

基于图像融合的输电线路覆冰重量估计研究

周子涵, 舒征宇, 雷明, 毛洪彬, 任冠臣, 李建斌

(三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 输电线路覆冰是电力系统运行中常见且危害性极大的气象灾害, 其附加荷载会导致导线弧垂增加、绝缘性能下降甚至杆塔损毁; 基于此, 对输电线路覆冰重量估计问题进行了研究; 针对无人机巡检图像因拍摄角度差异导致的几何畸变以及低能见度条件下图像质量下降的情况, 采用透视变换进行视角校正, 并利用改进小波变换融合可见光与红外图像, 以提升图像清晰度、对比度和细节表现; 结合 SURF 特征点检测、FLANN 匹配与加权平均策略, 实现了输电线路全景图像的无缝拼接; 在拼接图像中提取导线弧垂参数, 并结合抛物线力学模型与导线设计参数, 反演计算线路覆冰重量; 经实验测试, 该方法在多日实测数据中与拉力传感器测值的平均误差小于 6%, 在准确性、鲁棒性和计算效率方面均优于传统方法, 能够满足电力系统覆冰监测与防灾减灾的工程应用需求。

关键词: 覆冰重量; 透视变换; 小波变换; SURF 算法; 图像拼接

Research on Transmission Line Ice Weight Estimation Using Image Fusion

ZHOU Zihan, SHU Zhengyu, LEI Ming, MAO Hongbin, REN Guanchen, LI Jianbin

(College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: Transmission line icing is a extremely hazardous meteorological disaster in power operation systems, and its additional load results in conductor sag, reduces insulation performance, and may even cause tower damage. To address this issue, research on icing weight estimation of power transmission lines is conducted. To address the geometric distortion caused by differences in shooting angels and the degradation of image quality due to low visibility in UAV inspection images, a perspective transformation is applied for viewpoint correction, and an improved wavelet transform is used to fuse visible and infrared images, thus enhancing the clarity, contrast, and detail features of the images. The speed up robust features (SURF) feature detection, fast library for approximate nearest neighbors (FLANN) matching, and weighted average strategy are integrated to achieve seamless panoramic stitching of transmission line images. The sag parameters of conductors are extracted from the stitched images, and the icing weight is inversely calculated by combining the parabolic mechanical model with the design parameters of conductors. Experimental results show that by applying this method, the average error between multi-day measured data and tension sensor tests is less than 6%, and this method has the advantages over traditional methods in accuracy, robustness, and computational efficiency, meeting engineering requirements for icing monitoring and disaster prevention in power transmission systems.

Keywords: ice weight; perspective transformation; wavelet transform; SURF algorithm; Image stitching

0 引言

输电线路覆冰是电力系统常见且危害严重的气象灾害, 会导致导线弧垂增加、绝缘性能下降甚至杆塔损坏, 威胁电网安全稳定。目前研究主要集中在覆冰厚度计算和成像信息获取两个方面。在厚度计算方面, 深度学习被广泛应用, 文献 [1] 结合核主成分分析 (KPCA, kernel principal component analysis) 与灰狼优

化器 (GWO, grey wolf optimizer) 建立 KPCA-GWO 覆冰厚度计算模型, 提高了覆冰厚度计算精度与收敛速度。文献 [2] 基于机载 LiDAR 点云数据, 通过三维转换与投影模型比较覆冰前后边界宽度, 识别覆冰厚度。文献 [3] 应用瞪羚优化算法 (GOA, gazelle optimization algorithm) 优化反向传播神经网络 (BPNN, back propagation neural network), 先用相关分析和主成分分析降维主控因子, 再进行覆冰厚度预测。文献 [4] 利

收稿日期:2025-09-26; 修回日期:2025-10-31。

作者简介:周子涵(2000-),男,硕士研究生。

通讯作者:舒征宇(1983-),男,博士,副教授。

引用格式:周子涵,舒征宇,雷明,等. 基于图像融合的输电线路覆冰重量估计研究[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(3): 216-222.

用高分辨率高程数据识别不同微地形,分析各类微地形下的覆冰特性,并开展覆冰厚度模拟。总体来看,深度学习算法虽提高了精度,但对设备和模型构建要求较高,计算复杂。相比之下,传统图像处理结构简单,更适合单一目标检测^[5]。

在输电线路成像信息获取方面,雨雪、大雾等天气会引入噪声干扰,影响覆冰线路识别^[6]。因此,在特征提取之前必须进行图像预处理。已有研究提出了多种方法:文献[7]利用双峰柯西分布的逆累积分布函数生成长尾分布采样点,并结合柯西-高斯融合模块动态平衡平滑区域与边缘细节特征。文献[8]结合物理感知多尺度特征提取与改进Transformer实现局部特征与全局依赖融合。文献[9]基于DuIE数据集训练或评估的神经网络模型进行颜色校正、金字塔多尺度融合、特征恢复与增强、改进水下按通道先验去雾优化,再由YOLOv8-HD检测,提高了图像色彩与细节。文献[10]采用物理解耦网络分离估计大气光值与传输图,结合自适应特征提取模块(AFEM, adaptive feature extraction module)在特征空间近似大气散射模型特征对图像中的雾气进行去除。总体而言,这些方法融合了物理建模与深度学习,虽然提升了可解释性但计算复杂、参数依赖强。

