

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307041

# 山区输电线路高浓度烟雾环境火点定位技术\*

祝永坤<sup>1</sup> 尚鑫<sup>2</sup> 冯振华<sup>3</sup> 王湃<sup>3</sup> 黄宇辰<sup>3</sup>

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司 呼和浩特 010020; 2. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院 呼和浩特 010020; 3. 国网内蒙古东部电力有限公司呼伦贝尔公司 呼伦贝尔 021000)

**摘要:**针对目前巡检与监控手段在高浓度烟雾环境下无法准确识别 $10\text{ m}^2$ 以下的着火面积,以及不能准确识别处于低洼地带的山火等问题,以组合惯导多数据融合为核心,研究山区输电线路高浓度烟雾环境火点定位技术。该技术采用联邦滤波器,对山区输电线路的卫星遥感、惯导等多源监测数据进行组合与多数据融合。设计基于上下文判断法与绝对阈值法的着火点自适应阈值检测算法,实施山区输电线路火点信息提取。设计PSO算法与BP神经网络相结合的多波段光电复合探测目标识别方法,实现高浓度烟雾环境下的山区输电线路火点目标识别。利用基于激光测距的山区输电线路火点测距方法,实现山区输电线路高浓度烟雾环境火点定位。实验测试结果表明,设计技术对于平原地带火点( $10\text{ m}^2$ 以上的着火面积)、平原地带火点( $10\text{ m}^2$ 以下的着火面积)、低洼地带火点( $10\text{ m}^2$ 以上的着火面积)三种情况的定位精度均高于99.5%。

**关键词:**组合惯导多数据融合;山区输电线路;PSO算法;激光测距;火点定位

**中图分类号:** TU18, TN102 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

## Fire point location technology in high concentration smoke environment of transmission line in mountainous area

Zhu Yongkun<sup>1</sup> Shang Xin<sup>2</sup> Feng Zhenhua<sup>3</sup> Wang Pai<sup>3</sup> Huang Yuchen<sup>3</sup>

(1. State Grid Inner Mongolia Eastern Power Co., Ltd., Hohhot 010020, China;

2. State Grid Inner Mongolia East Electric Power Co., Ltd. Electric Power Science Research Institute, Hohhot 010020, China;

3. State Grid Inner Mongolia East Electric Power Co., Ltd. Hulunbuir Company Inner Mongolia, Hulunbuir 021000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems that the current inspection and monitoring methods cannot accurately identify the fire area below  $10\text{ m}^2$  square meters in the high-concentration smoke environment, and it cannot accurately identify the mountain fire in the low-lying area, the fire location technology of the transmission line in the high-concentration smoke environment was studied based on the integrated inertial navigation multi-data fusion. This technology combines and fuses multi-source monitoring data such as satellite remote sensing and inertial navigation data of transmission lines in mountainous areas by using federated filter. An adaptive threshold detection algorithm was designed for ignition points based on context judgment and absolute threshold method, and implement the extraction of ignition point information for transmission lines in mountainous areas. A multi band optoelectronic composite detection target recognition method was designed combining PSO algorithm and BP neural network to achieve the recognition of fire point targets on transmission lines in mountainous areas under high concentration smoke environment. Location of transmission lines in mountainous areas fire point location method based on laser ranging, fire point location of transmission lines in mountainous areas in high smog environment is realized. The experimental test results indicate that the design technology is effective for fire points ( $10\text{ m}^2$  above the fire area), fire points in plain areas ( $10\text{ m}^2$  The fire area below), and the fire point in low-lying areas ( $10\text{ m}^2$  above the fire area). The positioning accuracy of the above three situations is higher than 99.5%.

