

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.017

# 基于多维联合动态监测的输电线路山火风险预警与运行决策研究

乔天骄<sup>1</sup>, 张雷<sup>1</sup>, 许中阳<sup>1</sup>, 李威<sup>2</sup>, 李勇华<sup>2</sup>

(1. 国家电网有限公司华北分部, 北京 100053; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 南京 211106)

**摘要:** 高比例可再生能源并网需建设更多的交直流输电网, 再生能源输电不可避免经过山火高发区域。为提升输电线路的山火预防能力, 文中研究了基于多维联合动态监测的输电线路山火风险预警和运行决策方法。发生山火时, 通过多维联合的山火监测体系迅速确定火点, 结合植被、地形、风速等因素, 动态计算山火蔓延至输电线路的概率。通过试验研究坡度、风速对火焰条件下间隙击穿电压的影响。结合山火蔓延和考虑环境因素的击穿特性, 计算输电线路的击穿跳闸概率, 发布山火风险预警, 提出对应的运行决策, 对输电线路安全稳定运行具有重要意义。

**关键词:** 多维联合监测; 山火预警; 山火蔓延; 间隙击穿特性

## Research on Risk Warning and Operation Decision of Transmission Line Wildfire Based on Multi-dimensional Joint Dynamic Monitoring

QIAO Tianjiao<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, XU Zhongyang<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, LI Yonghua<sup>2</sup>

(1. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China; 2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The high proportion of renewable energy grid connection requires the construction of more AC/DC transmission networks, and renewable energy transmission inevitably passes through areas with high wildfire incidence. For enhancing the ability of transmission lines to prevent wildfires, the risk warning and operation decision method of transmission line wildfires based on multidimensional joint dynamic monitoring is researched in this paper. In case of wildfire, the fire point is quickly determined through a multidimensional joint wildfire monitoring system, and the probability of wildfire spreading to transmission lines is dynamically calculated based on such factors as vegetation, terrain, and wind speed. The influence of slope and wind speed on gap breakdown voltage is studied by flame conditions through experiments. Based on the spread and breakdown characteristics of environmental factors, the probability of breakdown tripping of transmission lines is calculated, the wildfire risk warnings are issued, and corresponding operational decisions are proposed, which are of great significance for the safe and stable operation of transmission lines.

**Key words:** multi-dimensional joint monitoring; wildfire warning; wildfire spreading; gap breakdown characteristics

## 0 引言

随着可再生能源大规模并网, 大量输电线路穿

越林区或荒地, 安全稳定运行面临山火的严峻考验<sup>[1-4]</sup>。

目前针对输电线路山火跳闸风险预警评估, 主要结合人为因素、线路走廊植被、气象和地形等因素预

收稿日期: 2025-08-20; 修回日期: 2025-10-13

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(61933005); 国网华北分部调控中心项目(SGNC0000DKXX2310156)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China Key Funding Project(61933005), Project of North China Branch of State Grid Corporation of China(SGNC0000DKXX2310156).

测线路走廊发生火灾风险和线路绝缘击穿的概率<sup>[5-7]</sup>, 对于输电线路山火防治区段划分具有重要作用。但上述研究对山火发生时火灾蔓延至线路的动态预警研究尚有不足, 且山火条件下输电线路的击穿耐压主要采用传统试验数据拟合, 对不同风速地形的适用性有待验证。随着山火多维监测系统的完善, 可以更快速识别确定山火位置<sup>[8-10]</sup>, 对于复杂输电线路走廊环境, 在山火发生时进一步预测山火是否能够蔓延至线路下方, 并结合不同环境条件下火焰间隙的耐压特性对输电线路山火因跳闸风险进行预警, 对于线路运行决策、保障供电安全具有重要意义。

目前, 山火蔓延研究主要在王正非模型<sup>[11]</sup>的基础上, 考虑温度、湿度、风速、风向、植被类型等复杂环境对山火的影响。杨知<sup>[12]</sup>等利用遥感和GIS技术构建了山火蔓延监控平台, 结合下垫面和气象等因素, 实现了模拟了山火蔓延过程。李晋伟<sup>[13]</sup>等基于经验模态分解和极端学习机, 有效预测输电线路山火蔓延速度。刘辉、周国雄<sup>[14-15]</sup>等提出了基于元胞自动机的山火蔓延模型, 以实现山火蔓延的准确模拟。目前山火蔓延研究多为针对林区山火防治, 适用于大尺度区域, 而输电线路的山火防治主要考虑输电线路附近山火, 需要结合输电线路的区域多维监测系统, 对典型输电线路走廊环境附近的山火蔓延特性开展研究。

山火条件下的间隙击穿特性方面, 黄道春<sup>[16-17]</sup>等根据火焰形态将间隙划分为火焰连续区、火焰不连续区和烟雾区, 研究了间隙放电的间隙击穿特性; 周志宇<sup>[18]</sup>等基于火焰温度、火焰高度、植被类型计算出击穿电压, 进而评估线路跳闸概率; 龙洋明、黎鹏<sup>[19-20]</sup>等研究发现不规则烟雾颗粒会降低54%的空气击穿电压; 周恩泽<sup>[21]</sup>等研究发现高海拔地区火焰中心温度比低海拔地区低18.3%, 但高海拔所需击穿电压仍低于低海拔地区。但现有的间隙击穿研究对坡度和风速考虑较少, 而在坡度和风速作用下的斜坡地形间隙击穿电压, 与常规水平地形间隙击穿电压存在一定差异。