综上,现有研究多聚焦精度提升和多源融合,但仍停留在单一技术层面,缺乏跨方法系统集成。针对此问题,本文提出了一种多技术融合驱动的输电线路覆冰重量估算方法。该方法在图像处理环节融合了透视变换以及红外-可见光图像的小波增强,有效解决了低能见度和几何畸变带来的特征点提取困难的问题;在图像拼接环节结合SURF特征点检测、FLANN匹配与加权平均融合,实现了全景线路图像的高精度无缝拼接;在物理建模环节则采用图像弧垂参数与抛物线力学模型耦合反演出覆冰重量。通过图像增强、特征拼接与力学建模的多技术协同,本文实现了从图像特征到荷载参数的跨层次映射,不仅提升了估算精度与鲁棒性,也为电力系统覆冰重量辨识提供了一种新的思路。

1 输电线路覆冰图像的拼接

1.1 图像透视变换

无人机在能见度较低的环境中巡检时,受到视野限制不能直接拍摄出一张清晰完整的输电线路图像,因此需要在不同位置来拍摄多张图像,进而通过拼接还原出一段完整的线路。由于拍摄位置和姿态的差异会导致图像视角不一致,影响后续特征匹配与拼接精度,故需要对不同位置拍摄的图像进行视角校正统一。透视变换可将不同视角的图像统一到相同坐标系,同时减少几何畸变,提高后续匹配的稳定性^[11]。为此,在进行后续操作之前,需要对图像进行透视变换,将其统一到相同或

相近的视角坐标系中,以减少几何失真对拼接的影响。

透视变换是一种保持直线特性的二维投影变换,其数学形式可表示为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ w' \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: (x, y) 和 (x', y') 分别为变换前后的像素坐标, \mathbf{H} 为 3×3 的单应性矩阵, w' 为齐次坐标尺度因子。变换前后的图像如图1所示,经过透视变换校正后,两幅图像在几何结构上具有更高的一致性,能够提升后续SURF特征匹配的精度与拼接的无缝性。

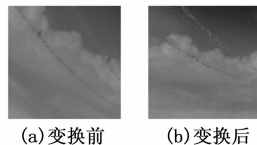


图1 图像透视变换

1.2 基于红外图像增强的拼接处理

1.2.1 基于改进小波变换的图像增强

由于线路的覆冰现象多伴随着雨雪、雾气等影响视野的气候条件,因此需要对所拍摄的图像进行增强处理,来突出检测目标主体(线路),同时保留背景细节来提升匹配精度。红外图像在目标主体检测上具有较强优势,但细节表达能力不足;可见光图像则细节丰富,但在低对比场景下目标易被背景干扰掩盖^[12]。为进一步发挥红外与可见光图像的互补特性,在常规小波融合框架中引入了自适应多尺度策略和方向敏感的高频增强机制,以提升融合图像的细节、对比度和结构完整性。

具体实现步骤如下。

1) 输入图像:获取在同一位置拍摄的红外图像和可见光图像,这些图像通常包含不同的细节信息。

2) 小波变换分解:对每一张输入图像进行小波变换,将图像分解为不同分辨率的子带(通常包括一个低频子带和多个高频子带)。其中高频子带包含图像的边缘、细节信息以及噪声,低频子带包含图像的整体轮廓信息和大尺度特征。

3) 融合规则设计:在低频子带融合中,传统方法通常采用固定权重,难以兼顾平滑区域与细节区域的差异。为此,引入基于局部对比度与结构相似度的自适应权重分配:首先对于每张待融合图像 $I_i(x, y)$ 在每个像素 (x, y) 处计算局部对比度 $C_i(x, y)$,其计算公式如式(2)所示:

$$\begin{cases} \mu_i(x, y) = \frac{1}{|W|} \sum_{(u, v) \in W} I_i(u, v) \\ C_i(x, y) = \frac{|I_i(x, y) - \mu_i(x, y)|}{\mu_i(x, y)} \end{cases} \quad (2)$$