**Keywords:** integrated inertial navigation multi data fusion; transmission lines in mountainous areas; PSO algorithm; laser ranging; fire point positioning

收稿日期: 2023-11-13 Received Date: 2023-11-13

\* 基金项目: 国网内蒙古东部电力有限公司(SGMD0000SGJS2250014)项目资助

## 0 引言

输电线路<sup>[1-2]</sup>林区火灾<sup>[3]</sup>是无法完全避免的<sup>[4]</sup>。除加强群众护林防火的意识外,保护输电线路及林木资源的最佳方法,便是缩短火灾侦察的时间,准确定位火点,制定应急预案,防止火势蔓延及失控,保障输电线路稳定运行<sup>[5]</sup>。基于该背景对山区输电线路高浓度烟雾环境火点精确定位技术进行研究。

对于山区输电线路环境火点定位技术的研究<sup>[6]</sup>,当前的研究成果已经十分丰富。20 世纪 90 年代山火监控技术主要以卫星林火监测系统为主,监控范围广,覆盖面积大,但对于局部面积火灾识别精度不高,不易发现初级阶段的着火点。2001 年,基于 GIS 地理信息系统和带有 GPS 定位系统的红外监测装置相结合的山火监控技术受到国内外专家的关注,该方案能够及时发现监测点的山火,并能够对山火进行精准定位,但监测范围小,无法对区域内山火着火点进行监测。2013 年,基于红外热成像技术的山火图像监控装置在山火识别中成功应用,为输电线路山火监控提出新的解决思路。最近几年,文献[7]中提出一种基于凸壳理论的监控摄像头部分遮挡场景下火焰定位方法,该方法能够迅速对起火部位实施定位,为调查火灾事故提供了有利工具。文献[8]中设计了一种基于红外图像的高温点定位跟踪算法,主要基于红外探测器技术与 FPGA 设计了一种智能消防头盔,实现了火场高温点的定位及跟踪。然而,该方法在高温火点的定位上表现较好,但是在受到其他环境因素影响下的定位准确性较低。整体来说,将以上方法应用于山区输电线路火点定位时,由于高浓度烟雾环境导致其无法准确识别 10 m<sup>2</sup> 以下的着火面积,以及不能准确识别处于低洼地带的山火,难以对山区输电线路的山火进行精准定位。

因此,为了提高定位准确性,在上述方法的基础上,设计一种山区输电线路高浓度烟雾环境火点精确定位技术,该技术以组合惯导多数据融合为核心,并且基于上下文判断法与绝对阈值法提取山区输电线路火点信息,在考虑高浓度烟雾环境条件下,充分考虑气候环境变化情况,实现火点精确定位。

## 1 山区输电线路高浓度烟雾环境火点精确定位技术设计

### 1.1 组合惯导多数据融合

对于山区输电线路卫星遥感惯导多源监测数据,包括惯性导航系统 INS 监测数据、GBAS 着陆系统 GLS 监测数据以及仪表着陆系统 ILS 监测数据,应用联邦滤波

器实施三者的组合惯导多数据融合。组合惯导多数据融合流程具体如下:

#### 1) 信息分配

将山区输电线路卫星遥感惯导多源监测数据按需分配到主滤波器与多个子滤波器之间<sup>[9]</sup>。

其中过程信息  $A^{-1}(l)$  的主滤波器信息分配原则具体如下式:

$$A^{-1}(l) = \delta_i^{-1} A(l) \quad (1)$$

式中:  $A(l)$  是指山区输电线路卫星遥感惯导多源监测数据的状态方程;  $\delta_i$  指的是某信息分配因子,其值大于 0,且满足下式的信息分配原理:

$$\sum_{i=1}^a \delta_i + \delta_n = 1 \quad (2)$$

式中:  $a$  指的是信息分配因子数量;  $\delta_n$  是指除  $\delta_i$  以外的随机信息分配因子<sup>[10]</sup>。

过程信息  $A^{-1}(l)$  的子滤波器信息分配原则具体如下式:

$$A^{-1}(l)' = \delta_i A(l) \quad (3)$$

#### 2) 初始值设定

以联邦滤波器初始设定要求为依据设置主滤波器与其他子滤波器对应估计协方差矩阵的初始值,具体来说,将其设定为系统组合以前的初始值的  $\chi_i (i = 1, 2, \dots, M, n)$  倍,其中  $\chi_i$  符合信息守恒定律<sup>[11]</sup>。

