

Automatic Transmission Line Extraction Technology Based on UAV Image*

XIA Bin^{1*}, ZHANG Hongyang¹, LI Ye¹, ZHENG Riping¹, PANG Shiqiang²

(1. Jiangmen Power Supply Company, Guangdong Electric Power Company, Jiangmen Guangdong 529000, China;

2. Jiangmen Electric Power Design Institute Co., Ltd, Jiangmen Guangdong 529000, China)

Abstract: The detection of power transmission lines can ensure the safe operation of the power grid. The accurate and fast extraction of power transmission lines using UAV images is the premise of power inspection. A method of automatic extraction of power lines based on UAV image is proposed, which can effectively identify power lines from complex background images. Firstly, power line pixels are extracted by using ratio detection operator and Hough transform is used to detect the line segment. Then, a complete transmission line synthesis algorithm is designed according to the geometric characteristics of transmission lines. According to the UAV image test, the proposed automatic extraction method of power transmission line can effectively eliminate the interference of complex background information and realize accurate identification of power transmission line position.

Key words: power line extraction; ratio detection operator; Hough transform; power line composition

EEACC: 7210 doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.06.028

基于无人机图像的输电线自动提取技术*

夏 斌^{1*}, 张红阳¹, 李 冶¹, 郑日平¹, 庞世强²

(1. 广东电网有限责任公司江门供电局, 广东 江门 529000; 2. 江门电力设计院有限公司, 广东 江门 529000)

摘 要: 对输电线路的检测能够确保电网的安全运行, 利用无人机图像实现输电线准确、快速的提取是实现电力巡检的前提。本文提出了一种基于无人机图像的输电线自动提取方法, 能够从复杂的背景图像中完成输电线的有效识别。首先, 采用 Ratio 算子提取出电力线像素, 并结合 Hough 变换对直线段进行检测; 然后, 根据输电线路几何特征设计了完整输电线合成算法。由无人机图像试验可知, 本文所提出的输电线自动提取方法能够有效排除复杂背景信息的干扰, 实现输电线位置的准确识别。

关键词: 输电线提取; 比率检测算子; Hough 变换; 输电线合成

中图分类号: TM752

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2021)06-1457-06

电力系统规模逐渐扩大, 其结构也变得更为复杂, 人工巡检已不能满足巡检的需要^[1-3]。与传统的人工检测方式相比, 无人机检测不仅降低了检测成本, 而且可以高效、安全地完成检测任务^[4-5]。无人机航拍图像多以植物或建筑物为背景, 输电线在航拍图像中的表现相对较弱。而图像中的道路和树木作为背景的一部分, 也包含了许多与输电线一样的线性特征。所以在无人机航拍图像中, 由于背景干扰, 很容易导致误检或漏检^[6]。

近年来, 人们对输电线的检测方法进行了许多研

究。文献[7]中提出了一种利用基于脉冲耦合神经网络的滤波器, 可以使噪声得到效果较好的剔除。其有利于解决误检测问题, 且定位精度较好, 但算法较复杂, 并且增加经验控制适应范围较窄。文献[8]中通过将基于方向约束的线性目标扩展到输电线目标上, 并引入 Radon 变换因子, 从而有效抑制了非目标对象的干扰, 该方法主要应用于识别近似水平方向的输电线。文献[9]中针对无人机图像中输电线两个方向的局部灰度分布进行滤波, 对图像中的复杂背景信息进行弱化, 使输电线目标得到增强, 需经过多次

项目来源: 广东电网有限责任公司科技项目(030700KK52180149)

收稿日期: 2020-11-13 修改日期: 2021-03-12

迭代才能够成功提取出图像中所有输电线。

直线检测主要应用于线类目标物的检测,主要有基于边缘图像和基于图像梯度两种方法。其中基于边缘图像的方法主要采用 Hough 变换,主要是因为 Hough 变换的鲁棒性好,易于实现^[10]。文献[11]就采用了 Canny 算子与 Hough 变换相结合的直线特征提取算法,但一些传统的边缘检测算子如 Canny、Sobel、Prewitt 等传统边缘检测算子在抗噪性能以及线型特征检测精度方面表现出明显的不足^[12]。而 Ratio 算子受背景信息干扰较小、检测精度高,可以满足输电线路自动提取技术的要求。