其中: W 是以 (x, y) 为中心的局部窗口, $|W|$ 是窗

口中的像素数量, $\mu_i(x, y)$ 为局部平均值。

随后计算低频子带的自适应权重系数 $\omega_i(x, y)$, 并对其进行融合。计算公式如式 (3) 所示:

$$\begin{cases} \omega_i(x, y) = \frac{C_i(x, y) \cdot S_i(x, y)}{\sum_{k=1}^N C_k(x, y) \cdot S_k(x, y)} \\ A(x, y) = \sum_{i=1}^N \omega_i(x, y) \cdot A_i(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $C_i(x, y)$ 为局部对比度, $S_i(x, y)$ 为结构相似度, $A_i(x, y)$ 是第 i 张图像小波变换后的低频分量, $A(x, y)$ 是融合后的低频分量。

对于高频部分, 采用小波分解的高频子带天然分为水平、垂直和对角 3 个方向。为避免传统最大绝对值选择规则忽略方向性, 在高频融合中引入方向增强因子, 公式如下:

$$H_f(x, y) = \max(\alpha_d \cdot |H_i(x, y)|) \quad (4)$$

其中: d 表示方向 (水平、垂直、对角), α_d 根据局部梯度分布自适应确定: 若某一方向梯度能量较高, 则相应方向的 $\alpha_d > 1$, 用于加强覆冰特征明显方向的细节。若噪声主导, 则 $\alpha_d < 1$, 以抑制干扰。

在完成低频与高频子带的处理后, 将二者融合形成完整的子带集合。低频部分提供整体亮度和轮廓, 高频部分突出边缘与细节。公式如下:

$$F(x, y) = A(x, y) + H_f(x, y) \quad (5)$$

其中: $F(x, y)$ 表示融合后的结果, $A(x, y)$ 、 $H_f(x, y)$ 分别为处理后的低频与高频分量。图像融合效果如图 2 所示。



图 2 增强效果图

1.2.2 基于 SURF 算法的特征点检测与匹配

在输电线路巡检影像中, 由于无人机拍摄视野以及能见度的限制, 单张图像往往难以覆盖整档线路, 因此需要对多张图像进行拼接来还原导线全貌。为此, 本文引入基于 SURF 算法的特征提取与匹配结合加权融合策略, 对图像实现高精度拼接。具体步骤如下。

1) 特征点检测与描述: 构建积分图像并在多尺度空间中利用 Hessian 矩阵行列式进行极值点检测, 筛选稳定特征点。Hessian 矩阵的表达式如式 (6) 所示:

$$\mathbf{H}(x, y, \sigma) = \begin{pmatrix} L_{xx}(x, y, \sigma) & L_{xy}(x, y, \sigma) \\ L_{xy}(x, y, \sigma) & L_{yy}(x, y, \sigma) \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中: $L_{xx}(x, y, \sigma)$, $L_{xy}(x, y, \sigma)$, $L_{yy}(x, y, \sigma)$ 是图像在尺度 σ 下的二阶高斯导数。

SURF 算法的主要步骤如下: 首先构建积分图像, 使得任意矩形区域的像素之和可以在常数时间之内计算。其次使用积分图像加速计算 Hessian 矩阵的行列式, 并在尺度空间中应用非极大值抑制, 进一步筛选特征点。随后在每个特征点周围计算图像块的梯度方向直方图, 以确定特征点的主方向。最后在特征点周围划分成若干个子区域, 计算相关参数, 形成特征点的描述符。

2) 特征点匹配: 采用 FLANN 算法加速匹配, 以欧氏距离衡量特征相似度, 并应用比率检验剔除误匹配, 匹配阈值 η 经验取 0.4~0.5 以平衡匹配数与准确率^[13]。具体步骤如下:

首先将第一幅图像的特征点描述符作为查询集, 第二幅图像的特征点描述符作为训练集, 为后续匹配做准备, 其次对于查询集中每个描述符 $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 与训练集中每个描述符 $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 计算欧氏距离, 用于衡量两特征的相似度。如式 (7) 所示:

$$d(a, b) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \quad (7)$$

对于每个查询特征点, 保留与其距离最近的匹配点 (最近邻) 和次近的匹配点 (次近邻), 舍弃其余候选, 检验公式如式 (8) 所示:

$$\frac{d_1}{d_2} < \eta \quad (8)$$

其中: d_1 , d_2 分别表示最近邻距离和次近邻距离, η 为相似度阈值, 通常 $\eta \in (0, 1)$ 。 η 越大, 匹配点越多, 但会导致误匹配增加。图像增强前后特征点检测与匹配的结果如图 3 所示。

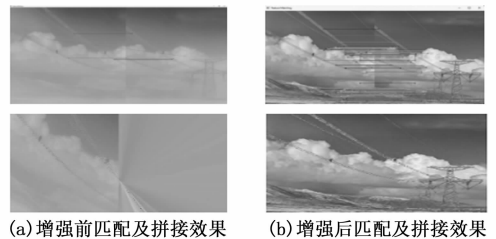


图 3 特征点检测与匹配结果

可以明显看出, 经过红外图像增强后再进行拼接, 能够提取出更多的特征点, 匹配的准确度也明显提升。而原始图像通过匹配的特征点很少, 并且仍然存在误匹配的情况, 导致无法生成完整的拼接图像。

