

# 红外架空导线图像的分割与检测方法

黎 新<sup>1</sup>, 曾祥进<sup>1,2</sup>, 洪 俐<sup>1</sup>, 冯 嵩<sup>1</sup>

(1. 武汉工程大学 计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 430205; 2. 湖北三峡实验室, 湖北 宜昌 445804)

**摘要:** 针对架空高压电线巡检难度高、检测效率低等问题, 提出了一种架空高压导线分割与检测的方法。该方法利用直方图双峰法、感兴趣区域提取、滤波器与图像差分相结合的导线优化方法来剔除掉图像中云层、杆塔、地面等干扰项。通过优化了投票与筛选机制的改进的霍夫直线检测算法提取导线, 最后通过绝缘子与导线间的拓扑关系截取需要的导线部分。实验结果表明: 本文算法检测性能良好, 平均交并比为 94.4%, 导线检测正确率 92.8%。满足实际工业生产要求。

**关键词:** 图像分割; 导线分割; 霍夫直线检测; 投票优化

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)12-1390-09

## Wire Segmentation and Detection Method for Infrared Overhead Wire Images

LI Xin<sup>1</sup>, ZENG Xiangjin<sup>1,2</sup>, HONG LI<sup>1</sup>, FENG Song<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;  
2. Hubei Three Gorges Laboratory, Yichang 445804, China)

**Abstract:** In this study, a method for overhead high-voltage wire segmentation and inspection is proposed to address the difficulty and low efficiency of overhead high-voltage cable inspection. This method utilizes the histogram bimodal method, region of interest extraction, and a wire optimization method that combines filters and image differentiation to extract and eliminate interference items, such as clouds, towers, and the ground in the image. The improved Hough line detection algorithm, which optimizes the voting and screening mechanisms, extracts the wires, and finally intercepts the required part of the wires through the topological relationship between the insulators and wires. The experimental results show that the proposed algorithm has ideal detection performance, with an average intersection-to-parallel ratio of 94.4% and a wire detection accuracy of 92.8%, meeting actual industrial production requirements.

**Key words:** image segmentation, wire segmentation, Hough line detection, voting optimization

## 0 引言

电网导线定位的发展历程可以追溯到 20 世纪 50 年代, 当时电网导线定位的主要方法是采用热成像技术, 以及电磁波技术。巡检方式主要通过人工巡检<sup>[1-2]</sup>。目前国内的研究人员将研究的方向已由最初的人工巡检转移到无人机巡检技术上。无人机技术的发展为电网导线定位提供了新的可能性, 可以改善传统的人工巡检方式, 提高巡检效率, 减少成本, 提高出勤率, 为现代化智能电网的发展提供了支持<sup>[3-4]</sup>。国内对基于无人机智能巡线技术的研究虽然起步较晚, 但发展速度较快, 发展前景良好<sup>[5-7]</sup>。

基于传统方法的导线识别研究已初见成效, 包括设计特殊滤波器、使用边缘检测算法后采取 Hough 变换、直线分割器 (line segment detector, LSD) 等方法<sup>[8]</sup>。赵文博等人<sup>[9]</sup>采用了多尺度 LSD 确定电力线候选区域, 并利用基于对象的马尔可夫随机场在候选区域确定导线, 但对于灰度较弱的导线检测效果不好。危双丰等人<sup>[10]</sup>采用了 Canny 算子与 Hough 直线检测将输电线提取出来, 通过对输电线周围进行卷积运算来提取导线上的异物和部件, 但受制于图像边界与导线的交点, 在交点附近干扰较多的情况下, 检测效果较差。赵乐等人<sup>[11]</sup>使用 LSD 算法创建了一个包含电力线段和大量其他线段的线段候选池, 并利

收稿日期: 2023-07-21; 修订日期: 2023-09-04。

作者简介: 黎新 (1998-), 男, 硕士, 主要研究方向为机器视觉。E-mail: lxwork0347@qq.com。

通信作者: 曾祥进 (1977-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为智能机器人控制、机器视觉、嵌入式系统设计、运动控制等。E-mail: xjzeng21@163.com

基金项目: 湖北省湖北三峡实验室创新基金 (SC215001)。

用基于对象的异性加权惩罚随机场区分电力线段和其他线段，但航拍影像背景过于复杂，导致提取时干扰物过多。张从新等人<sup>[12]</sup>提出一种复杂地物背景下电力线快速提取的新方法，可快速、完整地提取出复杂地物背景下的电力线。但利用最大类间方差法(Otsu)不易分割导线与绝缘子、杆塔，导致最终检测容易出现误检。Baker 等人<sup>[13]</sup>在人为设定初值的情况下，使用抛物线的 Hough 变换跟踪图像中的电线，但精度较低。

此外，在深度学习领域中，李昭慧<sup>[14]</sup>使用改进的 Deeplabv3+ 中加入图像金字塔，提高导线的分割准确度。但不能对导线进行区分。胡广亮等人<sup>[15]</sup>设计了一种基于全卷积网络的输电线识别与分割算法。该算法在利用深度卷积网络自适应提取图像深层次特征的基础上，通过将全卷积网络生成的原型掩模与全连接网络生成的掩模系数进行线性组合得到最终的分割图像。刘嘉玮等人<sup>[16]</sup>使用全卷积神经网络 U-Net 在像素级检测对导线是否存在做出了精确的判断，但在复杂背景下检测效果不佳。Madaan 等人<sup>[17]</sup>使用图形学技术制造仿真图像提升数据量，先使 POV-Ray (persistence of vision raytracer) 技术渲染大量仿真图像，再采用神经网络架构搜索寻找比较好的检测框架，但实际识别效果没有达到较高水平，同时由于这类算法只输出一个分类结果。与传统图像处理方法相比，深度学习方法有较高的检测速度与鲁棒性，但是也存在一些缺陷。首先是深度学习方法需要大量的数据集，但目前做了像素级标记的公开输电线路数据集较少。其次神经网络中的特征提取模块会造成特征信息的丢失，不利于所占像素比例小、宽度小的导线的图像分割。