本文为实现无人机图像中复杂背景信息下输电线的准确提取,利用 Ratio 算子结合 Hough 变换,对输电线路进行初步提取,并根据输电线路几何特征对直线段编组合并,能够快速、高效地完成对输电线目标的识别。

1 算法总体框架

算法设计总体流程如图 1 所示。本文为实现复杂图像背景中输电线路的准确提取,主要思路为:首先采用 Ratio 算子检测线路边缘,并结合 Hough 变换完成对直线段初步提取,其次针对线路在空间中的几何特征,计算初步提取出的直线段的斜率,将相同斜率的直线段编为一个组别,那么相同组别中线段垂直距离最小的即可最终合并成一条输电线。需要注意的是,直线段端点的连接需设置合适的阈值,且遵循最小距离原则,则可以提取出完整的输电线路。

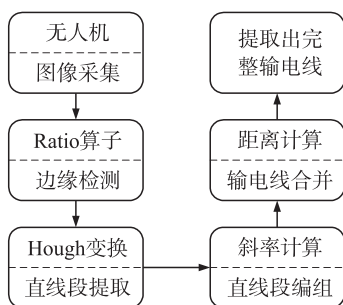


图 1 算法设计总体流程

2 边缘检测与直线段提取

2.1 Ratio 算子检测输电线边缘

输电线像素的准确二值化图像是直线检测的基础^[13]。考虑输电线航拍图像的以下特点:一方面,输电线拓扑结构简单,可以近似看作直线,且相互平行;另一方面,输电线的宽度通常只占 1 个~2 个像素,而输电线检测图像的背景通常是自然的山脉、森林和建筑物,因此提取其像素比较复杂^[14]。使用

Canny、Sobel、Prewitt 等几种经典的边缘检测算子对一幅航拍图像进行输电线边缘检测,其原始灰度图像和边缘检测图像如图 2 所示。

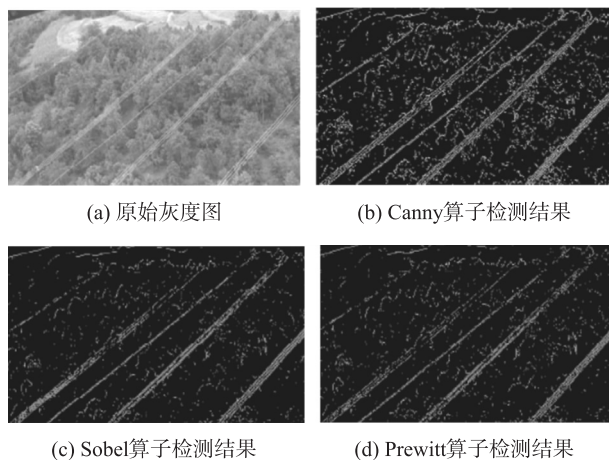


图 2 原始灰度图像和边缘检测图像

由于树木的影响,由以上结果中我们可以看到大量的干扰信息。为了消除这些噪声干扰,本文采用 Ratio 检测算子对输电线边缘进行提取。Ratio 检测算子是一种通过对中心像素的邻域像素进行平均来平滑噪声的均值比例算子,以中心区域和两个邻域区域的平均比值的较小值作为响应,并通过特定的模型进行计算^[15]。

在无人机输电线检测飞行实验中,输电线的方向通常是垂直或倾斜的,设在航拍图像中输电线的宽度仅占一个像素。因此,可以设计两种方向的 Ratio 检测模型,如图 3 所示。