1.2.3 加权平均融合算法

在完成基于 SURF 算法的图像特征匹配与几何配准后, 需要对重叠区域进行无缝融合, 以消除因亮度差异或几何误差导致的接缝突变。本文采用加权平均融合算法, 其处理步骤如下。

1) 确定重叠区域: 设经过配准后的两幅图像分别为 $I_A(x, y)$ 和 $I_B(x, y)$, 并且水平方向的重叠区间为 $[x_1,$

$x_2]$ 。

2) 计算权重系数: 对于重叠区域内像素 (x, y) , 分别计算图像 A 和图像 B 的权重, 如式 (9) 所示:

$$\begin{cases} W_A(x, y) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \\ W_B(x, y) = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = 1 - W_A(x, y) \end{cases} \quad (9)$$

其中: x_1, x_2 为重叠区的起止横坐标; $W_A(x, y)$ 、 $W_B(x, y)$ 为对应像素的归一化权重。

3) 像素融合: 融合后的像素值按照加权平均原则计算, 如式 (10) 所示:

$$I_f(x, y) = W_A(x, y) \cdot I_A(x, y) + W_B(x, y) \cdot I_B(x, y) \quad (10)$$

其中: I_f 表示拼接后的图像, 该公式保证了融合结果在重叠区域从图像 A 平滑过渡到图像 B, 从而消除接缝处的突变现象。该拼接策略将重叠区域以外的部分直接取自对应图像, 结合上述融合区域, 得到最终无缝拼接的全景图, 为后续导线弧垂测量与覆冰重量计算提供高质量的图像基础。

2 基于弧垂及综合荷载下的覆冰重量计算

在通过图像处理技术获得全档距输电线路的清晰图像后, 下一步的核心任务是利用图像信息精确测量导线弧垂, 并基于线路的力学模型反演出覆冰的等效重量。

2.1 基于 Hough 变换的弧垂提取

在获得完整拼接的输电线路全景图后, 准确提取导线的最大弧垂是计算覆冰重量的关键前提。为此, 采用基于 Hough 变换的直线检测方法, 结合二次曲线拟合实现弧垂像素值的自动提取。具体过程如下:

首先, 采用 Canny 边缘检测算法对图像进行边缘提取, 以获取图像中的边缘特征, 边缘提取的主要步骤如文献 [14] 所描述, 其核心是梯度幅值与方向的计算, 如式 (11) 所示:

$$\begin{cases} G = G_x^2 + G_y^2, \\ \alpha = \arctan\left(\frac{G_x}{G_y}\right) \end{cases} \quad (11)$$

其中: G_x, G_y 分别表示图像在 x, y 方向上的梯度, α 为梯度方向。

随后在所提取出的边缘图上应用霍夫变换, 检测出两端杆塔悬挂点连线, 作为导线的基线参考。霍夫变换通过参数空间表示直线:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (12)$$

其中: ρ 为直线到原点的距离, θ 为法向角度。基线的确定为后续导线像素提取提供了稳定的几何基准。

其次, 以基线为中心建立一定宽度的搜索带, 提取其中的导线像素点集 $\{(x_k, y_k)\}$, 并采用二次多项式进行拟合:

$$y(x) = ax^2 + bx + c \quad (13)$$

其中: a, b, c 为拟合系数, 以导线左端点为原点建立直角坐标系, x, y 为像素坐标。该拟合曲线能够有效平滑噪声并准确反映导线整体形态。通过对拟合曲线求导并令导数等于 0, 可得到导线最低点的横坐标 x_{\min} , 将横坐标带入式 (13) 可得到导线最低点的纵坐标 y_{\min} 。

最后根据两端悬挂点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 可确定基线方程, 并结合该方程最终计算出弧垂的像素大小:

$$\begin{cases} y_b(x) = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \\ H_M = |y_{\min} - y_b(x_{\min})| \end{cases} \quad (14)$$

其中: H_M 表示图像中导线最大弧垂的像素大小, y_{\min} 为拟合曲线最低点纵坐标, y_b 为基线在该位置的纵坐标。

由此可见, 通过基于 Hough 变换的导线提取与二次曲线拟合方法, 能够在图像坐标系下准确获得导线的最大弧垂像素值, 为后续的比例换算及覆冰荷载反演提供了可靠的几何基础。