基于各种方法的优缺点考虑，采用以往的方法难以取得兼顾稳定、精度的效果。本文在获取导线红外图像的基础上，结合图像处理相关算法，实现了一套导线自动分割与检测算法，能精确定位导线坐标。该算法在图像预处理的过程中结合了图像差分与滤波器来优化导线，在导线定位的过程使用了改进的霍夫直线检测算法检测导线，并利用绝缘子与导线间的拓扑关系筛选与截取导线。

## 1 算法总体设计结构

本文架空高压导线红外图像主要由无人机航拍得到，主要包含导线和地线两种类型的红外图像。本文主要描述了导线类图像的检测过程，地线类图像检测过程与导线类检测过程类似。算法流程为：

对采集到的红外图像通道分离；

通过直方图双峰法获取到合适的分割阈值，并通过该分割阈值乘以不同的系数来获取不同灰度强度的二值图像；

提取图像的兴趣区域（region of interest, ROI）区域，以及利用不同强度的灰度图像差分来优化导线；

通过最大联通域获取绝缘子位置；

通过绝缘子与导线间的拓扑关系以及改进的霍夫直线检测算法检测导线。

图 1 为原始导线红外图像，其中绝缘子、杆塔、导线已在图中标注。图 2 为本文算法流程图。

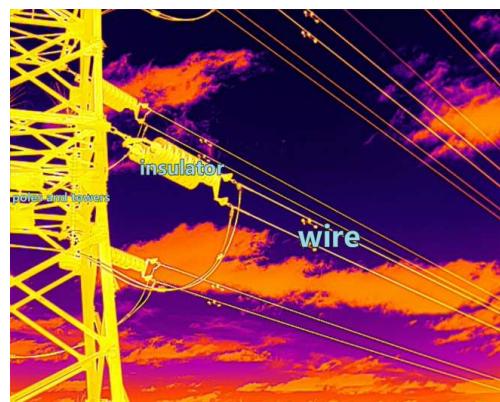


图 1 导线红外图像

Fig.1 Wire infrared image

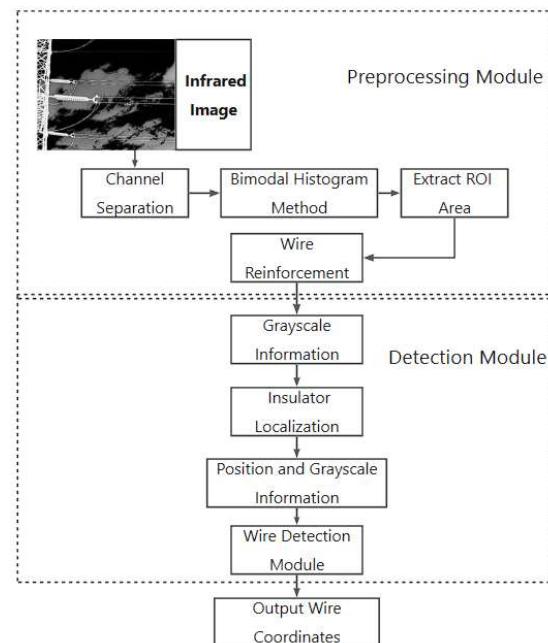


图 2 本文算法流程

Fig.2 Algorithm process

## 2 图像预处理

本文算法需要定位导线具体坐标，要求达到像素级精度。在电网实际检修过程中，需要根据温度判断电线是否存在温度异常，所以往往采用红外相机进行

拍摄任务。电线红外航拍图像由不同的拍摄人员,乃至不同的无人机型号所拍摄,因此图像中绝缘子、电线的位置、大小往往差异较大。为了方便后续对电线进行统一处理,同时也为了避免背景的干扰,在进行导线定位前需要优化图像来凸显导线。原始的红外图像中导线与背景的差异较小,但通过对比图像RGB三通道,发现G通道下,导线与背景的对比度较高,适合作为待处理的灰度图。图3为通道分离图。

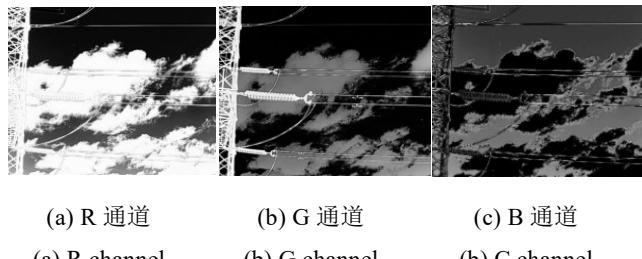


图3 通道分离图

Fig.3 Channel separation image

## 2.1 直方图双峰法

直方图双峰法获取自适应灰度阈值旨在削弱因不同光照、不同天气等条件下使用固定阈值时,云朵与导线难以分割的问题,增强算法的鲁棒性。本文直方图双峰法通过统计图像中不同灰度级数下像素点的数量。根据灰度值的不同,在直方图中出现3个波峰:①天空背景,②云朵,③导线、绝缘子和杆塔等主体。为了方便后续波谷最低点的计算,采用一维的高斯滤波核平滑曲线。最后通过云朵与待检测主体之间的波谷确定图像中待检测主体与背景之间灰度分割阈值。在后续的处理步骤中,经实验发现,可以通过该灰度阈值乘以不同的系数( $0.7 < \delta \leq 1$ )得到不同强度的灰度图,其中提取ROI区域需要保留更多图像信息,可以设定较大的系数( $\delta=1$ )。

