

基于蔓延模型的架空输电线路山火跳闸概率 全过程预测方法

周洋卓君¹, 马瑞康¹, 汪皓², 周恩泽³, 魏瑞增³, 周游¹

(1. 电网防灾减灾全国重点实验室(长沙理工大学电气与信息工程学院), 长沙 410114; 2. 广东电网有限责任公司, 广州 510060; 3. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080)

摘要: 目前电网主要以实时监测与线路下方山火跳闸模型相结合的方法进行跳闸风险评估, 虽依赖于卫星山火监测的实时性和可靠性, 但在部分情况下山火燃烧情形与跳闸模型模拟环境仍存在差异。针对上述问题, 提出了一种基于山火蔓延模型的线路跳闸概率全过程预测方法。首先利用林火蔓延模型对实时监测火点的山火燃烧状态及火焰边界进行预测, 结合附近杆塔位置信息获得线路与火焰的空间位置关系。然后根据气象和山火蔓延情况分析火焰、烟雾对输电线路绝缘的影响。最后依据分析结论建立了对应不同情况的山火诱发线路绝缘击穿临界条件, 细化了输电线路山火跳闸概率的分类计算方法。该方案基于山火蔓延特性, 将山火蔓延和线路跳闸动态相结合, 弥补了现存山火防御措施中过于依赖监测方法、现场燃烧情形与模型预设情形存在出入等不足, 进一步提升了电网对山火灾害的抵御能力。

关键词: 山火跳闸; 元胞自动机; 蔓延仿真; 跳闸概率计算; 全过程预测

Whole Process Prediction Method for Wildfire Trip Probability of Overhead Transmission Line Based on Propagation Model

ZHOU Yangzhuojun¹, MA Ruikang¹, WANG Hao², ZHOU Enze³, WEI Ruizeng³, ZHOU You¹

(1. National Key Laboratory of Power Grid Disaster Prevention and Mitigation, School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510060, China; 3. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: Currently, the power grid primarily employs a method that combines real-time monitoring with a wildfire trip-out model beneath the transmission lines for trip-out risk assessment. Although this relies on the real-time and reliability of satellite wildfire monitoring, there are still discrepancies between the actual wildfire combustion scenarios and the simulated environment of the trip-out model in some cases. To address the aforementioned issues, a full-process prediction method for transmission lines trip-out probability based on a wildfire spread model is proposed. Firstly, the forest fire spread model is utilized to predict the wildfire combustion state and flame boundary of the real-time monitored fire point, and the spatial position relationship between the transmission lines and the flame is obtained by combining the location information of nearby towers. Secondly, based on meteorological and wildfire spread conditions, the impact of flames and smoke on the insulation of transmission lines is analyzed. Finally, according to the analysis conclusions, the critical conditions for wildfire-induced insulation breakdown of transmission lines under different scenarios are established, and the classification calculation method for the trip-out probability of transmission lines due to wildfires is refined. This scheme combines wildfire spread characteristics with the dynamics of wildfire spread and transmission lines trip-out, addressing the deficiencies in existing wildfire prevention measures such as over-reliance on monitoring methods and discrepancies between actual combustion scenarios and model preset scenarios, thereby further enhancing the power grid's resilience to wildfire disasters.

Key words: wildfire trip; cellular automate; spread simulation; trip probability calculation; whole-process prediction

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177015, 51607012); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20222559)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China(52177015, 51607012); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GDKJXM20222559)。

0 引言

输电线路是电能运输的关键环节,长期暴露在自然环境中容易受到外部因素的干扰^[1-4]。山火作为常见自然灾害之一,当其发生并蔓延至线路附近时往往会击穿输电线路绝缘,引发跳闸事故。据统计,由山火引发的线路跳闸率仅次于雷击跳闸率位列第二,已严重影响电网的安全稳定运行。据统计,2023年度南方电网110 kV及以上电压等级输电线路山火跳闸110条次^[5],严重影响了电网系统的稳定运行。目前电网主要依靠卫星遥感实时监测山火发布告警信号。当山火距离线路临界距离时电网运维人员往往需要实时人工监控山火的蔓延趋势,防止山火蔓延到输电走廊诱发输电线路跳闸。若能有效预测山火蔓延发展趋势,评估周边输电线路动态跳闸概率,能够为电网应对可能的山火跳闸事件提供足够的时间裕度,保障电网安全稳定运行。

传统山火告警主要以卫星监测、无人机巡查及杆塔监测装置为主,必要时辅以人工巡视进行确认。其中卫星监测因其监测范围广、监测时间长等优点,被广泛应用于各大电网系统。目前山火监测卫星主要包括极轨卫星、同步卫星、静止卫星。刘毓等人针对极轨卫星过境时间间隔长这一缺陷,提出了一种基于同步卫星的广域监测方法^[6]。周游等人同样针对极轨卫星监测间隔长、难以实现持续监测的缺陷,提出基于静止气象卫星的24 h不间断监测方法,进一步完善了电网山火卫星监测及告警策略^[7]。但此类研究仅依托火点位置动态定位周边杆塔,依据杆塔与火点的相对空间距离发出对应告警信号,未考量不同植被与气象条件下山火引发线路跳闸的可能性。周志宇等人依据线路下方火焰产生的烟尘、离子等环境因素,计算山火环境下的间隙击穿电压^[8]。但该模型对火焰场景的考量较为单一,未顾及火焰体不同部位对空气绝缘的差异化影响。周恩泽等人在大量的山火击穿试验基础上对放电间隙中火焰与烟尘区域的分布情况进行了细化分类,依据火焰高度、烟尘长度及线路高度间大小关系,将线路所处山火环境分为线路火焰完全桥接与线路火焰不完全桥接两种情况,增强了模型适用性^[9]。黄道春等人将火焰间分为火焰连续区、火焰不连续区、烟尘区3类区间,进一步精细化了间隙击穿电压的计算^[10]。但是这些山火跳闸模型都仅考

虑火焰燃烧于线路正下方的跳闸,对应火焰烟尘笔直分布。然而大量的现场事故表明,即便山火没有位于线路的正下方,但是山火燃烧时产生的浓烟受风力作用,在火焰蔓延至线路下方之前提前抵达线路间隙引起线路跳闸。现有的跳闸模型没有考虑山火动态蔓延过程对线路绝缘的影响。国内也先后有学者采用椭圆模型、元胞自动机模型等对火场规模进行预测^[11-12],但这类方法通常仅依据火场边界与线路的距离发布对应告警等级,未考虑山火向线路蔓延过程中火焰及烟气扩散对线路绝缘性能及跳闸概率的影响。

本文提出了一种基于山火蔓延的输电线路山火跳闸风险动态预测方法。该模型基于典型的火焰蔓延模型和元胞自动机原理实现空间上的火场边界蔓延预测,然后根据山火边界和架空输电线路的相对空间关系,结合实时风速和风向确定线路绝缘的下降程度,分场景建立对应的线路绝缘山火击穿环境,从而实现山火蔓延过程中输电线路山火跳闸概率的动态评估。

1 输电走廊山火蔓延过程预测

1.1 火焰蔓延速度计算

输电线路山火跳闸事故是山火蔓延到输电线路附近改变了线路的绝缘间隙,导致线路发生导线对地或者相间空气绝缘击穿引起的。相关研究显示,植被燃烧时火焰电阻率远低于纯空气间隙的绝缘强度,比如杉树枝火焰电阻率最小仅为 $3\text{ k}\Omega\cdot\text{m}$,杉树干最大也仅 $30\text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ ^[5]。山火的影响范围有限,通常认为距离线路3 km以外火点基本对线路绝缘不产生影响^[13]。近年来山火引发的输电线路跳闸事故呈上升趋势,2009—2010年期间,云南省和贵州省等地输电线路因山火跳闸事故频繁发生,严重影响到云贵两省的电力外送和电网的安全与稳定。2010年5月,1 000 kV特高压示范工程长南I线31—33号杆塔之间发生山火,导致C相故障跳闸,国外如巴西、南非和墨西哥等不同电压等级的输电线路也因火发生过多次跳闸事故^[8]。但是在合适的风向条件下山火会以极快的速度朝着线路方向蔓延,降低线路的绝缘强度,危及电网的安全运行。针对山火蔓延过程,国内外学者先后提出物理模型、经验模型、半物理半经验模型^[14]等大量模型。其中物理模型^[15-17]聚焦于燃烧过程中的能量转移、热量辐