2.2 弧垂计算及负重分析

在拼接后的全景图上, 选取具有已知实际高度 K 的参照物 (杆塔), 并测得其像素高度 H_i 与导线最大弧垂像素高度 H_M , 则最大弧垂的实际值如式 (15) 所示:

$$f_M = \frac{H_M}{H_i} \times K \quad (15)$$

悬挂于两座杆塔之间的输电导线, 在自重及覆冰等外部垂直荷载作用下, 其悬垂形态可近似为一条抛物线^[15]。导线单位长度所承受的总垂直荷载等于导线自重荷载与覆冰荷载之和。为了更精确地进行力学分析, 引入“比载” (单位截面积上的单位长度荷载) 的概念。总垂直比载 γ 可表示为:

$$\gamma = \gamma_g + \gamma_i \quad (16)$$

其中: γ 为计及覆冰的导线总垂直比载, 单位: $N/(m \cdot mm^2)$; γ_g 为导线的自重比载, 是导线固有参数; γ_i 为覆冰产生的附加冰重比载。

根据输电线路的抛物线模型理论^[16], 导线的最大弧垂 f_M 与总垂直比载 γ 、档距 l 以及导线跨中最低点的水平应力 σ_0 存在如下关系:

$$f_M = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0 \cos \beta} \quad (17)$$

其中: f_M 为导线的最大弧垂, 该值可通过对拼接图像进行像素比例换算得到。 l 为线路档距, 即两端悬挂点之间的水平距离。 σ_0 为导线最低点的水平应力 (N/mm^2)。 β 为两端悬挂点的高度差角, 可通过线路设计资料获取。

此公式构建了可测量的几何参数与线路综合荷载及力学状态之间的核心关系, 是后续进行覆冰重量估算的

重要基础。输电线路抛物线模型如图 4 所示。

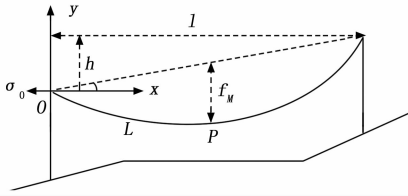


图 4 输电线路抛物线模型

2.3 基于弧垂的覆冰重量计算

根据式 (17) 建立的力学模型, 若能确定导线的最大弧垂 f_M 和当时的水平应力 σ_0 , 即可反算出线路的总垂直比载 γ 。将式 (17) 进行移项, 可得:

$$\gamma = \frac{8f_M\sigma_0\cos\beta}{l^2} \quad (17)$$

总垂直比载 γ 中包含了导线自重比载 γ_g 。导线自重比载是其固有物理属性, 可由线路设计参数表查得或通过公式 (19) 计算:

$$\gamma_g = \frac{M_0g}{LS} \quad (18)$$

其中: M_0 、 L 、 S 分别为导线单位长度质量、实际线长和横截面积。从总垂直比载中减去自重比载, 即可得到由覆冰产生的冰重比载 γ_i :

$$\gamma_i = \gamma - \gamma_g = \frac{8f_M\sigma_0\cos\beta}{l^2} - \gamma_g \quad (20)$$

冰重比载 γ_i 的定义为覆冰总重量除以导线线长与截面积的乘积, 因此, 整档导线的覆冰总质量 M_i 可以通过下式计算:

$$\begin{cases} \gamma_i = \frac{M_i g}{LS} \\ M_i = \frac{\gamma_i LS}{g} = \frac{LS}{g} \left(\frac{8f_M\sigma_0\cos\beta}{l^2} - \gamma_g \right) \end{cases} \quad (21)$$

其中: M_i 为覆冰总质量; S 为导线横截面积; g 为重力加速度, 通常取 9.8 m/s^2 。

以导线点为坐标原点, 间距方向为 X 轴, 垂向为 Y 轴建立直角坐标系, 根据几何关系可得导线方程及线长 L 为^[17]:

$$\begin{aligned} y &= qx^2 + jx \quad (21) \\ L &= \frac{1}{8} \end{aligned}$$

$$\left[\ln \frac{\sqrt{1+(2ql+j)^2} + (2ql+j)}{\sqrt{1+(2ql+j)^2} - (2ql+j)} - \ln \frac{\sqrt{1+j^2} + j}{\sqrt{1+j^2} - j} \right] + \frac{1}{4q} [(2ql+j)\sqrt{1+(2ql+j)^2} - j\sqrt{1+j^2}] \quad (22)$$

其中: $q=4f_M/l^2$, $j=(h-4f_M)/l$ 。将弧垂的计算结果带入式 (23) 即可求得导线的线长。

通过式 (21) ~ (23) 可以看出, 覆冰重量的精确计算依赖于三个关键输入: 现场测量的弧垂 f_M 、导线的设计参数 (l 、 β 、 S 、 γ_g 、 L) 以及一个关键的状态量

水平应力 σ_0 。而水平应力受温度影响较大, 因此需考虑导线温度对于水平应力的修正。

2.4 表面温度对线路的影响

2.4.1 导线温度对水平应力的影响

输电线路的材质为钢芯铝绞线, 当温度变化时, 在热膨胀效应下会发生轴向伸长或收缩^[18-19]。导线温度与水平应力的关系^[20]可由式 (24) 来表示:

$$\begin{cases} \sigma_0^2(\sigma_0 + a) = b \\ a = \frac{E\gamma_m^2 l^2}{24\sigma_m^2} \cos^2\beta - \sigma_m + \partial E(t - t_m) \cos\beta \\ b = \frac{E\gamma^2 l^2}{24} \cos\beta \end{cases} \quad (24)$$

