

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209041

基于 AD-Census 代价及目标检测的吊车防撞线技术

方春华¹ 陆杰炜¹ 董晓虎² 程 绳² 吴 军² 申万科¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2. 国网湖北省电力有限公司超高压公司 武汉 430051)

摘要: 针对大型吊车在高压输电线路下施工易发生碰线事故的问题,提出一种基于目标检测和双目测距的方法来对风险进行管控。所提方法首先使用 YOLOv4 算法对输电线进行检测,然后考虑到双目相机处于不同拍摄角度会导致图像存在亮度差异的情况,提出了基于 AD-Census 代价的 SGBM 双目测距算法对输电线进行测距。最后通过实验验证了所提方法的有效性。结果表明,该方法在检测输电线时平均置信度能够达到 81.67%,在 5~8 m 以内测量误差能够控制在 0.4 m 以内,平均检测测距用时 50 ms。相比原始双目测距算法,改进算法的测量精度有一定提升。所提方法能够准确测量吊臂与输电线间的距离,对防止吊车碰线具有一定意义。

关键词: 输电线路;目标检测;AD-Census 代价;双目测距

中图分类号: TM930 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

Technology of preventing cranes from touching wires based on AD-Census cost and object detection

Fang Chunhua¹ Lu Jiewei¹ Dong Xiaohu² Cheng Sheng² Wu Jun² Shen Wanke¹

(1. College of Electricity and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Company Ultra High Voltage Company, Wuhan 430051, China)

Abstract: Aiming at the problem of line collision accident of large cranes under transmission lines, a method based on object detection and binocular distance measurement is proposed to control the risk. Firstly, the proposed method uses YOLOv4 algorithm to detect the transmission lines. Then, considering that binocular cameras at different angles can lead to image brightness differences, a binocular ranging algorithm based on AD-Census cost SGBM (semi-global block matching) is proposed. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by experiments. The results show that the average confidence of the method can reach 81.67%, the measurement error can be controlled within 0.4 m within 5~8 m, and the average detection time is 50 ms. Compared with the original binocular ranging algorithm, the measurement accuracy of the improved algorithm is improved to some extent. The proposed method can accurately measure the distance between the crane boom and the transmission line, which has certain significance to prevent the crane from hitting the line.

Keywords: transmission line; object detection; AD-Census cost; binocular distance measurement

0 引 言

近年来,为了支撑我国经济的快速发展,与之配套的电力系统基础设施建设经历了迅猛的发展^[1-2]。输电线路是组成电网,传输电能的最基本单位。但大型机械尤其是吊卡在输电线路下施工时,极易造成碰电线事故^[3-4],给电网的安全稳定运行造成了极大的安全隐患。

由于输电线具有细长且反射面小的特点,导致它无法有效反射声波或者被光线精准定位,所以采用传统的测距方法如超声波测距和激光测距等方法来测量吊臂与输电线

间距离,防止碰线的方法效果十分有限。目前国内的一些学者主要都选择使用电磁场强度来判断安全距离,该方法简单易行,但是由于传感器安装位置以及现场复杂施工环境的影响,该测量方法精度不高,也不能对输电线进行识别^[5-7]。国外的研究者主要是大型的吊车生产企业,最具有代表性的如西门子公司研制的 Crane Ranger 系统^[8]。该系统使用超声波测距来防止吊臂触碰高压线,此方法较为经济,但是反应速度较慢,精度不高,防撞效果有限。

双目视觉技术能够对输电线进行精确、高效的测距^[9-11]。在针对输电线测距方面,丁言涛^[12]使用图像分割

技术结合双目测距的方法对输电线进行了自动识别并测距,但是由于其测试场景是室内,还需考虑在室外使用时光照对图像亮度差异的影响,在室外使用的效果还不太明确。张静等^[13]使用基于 Hough 直线检测的双目视觉技术实现了无人机电力线路巡检的安全距离测量;李昊等采用基于半全局匹配(semi global matching, SGM)算法的双目测距技术对输电线路净距离进行了测量^[14]。然而这类双目测距方法需要手动点击深度图才能进行距离的显示,无法实现输电线路的自动识别及距离的自动测量。因此,研究一种能够对输电线进行自动识别,并适合户外光线环境的精确测距方法具有十分重要的工程意义。