#### 3) 设置过程噪声协方差阵

在滤波过程中,设置主滤波器与各个子滤波器的对应过程噪声协方差阵,具体如下式:

$$\begin{cases} \alpha(A^{-1}(l)) = \chi_i \varepsilon(A^{-1}(l)) \\ \alpha(A^{-1}(l)') = \chi_i \phi(A^{-1}(l)') \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\alpha(A^{-1}(l))$  指的是主滤波器的对应过程噪声协方差阵;  $\varepsilon(A^{-1}(l))$  是指主滤波器的组合过程噪声协方差阵;  $\alpha(A^{-1}(l)')$  表示子滤波器的对应过程噪声协方差阵;  $\phi(A^{-1}(l)')$  代表子滤波器的组合过程噪声协方差阵<sup>[12]</sup>。

#### 4) 获取局部估计

各个子滤波器在实施自身量测信息处理的同时,与前面的步骤相结合,最终获取局部估计。

#### 5) 多数据融合

在解算获取主滤波器与各子滤波器局部估计后,通过下式实现最优组合:

$$\begin{cases} W_g = [W_1^{-1} + W_2^{-1} + \dots + W_n^{-1} + W_m^{-1}]^{-1} \\ \hat{E}_g = W_g [W_1^{-1} \hat{E}_1 + W_2^{-1} \hat{E}_2 + \dots + W_n^{-1} \hat{E}_n + W_m^{-1} \hat{E}_m] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $W_m^{-1}$  指的是主滤波器的第  $m$  个局部估计值;  $W_g$  是指主滤波器的局部估计;  $\hat{E}_m$  表示第  $m$  个子滤波器的局部

估计值;  $\hat{E}_g$  代表子滤波器的局部估计<sup>[13]</sup>。

#### 6) 重置

根据获得的最优组合,应用全局滤波解实施全部滤波器中协方差阵与滤波值的重置工作。

### 1.2 基于上下文判断法与绝对阈值法的山区输电线路火点信息提取

设计一种基于上下文判断法与绝对阈值法的着火点自适应阈值检测算法,实施山区输电线路火点信息提取。其具体流程如下:

#### 1) 林区、水体与云层掩膜

(1) 组合惯导多数据融合结果可以分为非林区与林区,综合火灾前的组合惯导多数据融合结果,将 NDVI 值作为指标构建森林掩膜,以识别森林火点,将非林区高温像元排除在外<sup>[14]</sup>。

(2) 由于云层在白天有着高反射率特性,通过下式检测影像中的云并形成掩膜:

$$D_1 + D_2 > 0.70 \quad (6)$$

式中:  $D_1$  指的是红光波段对应反射率;  $D_2$  是指近红外波段对应反射率<sup>[15]</sup>。

(3) 结合归一化差分水体指数、中波红外波段亮温  $H$  以及  $D_2$ ,通过下式实施影像中水体的检测。

$$\begin{cases} D_2 < 0.17 \\ NDWI = \frac{D_3 - D_2}{D_3 + D_2} > 0.15 \\ H < 305 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $NDWI$  指的是归一化差分水体指数;  $D_3$  是指绿光波段对应反射率<sup>[16]</sup>。

#### 2) 疑火点提取

(1) 设置一个极高的阈值,利用该阈值直接判定疑火点像元。

(2) 设定一个相对较高的阈值,基于提取获得的水云掩膜实施高温可疑像元提取,通过上下文阈值法利用两个阈值对高温可疑像元实施判断,确认其是否为疑火点。

#### 3) 火点提取

针对疑火点像元燃烧前后归一化差分水体指数的实际变化情况实施时序分析,将一部分误提像元排除,提升火点监测精度。

### 1.3 高浓度烟雾环境下的山火识别

设计一种 PSO 算法与 BP 神经网络相结合的多波段光电复合探测目标识别方法,实现高浓度烟雾环境下的山区输电线路火点目标识别。

首先利用中值滤波技术对山区输电线路火点图像实施预处理,在去噪的同时保证图像边缘清晰,保护烟火区域轮廓<sup>[17]</sup>。

接着利用设计方法实施山火目标识别,具体步骤如下:

1) 提取高浓度烟雾环境下山区输电线路火点图像的特征。

2) 确定适用于各波段下的 BP 神经网络结构。

3) 依据各层神经元个数对粒子的维度进行确定。

4) 粒子维度用于表示两种波段空间内粒子的速度向量和位置向量。其中,可见光波段空间内的表示具体如下:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{\text{可见光}} = (u_1, u_2, \dots, u_\alpha) \\ \mathbf{c}_{\text{可见光}} = (c_1, c_2, \dots, c_\alpha) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{u}_{\text{可见光}}$  指的是可见光波段空间内粒子的速度向量;  $\alpha$  是指可见光波段的粒子维度数;  $\mathbf{c}_{\text{可见光}}$  指的是可见光波段空间内粒子的位置向量<sup>[18]</sup>。

红外波段空间内的表示同上式原理相同。

5) 对 PSO 算法的其他参数实施初始化处理。首先设置学习因子  $d_1$  和  $d_2$ ,接着通过典型线性递减策略对惯性权重进行确定。

6) 实施粒子群优化处理,所选择的适应度函数具体如下式:

$$U = \frac{1}{K \sum_{j=1}^K (g_j - g_j')^2} \quad (9)$$

式中:  $K$  指的是粒子数量;  $g_j$  是指期望输出值也就是实际值;  $g_j'$  是指网络输出的预测值。

7) 实施粒子的迭代训练。到达最大迭代次数后,将对应参数值作为各网络初始参数值,分别实施高浓度烟雾环境下的网络训练。结合两种网络的识别结果,实现高浓度烟雾环境下更加准确的山火识别,公式为:

$$C_i = \frac{\exp(\mathbf{u}_{\text{可见光}}, \mathbf{c}_{\text{可见光}})}{\sum_{i=1}^{\alpha} \exp(\mathbf{u}_{\text{可见光}}, \mathbf{c}_{\text{可见光}})} \quad (10)$$

$$U > \varepsilon'$$

式中:  $\varepsilon'$  表示适应度阈值。

### 1.4 气候环境变化情况下山火识别优化

上述内容主要考虑了高浓度烟雾环境,这是山火发生时的主要特征。然而,在实际环境中,智能识别山火时,山火周边的气候环境是随机的且具备多变性。因此,为了进一步提高山火识别的准确,在高浓度烟雾环境下的山火识别的基础上,增加气候环境变化因子,通过该因子优化山火识别方法。气候环境变化因子包括温度、湿度、风速、风向、大气压力、降雨量,设置气候环境变化因子,公式为:

$$\mathbf{e}_j \in \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\} \quad (11)$$

计算处理气候环境变化因子的权重,确定气候环境变化因子对山火识别的重要程度,公式为:

$$w_i = \frac{e_j}{\sum_{j=1}^6 e_j} \quad (12)$$

加权处理气候环境变化因子,并将其与高浓度烟雾环境下的山火识别结果相结合,得到优化后的山火识别方法,为火点定位提供准确的参考,公式为:

$$C_i' = w_i e_j \beta C_i \quad (13)$$

式中:  $\beta$  表示优化系数。

至此在山区输电线路火点定位中充分考虑了气候环境变化,从而提高定位准确性。

### 1.5 山区输电线路火点定位

设计一种基于激光测距技术的山区输电线路火点测距方法,实现山区输电线路高浓度烟雾环境火点定位。

该方法的执行步骤具体如下:

1) 布置激光发射点与摄像机<sup>[19]</sup>。

其中激光发射点的布置流程如图 1 所示。

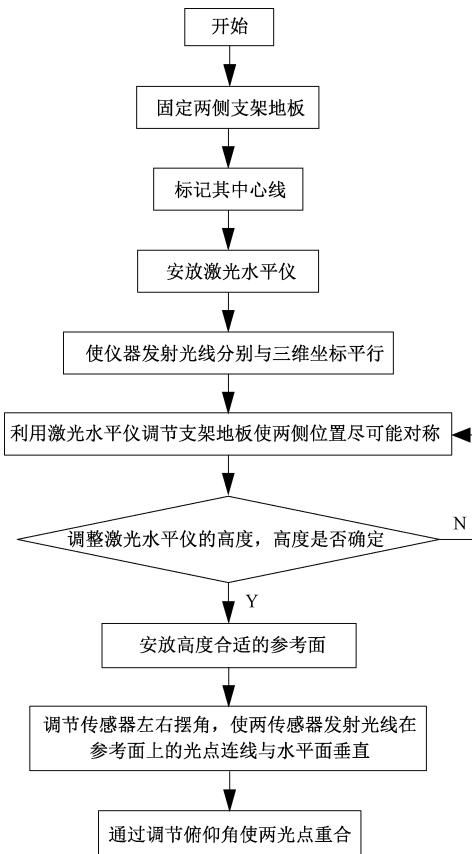


图 1 激光发射点的布置流程

Fig. 1 Layout process of laser transmitting point

- 2) 调整激光发射点和摄像机的相对位置。
- 3) 根据测量靶标定结果,标定激光点位于图像中的位置;
- 4) 基于山火识别结果,标注烟火在图像中的边框

位置;

5) 基于图像中心点坐标和烟火边框坐标的位置偏差,采用 PID 偏差控制算法转动云台电机,使烟火边框点坐标逐步移动到图像中心位置,并记录此时激光测得的距离,该距离即表示烟火边框点到杆塔的距离;

6) 不断重复步骤 5), 获得多个边框点到杆塔的距离。

7) 采用均值法得到山火中心点到杆塔的距离,具体计算公式如下:

$$s = \frac{DIS_1 + DIS_2 + \dots + DIS_\kappa}{\kappa} \quad (14)$$

式中:  $\kappa$  指的是边框点个数;  $DIS_\kappa$  是指第  $\kappa$  个边框点到杆塔的距离<sup>[20]</sup>。

就此完成山区输电线路高浓度烟雾环境下的火点定位。

## 2 实验测试

### 2.1 实验过程

对于设计的山区输电线路高浓度烟雾环境火点精确定位技术,利用其对某山区实施输电线路高浓度烟雾环境火点定位测试。

在测试中首先应用联邦滤波器实施山区输电线路卫星遥感惯导多源监测数据的组合惯导多数据融合。接着利用设计的基于上下文判断法与绝对阈值法的着火点自适应阈值检测算法,实施实验山区输电线路火点信息提取。

然后通过 PSO 算法与 BP 神经网络相结合的多波段光电复合探测目标识别方法实施高浓度烟雾环境下实验山区输电线路的火点目标识别。

其中针对实验山区实际情况,设置的极高阈值为 350 K, 设定的相对较高的阈值为 335 K。

在识别中,将可见光波段下的结构设置为 2-8-2, 红外光波段下的结构设置为 2-9-2。则粒子维度的计算结果如下式所示:

$$V_1 = 8 + 2 + 8 \times 2 + 8 \times 2 = 42 \quad (15)$$

$$V_2 = 9 + 2 + 9 \times 2 + 9 \times 2 = 47 \quad (16)$$

式中:  $V_1$ 、 $V_2$  分别表示两种波段下粒子维度的计算结果。

则两种波段空间内粒子的速度向量以及速度向量表示具体如下式:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{\text{可见光}} = (u_1, u_2, \dots, u_{42}) \\ \mathbf{c}_{\text{可见光}} = (c_1, c_2, \dots, c_{42}) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{\text{红外}} = (u_1, u_2, \dots, u_{47}) \\ \mathbf{c}_{\text{红外}} = (c_1, c_2, \dots, c_{47}) \end{cases} \quad (18)$$

在 PSO 算法参数设置中,学习因子  $d_1$  和  $d_2$  的设置

具体如下式:

$$\begin{cases} d_1 = 1.5 \\ d_2 = 1.5 \end{cases} \quad (19)$$

惯性权重的设置具体如下式:

$$\mu = \mu_{\max} - \sigma \left( \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{\sigma_{\max}} \right) \quad (20)$$