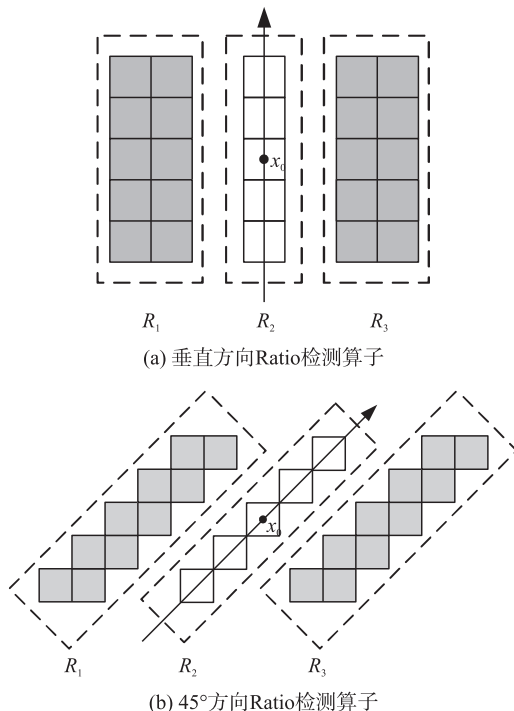


图 3 Ratio 检测算子分析

首先,设置包含 n_i 个像素的区域 $R_i (i=1,2,3)$, 其中心像素点为 x_0 , 每个像素的灰度值记作 V_k , 则 R_1, R_2, R_3 平均灰度值 A_i 为:

$$A_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k \in R_i} V_k \quad (1)$$

考虑到输电线以上特点,采用 Ratio 检测可以设计大小包含 5 pixel×5 pixel, R_1 面积为 1 pixel×5 pixel, R_2 和 R_3 面积各为 2 pixel×5 pixel。则 R_1, R_2, R_3 区域的边缘检测响应函数 f_{12}, f_{13} 可以定义为:

$$f_{12} = 1 - \min\left(\frac{A_1}{A_2}, \frac{A_2}{A_1}\right) \quad (2)$$

$$f_{13} = 1 - \min\left(\frac{A_1}{A_3}, \frac{A_3}{A_1}\right)$$

线特征响应函数 F 定义如下:

$$F = \min(f_{12}, f_{13}) \quad (3)$$

由于实验中采取了两个方向的检测算子,分别得到两个响应函数,定义为 F_{90}, F_{45} 。那么,最终的线特征响应函数 F_m 取两者中较大者:

$$F_m = \max(F_{90}, F_{45}) \quad (4)$$

设置合适的判定阈值 F_{TH} , 若 $F_m > F_{TH}$, 可以将中心像素 x_0 认为输电线像素点。针对不同形式或方向 Ratio 算子检测,可以重新设计并调整阈值以适应不同的情况。基于 Ratio 算子的输电线路检测图像如图 4 所示。由图像结果可知,该方法实现了大部分非直线边缘特征的消除,使输电线轮廓更加清晰。

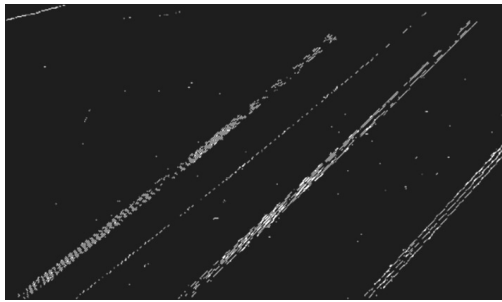


图4 基于 Ratio 算子的输电线路检测图像

2.2 Hough 变换提取直线段

Hough 具有良好的抗噪性能,可将具有相同特征的几何图形从灰度图像中分离出来^[16-17]。其主要基于点与线的对偶性来实现直线检测,极坐标系下直线方程表示为:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (5)$$

平面直角坐标系下任一点的坐标 (x, y) , 对应于与极坐标系下的过点 (ρ, θ) 的正弦曲线,而直角坐标系下同属于一条直线上的点在极坐标系下会出现交集。首先,由定义 $\theta \in [0, 180)$, ρ 表示为坐标