其中: σ_m 、 γ_m 、 t_m 分别为导线在标况下的水平应力、比载及温度, t 为运行时的导线温度, E 为导线的弹性系数 (N/mm^2), ∂ 为导线温度伸长系数 ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)。

2.4.2 线路标况参数的计算

在导线未覆冰的标况下, 分别计算导线的表面温度 t_m , 最大弧垂 f_M' 作为标况参数, 再结合式 (23) 即可求得导线的标况线长 L_m , 再根据式 (19) 即可求得导线的标况比载, 最后结合式 (24) 对导线的应力进行修正, 最终由式 (21) 求出导线的覆冰重量。计算总体流程如图 5 所示。

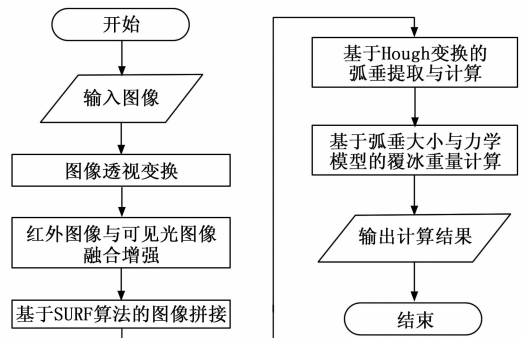


图 5 覆冰重量计算流程图

3 算例分析

为验证本文所提出基于图像融合的输电线路覆冰重量估计方法的有效性, 选取某南方地区 110 kV 输电线路作为研究对象。实验所采用的无人机搭载双光谱成像系统, 包括一台分辨率为 $1\,920 \times 1\,080$ 的可见光相机与一台分辨率为 640×480 的红外相机。图像采集覆盖典型的冬季雨雪场景, 涵盖多种气象条件与线路参数, 以保证实验数据中存在明显的覆冰情况, 具有一定的代表性。

3.1 图像融合与拼接效果分析

为了消除复杂气象条件以及视角对图像拼接效果的影响, 首先对图像进行校正并使用可见光图像与红外图像进行改进小波融合, 同时在图像拼接方面, 采用 SURF 特征点提取与匹配, 结合加权平均融合策略对图像进行拼接处理, 并结合图像以及相关参数与常规方法

进行对比, 其中峰值信噪比 (PSNR, peak signal-to-noise ratio) 主要基于均方误差来度量图像的失真程度, 数值越大表示图像质量越好。结构相似性指数 (SSIM, structural similarity index measure) 则是模拟人眼视觉系统, 从亮度、对比度、结构 3 个方面综合评价两幅图像的相似度, 越接近 1 则表示相似度越高。信息熵 (Entropy) 用来衡量图像中灰度分布的复杂性和信息量, 熵值越高, 说明图像细节越丰富。本文经视角矫正及图像增强后的拼接效果与传统拼接算法的对比结果如图 6 所示, 相关参数的对比如表 1 所示。



图 6 图像处理前后拼接效果图

表 1 不同算法图像拼接对比

算法	匹配正确率/%	接缝平滑性	几何一致性	PSNR /dB	SSIM	信息熵
SIFT 算法	91.2	3.8	2.7	28.6	0.872	6.89
ORB 算法	87.5	3.5	3.1	30.1	0.894	7.12
本文算法	94.7	4.6	1.9	32.4	0.957	7.65

综合多项指标的实验结果如表 1 所示, 可以看出本文方法在匹配正确率、接缝平滑性和几何一致性方面均表现突出, 同时在 PSNR、SSIM 和信息熵等客观质量指标上也明显优于传统算法, 表明其在图像清晰度与色彩一致性保持方面具有更好的性能。而原始图像由于特征点匹配数目过少, 拼接后存在明显的畸变。本文方法在典型样例中的匹配正确率达到 94.7%, 优于传统 SIFT (91.2%) 与 ORB (87.5%) 算法。

同时为验证所提算法在工程应用中的实时性, 本文进一步对计算效率进行了评估与对比。实验在不同硬件平台 (Intel i7-14700H/16GB RAM 与 Jetson Xavier NX 嵌入式平台) 上运行, 并与传统 SIFT 及 ORB 算法的平均处理时间进行比较。结果如表 2 所示。

表 2 处理时间对比

算法	平均拼接时间 (PC/s)	平均拼接时间 (嵌入式/s)	CPU 占用 /%	内存占用 /MB
SIFT 算法	1.28	1.02	63	620
ORB 算法	2.68	2.15	71	740
本文算法	1.54	1.37	65	680