针对上述问题, 文中首先分析风速、风向、坡度等因素对山火蔓延至输电线路概率的影响, 然后开展不同坡度、风速条件下的空气间隙击穿特性试验, 对典型环境因素影响下的山火间隙击穿概率进行修正。进一步结合多维山火监测体系的监测数据, 建立输电线路山火风险预警模型。最后建立输电线路山火风险预警与运行决策, 发生山火时可进行动态预警, 指导运维人员采取应急措施。

## 1 山火蔓延至线路概率分析

### 1.1 山火蔓延分析

通常山火初始火点与输电线路有一定距离, 且在地理因素、气象因素下, 山火存在向远离线路方向蔓延或在蔓延至线路之前熄灭的可能。建立山火蔓延模型, 分析山火蔓延风险, 可为山火有效预警和及时扑救提供理论依据。山火蔓延示意图见图1, 在同一坡度平面下, 取山火起始火点与线路走廊垂直距离为最短距离 $L_{\min}$ 。设定最短距离连线方向为 $0^\circ$ 方向, 逆时针旋转为正方向, 最短距离连线与风向夹角为 $\alpha$ , 当 $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时, 山火向线路走廊蔓延, 为有效风向; 当 $-90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$ 时, 山火向远离线路走廊蔓延, 为无效风向。山火在风速及有效风向作用下, 向线路方向的蔓延距离为 $L_{\text{spread}}$ , 其可初步表示为

$$L_{\text{spread}} = \int_0^t R(t) dt \quad (1)$$

式(1)中:  $R(t)$  为  $t$  时刻山火蔓延速度, m/s;  $t$  为山火熄灭时间, s。

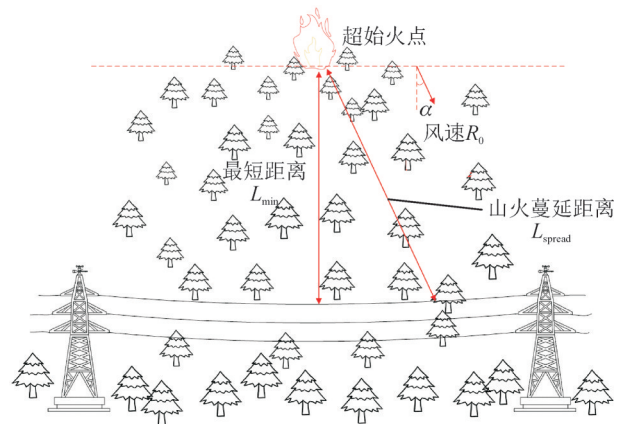


图1 山火蔓延示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wildfire spread

山火蔓延速度 $R(t)$ 主要受风速、温度、湿度、坡度及植被类型影响, 可表示为

$$R(t) = R(t-1)K_s K_w K_\varphi \quad (2)$$

式(2)中:  $R(t-1)$  为上一时刻山火蔓延速度, 记 $R_0 = aT + bV + ch - d$  为初始山火蔓延速度<sup>[11]</sup>, m/s;  $K_s$  为植被燃烧系数;  $K_w$  为风速调整系数;  $K_\varphi$  为坡度调整系数。

植被燃烧系数由植被类型风险等级、可燃物风险等级、NDVI植被指数和植被燃烧试验综合确定<sup>[22]</sup>, 可表示为

$$K_s = \begin{cases} k_{sp1} \cdot k_{sp2} & 0 < k_{sp2} < 1 \\ 0 & k_{sp2} = 0 \\ k_{sp1} \cdot (1 + k_{sp2}) & -1 < k_{sp2} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中:  $k_{sp1}$  为植被燃烧指数;  $k_{sp2}$  为植被稀疏程度。

$k_{sp1}$  反映了植被的易燃程度,其典型植被燃烧指数见表1。

表1 植被燃烧指数

Table 1 Vegetation burning index

植被	隔离带、荒漠	湿地、草甸	阔叶林地	针叶林地	干枯落叶	干枯杂草
$k_{sp1}$	0.0	0.8	1.0	1.2	1.6	1.8

$k_{sp2}$  即为归一化植被指数  $NDVI$ ,其数值越接近1,表明植被覆盖率越高;越接近-1,表明植被稀疏程度越高;如果为0,则没有植被覆盖。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (4)$$

式(4)中:  $NIR$  为卫星遥感数据中的近红外波段反射率;  $RED$  为红外波段反射率。

风速及风向对山火蔓延影响见图2,山火蔓延极易受风速和风向的影响,以火点为中心,向四周呈发散式地蔓延。风速调整系数  $K_w$  可表示为

$$K_w = e^{0.1783v(t)\cos\theta} \quad (5)$$

式(5)中:  $v(t)$  为  $t$  时刻的风速,  $m/s$ ;  $\theta$  为山火蔓延方向与实时风向的夹角,  $(^\circ)$ 。