射传递等微观机理研究,所涉及的物理变量繁多,难以现场应用。在宏观计算蔓延速度时更多运用经验模型及半物理半经验模型,如美国提出的 Rothermel 模型^[18]、澳大利亚的 McArthur 模型^[19]、Cheney 模型^[20]、加拿大的林火行为预测系统(fire behavior prediction system, FBP)^[21]、我国提出的王正非模型^[22]等。

王正非模型基于大小兴安岭和四川省的 100 多次火烧试验数据,结合符合预报的理论与物理机制分析得出,作为目前国内比较先进的森林火灾蔓延模型,在平地无风、无风上坡和顺风上坡且坡度不超过 65° 的林地环境中,相较于其他蔓延模型具备一定地域适应性优势,但该模型原仅适用于坡度 60° 以下的林地,经改进后扩展了适用范围。最初的王正非模型于 1983 年^[23]提出。通过室内的燃烧实验得到室内火焰扩散速度,并以此等效室外火焰在无风平坡环境下的蔓延速度 R_0 ,并以风速、坡度、可燃物类型等蔓延因子修正系数对蔓延速度 R 进行修正从而适应室外不同的燃烧环境。

$$R = R_0 K_z K_w / \cos \varphi \quad (1)$$

式中: K_z 为可燃物类型修正系数; K_w 为风速修正系数; φ 为坡度。各修正系数均通过经验表格进行离散化匹配,无法精准覆盖所有参数,且坡度修正仅采用简单的余弦函数。1988 年王正非重新对修正系数中的风速与坡度因子进行了函数表示^[24-25],通过收集在大小兴安岭和四川省等地进行的 100 多次火烧实验数据,以多元回归方式重新拟合了初始火蔓延速度的计算式。

$$K_w = \alpha e^{0.178v \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

$$K_s = \beta e^{3.533 \tan \varphi^{1.2}} \quad (3)$$

$$R_{\text{day}} = aT + bV + c(100 - h) - D \quad (4)$$

式中: K_s 为坡度修正系数; θ 为风向与地面的偏角; R_{day} 为日燃烧指标,即无风平坡环境下的火焰蔓延速度; T 为日最高温度,℃; V 为中午风力,级; h 为日最小湿度,%; a 、 b 、 c 、 D 为拟合参数,其值分别为 0.03、0.05、0.01、0.3; α 、 β 为地域适应系数,我国地域均取 1; φ 为坡度。

以上修正后的模型可适用于我国绝大多数场景下野外山火燃烧与蔓延速度的评估计算。

1.2 空间火焰蔓延过程可视化

王正非模型给出了顺风方向的火焰蔓延速度计

算方法。但是山火蔓延是一个动态的空间扩散过程,蔓延速度一方面取决于环境因素影响下的蔓延速率,另一方面取决于当前区域的燃烧程度,因此需要利用可视化模型将蔓延过程推广至二维平面。目前应用广泛的可视化模型主要分为两类。一类基于 Anderson 椭圆模型^[26]及 Huygens 传播理论^[27],火场形状由离散的边界点控制,每个控制点按椭圆规则进行位移,火场的蔓延即可简化为控制点的横移。该模型的拟合精度依赖于控制点的数量及最终边界的插值规则,同时由于对火场形状的椭圆形假设导致其适用区域较为局限,如分布均匀的草原或灌木区域,在复杂植被、地理环境下模型的适用性存疑。相关研究表明林火蔓延模型受可燃物、火环境(气象、地形和植被)和火源条件的制约和控制,这类基于形状假设的模型在复杂环境下的局限性更为明显。因此本文拟用另一类基于元胞自动机原理^[28]的栅格模型,将目标区域划分为栅格网络,每一个栅格对应一个元胞单元。通过元胞单元的状态传递表征火焰的蔓延过程,并以最终火焰单元的位置分布刻画蔓延后的火焰边界。

采用 Moore 型元胞设定^[29],单个元胞作用范围为周围八邻胞(图 1),即火点元胞在向外蔓延时,仅会对周围灰色邻胞产生影响。受火焰在各元胞中蔓延速度差异的影响,在相同时长内,各邻胞会呈现出不同的燃烧状态。以蔓延面积与元胞总面积之比量化该元胞的燃烧状态。

$$A_t = \frac{S_{\text{燃烧}}}{S_{\text{元胞}}} = \frac{R_t \cdot t \cdot D}{S_{\text{元胞}}} \quad (5)$$

式中: A_t 为元胞燃烧状态; $S_{\text{燃烧}}$ 为元胞燃烧蔓延的面积; t 为蔓延时长; R_t 为火焰在元胞上蔓延速度; D 为元胞边长; $S_{\text{元胞}}$ 为元胞的总面积。蔓延时长与元胞边长均为已知常数,各个元胞上的蔓延速度 R_t 则由王正非模型计算得出。

王正非模型所搭建的燃烧环境为坡向、风向、蔓延方向均为同一朝向。为将该一维速度计算扩展至二维平面,可根据毛贤敏提出的方法将风速分别投影至上坡、下坡、左平坡、右平坡 4 个方向,同时考虑风与地形的综合作用修正得出各向速度计算式^[30]。而元胞空间中每个元胞单元均具备八邻胞的分布,中心火焰元胞在向外蔓延时将存在 8 个方向的蔓延速度。以下对各方向蔓延速度计算作进一步修正推导。

1.2.1 可燃物修正

考虑到不同类型植被的燃烧特性存在差异,依据元胞内的可燃物种类对其蔓延速度进行修正。国内典型植被类型分类及对应可燃物修正系数 K_z ^[31-32]如表1所示。

表1 植被类型对照

Tab. 1 Vegetation type comparison

植被类型	K_z
杉树	0.8
茅草、杂草	1.6
秸秆	0.6
次生林	0.7
针叶林	0.4
平铺针叶	0.8
枯枝落叶	1.2
莎草、矮桦	1.8
牧场草原	2
红松、华山松、云南松等林地	1

1.2.2 风速修正

火焰在向四周扩散蔓延时,8个方向的蔓延速度均会受风力影响(图2)。因此,对各方向蔓延的风速修正系数 K_w 可根据其风向在对应方向上的投影来确定。

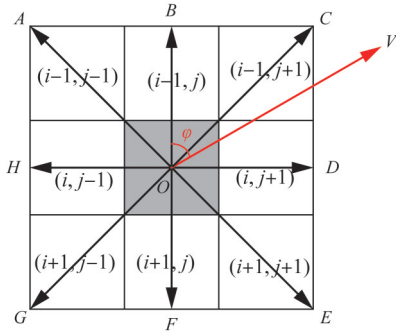


图2 风在元胞空间中作用示意图

Fig. 2 Sketch diagram of of wind effects in cellular space

以方向OB为例,设OB为起始轴,顺时针到达OV的角度为 φ 。对应的风向OV在OB上的投影为 $V\cos\varphi$ (其中V为风速),同理对其余7个蔓延方向的风投影进行推算,如表2所示。