从结果可见, 本文算法在保证拼接精度的同时, 整体运行时间较 SIFT 算法缩短约 28%, 相比 ORB 算法

略有增加, 但拼接质量显著提升。尤其在嵌入式平台上, 平均单幅拼接耗时约 1.37 s, 能够满足现场无人机巡检的实时性需求, 表明所提方法具有良好的工程适用性与计算效率。

3.2 弧垂提取与覆冰重量估算

在完成图像拼接后, 通过像素比例换算得到导线的最大弧垂。以其中某一天典型档距的测量结果为例, 覆冰后的最大弧垂增大至 4.87 m。根据第二章建立的抛物线力学模型, 结合导线自重比载与截面积参数, 计算得到整档导线的覆冰重量, 结果约为 15.8 kg/档。

实验中, 采用拉力传感器实时记录导线轴向张力变化, 结合导线设计参数可得到导线的实际垂向荷载, 以此作为冰重参考值。同时, 在相同时间段内采集图像并进行覆冰重量估算, 将计算结果与传感器反演出的冰重进行时间同步与数值对比, 保证两者具有一致的气象条件与荷载状态。为检验计算精度, 选取 10 档导线进行多日测量, 每 2 小时巡航拍摄一次, 并同步与安装拉力传感器的测量结果对比。结果显示各档导线估算值与传感器测值的最大误差不超过 6%, 证明该方法能够在误差允许的范围内反映覆冰工况下导线的荷载变化特性。10 档导线的测量结果如图 7 所示, 以第一档线路为例, 其 10 天内同一时间段的详细测量结果如表 3 所示。

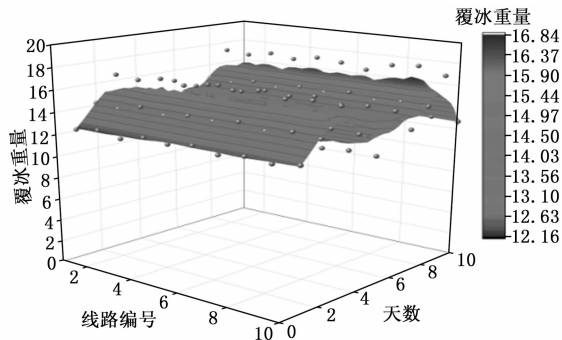


图 7 线路覆冰重量计算结果

表 3 单档线路覆冰重量计算结果

天数	气候	实测弧垂 /m	估计弧垂 /m	弧垂误差 /%	覆冰重量估计值/(kg/档)	拉力传感器测量值/(kg/档)	重量误差 /%
D1	小雪/-2℃	3.21	3.25	+1.25	12.1	11.8	+2.54
D2	阴/0℃	3.87	3.92	+1.29	14.2	13.5	+5.19
D3	大雪/-4℃	4.75	4.87	+2.52	16.5	15.8	+4.43
D4	雾/1℃	3.72	3.65	-1.88	13.3	13.8	-3.76
D5	晴/3℃	3.15	3.26	+3.49	11.1	11.5	-3.60
D6	雨夹雪/-1℃	3.66	3.78	+3.28	15.0	14.5	+3.45
D7	大雾/-2℃	3.59	3.55	-1.11	13.0	12.6	+3.17
D8	阴/0℃	3.92	3.81	-2.80	14.9	15.5	-4.03
D9	大雪/-5℃	5.11	5.02	-1.76	17.2	16.6	+3.61
D10	晴/-4℃	3.35	3.28	-2.09	12.6	12.1	+4.13

从表 3 和图 7 可见, 本文方法在多档导线的覆冰重量估算中总体误差控制在 6% 以内, 但个别档距仍存在偏差。其主要原因包括: 图像拼接误差, 即低能见度或复杂背景下, 红外与可见光配准精度下降, 导致弧垂像素测量偏差; 力学模型简化, 即抛物线模型未充分考虑覆冰不均匀性及风荷载影响, 易引起局部误差。综上所述, 本文方法虽已具备较高的精度与鲁棒性, 但仍需通过模型细化与数据融合优化, 进一步降低极端气象条件下的估算误差。针对上述问题, 后续研究考虑引入亚像素级弧垂检测与改进的动态荷载模型, 以提升估算精度与模型适应性。

4 结束语

本文针对复杂气象条件下输电线路覆冰状态难以准确监测的问题, 提出了一种基于图像融合与拼接的覆冰重量估计方法。通过透视变换实现多视角图像的几何校正, 利用改进小波变换融合红外与可见光图像以增强细节与对比度, 并结合 SURF 特征点检测、FLANN 匹配与加权平均融合实现高精度无缝拼接, 从而获得完整的线路全景图像。在此基础上, 提取导线弧垂参数并结合抛物线力学模型与导线设计参数, 建立了弧垂与覆冰重量的定量关系。实验结果表明, 该方法在保证计算精度的同时兼顾了鲁棒性与实时性, 估算误差控制在 6% 以内, 能够有效反映覆冰荷载特性, 为电力系统的防冰减灾与安全运行提供了新的技术思路与参考。未来研究将进一步引入多模态时序数据和更完善的应力修正模型, 以提升估算的稳定性和广域适用性。