本文首先通过实地拍摄的方式采集输电线图片,制作了输电线数据集,并利用 YOLOv4 (you only look once version 4)算法对输电线进行识别。在识别到输电线的基礎上,分析讨论了基于特征点匹配与立体匹配算法的优缺点,提出利用半全局块匹配算法 (semi-global block matching, SGBM)进行测距。最后对基于 BT 代价与 AD-Census 代价的融合算法精度进行了比较。

1 基于 YOLOv4 的输电线检测

1.1 YOLOv4 简介

YOLO 系列目标检测算法作为 OS(One Stage)检测模型中的经典,较好地兼顾了检测精度和速度^[15]。其中,目前新型的 YOLOv4 目标检测算是 Alexey Bochkovskiy 等在 YOLOv3 的基础上,通过加入许多不同的方法和技巧所提出的新型目标检测网络。YOLOv4 总体网络结构如图 1 所示。

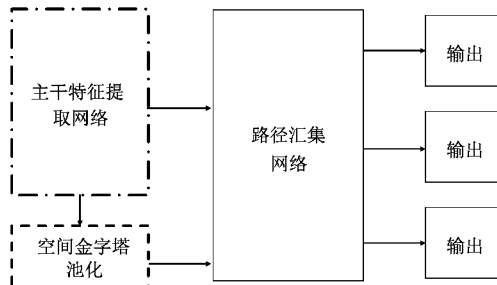


图 1 YOLOv4 网络

如图该网络由四大部分组成^[16]:主干特征提取网络 (cross stage partial Darknet53, CSPDarknet53),空间金字塔池化 (spatial pyramid pooling, SPP),路径汇集网络 (path aggregation network, PANet),输出层 (YOLO Head)。上述部分除输出层外都在 YOLOv3 的基础上做了一定的改进。在 COCO 数据集上测试时 YOLOv4 的帧率以及准确率相较于 YOLOv3 都有较大的提升。因此,本文选择 YOLOv4 作为检测网络。

1.2 输电线检测过程

输电线图片输入 YOLOv4 网络后,首先被不失真地缩

放成尺寸为 416×416 的三通道图片,然后被送入 CSPDarknet53 主干特征提取网络。这一部分会对输电线进行初步特征提取,对最后一层的输出做 3 次卷积后送入 SPP 进行最大池化操作。完成最大池化后再对信息进行堆叠和卷积并送入 PANet 中。在 PANet 中对主干特征网络输出的最后第 2 层、最后第 3 层以及 SPP 输出的信息进行融合,最后将预测结果输入到输出层 YOLO Head 中。

对输入 YOLO Head 中的输电线预测结果进行解码,首先将图像划分为 $S \times S$ 个网格,每个网格负责预测中心落入该网格的目标是否是输电线,并计算三个预测框。每个预测框对应 5+1 个值,1 表示数据集中只有输电线一个种类,5 表示预测框的信息,分别是:中心点坐标 (x, y) ,框的宽和高以及置信度。最后使用非极大值抑制算法来筛选出置信度得分较高的输电线预测框作为最终的目标检测结果进行输出。基于 YOLOv4 的输电线检测过程如图 2 所示。

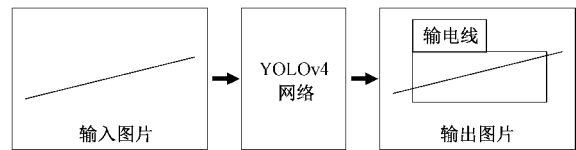


图 2 YOLOv4 输电线检测过程

2 基于双目视觉的输电线距离测量

在利用 YOLOv4 目标检测算法完成对输电线的检测后,使用双目测距对输电线进行距离测量。

2.1 双目视觉原理

双目视觉通过输电线在相机成像屏幕上的投影偏差进行距离估计。针对输电线的距离测量模型如图 3 所示。

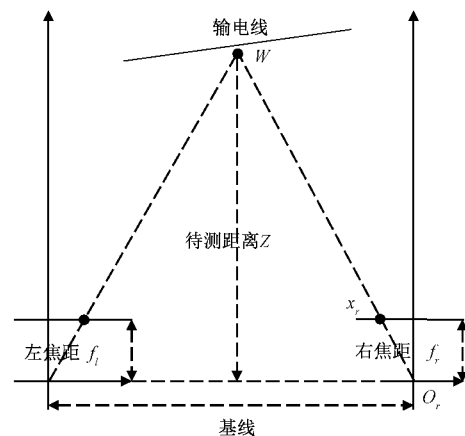


图 3 双目测距模型

点 W 为被测输电线上的一点, O_l 为左目相机的光心, O_r 为右目相机的光心。输电线在两相机成像面的横坐标分别为 x_l 和 x_r 。 f_l 为左相机的焦距, f_r 为右相机的焦距, B 为两相机基线间的距离, Z 表示输电线与相机间的距离。