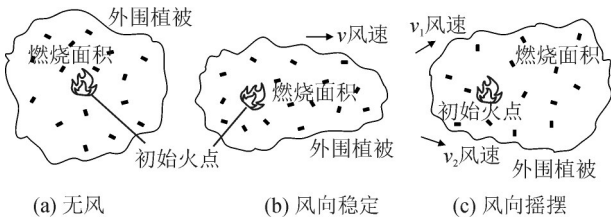


图2 风速及风向对山火蔓延影响

Fig. 2 The impact of wind speed and direction on the spread of wildfires

荒野地形通常存在一定山坡,上坡促进山火蔓延,下坡阻碍山火蔓延,坡度调整系数  $K_\varphi$  可表示为

$$K_\varphi = e^{(-1)^f 3.5331 \tan \varphi} \quad (6)$$

式(6)中:  $f$  为标志着山火蔓延坡向,向上蔓延  $f$  取0,向下蔓延  $f$  取1;  $\varphi$  为具体时刻的坡度,  $(^\circ)$ 。

### 1.2 山火蔓延至线路概率计算

通过实时山火蔓延速度计算,可知  $t-1$  时刻山火蔓延速度为  $R(t-1)$ ,经时间  $\Delta t$  山火蔓延速度为  $R(t)$ ,  $\Delta t$  时段山火蔓延加速度可表示为  $a =$

$[R(t) - R(t-1)]/\Delta t$ 。若  $a < 0$ ,则山火有熄灭趋势,山火熄灭时间可由  $t_e = [R(t_e) - R(t)]/a$  计算,因此从起始火点到山火熄灭的蔓延距离可表示为

$$L_{spread} = R(t) \times t_e + \frac{at_e^2}{2} + L_t \quad (7)$$

式(7)中:  $R(t)$  为  $t$  时刻山火蔓延速度,  $m/s$ ;  $t_e$  为  $t$  时刻到山火熄灭的时间,  $s$ ;  $a$  为  $t-1$  时刻到  $t$  时刻的山火蔓延加速度,  $m/s^2$ ;  $L_t$  为起始火点到时刻的山火蔓延距离,  $m$ 。

山火蔓延至邻近输电线路的概率  $P(f)$  可表示为

$$P(f) = \begin{cases} 0 & 90^\circ \leq \alpha < 270^\circ \\ \frac{L_{spread} \cos \alpha}{L_{min}} & -90^\circ < \alpha < 90^\circ \\ 1 & L_{min} < L_{spread} \cos \alpha, \\ & -90^\circ < \alpha < 90^\circ \end{cases} \quad (8)$$

输电线路依据地形假设,存在转角或多条线路情况。山火起始火点位置具有较大随机性,且山火蔓延过程易受地形、风速、风向等影响。山火向转角输电线路蔓延见图3,起始火点位置与线路区段A的最短距离  $L_{Amin0}$ ,与线路区段B的最短距离  $L_{Bmin0}$ ,在风速  $R_0$ 、风向影响下向转角线路蔓延;  $t$  时刻山火火头蔓延至山火位置1,此时与线路区段A的最短距离  $L_{Amin1}$ ,与线路区段B的最短距离  $L_{Bmin1}$ ,此外风速和风向也存在变化,因此山火最先蔓延至线路区段A或区段B均有可能。因此对于同一条线路,需同时计算山火蔓延至区段A的概率  $P(f_A)$  和蔓延至区段B的概率  $P(f_B)$ ,取最大风险概率作为线路的山火蔓延概率  $P(F)$

$$P(F) = \max [P(f_A), P(f_B)] \quad (9)$$

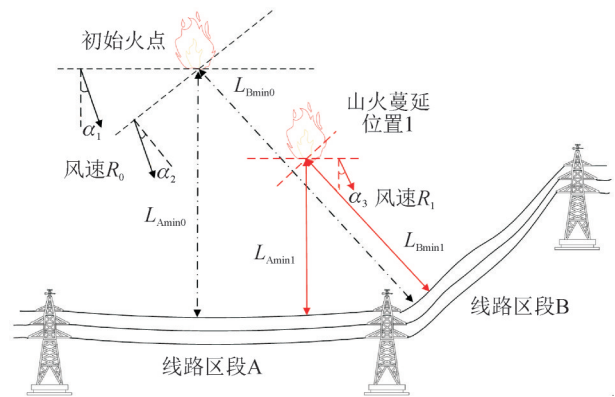


图3 山火向转角输电线路蔓延

Fig. 3 Wildfire spreading towards the transmission line at the corner

## 2 考虑环境因素的山火间隙击穿概率分析

### 2.1 坡度、风速作用下间隙击穿特性

依据典型山火燃烧试验<sup>[16-17,20]</sup>,搭建不同坡度、

风速下的山火间隙击穿试验平台。研究对象为21 cm×21 cm×10 cm、均匀喷洒95%酒精的杉树枝。对导线以2 kV/s的速率进行升压直至间隙击穿,记录对应的间隙击穿电压。每种情况重复3次有效试验,以其余击穿电压的平均值为该情况下的间隙击穿电压。

1)坡度。据山火线路跳闸故障统计,73.6%的线路跳闸发生在坡度为0°~50°的地形<sup>[23-24]</sup>。为研究坡度对击穿电压影响,搭建试验平台见图4,试验平台斜面与水平地面夹角 $\beta$ ,试验平台中心位置与导线的间隙距离 $H$ 为45 cm。调节坡度 $\beta$ 分别为0°、10°、20°、30°、40°、50°,获取不同坡度下的间隙击穿特性。