直方图双峰法处理结果如图4所示。图(a)为G通道灰度图;图(b)为灰度阈值( $\delta=1$ )处理结果图;图(c)为灰度阈值( $\delta=0.8$ )处理结果图;图(d)为不同灰度级数下像素点数量的直方图平滑后的结果。

## 2.2 提取导线的ROI区域

为确保后续提取到的最大连通域是绝缘子,本文需要在预处理中裁剪掉杆塔、地面等部分,提取导线的ROI区域。由于需要裁剪的部分往往是处于水平或竖直状态,仅需提取矩形框就可以完成目标,所以本文分别在水平和竖直方向上做投影并依据投影得到的像素点的数量是否出现明显落差来提取导线区域。处理结果如图5所示,图5为ROI区域提取图,其中绿色框为本文提取的ROI区域。

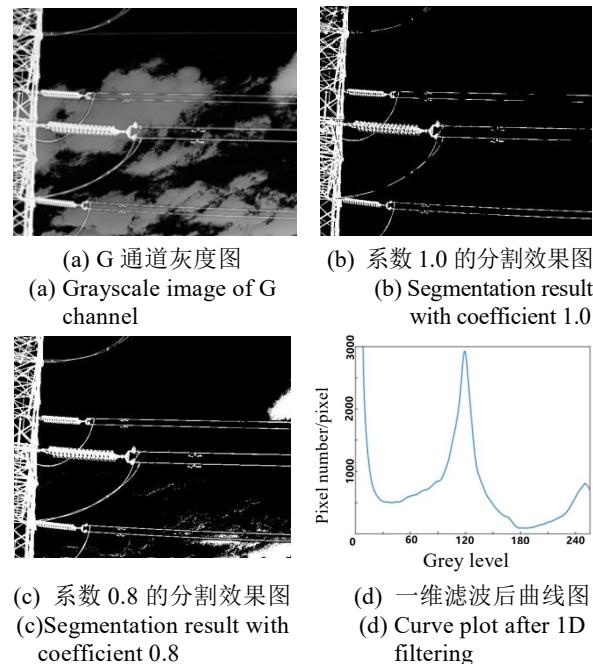


图4 直方图双峰法

Fig.4 Bimodal histogram method



图5 提取导线的ROI区域

Fig.5 Extract ROI of wire

## 2.3 滤波器与图像差分相结合的导线优化方法

在航拍的图像中导线相较于杆塔、绝缘子灰度级数差异明显,在灰度直方图中会形成明显的双峰,直接利用直方图双峰法获取到自适应灰度阈值做分割时,可能会由于导线灰度较低而被划分为背景部分或出现导线“断裂”的情况,影响后续导线分割。

本小节主要针对上述问题对导线图像做出优化,提出了一种基于滤波器与图像差分相结合的导线优化方法,以下简称滤波差分算法。在优化方法的选择上,一般采用传统的边缘检测算法提取掩膜区域对导线进行增强,主要有Sobel和Canny等。这些边缘检测算法根据图像中的灰度级数与相邻区域之间灰度级数的变化采用差分近似的数学方法进行边缘检测,但导线“断裂”的情况往往是由于导线上某点温度较低,具有偶然性,会被识别为边缘。同样的,当云层与导线颜色相近时,会与导线检测到同一轮廓中,影

响识别结果。

基于以上考虑,本文根据导线图像特点,参考高斯滤波核,使用了一种水平方向边缘检测的滤波核,该滤波核能对导线部分有一定的强化作用,但同时也会增强噪声,但配合本文所使用的图像差分方法能在强化导线的同时剔除噪声。从导线图像可以分析出,导线往往为水平方向,具有一定的倾斜度。导线宽度一般为2~3个像素。越处于导线中间,灰度值越高。针对以上特点,使用的模板为:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

该模板大小为 $5\times 5$ ,将该模板与直方图双峰法的分割效果图( $\delta=0.8$ )图像进行滤波运算,提取图像的水平梯度,提高直线与背景的对比度。取分割效果图( $\delta=0.8$ )与( $\delta=1$ )异或的结果图像与滤波运算结果图异或,最后再通过中值滤波对处理结果去噪。处理流程图如图6所示。