设 d 为 x_l 和 x_r 之间的像素距离,那么实际距离 Z 可用公式表示为:

$$Z = \frac{fB}{d} \quad (1)$$

2.2 基于 SGBM 算法的输电线距离测量

由于本文的研究对象输电线具有细、长、特征点不明显等特点,所以基于特征点匹配的算法并不适用。以 ORB 算法为例,图 5 为基于 ORB 算法并剔除误匹配点的输电线特征匹配,实际效果有限。

因此本文采用兼顾了速度和精度的 SGBM 半全局匹配算法来进行双目测距。

基于 SGBM 算法的输电线距离测量分为如下几步:

1)相机标定:摄像机标定是双目测距的基础,为了获取用于计算视差以及消除摄像头畸变的相应参数,本文通过张氏标定法对对摄像机进行标定。

2)双目校正:双目校正通过极线约束来使左右输电线视图进行严格地行对应,消除摄像头的畸变,为下一步的图像像素匹配节省搜索时间并提高立体匹配的准确率。

3)立体匹配:立体匹配把同一场景下左右视图上对应的输电线像点匹配起来,得到由视差 d 组成的视差图。

4)计算距离:利用已经生成的视差图,结合相机标定和立体匹配得到的数据,运用式(1)计算实际的距离,并将距离在目标检测框中显示。

2.3 基于 AD-Census 的代价计算

SGBM 算法在立体匹配的代价计算阶段采用了 BT 代价。考虑到左右相机在不同拍摄角度时存在接收到光照不一致,导致图像存在亮度差异的情况,提出在代价计算阶段使用对亮度偏差更加鲁棒的 AD-Census 代价来进行应对,降低在亮度偏差情况下立体匹配的误匹配率。

图 4 展示了 Census 代价的计算过程。

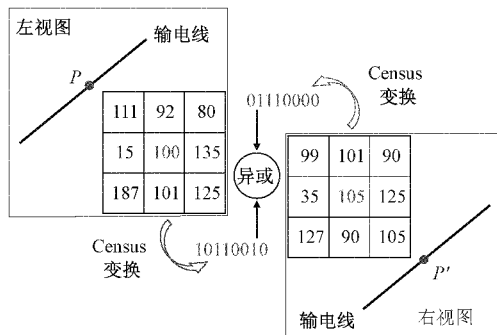


图 4 Census 代价计算

在计算 Census 代价时首先进行 Census 变换。在左目相机拍摄的输电线视图中选取一像素点 $P(x, y)$ 并以此建立一 3×3 的窗口,以该窗口中心点的灰度值为基准与其他像素点进行比较,灰度值大于中心点的记为 0,小于时记为 1,得到一个像素序列。

同理,在右视图中选取另一视差为 d 的像素点 $P'(x +$

$d, y)$ 生成像素序列。Census 代价即为左右像素点所生成序列的汉明距离,即两序列求异或后 1 的数量。其公式为:

$$C_c(p, d) = H(R_l(x, y), R_r(x + d, y)) \quad (2)$$

式中: $C_c(p, d)$ 表示代价值, $R_l(x, y)$ 为左图像素序列, $R_r(x + d, y)$ 为右图像与左图像视差为 d 时的素序列, H 为求两像素序列的汉明距离。

求取 AD 代价时,只需计算左右输电线图像中对应像素差的平均值。代价计算公式如下所示:

$$C_{AD}(p, d) = \frac{1}{3} \left\{ \begin{aligned} &|P_R^{left} - Pd_R^{right}| + \\ &|P_G^{left} - Pd_G^{right}| + \\ &|P_B^{left} - Pd_B^{right}| \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, P_i^{left} 为左图像中的像素, Pd_i^{right} 为对应的右图像中视差为 d 的像素, i 为 R、G、B(红、绿、蓝)。