原点到该直线的距离,那么可以根据每一个点 (x, y) 及离散的 θ 值将 ρ 计算出来。通过累计所有的 (ρ, θ) 可以获得最终的权值,并选择其最大值,记作 $A_m(\rho, \theta)$ 。如果 $A_m(\rho, \theta)$ 的值大于设定的阈值,即可以找到直角坐标系中直线的位置。Hough 变换原理分析如图 5 所示。

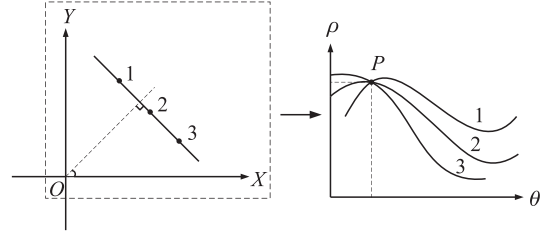


图5 Hough 变换原理

由以上分析可知,直线检测的 Hough 变换可以定义为:

$$H(\rho_q, \theta_p) = \sum_{i,j=0}^{N-1} A(x_i, y_j) \mid \rho_q - \frac{1}{2} \leq x_i \cos \theta_p + y_j \sin \theta_p \leq \rho_q + \frac{1}{2} \quad (6)$$

$$q=0, 1, \dots, Q-1; p=0, 1, \dots, P-1$$

式中: $A(x_i, y_j)$ 表示提取的每个像素的灰度值; q 是关于 ρ 的总体样本数; P 是所取离散的 θ 总数,二值图像尺寸则定义为 $N \cdot N$ 。

将 Hough 变换应用于基于 Ratio 检测算子后的二值图像,如图 6 所示。由于初始图像中背景信息较单一,且无其他的线性干扰,可以看到使用 Hough 变换能够使一些处于相同直线的短线段得到了较好的连接,但如果输电线背景图像复杂程度增大,要想获取图像中的完整的输电线路,仍有必要对初步提取后的线路作进一步处理。



图6 Hough 变换二值图像直线提取

3 基于线性特征的输电线路编组合并提取

针对背景较复杂的输电线路拍摄图像,非电力线目标可能包含许多的线性干扰,相对使输电线在图像信息中表现较弱。且通过 Hough 变换对输电线路进行直线段的初步提取后,对于较短的直线目

标效果较好,即难以满足对完整的输电线信息的恢复。以下采用基于线性特征的输电线编组合并提取算法对初步获得的二值图像作进一步处理。

3.1 直线段编组

经过 Hough 变换后,图像中的输电线主要表现为破碎的直线段,任意选择其中的两条线段,根据其在坐标系中的位置可以计算获得各自对应的斜率。首先选取两直线段,并规定其一般方程形式分别为:

$$\begin{aligned} L_1: A_1x + B_1y + C_1 &= 0 \\ L_2: A_2x + B_2y + C_2 &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

A_1, B_1, C_1 和 A_2, B_2, C_2 则表示为两直线方程中的系数,直线段 L_1 的端点取为 $M_1(a_1, b_1)$ 、 $N_1(a_2, b_2)$,直线段 L_2 的端点取为 $M_2(a_3, b_3)$ 、 $N_2(a_4, b_4)$ 。以直线 L_1 为例,可以计算线段 M_1N_1 所在直线的斜率 k_1 及转换为相应角度 α_1 :

$$k_1 = \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1}, \alpha_1 = \arctan k_1 \quad (8)$$

那么,同理可以计算 M_2N_2 所在直线的斜率为 k_2 及转换为相应角度 α_2 :

$$k_2 = \frac{b_4 - b_3}{a_4 - a_3}, \alpha_2 = \arctan k_2 \quad (9)$$

将所得到的角度值做差,若其绝对值 $|\alpha_1 - \alpha_2|$ 小于所设定的阈值 ε ,即可以认为两直线段彼此近似平行,那么将所有找到的平行线段分为同一组。

3.2 输电线路合并

已知同一组中的直线段彼此平行,而对于任意两条平行线段是否同属于一条输电线路则需要进行下一步的判断。对于两直线段 L_1, L_2 ,假设两者彼此平行,可以计算得到 L_1, L_2 之间的垂直距离 d 。