为了求证本小节算法的可行性,将本小节算法和Sobel、Canny检测算法进行对比,其中Sobel算子大

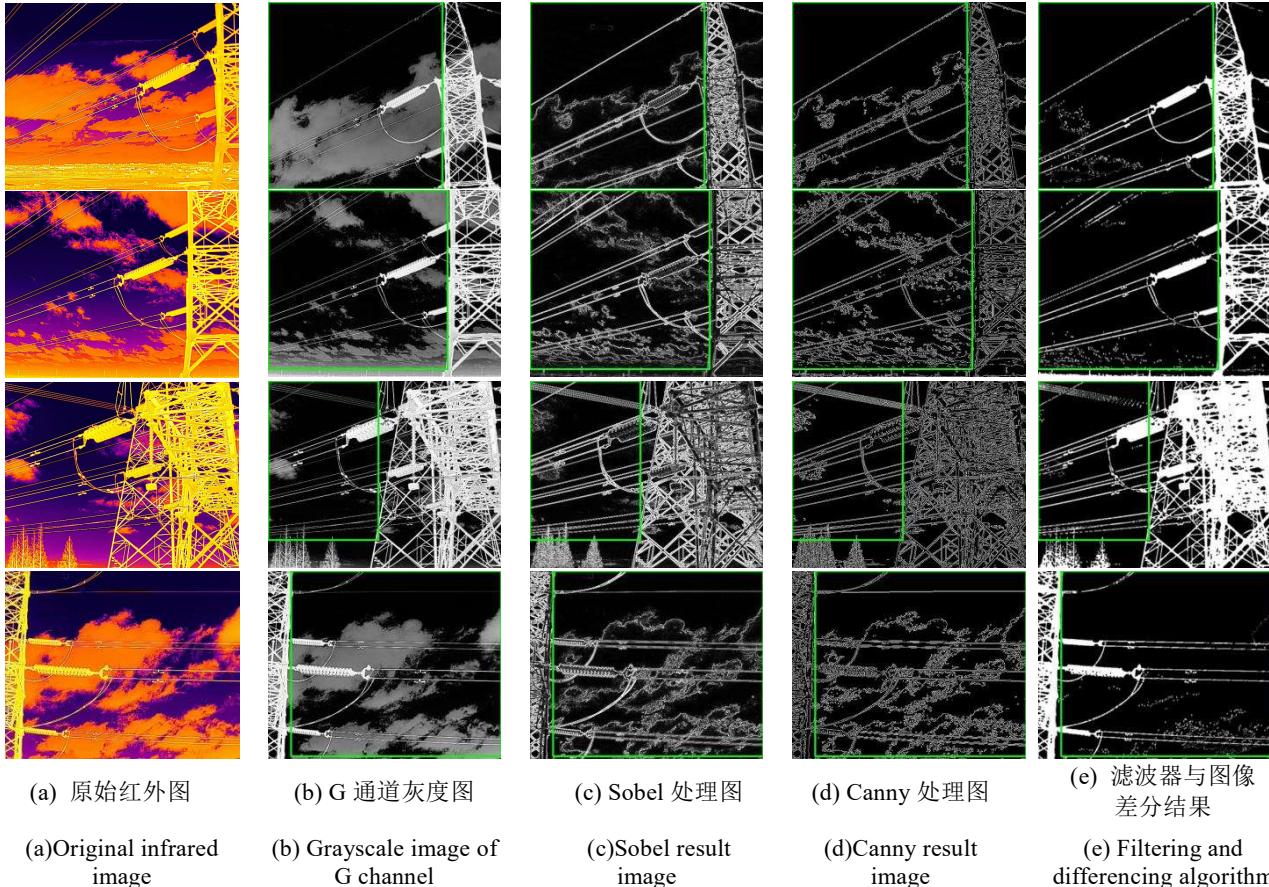


图7 导线强化图

Fig.7 Reinforced wire images

小为3,边界为4邻域,Canny算子大小为3,灰度阈值为100与150。处理结果如图7所示,绿色方框为ROI区域,其中图(a)为原始图像;图(b)为G通道灰度图;图(c)为Sobel边缘处理结果;图(d)为Canny边缘处理结果;图(e)为本小节处理结果。

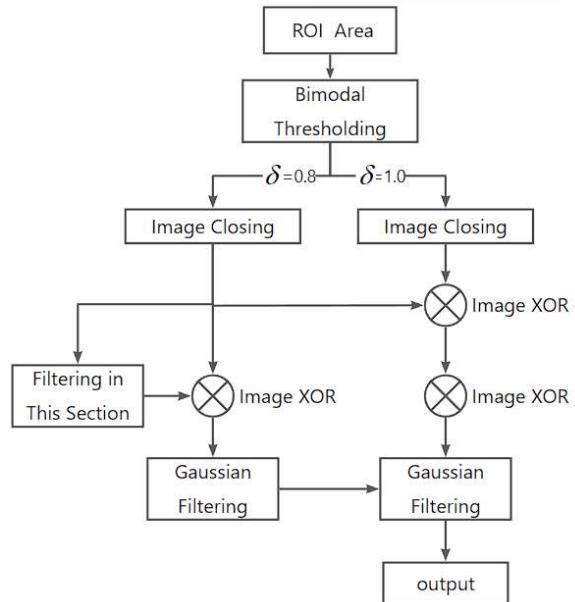


图6 滤波差分算法  
Fig.6 Filtering and differencing algorithm

从图中可以看出 Canny、Sobel 检测算法对导线能较为完整的提取边缘,但对于导线的强化效果强差人意,虽然提取了导线的边缘信息,但图像中干扰较多。而本小节滤波差分算法效果最好,对于灰度较弱而“断开”的导线会适当的连接起来,并剔除了云朵的干扰。

### 3 基于改进霍夫直线的导线检测方法

#### 3.1 最大连通域获取绝缘子

在实际应用场景中,拍摄所得到的导线图像中绝缘子越大越代表该绝缘子离拍摄镜头近,也代表红外图像所得到的温度场数据更准确。由于绝缘子和导线在空间上具有强关联的拓扑关系,所以根据绝缘子轮廓的大小,可以判断出与绝缘子相连的温度最准确的导线。

本文使用的基于最大连通域的绝缘子检测方法,是对图像预处理后的导线优化图像进行腐蚀运算,并通过最大连通域获取绝缘子。实现流程为:

①从二值图像中寻找第1个像素值为255的点,作为算法的起始点。

②统计其周围3个像素范围内255像素点的数量,若数量较少,说明该点不在绝缘子内部,将该点灰度设为0。

③寻找下一个像素值为255的点,重复步骤②和③,得到腐蚀后的图像。

④通过筛选轮廓,以连通域最大为检测到的绝缘子,并得到其外接矩形,为导线定位做准备。

#### 3.2 改进的霍夫直线检测方法定位导线

##### 3.2.1 霍夫直线原理

霍夫变换运用两个坐标空间之间的变换,在笛卡尔坐标系中的直线通过极坐标变换映射到参数坐标空间中,从而把检测任意形状的问题转化为统计参数坐标空间中的交点问题。在笛卡尔坐标系中,一条直线可以表示为:

$$y = kx + b \quad (2)$$

式中:  $k$  和  $b$  是参数,表示直线的斜率和截距。进行参变分离将方程改写为:

$$b = -kx + y \quad (3)$$

但在实际应用中,点斜式存在斜率无穷大的情况,所以一般选择直线的极坐标方程:

$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta \quad (4)$$

或:

$$y = \left( -\frac{\cos\theta}{\sin\theta} \right)x + \frac{\rho}{\sin\theta} \quad (5)$$

式中:  $\rho$  是极径;  $\theta$  是弧度。由此可以发现笛卡尔坐标

系下,每一个点都可以在极坐标下找到对应的一条曲线,其中当多条曲线交于一点时,此时  $\rho$  与  $\theta$  为定值,结合公式(5)说明此时极坐标下的交点是对应笛卡尔坐标系下直线。当笛卡尔坐标系下多点共线时,总能在极坐标系下找到与之对应的  $\rho$  与  $\theta$ 。此时找直线的问题可以转化为求极坐标系下的交点问题。

##### 3.2.2 本文改进的霍夫直线检测方法

在霍夫直线检测方法的投票模块中,霍夫直线变换通过将处理后的二值图上的每个点通过公式(4)变换为极坐标下的一条曲线,并通过一个宽为360,高为极径的矩阵存储,其中高亮区域代表投票次数多。如图8所示,其中横坐标代表角度,纵坐标代表极径。

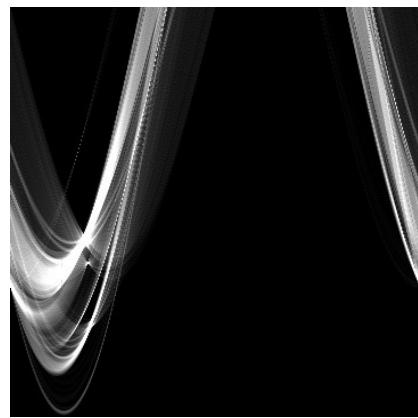


图8 矩阵存储的投票结果

Fig.8 Voting results stored in a matrix

随后通过设定一个固定的阈值,对于高于该阈值的所有点通过公式(5),由极坐标变换回笛卡尔坐标得到一条直线,即为检测结果。但由于霍夫直线检测算法投票机制的局限性以及噪声干扰,经实验发现主要存在如下问题:

1) 导线检测精度不高,往往会在导线附近会检测出多条直线,且角度各有不同,如图9所示。

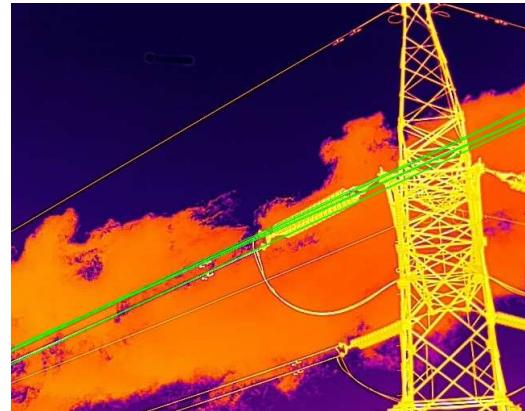


图9 霍夫直线检测算法的结果

Fig.9 Results of Hough line detection algorithm

2) 对于直线检测结果的筛选,太过依赖于算法设定好的交点的阈值,阈值设定较大可能检测不到直

线,较小会检测出过多的直线,容易出现误检。

本文对投票模块与导线筛选模块进行了改进,具体在于:

### 1) 投票模块

在预处理好的二值图中,部分区域不应该参与投票,例如杆塔、绝缘子区域,且本文已确定绝缘子位置,可以根据绝缘子位置初略判断导线所在区域,因此与绝缘子相连的区域应当拥有更多的投票权值。本文对待处理的二值图像进行区域划分,将与绝缘子区域横坐标相同的区域划分为不参与投票区域,即权值为0。在绝缘子左侧或右侧的区域根据绝缘子斜率,将与绝缘子在水平方向共线的区域划分为高权值区域,由于导线一般处于绝缘子边界的延长线附近,以区域中像素点到绝缘子边界延长线的距离为自变量,每条导线的权值可计算为:

$$q_i = \begin{cases} 2 - \ln(x/4 + e) \\ 0, \quad q < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:每条导线的权值为 $q_i$ , $i$ 为导线编号; $x$ 为像素点到绝缘子边界延长线的距离。多根导线时将每根导线的权值累加并加1为该点权值:

$$q = q_1 + q_2 + 1 \quad (7)$$

式中: $q$ 为该点的总权值,如图10所示,其中红色为不参与投票区域,绿色为绝缘子边界延长线区域。

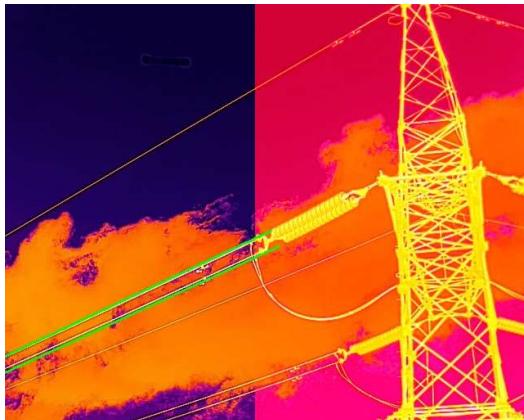


图 10 投票区域的权值分布

Fig.10 Weight distribution in voting area

### 2) 导线筛选模块

经典霍夫直线检测算法的筛选模块是通过选定一个固定的阈值,对于高于该阈值的票数的点,认为是检测结果。但容易造成图9的结果。改进的霍夫直线算法对于投票结果,通过算法预处理模块中的直方图双峰法确定投票的最低阈值,经阈值分割后,投票结果只剩下两块区域与部分离散点,再通过局部异常因子(local outlier factor, LOF)算法剔除离散点。最后的两块区域则对应两条导线,但由于区域之中每个