融合的 AD-Census 代价计算公式为:

$$C(p, d) = \rho(C_c(p, d), \lambda_c) + \rho(C_{AD}(p, d), \lambda_{AD}) \quad (4)$$

$\rho(c, \lambda)$ 是关于变量代价值 c 的鲁棒函数,而 λ 是一外部控制参数,通过调整 λ 可以对代价计算结果进行调整。

$\rho(c, \lambda)$ 的计算公式如下

$$\rho(c, \lambda) = 1 - \exp\left(-\frac{c}{\lambda}\right) \quad (5)$$

3 实验分析

目标检测和双目测距的硬件平台如下: NVIDIA GeForce RTX 2060GPU 显卡、intel i7-10750 CPU 处理器、16 GB 内存。软件环境为: Windows 10 操作系统、OpenCV 3.4.2、CUDA11.1、cuDNN11.2、MATLAB2016a。

3.1 输电线特征点匹配

从图 5 中可以看到 ORB 算法在左视图和右视图的输电线上产生了大量特征点,但是明显地可以看到左右视图即使在剔除误匹配的特征点后所剩的匹配特征点较少且还是存在误匹配的情况,误匹配的形式主要有如下几种:1)左视图中一点匹配右视图中多个点;2)点对点匹配错误;3)左视图中多点匹配右视图中一点。上图中,输电线特征点匹配的准确率仅为 28.57%,所以基于特征点匹配的算法并不适用于输电线。

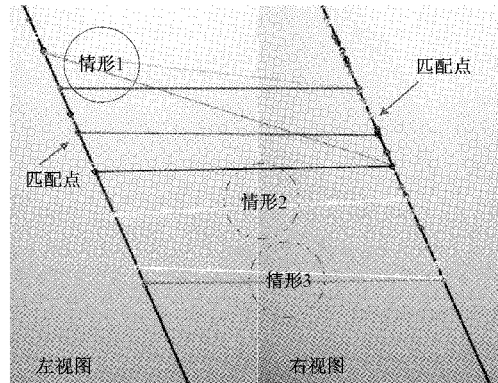


图 5 基于 ORB 算法的输电线特征匹配

3.2 代价对比分析

由于在真实场景中双目图像的亮度差异往往不够明显,所以在实验室环境下人为地对一侧摄像头进行补光,使拍摄出来的照片能够存在明显的亮度差异,以此来验证 AD-Census 代价对亮度差异的鲁棒性。对改进算法进行测试,图 6 为拍摄的实验原图,图中包含了一段 500 kV 输电导线,图 7 为基于两种不同代价所生成的视差图。

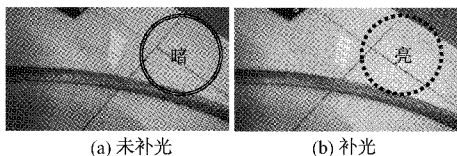


图 6 实验图片

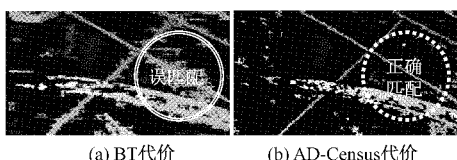


图 7 视差图

由图 7 可以看出,与 BT 代价相比,采用了 AD-Census 代价的视差图具有一定的优势,主要体现在输电线的视差图和真实图像更加接近,线条更加清晰,图像噪点更少,未出现如图 7(a)中的小面积的误匹配区域。由此可见,相比于 BT 代价,AD-Census 代价在处理亮度差异时鲁棒性更好。

3.3 输电线数据集制作

1)采集输电线图像:图像的采集方式主要采用摄像机拍摄,并且在拍摄完成后统一将图像分辨率调整为 480×640 ,最后得到 716 张图片。

2)输电线图像标注:本文采用 Labelimg 作为数据标注软件。样本数据以及标签示例分别如图 8 和 9 所示。

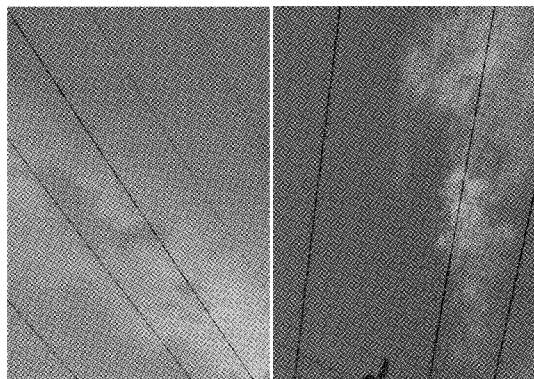


图 8 原始图片

3)数据集训练:对训练参数进行调整,输入图片的大小为设置为 416×416 ,每次训练输入的图片数量为 16 张。再令 Makefile 文件中的 GPU=1,开启 GPU 加速训练。