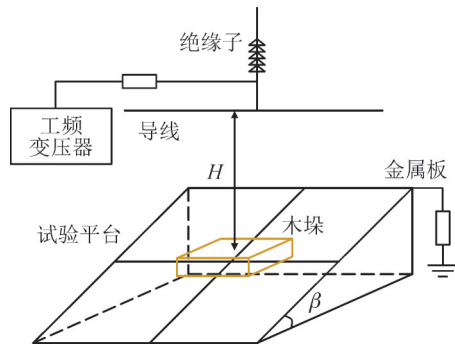


图4 坡度试验平台

Fig. 4 Slope test platform

不同坡度下的间隙击穿电压见表2、图5,试验结果表明,间隙击穿电压随坡度增加而大幅下降,当坡度为0°时,击穿电压31.1 kV,当坡度为50°时,击穿电压17.4 kV,下降了44.1%。分析发现,一方面是植被燃烧产生的热气流向上汇聚,加速了坡度上方的植被干燥,使植被燃烧更充分,提高了火线强度;另一方面,导线到金属板的垂直间隙距离固定,但随着坡度增加,导线与斜坡平面的相对距离缩短,植被燃烧的火焰和热量扩散时,对导线的影响更加明显。坡度—间隙击穿电压拟合曲线可表示为

$$U_s = -0.286\beta + U^s + 0.843 \quad (10)$$

式(10)中: $U_s$ 为坡度情况下的间隙击穿电压,kV; $\beta$ 为坡度,(°); $U^s$ 为水平地形的间隙击穿电压,kV。

表2 不同坡度下的间隙击穿电压

Table 2 Gap breakdown voltage at different slopes

参数	数值					
坡度/(°)	0	10	20	30	40	50
击穿电压/kV	31.1	29.7	26.8	23.5	20.3	17.4

2)风速。通过气象数据可知,常规天气下的风速在0~10 m/s。利用风机模拟起风环境,并通过风速仪测定风速大小。调节火焰间隙所受风速分别

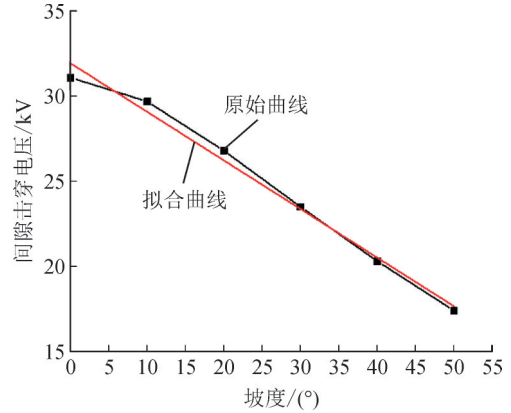


图5 坡度—间隙击穿电压拟合曲线

Fig. 5 Slope-gap breakdown voltage fitting curve

为0、0.6、1.2、2.1、2.7、4.2、5.4 m/s,获取不同风速下的间隙击穿电压。

不同风速下的间隙击穿电压见表3、图6,试验结果表明,无风时间隙击穿电压31.1 kV;风速为1.2 m/s时,击穿电压为24.3 kV,下降了21.9%;风速为5.4 m/s时,击穿电压为47.2 kV,上升了51.7%。分析发现,当风速小于3 m/s时,风带去的空气对植被燃烧有一定促进作用,在微风情况下间隙击穿电压降低;当风速大于3 m/s时,风使火焰的发生较大偏移,火焰垂直高度降低,抑制空气间隙的击穿。风速—间隙击穿电压拟合曲线可表示为

$$U_w = -0.339v^3 + 4v^2 - 8.709v + U^w - 0.443 \quad (11)$$

式(11)中: $U_w$ 为风速情况下的间隙击穿电压,kV; $v$ 为风速,m/s; $U^w$ 为无风情况下的间隙击穿电压,kV。

表3 不同风速下的间隙击穿电压

Table 3 Gap breakdown voltage at different wind speeds

参数	数值						
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.0	0.6	1.2	2.1	2.7	4.2	5.4
击穿电压/kV	31.1	26.6	24.3	27.3	30.8	38.5	47.2

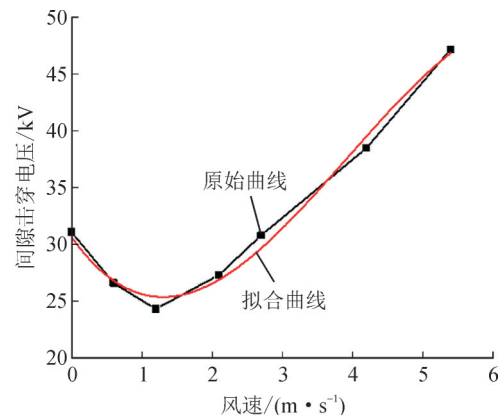


图6 风速—间隙击穿电压拟合曲线

Fig. 6 Wind speed-gap breakdown voltage fitting curve

## 2.2 山火条件下间隙击穿概率计算

基于现有山火间隙击穿研究<sup>[16-17]</sup>,将山火与线路桥接关系分为火焰连续区和烟雾区。综合燃烧反应和温度、湿度、空气密度、烟雾颗粒等各种影响因素<sup>[3]</sup>,计算不同桥接关系的平均耐受场强  $E$ ,并得到击穿电压  $U_{50}^0$  可表示为

$$U_{50}^0 = H_f E_f + H_s E_s + D \quad (12)$$

式(12)中:  $H_f$  和  $H_s$  分别为火焰区间隙高度和烟雾区间隙高度, m;  $E_f$  和  $E_s$  分别为火焰区平均耐受场强和烟雾区平均耐受场强, kV/m;  $D$  为修正系数, kV。