点(在笛卡尔坐标系下为直线)的极径与角度相差不大,且可能因为原始图像中导线附近存在干扰或噪点而导致区域之中出现区域的边界的投票结果高,而正确的结果偏低。所以区域中每个点都是存在“贡献”的,不能直接选择区域中的最高投票结果或区域的中心点。且由于拍摄视角的缘故,绝缘子附近可能存在其他绝缘子的导线,往往绝缘子附近可能存在2~4条导线,但根据导线与绝缘子之间的拓扑关系,最大连通域绝缘子对应的导线最宽,所以可以通过导线宽度筛选导线。具体实现如下:

对两片区域的投票结果进行排序,选择两片区域中票数最大的4个点通过公式(5)变换为直线。根据直线方程与图像边界和绝缘子的交点可以得到导线 $l_1$ 的两端。统计直线 $l_1$ 上灰度值较高的像素点的数量num,经实验发现当高像素点的数量num在直线上占比较重时,例如:

$$\text{num}/\text{len}(l_1) > 0.9 \quad (8)$$

式中: $\text{len}(l_1)$ 代表 $l_1$ 的距离长度。则认为导线初步检测成功。否则剔除当前点,重新求取极坐标下当前区域内最可能的点。当多条导线满足公式(8)时,比较它们的导线宽度。

$$w = \sum_{x_1 < x < x_2, y_1 - 3 < y < y_2 + 3} \begin{cases} 1, P(x,y) = 255 \\ 0, P(x,y) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $w$ 为导线在该点的宽度; $P(x,y)$ 代表该点的灰度值,由于图像进行过二值化, $P(x,y)$ 只能为0或255。通过计算导线上每一点的宽度 $w$ ,最后得到导线宽度的中位数与平均值,并以中位数与平均值代表导线的粗细程度,其中优先比较中位数,此时较粗的导线即为检测到的导线。其流程图如图11所示。

### 3.2.3 其他辅助工作

经过改进的霍夫直线检测方法获取到的直线只是导线的初步检测位置,且只是直线方程,还需要通过绝缘子位置来剔除直线中非导线的点。

#### 1) 导线截取

由于导线的起点端与绝缘子相连,根据已获取到的绝缘子的外接矩形,求取外接矩形与直线的交点,具体步骤为:

①根据绝缘子在图像中的位置判断导线在绝缘子左侧或右侧。

②将绝缘子的外接矩形在靠近导线侧的两个角相连后形成线段,并将线段两端扩展一定的长度,本文延展10像素后形成新的线段 $l_2$ 。

③求得 $l_1$ 与 $l_2$ 的交点,若不存在交点,则说明直线检测算法有误。

④通过求出的交点对直线进行截取。

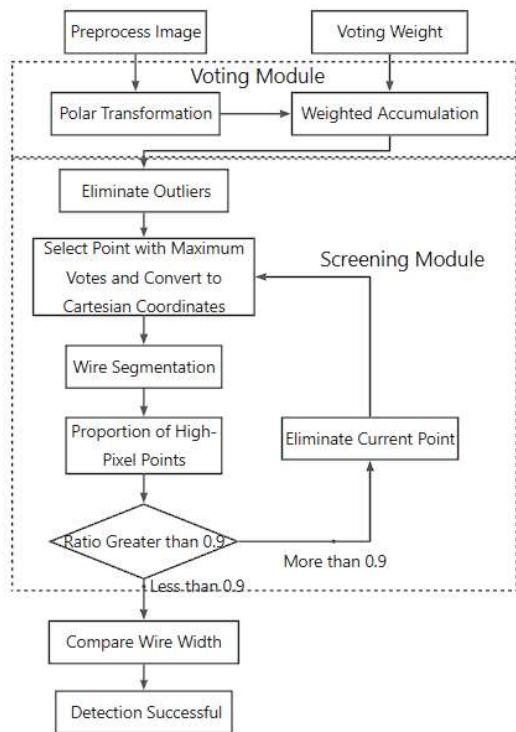


图 11 改进霍夫直线算法的流程

Fig. 11 Improved Hough line detection algorithm process

## 2) 导线纠偏

导线纠偏的原理是通过在 ( $\delta=0.8$ ) 的阈值分割图中遍历直线上所有点的坐标的灰度值, 对结果进行纠偏。对于初步检测成功的导线, 通过获取直线上的点的坐标的灰度  $P(x,y)$  及周围 4 连通域灰度:  $P(x, y-1)$ ,  $P(x-1, y)$ ,  $P(x+1, y)$ ,  $P(x, y+1)$ 。将 4 连通域与遍历的该点的灰度值为 255 的点(二值图只有 0 或 255)全部作为导线部分。

## 4 实验与数据分析

### 4.1 数据集建立

本文中红外架空导线图像来源于无人机航拍得到的红外图像, 共 1822 张。实验硬件和软件环境如表 1 所示。

表 1 实验硬件和软件环境

Table 1 Experimental platform parameter settings	
Experiment platform	Model parameters
Operating system	Windows 11
CPU	i5-12400F 2.50 GHz
GPU	RTX 2060s 8G
Programming language	C++