将各方向风速投影值代入式(2)即可得到各方向风速修正系数 K_w 。

1.2.3 坡度修正

栅格的平均坡度由海拔高程数据(digital eleva-

表2 任意风向的八向投影值

Tab. 2 Eight-way projection values for any wind direction

蔓延方向	风向投影值
OA	$V\cos(315^\circ-\varphi)$
OB	$V\cos\varphi$
OC	$V\cos(\varphi-45^\circ)$
OD	$V\cos(\varphi-90^\circ)$
OE	$V\cos(\varphi-135^\circ)$
OF	$V\cos(180^\circ-\varphi)$
OG	$V\cos(225^\circ-\varphi)$
OH	$V\cos(\varphi+90^\circ)$

tion model, DEM)与元胞尺寸间接获得。元胞之间的坡度存在相互独立性,即坡度仅与相邻的两元胞之间的海拔差和水平距离直接相关,与相邻的第3个元胞无关,因此在坡度修正过程中,仅存在相邻元胞或对角元胞两种情况。将式(3)代入本模型的坡度修正并以阶跃函数P来表示其蔓延方向为上坡或者下坡(式7),最终可得出适用于元胞模型的坡度校正(式6)。

$$K_s = \begin{cases} \beta e^{3.533(-1)^{\left|\frac{h_A-h_B}{a}\right|^{1.2}}}, & \text{相邻元胞} \\ \beta e^{3.533(-1)^{\left|\frac{h_A-h_B}{\sqrt{2}a}\right|^{1.2}}}, & \text{对角元胞} \end{cases} \quad (6)$$

$$P = \begin{cases} 0, & \frac{h_A-h_B}{a} \geq 0 (\text{上坡}) \\ 1, & \frac{h_A-h_B}{a} < 0 (\text{下坡}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: h_A 、 h_B 分别为火点元胞和其邻域元胞的海拔; a 为元胞边长; β 为坡度修正的地域系数,常规取值为1^[24],可随地域环境变化作适当调整。

1.2.4 道路与水域修正

部分特殊地貌对火焰具有常态阻燃性,如道路与水域,火焰往往难以跨越该类地形蔓延。元胞单元中,此类不可燃区域在元胞中面积占比 S_w 越大,对蔓延的阻滞作用越大,该阻滞作用以道路与水域修正系数 K_r 进行体现。实例仿真表明,当 $S_w>0.5$ 时,对应元胞基本能够完全隔离火焰蔓延。因此取0.5作为道路水域修正阈值,当 $S_w\geq 0.5$ 时, K_r 取0;当 $S_w\leq 0.5$ 时,以指数函数对该阻滞作用进行系数拟合。

$$K_r = \begin{cases} 0, & S_w \geq 0.5 \\ e^{9 \times (-S_w)}, & S_w < 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

最终各个方向上的蔓延速度 R_i 为:

$$R_t = R_0 \times K_s \times K_w \times K_z \times K_t \quad (9)$$

1.3 元胞火焰蔓延迭代过程

根据 Moore 型元胞的定义,当某一元胞处于完全燃烧状态后,才会开始向周围元胞传递燃烧蔓延状态^[29]。而中心的完全燃烧元胞由于其可燃物载量有限,燃烧后产生的炭化物质又不具备可燃性,因此元胞会在完全燃烧一段时间后退出现蔓延过程,不再向周围辐射热量。

元胞燃烧状态以元胞燃烧面积比 A_t 进行表示, $A_t \in [0, 1]$ 。各状态如图 3 所示, $A_t=0$ 表示在 t 时刻元胞尚未燃烧,处于初始状态;当 $A_t \in (0, 1)$ 时表示元胞部分区域正在燃烧,但火焰并未充满区域; $A_t=1$ 表示该元胞已完全燃烧,能够向其周边邻域 8 元胞传递燃烧状态。当某一元胞同时受到多个火焰元胞作用,叠加各火焰元胞对其传递的燃烧状态。

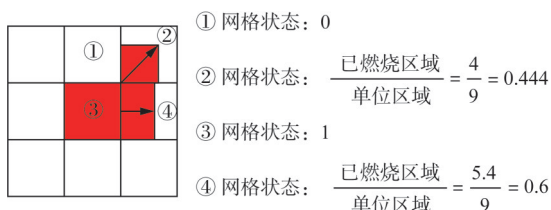


图 3 元胞各状态示意

Fig. 3 Sketch diagram of each state of the cell

在计算迭代过程中检查各元胞状态,将燃烧状态大于等于 1 的元胞纳入完全燃烧元胞集。仅完全燃烧的元胞能够对下一迭代过程的火焰蔓延产生影响。将处于完全燃烧状态达到一定时长后的元胞判定为过火元胞,并及时将其剔除,不再参与火焰蔓延过程。完全燃烧持续时长与元胞尺寸相关,元胞尺寸越大,完全燃烧状态持续时间越长。

应用以上迭代规则,蔓延模型最终可输出规定时长 T 后的火焰边界元胞分布,由此反映蔓延时长 T 后火焰边界位置。

2 输电走廊山火蔓延过程预测

2.1 火焰蔓延速度计算

山火跳闸本质是火焰燃烧产生的高温、烟尘等环境因素破坏了线路间隙绝缘性能,导致线地、线路间击穿电压降低,进而引发短路事故。因此跳闸概率的计算依赖于火焰燃烧状态。Byram 对火焰强度 I 与火焰高度 H_t 间的关系的描述如式(10)~(11)所示^[28]。

$$H_t = \gamma (I/250)^{1/2} \quad (10)$$

$$I = qWR/600 \quad (11)$$

式中: I 为火场强度; γ 为地域修正系数,通常取 $\gamma=1$; q 为单位质量可燃物的发热量,即热值,指 1 kg 可燃物完全燃烧放出的热量, J/kg (或 kJ/kg), 常见可燃物如无烟煤热值约为 3.4×10^7 J/kg、干木柴约为 1.2×10^7 J/kg; W 为可燃物载量; R 为火焰蔓延速度,可由王正非模型计算得到。以得到火焰高度可将垂直区域划分为火焰与烟尘两类绝缘间隙,各间隙绝缘强度以不同校正式计算。

燃烧发生时火焰焰尾闪烁部分与根部连续燃烧部分的外在特征与物理性质差异明显且分布规律不同。本文采用武汉大学黄道春教授提出的三区间燃烧模型^[10],如图 4 所示,将整个垂直区域划分为烟尘区、火焰连续区、火焰不连续区。

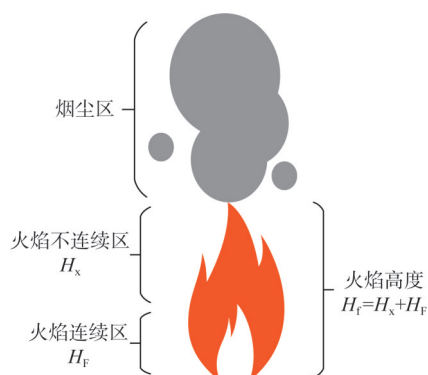


图 4 三区间燃烧模型

Fig. 4 Three-interval combustion model

实验观测数据^[11]如表 3 所示。火焰连续区长度 H_F 、火焰不连续区长度 H_x 与火焰高度 H_t 间大致保持线性关系。

表 3 不同火焰高度下火焰两区域长度分布^[6]

different flame heights m		
火焰连续区长度	火焰不连续区长度	火焰高度
1.85	0.11	1.96
1.48	0.37	1.85
0.74	0.37	1.11
0.55	0.26	0.81

以火焰连续区长度 H_F 及火焰高度 H_t 进行线性拟合(火焰不连续区长度 H_x 可由上述两参数相减求得),最终拟合方程如式(12)所示,拟合方程确定系数为 0.964 1;均方根误差(root mean square

error, RMSE)为 0.130 2, 拟合效果良好。

$$H_f = 0.898 7 \times H_F + 0.394 5 \quad (12)$$

式中 H_F 为火焰连续区长度。

完成火焰区间划分后, 对各类区间开展差异化绝缘特性分析, 明确各个火焰区段对线路绝缘的具体影响。

1) 火焰连续区

$$U_{HF} = \frac{E_{HF} H_F}{C_k C_w} \quad (13)$$

式中: E_{HF} 为标准火焰连续区平均击穿场强, 60 kV/m, H_F 为火焰连续区长度; C_k 、 C_w 分别为植被种类修正系数和植被含水量修正系数; U_{HF} 为火焰连续区电压。

2) 火焰不连续区

$$U_{HX} = \frac{E_{HX} H_X}{C_d C_p} \quad (14)$$

式中: U_{HX} 为火焰不连续区电压; E_{HX} 为标准火焰不连续区平均击穿场强, 173.7 kV/m; H_X 为火焰不连续区长度; C_d 、 C_p 分别为植被密度修正系数、烟尘颗粒修正系数。