首先由直线段 L_1, L_2 上已知的端点的坐标将直线的一般方程式(7)改写为两点式方程:

$$\begin{aligned} L_1: \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} &= \frac{y - b_1}{b_2 - b_1} \\ L_2: \frac{x - a_3}{a_4 - a_3} &= \frac{y - b_3}{b_4 - b_3} \end{aligned} \quad (10)$$

再改写为相对应的一般式方程为:

$$\begin{aligned} L_1: \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1}x - y - \frac{a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1}{a_2 - a_1} &= 0 \\ L_2: \frac{b_4 - b_3}{a_4 - a_3}x - y - \frac{a_3 \cdot b_4 - a_4 \cdot b_3}{a_4 - a_3} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

由式(7)、(11)可以获得关于两直线方程中相关参数信息 A_1, B_1, C_1 和 A_2, B_2, C_2 的准确表达式,那么取 L_1 上一点 $M_1(a_1, b_1)$ 可以计算到平行直线 L_2 的距离,亦为直线 L_1 到 L_2 的距离 d_1 :

$$d_1 = \frac{A_2 a_1 + B_2 b_1 + C_2}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2}} = \frac{b_4 a_1 - b_3 a_1 - b_1 a_4 + b_1 a_3 - a_3 b_4 + a_4 b_3}{(a_4 - a_3) \cdot \left(\sqrt{\frac{(b_4 - b_3)^2}{(a_4 - a_3)^2} + 1} \right)} \quad (12)$$

使用同样的方法,还可以得到点 $N_1(a_2, b_2)$ 到直线段 L_2 的距离 d_2 ,点 $M_2(a_3, b_3)$ 到直线段 L_1 的距离 d_3 以及点 $N_2(a_4, b_4)$ 到直线段 L_1 的距离 d_4 。对以上计算获得的距离 d_1, d_2, d_3, d_4 求平均值,记作 $\bar{d}_1$ 。设初步提取并分为同一组中的直线段总数为 n ,分别记作 $L_1, L_2, \dots, L_n$ 。那么以上述方法还需求出直线段 L_1 与剩余的 $(n-1)$ 条直线段的垂直距离,最终计算得到相应的距离平均值记作 $\bar{d}_2, \bar{d}_3, \dots, \bar{d}_{n-1}$ 。对 $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \dots, \bar{d}_{n-1}$ 的大小进行排序。其中,垂直距离最小的 $\bar{d}_{\min}$ 所对应的直线段 $L_{\min}$,可认为与直线段 L_1 同属于一条输电线路,则将两直线段进行连接可以实现输电线路的合并。

对于已经通过垂直距离判别方法确定为同属于一条输电线的两条直线段(为简化分析过程,此处仍假设直线段 L_1, L_2 为航拍图像中两条共线的直线段),需将直线段 L_1, L_2 连接为一条输电线路以实现电力线完整、有效的提取。

如图 7 所示,为两条共线的直线段 L_1, L_2 ,要保证直线段的有效连接,以下需要对彼此间的距离作进一步的计算。已知,各端点的坐标,由两点间距离公式可得点 $M_1(a_1, b_1)$ 到点 $M_2(a_3, b_3)$ 的距离 $D_{M_1M_2}$:

$$D_{M_1M_2} = \sqrt{(b_3 - b_1)^2 + (a_3 - a_1)^2} \quad (13)$$

同理可以计算出点 $M_1(a_1, b_1)$ 到点 $N_2(a_4, b_4)$ 的距离 $D_{M_1N_2}$,点 $N_1(a_2, b_2)$ 到点 $M_2(a_3, b_3)$ 的距离 $D_{N_1M_2}$,点 $N_1(a_2, b_2)$ 到点 $N_2(a_4, b_4)$ 的距离 $D_{N_1N_2}$ 。通过对 $D_{M_1M_2}, D_{M_1N_2}, D_{N_1M_2}, D_{N_1N_2}$ 的大小进行比较,得出最小值 $D_{\min}$ 所对应的两个端点,则可以认为该两点处为输电线初步提取时的断裂部位,应使这两端点通过直线进行连接。最终,通过以上步骤将使得两条破碎的输电线直线段合并为一条完整的输电线边缘。