在对比实验中, 平均交并比 (mean intersection over union, MIoU) 所需要的真值图像  $T(x,y)$  来源于人工标记区域图像  $A(x,y)$ , 并与直方图双峰法分割出来的二值图像  $B(x,y)$  取交集。

$$T = A \cap B \quad (10)$$

获取真值图像的过程如图 12 所示, 图(a)为原图; 图(b)为二值图像; 图(c)为人工选择的标记区域; 图(d)真值图像。

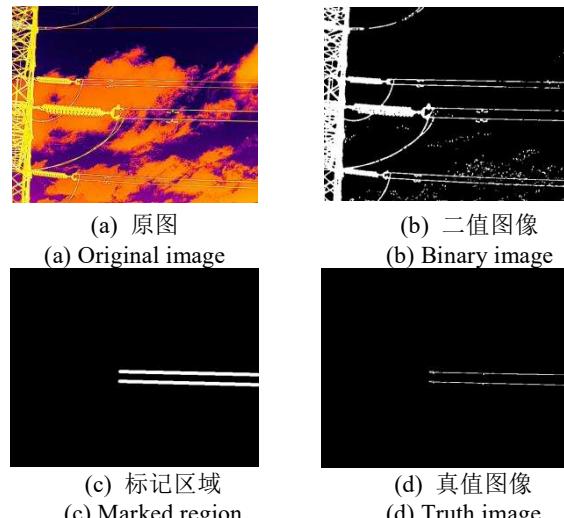


图 12 MIoU 所需要的真值图

Fig.12 Truth image for MIoU

### 4.2 数据分析

在图像分割领域中, 有多种评价精度的指标。为了验证文中构建的导线分割模型的性能, 需要选取合适的性能评价指标。本文选择了 MIoU 与导线准确率来衡量算法的准确性和精度, MIoU 指标则主要侧重于模型计算分割区域的整体性以及分割位置的准确性。另外, 它表示了真实值与预测值的交集比并集, 是语义分割领域中被广泛应用的标准指标, 同时也可以帮助评估模型的性能。本文 MIoU 的图像真值来源于人工标记区域并与直方图双峰法分割出来的二值图像相与。导线准确率指标则主要侧重于衡量导线检测的多检、漏检、错检的准确性。在实际应用中, MIoU 小于 0.85 的检测结果往往已经不符合检测要求, 可以视为误检。所以本文对准确率的衡量标准为 MIoU 大于 0.85 才视为检测正确。

为说明该算法的有效性, 本文在 Canny 边缘检测算法与本文改进算法后边缘检测图像中, 先后与添加了导线截取功能的传统算法 Hough 直线检测算法与改进的霍夫直线检测算法对导线目标进行检测, 以及添加本文 ROI 区域提取以及导线截取后的文献[12] 算法进行交叉实验, 共 1822 张导线图像。实验结果如表 2 与图 13 所示。

从表 2 中可以看出, 对于 Canny 边缘检测与本文滤波差分滤波算法后检测结果, 发现 Canny 边缘检测算法整体漏检、误检概率偏高, 可能是由于 Canny 边缘检测算法无法去除来自云朵的干扰, 而本

文滤波差分算法充分考虑了导线的形状与灰度特征,往往能在强化导线的同时过滤背景中的干扰项;在检测算法方面,经典的 Hough 直线检测算法往往能检测出图像中的导线,但由于没有约束条件,检测出来的导线无法区分,且会丢失部分导线信息,检测效果不佳;文献[12]算法对简单背景的导线图像效果较好,但对于云朵与导线难以区分,且在多根导线时容易出现误检;最后是本文算法通过改善霍夫直线的投票系统,给予了导线区域更大的投票权值,以及导线筛选模块获取精确坐标,达到了像素级定位的目的。从图 13 中可以看出,图(a)为原图;图(b)为文献[12]算法的检测结果,仅在多根导线相距较近时出现误检;图(c)为 Canny 边缘检测和 Hough 直线检测的结果,可以看出导线检测出来的导线无法区分,部分导线延伸到了杆塔上。图(d)为 Canny 边缘检测和改进的霍夫直线检测的结果,可以看出部分导线出现误检。图(e)为本文滤波差分算法和霍夫直线检测的结

果,在较为复杂的图中,导线还是存在漏检等情况。此外在图像放大的情况下,经典霍夫直线算法的检测结果往往如图 9 所示,与真正的导线存在像素级误差。图(f)为本文滤波差分算法和改进的霍夫直线检测的检测结果,用滤波器和图像差分来增强图像,优化了霍夫直线变换算法的投票机制,通过导线占比来确定导线,以图像的灰度信息与位置信息相结合,能够完整地提取到导线信息。

## 5 结论

本文针对红外图像架空导线的分割与检测的问题,构建了以无人机航拍的红外导线图像为基础的导线分割与检测算法流程。算法通过直方图双峰法分割阈值,剔除掉图像中云层的干扰。ROI 区域提取将图片有效信息区域裁剪出来。滤波器与图像差分相结合的导线优化方法优化导线,使得导线主体更加突出。最后在经典霍夫直线检测算法的基础上通过分区投

表 2 实验检测结果

Table 2 Experimental results

Preprocessing methods	Paper	Canny algorithm		Our filtering and differencing algorithm	
		[12]	Hough line algorithm	Our improved Hough	Our improved Hough
MIoU	88.4%	81.9%	82.1%	83.9%	94.4%
Accuracy	86.4%	80.5%	84.2%	83.4%	92.8%
(a) 原图	(b) 文献[12]	(c) Canny 和 Hough 算法	(d) Canny+改进的霍夫直线检测	(e) 滤波差分+霍夫直线检测	(f) 滤波差分+改进霍夫直线检测
(a) Original image	(b) References[12]	(c) Canny & Hough	(d) Canny & our improved Hough	(e) Our filtering and differencing algorithm & Hough	(f) Our filtering and differencing algorithm & our improved Hough