式中:  $\mu_{\max}$  为惯性权重最大值, 将其取值定为 0.9,  $\mu_{\min}$  是指惯性权重最小值, 将其取值定为 0.3;  $\sigma$  是指当前迭代数;  $\sigma_{\max}$  指的是最大迭代数, 将其定为 500。

实施粒子群优化、粒子迭代训练, 并实施两种网络的训练, 结合两种网络的识别结果作为最终识别结果。其中某处识别结果如图 2 所示。



图 2 某处识别结果

Fig. 2 Somewhere identify the result

最后利用基于激光测距的山区输电线路火点测距方法, 实现实验山区输电线路高浓度烟雾环境火点定位。

## 2.2 定位结果与性能测试分析

设计技术的最终定位结果如表 1 所示。

表 1 设计技术的最终定位结果

Table 1 Final positioning results of design technology

序号	火点类型	着火面积/ $\text{m}^2$	定位结果/ $\text{km}$
1	低洼地带火点	25	3.55
2	平原地带火点	8	2.63
3	低洼地带火点	15	4.51
4	平原地带火点	9	2.54
5	平原地带火点	15	2.87

表 1 说明通过设计技术能够在高浓度烟雾环境下实现低洼地带火点与平原地带火点的定位, 同时能够实现  $10 \text{ m}^2$  以下的着火面积的火点定位。

基于上表定位结果测试设计技术对于平原地带火点 ( $10 \text{ m}^2$  以上的着火面积)、平原地带火点 ( $10 \text{ m}^2$  以下的着火面积)、低洼地带火点 ( $10 \text{ m}^2$  以上的着火面积) 三种情况的定位精度。在测试中, 将基于凸壳理论的监控摄像头部分遮挡场景下火焰定位方法与基于红外图像的高温点定位跟踪算法作为对比方法, 共同进行测试, 分别用方法 1、方法 2 来表示。

最终测试结果如图 3 所示。

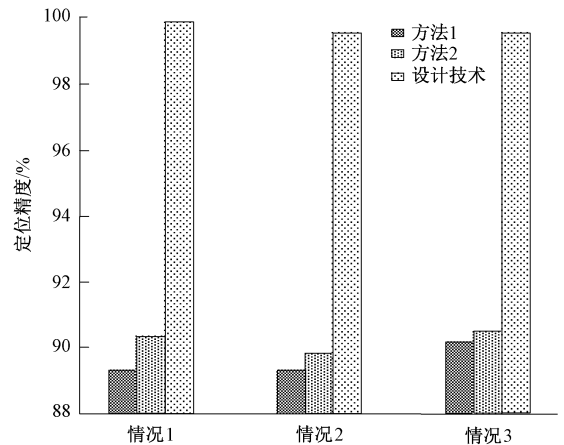


图 3 最终测试结果

Fig. 3 Final test results

根据图 3 测试结果, 设计技术对于平原地带火点 ( $10 \text{ m}^2$  以上的着火面积)、平原地带火点 ( $10 \text{ m}^2$  以下的着火面积)、低洼地带火点 ( $10 \text{ m}^2$  以上的着火面积) 三种情况的定位精度均高于 99.5%, 而方法 1、方法 2 对于三种情况的定位精度则均低于 91%, 说明设计技术在高浓度烟雾环境下能够准确识别  $10 \text{ m}^2$  以下的着火面积, 以及能够准确识别处于低洼地带的山火。

## 3 结论

针对目前输电线路山火监控技术存在的不足, 研究了组合惯导多数据融合下的山区输电线路高浓度烟雾环境火点精确定位技术。研究技术能够实现山火实时视频监控, 替代人工巡检, 大大提高巡检效率; 同时利用卫星遥感数据对山火进行大范围监测, 提高了山火监测效率。与其他巡检方式相比, 研究技术能够准确识别  $10 \text{ m}^2$  以下的着火面积, 以及准确识别处于低洼地带的山火。该技术还应用了激光测距方法, 具备测量山火与输电线路之间距离的功能, 使识别结果更加精准。此外, 该项目成果综合了组合惯导数据, 采用数据融合的方法获取山区输电线路综合火点信息, 也带来了更加精准的后续计算结果。综合来说, 该研究技术能够有效支撑山火扑救、财产损失预估等需求。