3) 烟尘区

$$U_{HS} = \frac{E_a H_s}{C_a C_t C_p} \quad (15)$$

式中: U_{HS} 为烟尘区电压; E_a 为标准空气间隙击穿电压梯度, 359.2 kV/m; H_s 为烟尘区长度; C_a 、 C_t 、 C_p 分别对应海拔修正系数、火焰温度修正系数、烟尘颗粒修正系数。

从式(15)可以看出, 影响山火间隙绝缘的因素包括海拔、植被密度、烟尘颗粒、植被种类、植被含水量、火焰温度等, 需要分别明确各个因素对间隙击穿电压的影响。

2.1.1 海拔校正系数 C_a

大量数据表明, 在不同海拔下空气间隙击穿电压不同^[33]。如武汉海拔为 23.3 m, 试验得到的山火条件下空气间隙平均击穿场强为 359.2 kV/m, 而昆明海拔为 2 100 m, 对应的平均击穿场强下降到 268.3 kV/m。海拔变化对火焰间隙的影响实质是空气密度的改变。随着海拔升高, 空气含量稀薄, 空气密度降低, 绝缘间隙中离子运动碰撞概率增加, 更易被击穿。根据帕邢定律, 空气的绝缘强度与气压密切相关, 比如海拔 2 000 m 时气压约为 80 kPa, 此时空气的击穿电压比海平面时降低了约 14 %,

海拔 3 000 m 时这一数值更是下降到 21 %; 且海拔每升高 1 000 m, 击穿电压约降低 7 %, 绝缘强度也会随海拔升高而下降, 一般海拔每升高 100 m, 绝缘强度约下降 1 %, 这进一步加剧了绝缘间隙被击穿的风险。在已知海拔 H_b 条件下空气间隙击穿的海拔修正系数 C_a 为:

$$C_a = \frac{1}{2 - e^{\frac{H_b - 23.3}{8150}}} \quad (16)$$

对应火焰燃烧模型中, 烟尘区及火焰不连续区均存在空气间隙, 而火焰连续区由于火焰充满空间, 空气容纳量少, 几乎不受海拔变化影响。

2.1.2 植被密度修正系数 C_d

地表植被堆积越密集, 火焰燃烧强度越大, 其火焰区域粒子活性越高, 导致间隙击穿电压越小。火焰连续区燃烧特性稳定, 受影响较小, 因此植被密度主要影响火焰非连续区。根据不同可燃物载量的燃烧实验, 经线性拟合可得火焰非连续区平均击穿场强与林地可燃物载量 W 的关系式如下。

$$E_{HX} = -6.319 W + 271 \quad (17)$$

以标准情况下火焰非连续区击穿场强为基准, 反推火焰非连续区植被密度修正系数 C_d 为:

$$C_d = \frac{173.7}{-6.319 W + 271} \quad (18)$$

2.1.3 烟尘颗粒修正系数 C_p

实验数据显示^[34], 在各燃烧环境下烟尘区域击穿特性波动较小, 烟尘间隙绝缘强度均为标准空气间隙的 85 % 左右。因此取烟尘颗粒修正系数 $C_p = 1.18$ 。

2.1.4 植被类型修正系数 C_k

不同植被燃烧特性各异, 据相关研究显示, 通过对福建 37 种针阔树种的燃烧热值、燃烧速度等 10 个燃烧相关因子测试, 以及对小兴安岭 8 个常见阔叶树种的热释放速率等燃烧参数测定, 证实阔叶树种的燃烧比针叶树种的燃烧更剧烈, 火焰的热释放速率更大。模型上层火焰不连续区域由于同时存在火焰与空气两类间隙类型, 燃烧状态不稳定, 因此该项修正主要应用于火焰连续区域修正。

实验数据^[35]表明火焰在杉木树种上燃烧的间隙绝缘场强为 60 kV/m, 以该场强数值为基准获得的典型不同高风险植被类型修正系数如下: 水杉木: 1; 云南松: 1.13; 桉树: 0.96; 灌木: 0.93; 茅草: 0.88。

2.1.5 植被含水量修正系数 C_w

与植被类型作用类似,植被含水量同样直接影响火焰的燃烧特性产生影响。植被含水量越高,火焰易燃性越低、燃烧强度越低。植被含水量有绝对含水与相对含水两种表达方式,此处以绝对含水量作为修正系数。

$$W_D = \frac{\text{自然鲜重} - \text{烘干重}}{\text{烘干重}} \times 100\% \quad (19)$$

式中 W_D 为植被绝对含水量, %。通过试验研究得到其与击穿电压梯度 E_{HF} 之间的关系式如下。

$$E_{HF} = -0.2W_D + 62.7 \quad (20)$$

以 15 % 绝对含水量植被下的击穿电压梯度为标准,对应的植被含水量修正系数 C_w 为:

$$C_w = \frac{60}{-0.2W_D + 62.7} \quad (21)$$

植被绝对含水量同时由季节与植被类型决定。以四季为时间节点,将国内常见植被类型的绝对含水量按时间划分如表4所示,通过查询表内数据即可获得植被的绝对含水量。

表4 不同植被绝对含水量与季节关系

Tab. 4 Relationship between absolute water contents of different vegetation types and seasons %

植被类型	绝对含水量			
	春季	夏季	秋季	冬季
茅草	150	160	150	140
灌木	230	250	230	210
松树	150	150	140	130
杉树	150	150	140	130
桉树	170	180	170	160

2.1.6 火焰温度修正系数 C_t

火焰周边的高温环境会减小绝缘间隙空气密度进而引发间隙击穿电压降低。由于该项修正仅对空气环境生效,其作用范围对应燃烧模型中火焰上方的烟尘间隙。对高温下空气击穿电压与对应温度进行线性拟合,最终结果如下。

$$U_{\text{高温}} = -0.707T_t + 351.57 \quad (22)$$

式中: T_t 为火焰上空空气温度; $U_{\text{高温}}$ 为对应高温环境下空气击穿电压。由于燃烧模型中间隙温度会随距火焰顶部距离而降低,因此为简化评估过程,以烟尘间隙平均温度进行代入计算。实验数据显示^[36],烟尘温度与火焰距离间大致呈线性关系,因此以烟尘间隙两端的温度均值计算烟尘间隙的平均

温度,烟尘击穿电压对应算式为:

$$U_{\text{间隙}} = -0.707 \frac{T_0 + T_f}{2} + 351.57 \quad (23)$$

式中: T_0 为火焰顶部温度; T_f 为线路处空气温度; $U_{\text{间隙}}$ 为整个烟尘间隙击穿电压。取实验中常规环境数据为基准值可反推出火焰温度修正系数 C_t 。

$$C_t = \frac{359.2}{-0.707 \frac{T_0 + T_f}{2} + 351.57} \quad (24)$$

2.2 输电走廊山火蔓延过程分析

传统输电线路山火跳闸模型设定的是固定单一燃烧环境,即火焰在线路下方燃烧,绝缘间隙被垂直分布的火焰或烟尘充满。依据燃烧模型计算所得的火焰高度、周围线路高度确定线路对地、线路间桥接情形,对不同情形以对应算式完成击穿电压计算^[37]。但相关统计显示,在线路山火跳闸事故中,导线对地面放电引起的跳闸约占 90 %,线路对杆塔放电引起的约占 9 %,绝缘损坏引起的情况很少见;且通过对典型山火跳闸事故的考察可知,多数情况下山火跳闸事故是山火在蔓延靠近线路过程中,形成高浓度烟尘粒子和带电质点的环境,引发子导线对树、相间和对地放电,突破输电线路正常运行所需安全间隙而造成跳闸,并非单纯的烟气和山火共同作用引发绝缘击穿现象。火焰由远及近靠近线路直至抵达线路下方,该蔓延过程的跳闸风险是传统跳闸模型的评估盲区。

顺风条件下,燃烧产生的烟尘、高温等环境因素会先于火焰抵达线路附近。大量的浓烟亦可显著降低空气绝缘的性能,导致线路提前跳闸。因此本文根据山火跳闸原理及现场环境情形,结合蔓延模型预测结果,提出了输电线路山火跳闸风险的全过程风险评估方法。