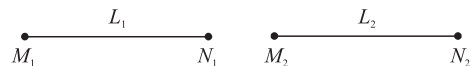


图 7 共线直线段合并计算

由于通过 Hough 变换初步提取得到的平行直线段,可能会出现线与线间的距离 d 或点与点间的距离 D 过大而难以进行有效判别的情况,此时对两直线段是否共线的判断需设定合适的阈值 d_{TH} 、 D_{TH} 。若 d, D 在有效的范围内,则认为两条破碎的直线段同属于一条输电线路,那么可以进行算法下

一步骤,并最终拟合得到航拍图像中完整的输电线边缘。

4 实验验证

为验证本文采用以上算法能够准确提取出航拍图像中复杂背景下的输电线路,实验针对两种复杂背景下的输电线图像信息,分别采用一般方法和本文算法所得提取效果进行对比分析。一般方法由当前使用较多的 Canny 算子,同时结合 Hough 变换直接提取获得输电线。本文算法过程由以上分析所述,最终可得实验效果对比如图 8 所示。

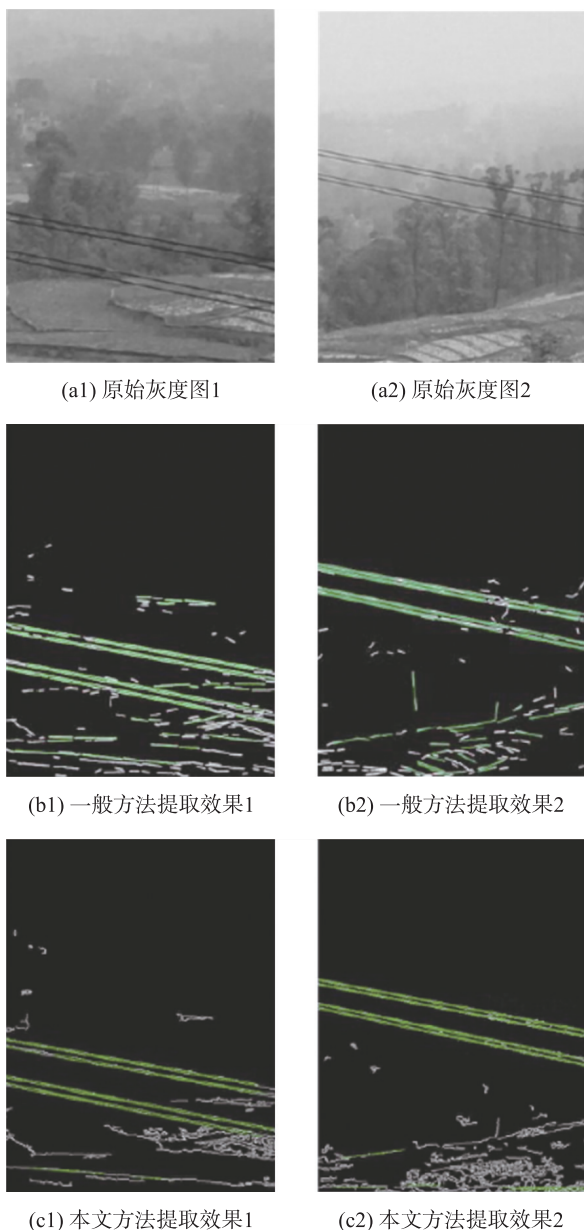


图8 实验结果分析

由以上结果可以看出,当图像背景信息比较复杂时,使用一般方法结果中出现了更多的干扰影响,在图 8(b1)中有许多地物线性特征也被识别为输电

线,而在图 8(b2)中由于植被的影响,所提取出的输电线出现了断裂,即无法完整提取出一条线路。由此可见,基于 Canny 算子的抗噪声能力差,检测精度不高。而对比使用本文所设计的算法,如图 8(c1)、(c2)所示,所提取的输电线受背景信息干扰较小,最终得到的输电线路图像较为清晰,且未出现破碎,验证了该算法能够实现复杂背景图像中输电线路准确、完整的提取。