## 参考文献

- [ 1 ] 周孝法,张越港,方宇,等. 相似性度量与牛顿插值融合的架空输电线弧垂测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7):221-229.  
ZHOU X F, ZHANG Y H, FANG Y, et al. Sag measurement method of overhead transmission line based on similarity measurement and newton interpolation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7):221-229.
- [ 2 ] 刘兰兰,万旭东,汪志刚,等. 基于超分辨率重建与多尺度特征融合的输电线路缺陷检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(1):130-139.  
LIU L L, WAN X D, WANG ZH G, et al. Transmission line defect detection method based on super-resolution reconstruction and multi-scale feature fusion [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 37(1):130-139.
- [ 3 ] 司菁菁,刘鑫,王晓莉,等. 基于期望块对数似然的激光吸收光谱层析成像[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2):248-256.  
SI J J, LIU X, WANG X L, et al. Laser absorption spectral tomography based on expected block loglikelihood [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2):248-256.
- [ 4 ] 刘宇,胡上茂,刘刚,等. 基于 LoRa 和 GPRS 的山区输电线路监测信号无线传输方案[J]. 高压电器, 2023, 59(2):177-183.  
LIU Y, HU SH M, LIU G, et al. Wireless transmission scheme of mountain transmission line monitoring signal based on LoRa and GPRS[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2023, 59(2):177-183.
- [ 5 ] 匡福志,李霞,钟湘平,等. 山区配电线路塔位地形雷击风险分类[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(4):66-72.  
KUANG F ZH, LI X, ZHONG X P, et al. Lightning risk classification of distribution line towers in mountainous areas [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4):66-72.
- [ 6 ] 施保华,朱正基,刘伟. 基于输电线树障定位的改进欧氏聚类分割算法研究[J]. 广西大学学报:自然科学版, 2023, 48(5):1124-1133.  
SHI B H, ZHU ZH J, LIU W. Research on improved Euclidean clustering segmentation algorithm based on tree barrier location of transmission lines [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2023, 48(5):1124-1133.
- [ 7 ] 王冠宁,陈涛,米文忠,等. 基于凸壳理论的监控摄像头部分遮挡场景下火焰定位方法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2022, 62(2):277-284.  
WANG G N, CHEN T, MI W ZH, et al. Flame location method in partially obscured surveillance camera based on convex shell theory [J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2022, 62(2):277-284.
- [ 8 ] 黄琼,司颖,王浩宇,等. 基于红外图像的高温点定位跟踪算法研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(9):1276-1280.  
HUANG Q, SI Y, WANG H Y, et al. Research on hot point location and tracking algorithm based on infrared image[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(9):1276-1280.
- [ 9 ] 郑茂然,陈朝晖,余江,等. 基于 MSST 的高压直流线路故障定位方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(3):8-15,125.  
ZHENG M R, CHEN ZH H, YU J, et al. Fault location method of HVDC line based on MSST [J]. China Southern Power Grid Technology, 2022, 16(3):8-15,125.
- [ 10 ] 王尧,王世新,周艺,等. 基于 GF-4 PMI 数据的亮温差校正火点检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(11):3595-3601.  
WANG Y, WANG SH X, ZHOU Y, et al. Research on bright temperature difference correction fire point detection method based on GF-4 PMI data [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(11):3595-3601.
- [ 11 ] 陈洁,郑伟,刘诚,等. Himawari-8 静止气象卫星时序法火点探测[J]. 遥感学报, 2021, 25(10):2095-2102.  
CHEN J, ZHENG W, LIU CH, et al. Fire point detection by Himawari-8 geostationary meteorological satellite time series method [J]. Journal of Remote Sensing, 2021, 25(10):2095-2102.
- [ 12 ] 栗俊杰,毛鹏军,方骞,等. 基于 K210 的火点检测与喷头定向控制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35):15136-15143.  
LI J J, MAO P J, FANG Q, et al. Fire point detection and nozzle orientation control based on K210 [J]. Science and Technology and Engineering, 2021, 21(35):15136-15143.
- [ 13 ] 刘佩. 地面精确定位钻孔在矿井火灾抢险救灾中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(3):124-128.  
LIU P. Application of ground precise positioning drilling in mine fire rescue and disaster relief[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2023, 50(3):124-128.
- [ 14 ] 徐奔奔,王炜焯,陈良富,等. 基于 VIIRS 火点数据和 FARSITE 系统的森林火灾蔓延模拟[J]. 遥感学报,