基于元胞蔓延模型得到的某时刻火场边界范围如图5所示。依据火场元胞(图5中红色栅格)与线路下方区域元胞(图5中蓝色栅格)相对位置关系可判断该时刻火焰是否已经抵达线路下方。当该时刻火焰已经抵达线路下方,此时燃烧环境为火焰燃烧于线路下方,线路垂直方向上的空气绝缘全部被火焰与烟气覆盖;若该时刻火焰尚未蔓延至线路下方,此时则需考虑风力作用下的烟尘横移是否会影响线路绝缘环境。

风力作用下,空气整体顺着风力方向横移。空

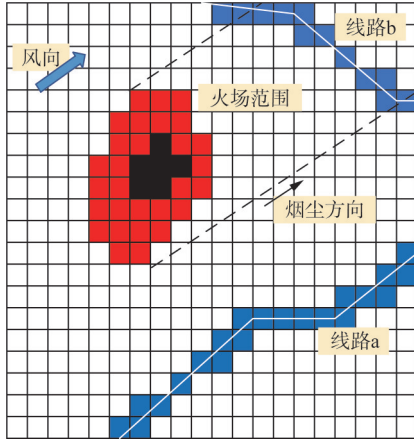


图5 风力作用下烟尘影响区域

Fig. 5 Soot affected areas under the action of wind

气中的高温与烟尘颗粒受裹带同样朝风力方向做横移, 导致其提前于火场到达线路位置, 破坏线路对地、线路间的绝缘间隙, 如图6所示。山火蔓延期间的风向决定了烟尘的横移方向。如图5所示, 烟尘沿风向横移, 线路b有可能受烟气影响而跳闸。线路a则不受烟尘影响。

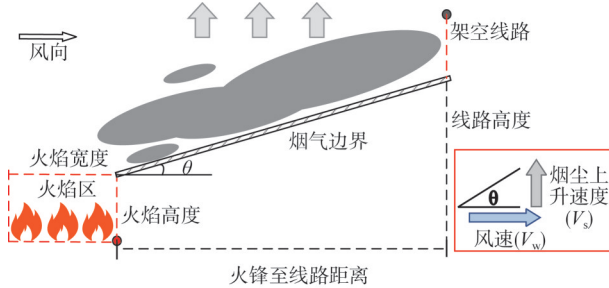


图6 山火烟气横移作用示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the lateral movement effects of wildfire smoke

除风向外, 风速同样是烟气横移的关键因素, 它与烟气上升速度共同决定了烟气的空间分布。烟气上升速度主要受环境空间分布影响, 研究数据显示在封闭环境下烟气上升速度会急剧加快, 如室内火灾产生的烟气上升速度可达3~4 m/s。而在开阔地上山火燃烧所产生的烟气上升速度多为1 m/s左右^[38]。在烟气上升速度一定的条件下, 区域风速越高, 烟气边界与水平面夹角 θ 越小(图6), 线路空气间隙受烟气影响越大, 线路击穿风险越大。夹角 θ 可由烟气上升速度 V_s 与风速 V_w 的正切值得求。

$$\tan \theta = \frac{V_s}{V_w} \quad (25)$$

获得夹角 θ 后即可依据火场与线路距离 L_f 计算烟尘在临近线路时的爬升高度 H_s , 结合线路高度确定放电间隙烟尘分布。

2.3 不同山火蔓延条件下线路绝缘的击穿电压

依据蔓延模型所预测的火场区域是否覆盖线路将跳闸环境分为两大类。当蔓延区域覆盖线路时按火焰和烟气垂直分布的间隙计算跳闸风险。当蔓延尚未到达线路下方时按斜向分布的烟尘间隙计算跳闸风险。

2.3.1 火焰和烟气垂直分布间隙

当火焰到达线路下方时线路下方火焰烟尘呈垂直分布。依据燃烧模型将该间隙区域由下至上划分为火焰连续区、火焰不连续区、烟尘区, 如图7所示。

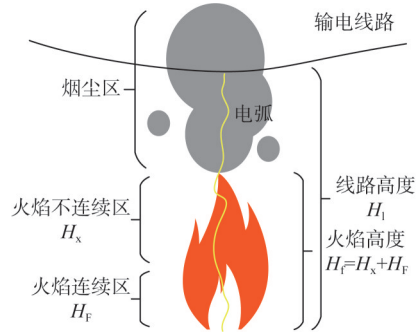


图7 垂直间隙区间分布

Fig. 7 Vertical gap interval distribution

其中, 火焰高度 H_f 由式(10)计算得到, 火焰区间划分由式(12)算出, 火焰上方设定均受烟尘覆盖。受地理条件影响, 各地区线路高度各异, 火焰高度受火焰燃烧强度、树木高度等条件影响同样存在极大波动, 因此依据放电间隙的三区间分层对线路的击穿环境分为以下3类情况。

1) 线路位于烟尘区间($H_l > H_f$)

根据各区间的长度可得导线对地的击穿电压 U_g 为:

$$U_g = \frac{E_a H_s}{C_a C_t C_p} + \frac{E_{HX} H_X}{C_d C_p} + \frac{E_{HF} H_F}{C_k C_w} \quad (26)$$

式中: H_s 为烟雾区长度; H_f 为导线高度与火焰高度的差值;

此时线路的相间空气也全部受烟尘覆盖, 即线路的相间击穿电压 U_{ab} 为:

$$U_{ab} = \frac{E_a L_X}{C_a C_t C_p} \quad (27)$$

式中 L_x 为相间距离。

2) 线路位于火焰不连续区间 ($H_f > H_l > H_f$)

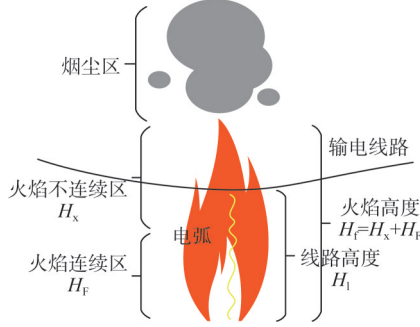


图8 线路位于火焰不连续区

Fig. 8 Transmission line located in the discontinuity zone of flame

如图8所示, 线路位于火焰不连续区间内, 击穿电弧经过部分火焰不连续区及火焰连续区与地面接触, 此时导线-地击穿电压 U_g 为:

$$U_g = \frac{E_{HX} H_X}{C_p C_d} + \frac{E_{HF} H_F}{C_k C_w} \quad (28)$$

线路的相间绝缘全部位于火焰不连续区域, 因此线路的相间击穿电压 U_{ab} 为:

$$U_{ab} = \frac{E_{HX} L_X}{C_p C_d} \quad (29)$$

3) 线路位于火焰连续区间 ($H_f > H_l$)

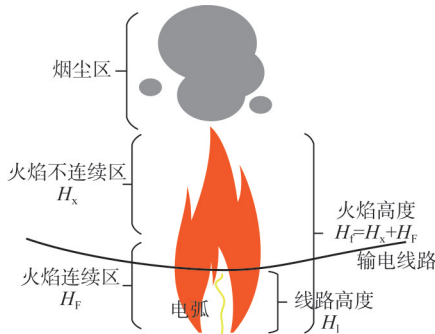


图9 线路位于火焰连续区

Fig. 9 Transmission line located in the continuous zone of flame

如图9所示, 电弧仅经过火焰连续区与大地接触, 此时导线对地线击穿电压 U_g 为:

$$U_g = \frac{E_{HF} H_l}{C_k C_w} \quad (30)$$

式中 H_l 为线路高度。

由于线路位于火焰连续区内, 因此相间击穿电压 U_{ab} 为:

$$U_{ab} = \frac{E_{HF} L_X}{C_k C_w} \quad (31)$$

2.3.2 烟尘横移分布间隙

当山火蔓延尚未达到线路下方时, 即烟尘横移间隙的情况, 由图6分析可知: 强风环境下烟气会快速横移抵达线路下方并借由高温空气漂浮上升, 进而覆盖架空线路的空气间隙, 威胁线路稳态运行 (如图10所示)。该风险发生前提为烟气边界低于线路高度 ($H_s + H_f < H_l$)。其中 H_f 由式(10)计算得出, H_l 为线路参数, H_s 可由烟尘上升角 θ 与火焰线路距离 L_f 计算得到。

$$H_s = \tan \theta \cdot L_f \quad (32)$$

式中 L_f 为火锋点至线路距离。

如图10所示, 风险环境下线路发生击穿的可能通道分为两类: 沿烟气与山火击穿的放电通道1, 以及沿烟气与空气击穿的放电通道2, 二者分别以红色虚线与蓝色虚线表示。