图 13 检测结果对比  
Fig.13 Comparison of detection results

票优化投票机制，通过导线占比来确定导线，以绝缘子与导线间的拓扑关系截取需要的导线部分。实验表明，文中提出的算法能精确的定位到导线。平均交并比为94.4%，导线检测正确率92.8%。该算法可用于对无人机航拍的红外图片实现导线的快速检测，并利用无人机厂家提供的温度场数据检测导线温度，验证了系统算法的可行性。未来将实现不同种类的导线的检测（包括地线、引流线等）以及利用不同方法去检测导线。

## 参考文献：

- [1] 赵乐, 王先培, 姚鸿泰, 等. 基于可见光航拍图像的电力线提取算法综述[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1536-1546.  
ZHAO Le, WANG Xianpei, YAO Hongtai, et al. Review of power line extraction algorithms based on visible light aerial images[J]. *Power Grid Technology*, 2021, 45(4): 1536-1546.
- [2] YAN Dongya. Research and application status of industrial robot control system[C]//3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering, 2018: DOI:10.1109/ICMCCE.2018.00012.
- [3] ZHAO L, YAO H, TIAN M, et al. Robust power line extraction from aerial image using object-based Gaussian-Markov random field with gravity property parameters[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2022, 103: 116634.
- [4] HAN Chuang, LIU Qu. Appearance monitoring of the transmission lines based on hough transform[C]//13th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI) 2020: DOI: 10.1109/CISP-BMEI51763.2020.9263568.
- [5] 隋宇, 宁平凡, 牛萍娟, 等. 面向架空输电线路的挂载无人机电力巡检技术研究综述[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3636-3648.  
SUI Yu, NING Pingfan, NIU Pingjuan, et al. Review of UAV-mounted power inspection technology for overhead transmission lines[J]. *Power Grid Technology*, 2021, 45(9): 3636-3648.
- [6] 邵瑰玮, 刘壮, 付晶, 等. 架空输电线路无人机巡检技术研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 14-22.  
SHAO Guiwei, LIU Zhuang, FU Jing, et al. Research progress on UAV inspection technology for overhead transmission lines[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 14-22.
- [7] 孙苗苗, 姜媛媛, 李振璧, 等. 基于图像拼接和帧间差分输电线路图像分割方法[J]. 红外技术, 2017, 39(2): 168-172.  
SUN Miaomiao, JIANG Yuanyuan, LI Zhenbi, et al. Image segmentation method for transmission lines based on image stitching and frame difference[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(2): 168-172.
- [8] 张卓彤, 郑娇娇. 立体影像直线特征提取的现状与展望[J]. 电子测量技术, 2021, 44(11): 45-50.  
ZHANG Zhuotong, ZHENG Jiaojiao. Current status and prospects of straight line feature extraction in stereo images[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(11): 45-50.
- [9] ZHAO Wenbo, QING Dong, ZUO Zhengli. A method combining line detection and semantic segmentation for power line extraction from unmanned aerial vehicle images[J]. *Remote Sens.*, 2022, 14: 1367.
- [10] 危双丰, 黄帅, 曹文博, 等. 基于航拍影像的输电线路绝缘子识别及缺陷检测[J]. 工程勘察, 2020, 48(4): 39-43, 71.  
WEI Shuangfeng, HUANG Shuai, CAO Wenbo, et al. Identification and defect detection of transmission line insulators based on aerial images [J]. *Engineering Surveying*, 2020, 48(4): 39-43, 71.
- [11] ZHAO Le, WANG Xianpei, YAO Hongtai, et al. Power line extraction from aerial images using object-based Markov random field with anisotropic weighted penalty[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 125333-125356.
- [12] 张从新, 赵乐, 王先培. 复杂地物背景下电力线的快速提取算法[J]. 武汉大学学报·工学版, 2018, 51(8): 732-739.  
ZHANG Congxin, ZHAO Le, WANG Xianpei. Fast extraction algorithm for power lines in complex terrain backgrounds[J]. *Journal of Wuhan University: Engineering Edition*, 2018, 51(8): 732-739.
- [13] Lewis Baker, Steven Mills, Tobias Langlotz, et al. Power line detection using Hough transform and line tracing techniques[C]//Power Line Detection Using Hough Transform and Line Tracing Techniques, 2016: DOI: 10.1109/IVCNZ.2016.7804438.
- [14] 李昭慧, 寇鸽子. 基于改进的 Deeplabv3+的红外航拍图像架空导线识别算法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(11): 181-189.  
LI Zhaozhi, KOU Gezi. Overhead wire identification algorithm in infrared aerial images based on improved Deeplabv3+[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(11): 181-189.
- [15] 胡广亮. 基于双目视觉的输电线缆识别与定位关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.  
HU Guangliang. Research on Key Technologies for Identification and Localization of Transmission Cables Based on Binocular Vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [16] 刘嘉玮, 李元祥, 龚政, 等. 全卷积网络电线识别方法[J]. 中国图形学报, 2020, 25(5): 956-966.  
LIU Jiawei, LI Yuanxiang, GONG Zheng, et al. Wire identification method using fully convolutional networks[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2020, 25(5): 956-966.
- [17] Ratnesh Madaan, Daniel Maturana, Sebastian Scherer. Wire detection using synthetic data and dilated convolutional networks for unmanned aerial vehicles[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017: 3487-3494.