- 2022, 26(8):1575-1588.
- XU B B, WANG W Y, CHEN L F, et al. Forest fire spread simulation based on VIIRS fire point data and FARSITE system[J]. Journal of Remote Sensing, 2022, 26(8):1575-1588.
- [15] 刘梦然,彭阳,屈善帮,等. 结合卡尔曼滤波的改进二次相关移动定位法[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(10):140-144.
- LIU M R, PENG Y, QU SH B, et al. Improved secondary correlation mobile positioning method combined with Kalman filter[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(10):140-144.
- [16] 曹子龙,童小华,许雄,等. 基于空地影像多层次匹配的火星巡视器定位与地面验证[J]. 测绘学报, 2023, 52(4):579-587.
- CAO Z L, TONG X H, XU X, et al. Mars rover positioning and ground verification based on multi-level matching of air-to-ground images[J]. Journal of Geodesy and Cartography, 2023, 52(4):579-587.
- [17] 张弛,黄益智,王长健,等. 基于光场成像的燃烧颗粒粒径与速度测量方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(4):949-956.
- ZHANG CH, HUANG Y ZH, WANG CH J, et al. Measurement method of combustion particle size and velocity based on optical field imaging[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(4):949-956.
- [18] 张旭彤,胡鹏,赵鑫,等. 火灾预警中基于 YOLO V5 的火源智能检测定位方法[J]. 微电子学与计算机, 2023, 40(3):67-74.
- ZHANG X T, HU P, ZHAO X, et al. Fire source intelligent detection and location method based on YOLO V5 in fire warning[J]. Microelectronics & Computer, 2023, 40(3):67-74.
- [19] 杨鹏,黄勇,李培佳,等. 同波束 VLBI 测量下的天问一号火星车定位及精度分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2023, 48(1):84-91.
- YANG P, HUANG Y, LI P J, et al. Location and accuracy analysis of Tianwan-1 rover with same beam VLBI measurement[J]. Journal of Wuhan University: Information Science Edition, 2023, 48(1):84-91.
- [20] 靳健,黄昕,许祺航. 基于 BP 神经网络的深埋地铁车站火灾火源定位方法研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1):322-331.
- JIN J, HUANG X, XU Q H. Research on fire source location method of deep-buried subway station fire based on BP neural network[J]. Modern Tunnel Technology, 2022, 59(S1):322-331.

### 作者简介



**祝永坤**(通信作者),正高级,现任输电处处长。工作期间累计发表专利、论文 20 余篇,获得国网公司科技成果奖 3 项,著有专业书籍 5 本,硕士毕业于东北电力大学。  
E-mail: bayeyongf7e@163.com

**Zhu Yongkun** (Corresponding author), a senior official, currently serves as the Director of the Transmission Department. During my work, he published more than 20 patents and papers, won 3 Science and Technology Achievement Awards from State Grid Corporation of China, authored 5 professional books, and received a M. Sc. degree from Northeast Electric Power University.



**尚鑫**,现为国网蒙东电科院输电专责主要研究方向为输电专业,工作期间累计发表专利论文 10 余篇,著有专业书籍 4 本,2016 年于合肥工业大学获得硕士学位。  
E-mail: bayeyongf7e@163.com

**Shang Xin**, currently responsible for power transmission at State Grid Inner Mongolia East Electric Power Research Institute, mainly focuses on the field of power transmission. During his work, he has published more than 10 patent papers and authored 4 professional books. In 2016, he received a M. Sc. degree from Hefei University of Technology.