训练完成后,提取训练数据,绘制成如图 10 所示的损



图 9 标签图片

失函数变化曲线。从图 10 中可以看出损失函数总共分为 3 个阶段:快速下降阶段:当迭代次数达到约 80 时,损失值出现急剧下降,迭代次数在 200~1 400 之间时下降速度较快,大于 1 400 时平缓震荡下降,最终趋于平稳,稳定在 0.27 左右。该损失值较低,表明数据集训练结果良好。

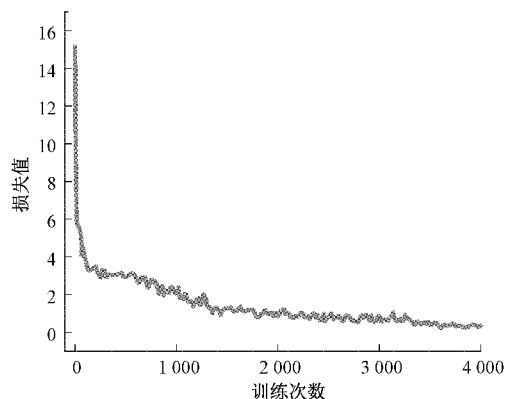


图 10 损失曲线

利用训练好的数据集进行输电线检测实验,实验结果如图 11 所示。从检测结果可以看出数据集对输电线的检测效果良好,YOLOv4 算法能对图片中的输电线进行准确的检测。

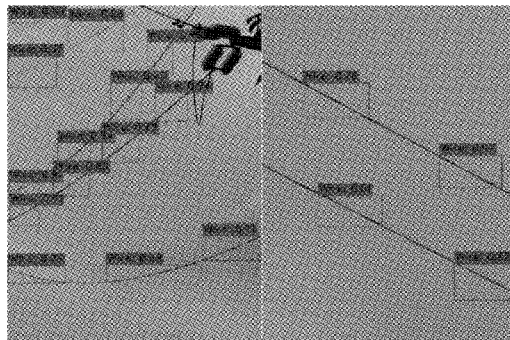


图 11 YOLOv4 检测结果

在测试样本的测试中,检测准确率较高,平均置信度为 81.67%;速度较快,当图片中输电线较多,平均每张图片的检测时间耗时大约 40 ms 左右,可以达到实际使用的要求。

3.4 输电线检测及测距

在图12中展示了使用双目测距融合YOLOv4目标检测后对输电线进行检测和测距的实际效果,并将改进算法和未改进算法的测距结果进行了对比,具体测量结果及误差如表1所示。

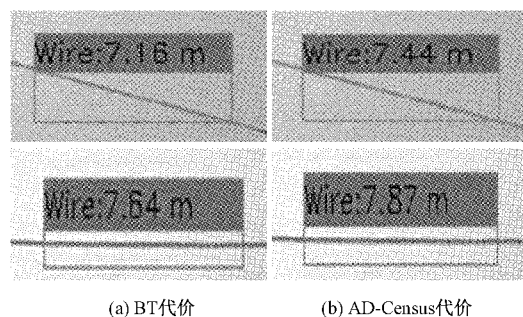


图12 输电线检测及测距

表1 测距结果 m

实际距离	原始算法	绝对误差	改进算法	绝对误差
5.02	4.55	-0.47	4.71	-0.31
5.83	5.51	-0.32	6.10	0.27
6.16	5.81	-0.35	6.40	0.24
6.69	6.94	0.25	6.58	-0.11
7.31	7.06	-0.25	7.12	-0.19
7.64	7.16	-0.48	7.44	-0.20
8.31	7.64	-0.67	7.87	-0.44

