAN Xiaorui, MCRAE D J, ZHANG Youhui. Assessment of forest fire danger rating systems[J]. World Forestry Research, 2006, 19(2): 39-46.
- [18] 汪东, 贾志成, 夏宇航, 等. 森林草原火灾监测技术研究现状和展望[J]. 世界林业研究, 2021, 34(2): 26-32.
WANG Dong, JIA Zhicheng, XIA Yuhang, et al. Research progress and trend in forestry and grassland fires monitoring technology[J]. World Forestry Research, 2021, 34(2): 26-32.
- [19] 李世友, 罗文彪, 舒清态, 等. 昆明地区 25 种木本植物的燃烧性及防火树种筛选[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(3): 351-357.
LI Shiyu, LUO Wenbiao, SHU Qingtai, et al. Combustibility of 25 woody plants for selection of fire-resistant tree species in Kunming area[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009, 26(3): 351-357.
- [20] 张璐, 许开立, 葛及, 等. 基于 DEMATEL-ANP-可拓云模型的铜冶炼企业安全生产风险评价[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(1): 1-8.
ZHANG Lu, XU Kaili, GE Ji, et al. Safety production risk assessment of copper smelting enterprises based on DEMATEL-ANP extensible cloud model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(1): 1-8.
- [21] 牛若芸, 翟盘茂, 孙明华. 森林火险气象指数及其构建方法回顾[J]. 气象, 2006, 32(12): 3-9.
NIU Ruoyun, ZHAI Panmao, SUN Minghua. Review of forest fire danger weather indexes and their calculation methods[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(12): 3-9.
- [22] 石宜金, 谭贵生, 赵波, 等. 基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 167-176.
SHI Yijin, TAN Guisheng, ZHAO Bo, et al. Condition assessment method for power transformers based on fuzzy comprehensive evaluation and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 167-176.
- [23] 周游, 隋三义, 陈洁, 等. 基于 Himawari-8 静止气象卫星的输电线路山火监测与告警技术[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2561-2569.
ZHOU You, SUI Sanyi, CHEN Jie, et al. Monitor and alarm technology of wildfire occurrences in transmission lines corridors based on Himawari-8 geostationary meteorological satellite[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2561-2569.
- [24] 陈锡阳, 胡长猛, 夏云峰, 等. 基于激光雷达技术的输电线路山火预警研究[J]. 电气应用, 2015, 34(9): 58-61.
CHEN Xiyang, HU Changmeng, XIA Yunfeng, et al. Study on mountain fire early-warning of transmission line based on lidar technology[J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(9): 58-61.
- [25] SU Yanjun, GUO Qinghua, COLLINS B M, et al. Forest fuel treatment detection using multi-temporal airborne lidar data and high-resolution aerial imagery: a case study in the Sierra Nevada Mountains, California[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(14): 3322-3345.
- [26] 刘毓, 李波, 罗晶, 等. 输电线路分布式山火监测系统在湖南电网的应用[J]. 湖南电力, 2016, 36(5): 44-46.
LIU Yu, LI Bo, LUO Jing, et al. Application of distributed monitoring system for transmission line nearby wildfire in Hunan power grid[J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(5): 44-46.
- [27] BRATATI G, KUMAR A C, RATAN A B. Reliability and efficiency enhancement of a radial distribution system through value-based auto-recloser placement and network remodelling[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-14.

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2023-12-29

作者简介:

欧阳帆(1979—), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: ouyf@hn.sgcc.com.cn

余笑龙(2000—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 328830582@qq.com

(编辑 许威)