参考文献:

- [1] LIU Y, LI Q, LIU J, et al. Research on an icing-thickness calculation model for power transmission lines based on KPCA and GWO [J]. *Electric Power Systems Research*, 2025, 248111877 - 111877.
- [2] 王红霞, 杨洋, 李孟, 等. 基于激光点云的输电线路铁塔覆冰厚度识别 [J]. *激光与红外*, 2025, 55 (3): 336 - 342.
- [3] 苏仁斌, 熊卫红, 刘先珊, 等. 基于新型元启发式反向传播神经网络的 500 kV 输电线路覆冰厚度预测 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 2025, 61 (1): 17 - 25, 34.
- [4] HUANG G, WU M, QIAO Z, et al. Characteristics and simulation of icing thickness of overhead transmission lines across various micro-terrains [J]. *Energies*, 2024, 17 (16): 4024 - 4024.
- [5] 肖雨晴, 罗亮, 于博向, 等. 面向海域环境感知的视觉处理方法研究综述 [J]. *计算机工程与应用*, 2024, 60 (23): 62 - 78.
- [6] 贺晓倩, 吴先用, 魏业文. 复杂背景中输电线路不均匀覆冰厚度测量方法 [J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38 (3): 224 - 229.
- [7] JI L, CHEN C. Multi-Scale image defogging network based on cauchy inverse cumulative function hybrid distribution deformation convolution [J]. *Sensors*, 2025, 25 (16): 5088 - 5088.
- [8] SHAO X, LI S, SHEN Y, et al. GLPF-Net: global and Local-Physics-aware fusion network for single image dehazing [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2025, (pre-publish): 1 - 22.
- [9] 曹莉凌, 胡浩宇, 曹守启. DUIE-YOLO: 一种基于图像增强的水下鱿鱼目标检测算法 [J]. *上海海洋大学学报*, 2026, 35 (1): 254 - 269.
- [10] 闫在爽, 贺鹏. 基于物理解耦与自适应特征提取的无监督图像去雾 [J]. *现代电子技术*, 2025, 48 (17): 77 - 84.
- [11] 张纾豪, 何坤金, 徐佳晨, 等. 融合透视校正与轻量注意力机制的轮毂缺陷检测方法 [J/OL]. *计算机应用*, 1 - 10. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=iwDheDcO5w4wy5BL7FU8j4hXIVtfwXKlJBDjusrws3mzBe4sceTgnzUI8Ac7L2ooz2yIpNRUNEJaoBJ9Y004mIPG4_v5ceuoDD-VV84uvHHaEwQF9T5E4XC91WjuQ90WXeqQLLmJsP4MAPXGQVWVbl2sjiTKGYp4-gSWehsqA8HPoxZP5--bwA = &uniplatform = NZKPT&language = CHS
- [12] 胡雪凯, 罗蓬, 李铁成, 等. 基于自适应加权的多尺度图像融合研究 [J]. *红外技术*, 2022, 44 (4): 404 - 409.
- [13] 张洋, 舒征宇, 陈琳, 等. 基于图像拼接的线路覆冰质量估算研究 [J]. *中国测试*, 2023, 49 (5): 108 - 116.
- [14] 姚景岩, 杨世勇, 舒征宇, 等. 基于航拍的输电线路覆冰厚度监测研究 [J]. *高压电器*, 2021, 57 (8): 105 - 114.
- [15] 陈庆昊, 马海鹏, 王璋奇. 二节点抛物线模型在采空区线路状态仿真分析中的应用 [J]. *华北电力大学学报 (自然科学版)*, 2025, 52 (4): 108 - 115, 124.
- [16] 姚陈果, 张磊, 李成祥, 等. 基于力学分析和弧垂测量的导线覆冰厚度测量方法 [J]. *高电压技术*, 2013, 39 (5): 1204 - 1209.
- [17] YIPING L, CUNGEN G, DEFA W, et al. Predictive model for sag and load on overhead transmission lines based on local deformation of transmission lines [J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 214 (PA): 1 - 9.
- [18] 陈敬友, 高兵, 杨帆, 等. 气体绝缘输电线路温升数值计算及绝缘气体换热能力 [J]. *高电压技术*, 2020, 46 (11): 4042 - 4051.
- [19] 操龙飞. 金属材料的热膨胀特性研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.
- [20] 刘杰. 基于弧垂的输电线路等值覆冰厚度监测方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.