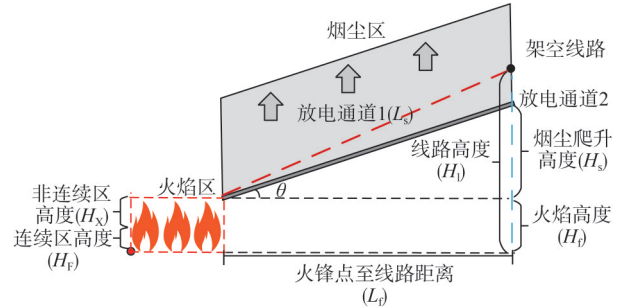


图10 烟尘横移情况下跳闸环境

Fig. 10 Tripping environment with soot traversing

放电通道1由两类间隙类型组成, 分别是斜向烟尘间隙与火焰间隙, 该通道线地击穿电压 U_{g1} 为:

$$U_{g1} = \frac{E_a L_s}{C_a C_t C_p} + \frac{E_{EX} H_X}{C_d C_t C_p} + \frac{E_{HF} H_F}{C_k C_w} \quad (33)$$

式中 L_s 为烟雾区长度, 对应图中黄色虚线的长度。

$$L_s = \sqrt{L_f^2 + (H_l - H_f)^2} \quad (34)$$

放电通道2同样由两类间隙组成, 分别为烟尘间隙与空气间隙。空气间隙长度由火焰高度与烟尘爬升高度组成。火焰高度由式(10)求得, 烟尘爬升高度 H_s 由式(32)计算获得。烟尘间隙长度如图10所示, 即为线路高度与空气间隙长度的差值。获得间隙类型及长度分布后, 即可对其击穿电压 U_{g2} 进行求解:

$$U_{g2} = \frac{E_a (H_l - H_s - H_f)}{C_a C_t C_p} + \frac{E_a (H_s + H_f)}{C_t C_a} \quad (35)$$

式中 H_l 、 H_s 、 H_f 分别为线路高度、烟尘爬升高度、火焰高度。取两通道击穿电压 U_{g1} 、 U_{g2} 较小值作为该环境下的线路对地击穿电压。

该条件下线路相间绝缘也会 $U_{g2} = \frac{E_a(H_l - H_s - H_f)}{C_a C_t C_p} + \frac{E_a(H_s + H_f)}{C_t C_a}$ 受烟尘覆盖, 相间击穿电压 U_{ab} 为:

$$U_{ab} = \frac{E_a L_X}{C_a C_p} \quad (36)$$

2.4 山火蔓延过程中线路绝缘的跳闸概率

输电线路的击穿风险由线路运行电压与山火蔓延条件下线路绝缘的击穿电压共同决定。在相同的线路运行电压条件下, 环境击穿电压越低, 线路短路跳闸风险和对应的跳闸概率越高。其概率分布遵循正态分布^[39], 线路击穿概率可用式(37)计算。

$$\rho(U_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(U_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (37)$$

式中: U_0 为线路绝缘承受的运行电压, 在计算线-地绝缘时, U_0 取 $k\sqrt{2}U_N$, 在计算相间绝缘为 U_0 取 $k\sqrt{2}U_N/\sqrt{3}$, 其中 U_N 为系统的额定电压, k 为系统的最大允许偏移系数, 对于 330 kV 以下线路取 1.15, 330 kV 以上线路取 1.1; σ 为击穿电压标准差, δ 为上述模型中计算得到的山火条件下线路的击穿电压偏差; Z_c 为变异系数, 常规空气间隙环境下为 2%, 山火环境下由于烟尘等颗粒使空气间隙更加不均匀, 取 4%^[8]。最终山火环境下的跳闸概率 $P_v(U_0)$ 的计算公式为:

$$P_v(U_0) = \frac{1}{0.04\sqrt{2\pi} \cdot \mu} e^{\int_{-\infty}^{U_0} \frac{(x - \mu)^2}{0.0032\mu^2} dx} \quad (38)$$

式中: μ 为正态分布中的均值; x 为电压变量。

3 实例分析

为验证所提方法的有效性, 本文以南方电网某 220 kV 双回线的跳闸事故为模拟案例。2022 年 3 月某日 17:21 该线路因山火跳闸造成其所属变电站失压, 累计失压 3 min, 损失负荷达 45 MW。山火自 14:00 开始爆发, 次日凌晨 01:00 被完全扑灭, 持续时间长达 11 h。

3.1 数据收集与预处理

对该次山火发生位置所在地级市、县、区范围, 收集当日气象、植被类型和高程海拔数据, 并

通过数据预处理, 计算蔓延模型中初始蔓延速度、可燃物修正系数、坡度修正系数、风速修正系数等蔓延参数。

3.1.1 气象数据

根据国家气象中心所发布数据, 该县区当日气象信息如表 5 所示。当地日最高气温达 27℃, 且在持续多日无雨的条件下, 空气相对湿度较低, 植被含水量也相对降低。山火发生时风速约为 5.5 m/s, 风向朝北, 导致山火边界总体向北方向蔓延。

表 5 该地级市当日气象数据

Tab. 5 Meteorological data of the city on the day

最高气温/℃	最高风速/(m·s ⁻¹)	最高风级	相对湿度/%	风向
27	5.5	4	36	正北方向

3.1.2 植被类型数据

从中国科学院资源环境科学与数据中心获取了该地级市县区 1 km×1 km 植被类型分布情况(图 11)。该山火爆发范围内植被类型为枞树园和经济林, 多以亚热带阔叶林与矮树、草丛为主, 为其蔓延行为提供了有利的可燃物条件。对照表 1 可确定各个地理位置的可燃物修正系数。

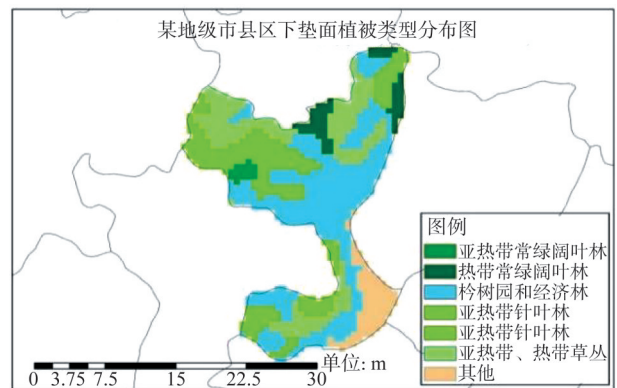


图 11 某地级市县区下垫面植被类型分布

Fig. 11 Distribution of underlying surface vegetation types in counties and districts of a prefecture-level city

3.1.3 高程海拔数据

该地级市县区 12.5 m×12.5 m 高程数据由中国科学院资源环境科学与数据中心提供(图 12)。该地级市县区地处云贵高原, 海拔普遍偏高且垂直落差较大, 山火蔓延方向存在一定坡度的上坡, 为山火蔓延和发展提供了有利的地形条件。