线路架设高度  $H_{line}$ , 植被平均高度  $H_{tree}$ , 植被燃烧火焰高度  $H_{fire}$ , 因此当火焰直接桥接线路时,  $H_f = H_{line} - H_{tree}$ ,  $H_s = 0$ ; 当通过烟雾桥接线路时,  $H_f = H_{fire}$ ,  $H_s = H_{line} - H_{fire} - H_{tree}$ 。火焰高度可由式(13)、(14)计算<sup>[12]</sup>:

$$H_{fire}(t) = \sqrt{I(t)/250} \quad (13)$$

$$I(t) = qWR(t) \quad (14)$$

式(13)、(14)中:  $I(t)$  为  $t$  时刻的火线强度, kW/m;  $q$  为植被单位质量的发热量, kJ/kg;  $W$  为有效可燃物, kg/m<sup>2</sup>;  $R(t)$  为  $t$  时刻的山火蔓延速度, m/s。

不同火焰区域平均耐受场强受温度、湿度、空气密度、烟雾颗粒影响,在计算击穿电压时,需进行修正。

$$E = K_\sigma K_h K_p E_0 \quad (15)$$

式(15)中:  $E$  为平均耐受场强,可根据不同桥接区域的修正因子,得到  $E_f$ 、 $E_s$ ;  $K_\sigma$  为空气密度修正因子,与周边环境温度和火焰温度有关;  $K_h$  为空气湿度修正因子,与环境湿度和火焰温度有关;  $K_p$  为烟雾颗粒修正因子,当间隙存在烟雾颗粒时,平均耐受电压下降至空气击穿电压的30%左右,一般取0.3;  $E_0$  为标准大气压下的纯空气间隙平均耐受场强, kW/m。

标准大气压情况下,输电线路空气击穿电压非常高,50%击穿电压  $U_{50}$  与线路电压等级和线路离地面的垂直高度有关。通过上述典型山火条件下的间隙击穿特性得到击穿电压为  $U_{50}^0$ ,再经2.1节坡度、风速情况下的修正,得到考虑更全面的间隙击穿电压  $U_{50}^1$ 。

而现有研究表明,空气间隙击穿概率可以由山火条件下间隙击穿电压  $U_{50}^1$  和50%击穿电压  $U_{50}$  表示<sup>[25]</sup>

$$P(U_{50}^1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(U_{50}^1 - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (16)$$

式(16)中:  $U_{50}^1$  为间隙击穿电压, kV;  $\mu$  为击穿电压  $U_{50}$ , kV;  $\sigma = zU_{50}$ , 山火情况下,杂质、烟雾等增大了击穿电压的分散程度,  $z$  为变异系数,取决于线路击穿电压的分散程度  $z$  取4%。

## 3 多维联合动态监测山火预警模型

### 3.1 多维联合的山火监测体系

现有的电网山火监测方式主要有:卫星遥感、视频监控、无人机巡检和激光雷达等方式<sup>[26]</sup>,但卫星遥感有山火漏报的风险<sup>[27]</sup>、视频监测易受环境干扰<sup>[28]</sup>,只能对一定范围实行有效监测、无人机续航能力有待提升<sup>[29]</sup>。为构筑全方位、立体式、连续性的山火监测体系,文中采用卫星遥感、视频监控、无人机巡检相结合的方式收集山火特征信息,然后通过云计算进行分析、计算和决策,实现山火的有效辨识和准确定位。

山火辨识流程见图7,利用极轨卫星进行大范围监测,快速定位火点和计算火灾面积。在初步确定火点后,将数据发送至山火监控中心,由其调取火点附近的视频监控信息,获取摄像头监测图像,视频监控设备的监测范围有限,效率较低,但对监测范围内的山火辨识也更准确,可动态监测山火向输电线路的蔓延。若该区域无固定监控设备,则可采用无人机巡检方式,重点区域布置无人机机巢,可更快捷迅速的对山火情况进行巡视,可用于复杂的、高风险的地形监测,避免山火区域人员可能发生的危险,迅速确定火情。确定山火发生后,同时通过相关监测系统获取风速、风向、坡度、温度和湿度等信息。并结合输电线路塔线体系、植被特征、杆塔坐标等信息,计算间隙击穿电压预测及线路跳闸概率。

### 3.2 山火预警模型

基于山火蔓延至线路的概率  $P(F)$  和山火情况下的空气间隙击穿概率  $P(U_{50}^1)$ ,可计算线路山火跳闸概率  $P$ ,并以此划分山火风险等级见表4。

$$P = P(F) \times P(U_{50}^1) \times 100\% \quad (17)$$

输电线路山火预警流程见图8。确定火点位置和附近的输电线路信息后,利用初始火点的环境信息,包括风速、风向、坡度、植被类型、温湿度等,初步计算山火蔓延速度及山火蔓延至附近输电线路的概率;当在无风或风向作用下,确定山火向线路蔓延时,初步计算当前火势情况下,输电线路的间隙击穿电压;进而确定线路跳闸概率,并发布对应山火预警信息。山火的蔓延受环境影响而实时变