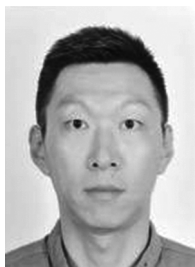
5 结论

本文设计了一种基于无人机图像的输电线自动提取算法,能够从复杂的背景图像中完成输电线路的有效识别。首先由 Ratio 算子结合 Hough 变换对电力线进行初步提取,再经编组合并最终完成输电线路的提取过程。由实验结果可知,该方法能够有效削弱复杂的背景噪声的干扰,且基于线路线性特征进行合并,进一步实现了线路准确、完整的提取,验证了此方法的有效性。

参考文献:

- [1] 俞海洋. 基于航线规划与图像识别技术的无人机巡线研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.
- [2] 彭向阳,陈驰,饶章权,等. 基于无人机多传感器数据采集的电力线路安全巡检及智能诊断[J]. 高电压技术,2015,41(1):159-166.
- [3] 陈驰,彭向阳,宋爽,等. 大型无人机电力巡检 LiDAR 点云安全距离诊断方法[J]. 电网技术,2017,41(8):2723-2730.
- [4] 刘跃波,马立新. 电力巡检无人机避障技术研究[J]. 电子测量技术,2019,42(13):1-5.
- [5] 高旭东,张军朝,张建,等. 无人机电力线路巡检安全距离测量新方法[J]. 现代电子技术,2020,43(5):146-149,154.
- [6] Cao W, Zhu L, Han J, et al. High Voltage Transmission Line Detection for Uav Based Routing Inspection[C]//2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Wollongong, Australia. 2013:554-558.
- [7] Li Z, Liu Y, Hayward R, et al. Knowledge-Based Power Line Detection for UAV Surveillance and Inspection Systems[C]//2008 23rd International Conference Image and Vision Computing, Christchurch, New Zealand, INSPEC. 2008:10400949.
- [8] 赵利坡,范慧杰,朱琳琳,等. 面向巡线无人机高压线实时检测与识别算法[J]. 小型微型计算机系统,2012,33(4):882-886.
- [9] 曹蔚然,朱琳琳,韩建达. 一种可迭代基于多向自相关的航拍电力线图像增强方法[J]. 机器人,2015,37(6):738-747.
- [10] 徐志军,陈建政. 基于图像处理和 Hough 变换的轮对踏面轮廓检测方法[J]. 电子测量技术,2017,40(6):117-121,131.
- [11] 王晨晨,杨慕升,姜立志,等. 结合改进 Hough 变换的在线工件直线特征提取研究[J]. 机械设计与制造,2019(S1):50-53.
- [12] 郝艳捧,蒋晓蓝,阳林,等. 基于图像分割评估运行绝缘子自然覆冰程度[J]. 高电压技术,2017,43(1):285-292.

- [13] 李朝阳, 阎广建, 李小文, 等. 高分辨率航空影像中高压电力线的自动提取[J]. 中国图象图形学报, 2007(6): 1041-1047.
- [14] 刘晓磊, 郑顺义, 许磊. 基于 LiDAR 点云数据的电力线自动提取算法研究[J]. 测绘地理信息, 2017, 42(4): 13-16.
- [15] 杨亮. 无人机航拍复杂背景影像中电力线的自动提取与匹配方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [16] 袁晨鑫, 官云兰, 张晶晶, 等. 基于改进 Hough 变换的电力线提取[J]. 北京测绘, 2018, 32(6): 730-733.
- [17] 张少平. 输电线路典型目标图像识别技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.



夏 斌(1981—), 男, 高级工程师, 硕士; 研究方向为电网规划建设及工程管理工作。