分析表1中的数据可以看出,当摄像头和输电线的距离增加接近8m或者接近5m时测距的误差呈现增大的趋势,在7m左右时精度最高。经过大量实验表明,使用双目测距对输电线进行测距时能够在5~8m时取得较好的测距效果,此时误差较小。与单独的输电线目标检测相比,每张图片的平均检测时间增加了10ms,达到了50ms,仍然能够达到实时检测的要求。同时该测量距离大于《GB 26859-2011 电力安全工作规程》对于相关电压等级输电线路安全距离的规定。因此该方法可以被用于吊卡在输电线路下施工时的实时预警。

4 结 论

针对大型吊卡在高压输电线下施工无法准确判断距离易酿成安全事故的问题,本文提出了一种基于目标检测和双目测距的安全距离预警方法。首先使用YOLOv4目标检测算法智能地识别图像中的输电线,并在考虑户外光照影响的基础上采用基于AD-Census代价的SGBM算法对输电线进行测距,取得了较好的测量效果。该方法在智能性和测距精度上优于现有的电场强度测距和人工观测方法。但是目前的目标检测领域发展迅速,未来可考虑采用性能更好的目标检测算法对输电线进行自动识别。

参考文献

- [1] 别一凡,李波,江军,等.基于改进SSD的变压器套管红外图像油位智能识别方法[J].电力工程技术,2021,40(5):158-163.
- [2] 张品焯,余楚云,伍国兴,等.基于增强特征金字塔和可变形卷积的绝缘子缺陷检测[J].电力工程技术,2021,40(4):155-160.
- [3] 李明洁.基于图像分析的输电线路防外力破坏技术研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [4] 李梅,郭飞,张立中,等.基于TATLNet的输电场景威胁检测[J].工程科学学报,2020,42(4):509-515.
- [5] 生红莹,刘欢,朱琳,等.带电线路中施工机械安全距离作业下的临界电场研究[J].机械与电子,2021,39(1):12-16.
- [6] 王麒,殷铭,杨富磊,等.输电线路检修现场三维安全距离预警系统[J].机电工程技术,2020,49(6):7-9,39.
- [7] 钱磊,平学良,周晓娜,等.输电线路防外力破坏预警技术应用研究[J].电子器件,2018,41(6):1441-1446.
- [8] 刘调.吊车防碰撞高压线报警系统设计与研究[D].武汉:武汉理工大学,2016.
- [9] 贾伯岩,孙翠英,李立学,等.基于兴趣区域匹配的输电线路双目监测系统研究[J].高电压技术,2020,46(10):3630-3637.
- [10] 李一航,周东兴,韩东升.一种基于透视变换的远距离双目测距方法[J].电子测量技术,2021,363(7):93-99.
- [11] 瑚琦,蔡文龙,卢定凡,等.基于嵌入式的双目视觉采棉测距系统[J].电子测量技术,2020,339(7):172-178.
- [12] 丁言涛.用于施工机械的高压电缆视觉测距系统[D].上海:东华大学,2021.
- [13] 张静,刘晓铭,黄国方.基于双目测距的无人机电力线路巡检安全距离测量研究[J].微型电脑应用,2020,36(2):117-119.
- [14] 李昊,王建,熊小伏,等.基于双目图像测距的输电线路净距计算与安全告警方法[J].广东电力,2021,34(6):10-20.
- [15] ZHOU L, WEI S, CUI Z M, et al. Lira-YOLO: A lightweight model for ship detection in radar images[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2020, 31(5):950-956.
- [16] ZHANG S, WU Y X, MEN C G, et al. Tiny YOLO optimization oriented bus passenger object detection[J]. Chinese Journal of Electronics, 2020,29(1):132-138.

作者简介

方春华,博士,主要从事高电压绝缘与在线监测技术研究。
E-mail:fang107531@163.com

陆杰炜(通信作者),硕士研究生,主要从事输电线路防外破研究。
E-mail:420506406@qq.com

董晓虎,高级工程师,主要从事输变电设备运行维护及检修。
E-mail:601966125@qq.com

程绳,高级工程师,从事超特高压输电线路运维工作。
E-mail:1721552447@qq.com

吴军,高级工程师,从事输电线路运维管理工作。
E-mail:114491234@qq.com

申万科,硕士研究生,主要从事输电线路无人机巡检工作。
E-mail:853798245@qq.com