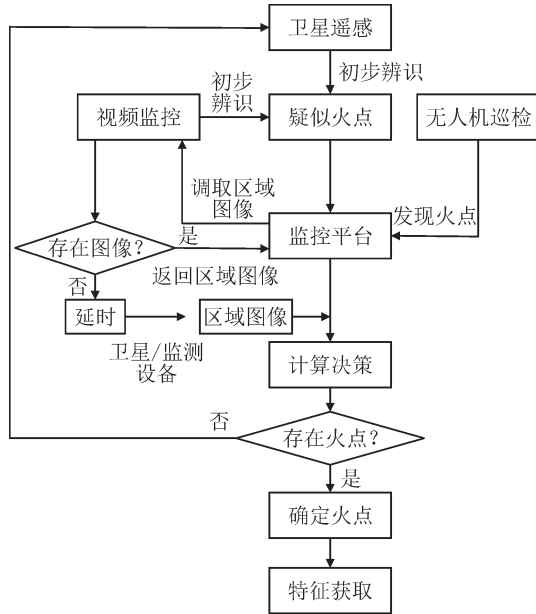


图7 多维监测联合的山火辨识框图

Fig. 7 Block diagram of wildfire identification based on multi-dimensional monitoring linkage

表4 山火风险等级

Table 4 Risk level of wildfire

参数	数值			
跳闸概率 $P$	$0 < P \leq 25\%$	$25\% < P \leq 50\%$	$50\% < P \leq 75\%$	$75\% < P \leq 100\%$
山火风险等级	I级 (蓝色)	II级 (黄色)	III级 (橙色)	IV级 (红色)
山火预警	低风险	中风险	较高风险	高风险

化,在监测山火、计算初步跳闸概率后,利用监测设备对山火蔓延情况进行跟踪,并实时获取环境特征信息,多次计算蔓延概率  $P(F)$  和跳闸概率  $P(U_{50}^1)$ ,并更新山火风险预警信息,直至山火熄灭或运维人员已采取应急措施。

### 3.3 山火预警实例分析

2020年至2022年,利用多维联合山火监测平台对某地区山火进行监测,期间共发生山火121次,有效监测103次,识别准确率为85.12%。以某500 kV输电线路山火事故为例。山火发生于山地丘陵地带,位于阳坡(坡度大于 $20^\circ$ ),植被种类偏多且分布较密集( $NDVI$ 植被平均指数0.64),以阔叶林和灌木为主;当日温度范围为 $15\sim 23^\circ\text{C}$ ,13点温度在 $22^\circ\text{C}$ 左右,空气湿度在39%左右;该地区3月份几乎未降雨,降雨量小于5 mm,因此土壤较干燥,植被缺水偏枯黄;有微风,约为 $0.6\text{ m/s}$ ,促使山火向线路方向蔓延;火点附近有一条500 kV输电线路,线路架设于丘陵地形的山脊,起始火点与线路最短距离为

1.1 km,导线离地高度为10 m。

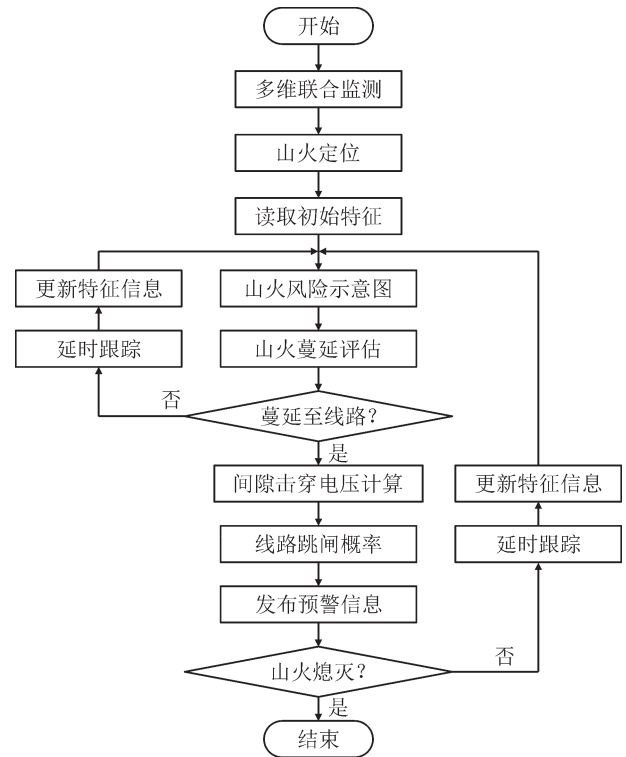


图8 输电线路山火预警流程图

Fig. 8 Transmission line wildfire warning flowchart

利用卫星和监控设备对山火蔓延进行跟踪,同时在监测平台结合温湿度、风速、风向、植被类型、坡度等影响因素,实时计算山火蔓延速度和蔓延至线路概率,并通过该时刻的山火火情、线路状况及环境因素,计算间隙击穿电压和间隙击穿概率。记山火初始发生时刻为0时刻,以5 min为时间节点,山火跟踪及线路山火跳闸概率计算结果见表5。本次山火发生于山区,且起始火点离输电线路较近,运维人员不能及时赶赴火点处阻止山火向线路蔓延。而通过计算线路跳闸概率,本次山火处于IV级风险,因此需切除该线路负荷并设计负荷转移方案,以保证供电可靠性。山火跟踪过程中,山火监测预警平台见图9。