3.2 山火蔓延及线路跳闸概率模拟

据山火事故现场运维人员反馈, 此次山火系高

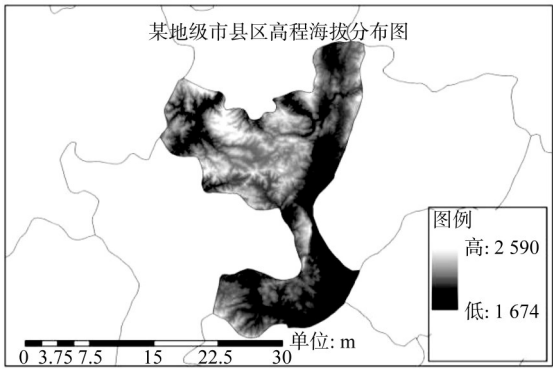


图 12 某地级市市区高程分布

Fig. 12 Elevations distribution of the city

速公路施工作业引燃周边杂草所致。南方电网相关运维部门提供了山火火势发展蔓延的实际情况, 如图 13 所示。山火在地形及北风的影响下迅速朝北向地区发展, 同时由于两侧道路的限制, 山火未向两侧蔓延。

基于卫星遥感智慧天眼监测系统, 获取初始监测火点经纬度, 对该火点进行蔓延预测。模型中元胞边长为 20 m, 单步蔓延发展时间为 1 min。同时将收集的火灾当天气象数据与火点周边区域地理数据按照同样的空间尺寸栅格化后, 建立山火蔓延模拟仿真, 最终蔓延结果如图 14 所示。对比图 13, 仿真结果中的火场形状与真实火场基本一致, 参考资料指出将火灾模拟结果与真实火灾场景进行对比是验证模型准确性的有效方式, 同时森林火灾模拟需综合考虑坡度、坡向等地形因素以及风速、风向等气象因素, 这进一步证明该山火蔓延模型能够结合地形和气象条件很好地模拟山火空间蔓延趋势。

为进一步确定蔓延动态预测过程的准确性, 本



图 13 山火火场边界俯视图

Fig. 13 Top view of the wildfire boundary



图 14 山火蔓延情况预测图

Fig. 14 Prediction of the spread of wildfires

文参考 RGB3DS 形变监测系统通过实时视觉分析精准计算火势数据、AI 预测火势发展趋势的技术思路, 依据现场运维人员提供的山火发展时间节点数据(表 6), 与预测结果进行对比, 对比结果如图 15 所示。结果显示, 火场边界与输电线路的最短距离随时间与现场反馈的距离基本一致, 平均空间误差为 35.496 4 m。图 15 中还给出了山火蔓延时输电线路的跳闸概率。山火发生后的 120 min 内, 火焰距线路存在一定距离, 线路跳闸概率低; 140 min 后线路的跳闸概率急剧上升, 并于 147 min 达到峰值 82.74 %, 此时火焰抵达线路正下方。由于持续火焰燃烧的影响, 该线路最终于 163 min 时刻在高温、烟气和火焰等离子体的共同作用下发生跳闸。

表 6 山火事件实际时间节点与线路情况

Tab. 6 Actual time nodes and line conditions of the wildfire incident

时刻	山火时长/min	至线路最短距离/km	情况
14:38	0	1.6	施工作业引燃附近杂草, 引发山火
15:30	52	1.0	运维人员抵达现场, 第一次预警
16:23	105	0.4	山火快速向双回线发展, 第二次预警
17:01	143	0	山火蔓延至线路下方, 第三次预警
17:21	163	0	山火蔓延区段扩大, 线路跳闸

为更直观地展现山火蔓延过程中非线路下方火焰对跳闸风险的影响, 图 16 给出了该次事件中线路跳闸概率随火焰距线路距离的变化。

当山火与线路距离较远时, 线路跳闸概率处于较低水平。当山火蔓延至线路 1 km 时跳闸风险缓慢增长至 10.97 %。随着山火向线路靠近, 当山火距离线路为 200 m 时线路跳闸风险增长到 12.64 %。

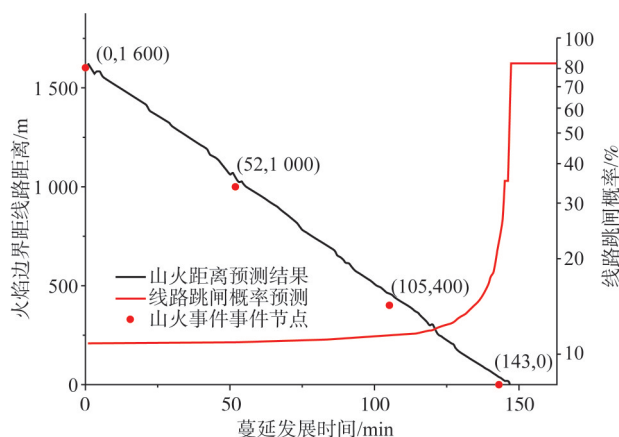


图 15 模型预测结果与实际时间节点对比

Fig. 15 Comparison of the forecast result with the event time nodes

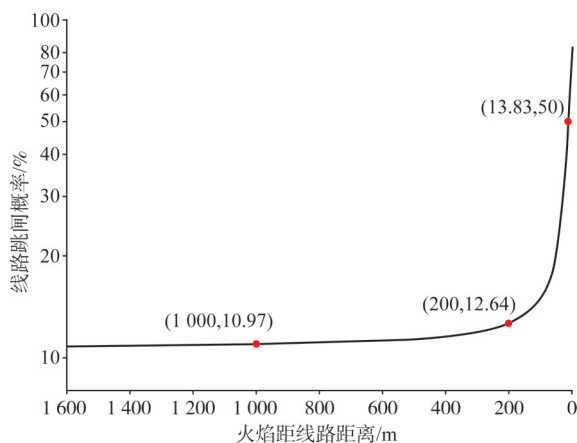


图 16 不同火焰距离下的线路跳闸概率预测

Fig. 16 Tripping probability of line at different flame distances

此时若山火可被及时扑灭, 电网仍能维持安全运行状态。当火焰处于线路 200 m 至 0 m 的范围内时, 线路跳闸概率呈爆发式增长。当山火距离线路为 13.83 m 时, 线路的跳闸概率达到 50%, 即此时线路绝缘的山火击穿电压等于线路的最大运行电压。值得注意的是, 由于火焰具有持续燃烧特性, 即便山火不再向线路进一步蔓延, 线路绝缘性能的长时间下降也极易引发线路跳闸, 进而导致停电事故。最终火焰抵达线路下方时, 线路的山火跳闸概率达到峰值 82.74%。根据现场的反馈, 火焰到达线路下方后并没有立刻引起线路跳闸, 而是继续燃烧了 20 min 后才引起跳闸停电。这意味着该模拟结果基本与现场的情况一致。

借助本文提出的方法, 可直观反映山火蔓延过程中对线路造成的动态风险变化。若在该次山火事

件中, 能在首次监测到山火火点时及时进行蔓延趋势与邻近线路跳闸概率模拟, 并为调度中心提供告警数据支撑, 将大大增加留给调度中心的处理时间, 一定程度上减小线路因山火跳闸造成的损失。

4 结论

针对传统跳闸模型难以预测山火蔓延过程中架空线路的动态风险变化, 本文首先基于火焰蔓延特性及元胞模型迭代原理, 实现了对火焰边界蔓延的全过程预测。其次, 基于火焰边界与线路间的相对位置关系, 评估了强风工况下火焰烟尘对线路空气绝缘间隙的影响机制, 提出了一种烟尘横移环境下的线路跳闸模型。最后, 结合三段式火焰燃烧模型评估不同情形下线路的跳闸概率, 完成对线路跳闸概率的全过程预测。实例仿真表明, 该模型参考基于改进元胞自动机山火蔓延模型的输电线路跳闸概率计算方法, 引入火焰温度、植被类型、火点距离和降雨量等多因素综合考量, 能够较为准确地预测山火蔓延趋势及蔓延全过程中的线路跳闸概率, 消除了传统静态跳闸模型与动态山火发展过程间的互悖性, 为电网山火防治提供有力数据及理论支撑。该类基于改进元胞自动机山火模型的线路跳闸概率计算方法已被中国电力科学研究院有限公司列为相关专利技术方案。