表5 山火跟踪及跳闸概率

Table 5 Wildfire tracking and trip probability

时间/ min	山火蔓延至线 路概率/%	间隙击穿概 率/%	线路山火跳闸 概率/%	山火风险 等级
0	58.62	74.33	43.57	II级
5	84.51	79.14	66.88	III级
10	100.00	82.26	82.26	IV级
15	100.00	81.72	81.72	IV级
20	100.00	84.37	84.37	IV级



图9 山火监测预警平台

Fig. 9 Wildfire monitoring and warning platform

### 4 结论

文中详细分析了山火蔓延机理及间隙击穿机理,充分考虑地理因素、气象因素及线路状况对山火情况下线路跳闸的影响,提出基于多维联合动态监测的山火预警模型,主要结论如下。

1)基于典型山火蔓延模型,综合植被类型、坡度、风速、风向等因素,计算山火蔓延至线路的概率,计算各种环境因子影响下的山火蔓延速度。在有风情况下,风向对山火蔓延至输电线路有较大影响。

2)基于火焰燃烧模型计算典型山火情况下的相地空气绝缘击穿电压,并着重分析了坡度与风速对击穿电压的影响。总体来看,坡度增大将促进空气间隙击穿;风速小于3 m/s时促进间隙击穿,而风速进一步增大将抑制间隙击穿。

3)多维联合山火监测平台的山火有效辨识率达85.12%,综合山火蔓延概率和间隙击穿概率,计算线路跳闸概率并发布风险预警信息,有助于运维人员及时采取合理的山火应急措施。

### 参考文献:

[1] 杨楠,董邦天,黄禹,等.考虑不确定性和多主体博弈的增量配电网源荷协同规划方法[J].中国电机工程学报,2019,39(9):2689-2701.  
 YANG Nan, DONG Bangtian, HUANG Yu, et al. Incremental distribution network source-load collaborative planning method considering uncertainty and multi-agent game[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2689-2701.

[2] 王炯,缪煦扬,朱太云,等.山火作用下架空输电导线智能监测技术研究综述[J].智慧电力,2025,53(5):48-54.  
 WANG Jiong, MIAO Xuyang, ZHU Taiyun, et al. A review of intelligent monitoring technologies for overhead transmission conductors under wildfire conditions[J]. Smart Power, 2025, 53(5): 48-54.

[3] 周恩泽,樊灵孟,黄勇,等.基于火焰燃烧模型的输电线路山火跳闸风险分布评估[J].电网技术,2022,46(7):2778-2785.  
 ZHOU Enze, FAN Lingmeng, HUANG Yong, et al. Risk

distribution assessment of wildfire-induced trips in transmission line based on flame combustion model[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2778-2785.

[4] 杨楠,贾俊杰,邢超,等.基于E-Seq2Seq技术的数据驱动型机组组合智能决策方法[J].中国电机工程学报,2020,40(23):7587-7599.  
 YANG Nan, JIA Junjie, XING Chao, et al. Data-driven intelligent decision-making method for unit commitment based on E-Seq2Seq technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7587-7599.

[5] 周恩泽,饶章权,刘琦,等.典型高风险植被火条件下导线—板间隙击穿特性[J].高压电器,2024,60(3):179-185.  
 ZHOU Enze, RAO Zhangquan, LIU Qi, et al. Breakdown characteristics of conductor-plane air gap under typical high risk vegetation fire condition[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 179-185.

[6] 欧阳帆,余笑龙,徐彪,等.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[J].电力系统保护与控制,2024,52(8):10-19.  
 OUYANG Fan, SHE Xiaolong, XU Biao, et al. 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[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 10-19.

[7] 杨潇钰,余勤,叶强,等.基于遥感技术的输电走廊植被山火预警平台研究[J].自然灾害学报,2021,30(6):67-76.  
 YANG Xiaoyu, YU Qin, YE Qiang, et al. An early warning platform of mountain fire in transmission corridor based on remote sensing[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(6): 67-76.

[8] 田甜,王军,宁鑫,等.基于RF-AdaBoost算法的配电线路火灾风险预测[J].电力科学与技术学报,2025,40(3):45-51.  
 TIAN Tian, WANG Jun, NING Xin, et al. Fire risk prediction of distribution lines based on RF-AdaBoost algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(3): 45-51.

[9] 巢亚锋,黄福勇,王成,等.架空输电线路山火应急处置工作现状及建议[J].湖南电力,2015,35(5):30-34.  
 CHAO Yafeng, HUANG Fuyong, WANG Cheng, et al. Research and suggestion of forest fire emergency disposal for overhead transmission lines[J]. Hunan Electric Power, 2015, 35(5): 30-34.

[10] 谢从珍,周晓静,余松,等.基于先验知识与孪生网络监督的输电线路山火跳闸预测模型[J].电力系统保护与控制,2025,53(21):72-83.  
 XIE Congzhen, ZHOU Xiaojing, YU Song, et al. Wildfire-induced transmission line trip prediction model based on prior knowledge and siamese network supervision[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(21): 72-83.

[11] 王正非.通用森林火险级系统[J].自然灾害学报,1992(3):39-44.  
 WANG Zhengfei. Universal forest fire risk level system[J]. Journal of Natural Disasters, 1992(3): 39-44.