参考文献

- [1] 高永亮, 张军强, 王涛, 等. 典型微地形下高压输电线路风振响应[J]. 高压电器, 2025, 61(2): 204-213.
GAO Yongliang, ZHANG Junqiang, WANG Tao, et al. Wind-induced response of high-voltage transmission line under typical micro-terrain[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(2): 204-213.
- [2] 毛近贤, 王伟芳, 张毅龙, 等. 雷暴云背景下超高压输电线路近区电场分析模型研究[J]. 高压电器, 2025, 61(3): 184-191.
MAO Jinxian, WANG Weifang, ZHANG Yilong, et al. Research on electric field analytical model near ehv transmission lines under thunderclouds[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(3): 184-191.
- [3] 吴骏, 周游, 周恩泽, 等. 基于山火跳闸敏感度的南方电网输电线路山火跳闸时空分布统计[J]. 南方电网技术, 2026, 20(3): 51-60, 73.
WU Jun, ZHOU You, ZHOU Enze, et al. Statistics on temporal and spatial distribution of wildfire tripping on transmission lines of Southern Power Grid based on the sensitivity of wildfire tripping[J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(3): 51-60, 73.
- [4] 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.
- [5] 周恩泽, 黄勇, 向淳, 等. 基于物元可拓的输电线路山火风险评估模型[J]. 南方电网技术, 2022, 16(1): 145–154.
- ZHOU Enze, HUANG Yong, XIANG Zhun, et al. Evaluation model of wildfire risk in transmission lines based on matter-element extension[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 145–154.
- [6] 刘毓, 陆佳政, 罗晶, 等. 架空输电线路山火同步卫星广域监测与杆塔定位[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1322–1327.
- LIU Yu, LU Jiazheng, LUO Jing, et al. Synchronous satellite wide area monitoring for overhead transmission line wildfire and tower location[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1322–1327.
- [7] 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.
- [8] 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, 5531.
- 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, 5531.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 刘辉, 杨韬, 林济铿, 等. 山火条件下输电线路跳闸概率计算[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 125–133.
- LIU Hui, YANG Tao, LIN Jikeng, et al. Calculation of transmission line trip probabilities under forest fire condition[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 125–133.
- [13] 国家能源局. 架空输电线路山火风险预报技术导则: DL/T 1620–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [14] 赵璠, 舒立福, 周汝良, 等. 林火行为蔓延模型研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(2): 46–50.
- ZHAO Fan, SHU Lifu, ZHOU Ruliang, et al. A review of wildland fire spread modelling[J]. World Forestry Research, 2017, 30(2): 46–50.
- [15] MELL W, JENKINS M, GOULD J, et al. A physics-based approach to modelling grassland fires[J]. International Journal of Wildland Fire, 2007(16): 1–22.
- [16] MORVAN D, LARINI M. Modeling of one dimensional fire spread in pine needles with opposing air flow[J]. Combustion Science & Technology, 2001, 164(1): 37–64.
- [17] GRASSO P, INNOCENTE M S. Physics-based model of wildfire propagation towards faster-than-real-time simulations[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2020, 80(5): 790–808.
- [18] ROTHERMEL R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels[R]. Ogden: USDA Forest Service, Intermountain Forest & Range Experiment Station, 1972: 1–40.
- [19] NOBLE I R, GILL A M, BARY G A V. McArthur's fire-danger meters expressed as equations[J]. Australian Journal of Ecology, 1980, 5(2): 201–203.
- [20] CHENEY, NP, GOULD J S, ANDERSON W. Prediction of fire spread in grasslands[J]. International Journal of Wildland Fire, 1998, 8(1): 1–13.
- [21] LAWSON B D, STOCKS B J, ALEXANDER M E, et al. A system for predicting fire behavior in Canadian forests[C]// 8th Conference on Fire and Forest Meteorology, April 29–May 2, 1985, Detroit, Michigan, USA. Detroit: Society of American Foresters, 1985: 110–126.
- [22] 王正非. 森林潜在火行为预测预报[J]. 林业科技, 1984(3): 11–15.
- WANG Zhengfei. Prediction and forecasting of potential fire behavior in forests[J]. Forestry Science and Technology, 1984(3): 11–15.
- [23] 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. The measurement method of the wildfire initial spread rate[J]. Mountain Research, 1983(2): 42–51.
- [24] 王正非. 三指标林火预报法[J]. 生态学杂志, 1988, 7(S1): 75–81.
- WANG Zhengfei. A three-index method for predicting forest fires[J]. Chinese Journal of Ecology, 1988, 7(S1): 75–81.
- [25] 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. Current forest fire danger rating system[J]. Journal of Natural Disasters, 1992(3): 39–44.
- [26] ANDERSON, D. H. CATCHPOLE E A, De MESTRE N J, et al. Modelling the spread of grass fires[J]. The ANZIAM Journal, 1982, 23(4): 451–466.
- [27] RICHARDS G D. Elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1990, 30(6): 1163–1179.
- [28] 沈敬伟, 温永宁, 周廷刚, 等. 基于元胞自动机的林火蔓延时空演变研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(8): 116–121.
- SHEN Jing-wei, WEN Yongning, ZHOU Tinggang, et al. A CA-based study on spatial-temporal evolution of forest fire spreading[J]. Journal of Southwest University (Natural Science

- Edition), 2013, 35(8): 116 – 121.
- [29] KARAFYLLIDIS I, THANAILAKIS A. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata[J]. Ecological Modelling, 1997, 99(1): 87 – 97.
- [30] 毛贤敏. 风和地形对林火蔓延速度的作用[J]. 应用气象学报, 1993(1): 100 – 104.
- MAO Xianmin. The influence of wind and relief on the speed of the forest fire spreading[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 1993(1): 100 – 104.
- [31] 郑焕能. 火场参数的计算与应用[J]. 森林防火, 1988(4): 8 – 9.
- ZHENG Huanneng. Calculation and application of fire field parameters[J]. Journal of Wildland Fire Science, 1988(4): 8 – 9.
- [32] BYRAM G M. Forest fire: control and use[M]. New York: McGraw-Hill, 1959: 61 – 89.
- [33] 周恩泽, 樊灵孟, 黄道春, 等. 2013 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 2013 m[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4316 – 4322.
- [34] 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.
- [35] 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 gap under typical high risk vegetation fire condition[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 179 – 185.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 梁振涛. 室外风对火灾烟气影响的试验研究[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(6): 768 – 772.
- LIANG Zhentao. Experimental study on the influence of outside wind on fire smoke[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(6): 768 – 772.
- [39] 周泽存, 沈其工, 方瑜, 等. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 55 – 61.

收稿日期: 2024-09-21; 网络首发日期: 2025-03-03

作者简介:

周洋卓君(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统防灾减灾, 844952080@qq.com;
马瑞康(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统防灾减灾, 304264938@qq.com;
汪皓(1982), 男, 工程师, 硕士, 从事电网调度自动化工作, wh.christian@gmail.com。

(上接第 142 页 Continued from Page 142)

- HOU Qixin, LI Qingmin, ZOU Liang, et al. Optimized methodology of axial partition structure for bridge arm reactor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3946 – 3954.
- [24] 陈鸣, 刘水, 钟振鑫. 二极管钳位三电平有源电力滤波器超螺旋滑模控制策略[J]. 广东电力, 2025, 38(3): 69 – 77.
- CHEN Ming, LIU Shui, ZHONG Zhenxin. The super twisting sliding mode control strategy for diode clamped three-level active power filters[J]. Guangdong Electric Power, 2025, 38(3): 69 – 77.
- [25] 张大维, 尹渭, 贾慧, 等. 改进的不对称三电平快速模型预测控制算法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(9): 190 – 196.
- ZHANG Dawei, YIN Wei, JIA Hui, et al. An improved asymmetric three-level F-MPC algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 190 – 196.
- [26] 徐政, 肖晃庆, 张哲任. 模块化多电平换流器主回路参数设计[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2514 – 2527.
- XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren. Design of main circuit parameters of modular multilevel converters[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2514 – 2527.
- [27] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2017.

收稿日期: 2024-09-04; 网络首发日期: 2025-02-20

作者简介:

王彦峰(1978), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电网输变电工程设计与建设, 13560309121@139.com;
王流火(1985), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为高压交流输电变电工程设计与建设, 379876352@qq.com;
刘生(1985), 男, 通信作者, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为高压交流和柔性直流输电变电技术, liusheng@gedi.com.cn。