[12] 杨知,刘宇舜,李闯,等.基于遥感+GIS的山火检测及火势蔓延监控平台实现[J].灾害学,2024,39(1):51-56.  
 YANG Zhi, LIU Yushun, LI Chuang, et al. Implementation of wildfire detection and fire spread monitoring platform based on remote sensing and GIS[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 51-56.

- [13] 李晋伟, 王奇, 何红太, 等. 基于EMD与ELM的输电线路山火蔓延速度组合预测模型[J]. 电力建设, 2015, 36(3): 27-32.  
LI Jinwei, WANG Qi, HE Hongtai, et al. Mountain fire spread speed combined forecasting model for transmission line based on EMD and ELM[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(3): 27-32.
- [14] 刘辉, 李鹏飞, 林济铿, 等. 基于元胞自动机的山火蔓延及电力线路故障概率计算新方法[J]. 中国电力, 2019, 52(11): 85-93.  
LIU Hui, LI Pengfei, LIN Jikeng, et al. A new method for calculating the probability of mountain fire spread and power line failure based on cellular automata[J]. Electric Power, 2019, 52(11): 85-93.
- [15] 周国雄, 吴淇, 陈爱斌. 林火蔓延模拟元胞自动机算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 288-294.  
ZHOU Guoxiong, WU Qi, CHEN Aibin. Research of cellular automata model for forest fire spreading simulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 288-294.
- [16] 黄道春, 陈鑫, 周恩泽, 等. 考虑火焰分区的植被火条件下导线—板间隙击穿电压研究[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3467-3474.  
HUANG Daochun, CHEN Xin, ZHOU Enze, et al. Breakdown voltage of conductor-plane gap under vegetation fire condition considering division of flames[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3467-3474.
- [17] 王振华, 尤飞, 张云, 等. 强热烈焰下典型高压输电线路状态受损及机理分析[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(6): 714-718.  
WANG Zhenhua, YOU Fei, ZHANG Yun, et al. Analyses on damage behaviors and mechanism of operation properties of typical high-voltage transmission line under intense heat and blaze[J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(6): 714-718.
- [18] 周志宇, 艾欣, 陆佳政, 等. 山火灾害引发的输电线路跳闸风险实时分析方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5321-5330.  
ZHOU Zhiyu, AI Xin, LU Jiazheng, et al. A real-time analysis approach and its application for transmission-line trip risk due to wildfire disaster[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5321-5330.
- [19] 龙明洋, 黄道春, 黎鹏, 等. 典型植被灰烬颗粒对导线—板间隙放电特性的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 627-633.  
LONG Mingyang, HUANG Daochun, LI Peng, et al. Influence of the typical vegetation ashes/particles on the discharge characteristics of conductor-plane air gap[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 627-633.
- [20] 黎鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 典型植被火焰下导线—板间隙击穿特性及放电模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 4001-4011.  
LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on breakdown characteristic and discharge model of conductor-plane gap under typical vegetation flame[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 4001-4011.
- [21] 周恩泽, 樊灵孟, 黄道春, 等. 2 013 m海拔高度植被火条件下导线—板间隙击穿特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4316-4322.  
ZHOU Enze, FAN Lingmeng, HUANG Daochun, et al. Breakdown characteristics of conductor-plane gap under vegetation fire at the altitude of 2 013 m[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4316-4322.
- [22] 王正非. 山火初始蔓延速度测算法[J]. 山地研究, 1983(2): 42-51.  
WANG Zhengfei. Method for calculating the initial spreading speed of mountain fires[J]. Mountain Research, 1983(2): 42-51.
- [23] 黎鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 模拟山火条件下导线—板间隙击穿特性影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 195-201.  
LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Influence factors analysis of the conductor-plane gap breakdown characteristic under simulation forest fire condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 195-201.
- [24] 秦圣辉, 尤飞, 王振华, 等. 山火诱发500 kV及以上输电线路跳闸事故分析[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(5): 712-716.  
QIN Shenghui, YOU Fei, WANG Zhenhua, et al. Analysis on tripping accidents of 500 kV and above transmission lines induced by mountain fire[J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(5): 712-716.
- [25] 宋嘉婧, 郭创新, 张金江, 等. 山火条件下的架空输电线路停运概率模型[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 100-105.  
SONG Jiajing, GUO Chuangxin, ZHANG Jinjiang, et al. A probabilistic model of overhead transmission line outage due to forest fire[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 100-105.
- [26] 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]. 电网技术, 2023, 47(11): 4765-4777.  
YANG Chunlan, NING Xin, XU Huikai, et al. Overview of mountain fire monitoring and early warning for power grid demand[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4765-4777.
- [27] 刘志勇, 蒋岳新, 申志强, 等. 利用卫星系统提升我国森林火灾监测能力探讨[J]. 航天器工程, 2019, 28(6): 96-100.  
LIU Zhiyong, JIANG Yuexin, SHEN Zhiqiang, et al. Discussion on improving monitoring ability of forest fire in China using satellite system[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(6): 96-100.
- [28] 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.
- [29] 朱松涛, 程海涛, 叶剑锋, 等. 基于无人机中继协同技术的输电通道防山火巡视应用[J]. 浙江电力, 2022, 41(1): 89-94.  
ZHU Songtao, CHENG Haitao, YE Jianfeng, et al. Application of patrol against mountain fire in transmission channels based on UAV relaying cooperative technology[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(1): 89-94.

乔天骄(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统调度运行研究(通信作者)(E-mail: mj65633236@163.com)。