

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209727

架空输电线路巡检机器人系统设计*

王 鹏 盛宇军 高笃良 蔡永攀 闫付乐

(国网北京市电力公司 北京 100051)

摘要: 架空输电线路机器人可以代替人工执行电力巡检任务,解决人工巡检中效率低、劳动强度大、智能化程度不足等问题。提出了档间巡检的设计思路,开发了低成本架空输电线路巡检机器人系统,通过设计机械结构、优化识别算法等方式,实现了机器人的自主行走、无线充电、图像采集、数据处理、智能巡检等功能。在软件方面基于C#开发了专用程序及界面,并建立了基于架空输电线路金具及缺陷数据集,在YOLOv4目标检测算法基础上,通过数据增强、边界框优化和模型结构改进,建立YOLOv4-M模型,优化了电力金具识别检测性能,提升了系统应用的环境适应性。通过机器人在线路上的运行和测试,识别算法在速度可以达到45fps,平均检测精度达到97.6%。

关键词: 架空输电线路;自主移动机器人;目标检测;自主巡检;无线充电

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.2

Design of inspection robot system for overhead transmission line

Wang Peng Sheng Yujun Gao Duliang Cai Yongzhi Yan Fule

(State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100051, China)

Abstract: Overhead transmission line robot can replace artificial power inspection tasks, solve the low efficiency in manual inspection Labor intensity The problem such as intelligent degree is insufficient Put forward between your checking design train of thought, through the design of mechanical structure optimization identification algorithm, realize the independent walking of the robot Wireless charging image acquisition intelligent inspection In the aspect of software, a special program and interface are developed based on C#, and a data set based on overhead transmission line hardware and defect is established. On the basis of YOLOv4 target detection algorithm, through data enhancement The boundary box optimization and model structure improvement, the establishment of YOLOV4-M model, optimize the performance of power hardware identification and detection, improve the environmental adaptability of the system application through the robot online operation and testing, the identification algorithm in the speed of 45fps, the average detection accuracy of 97.6%.

Keywords: overhead power transmission line; autonomous mobile robot; target detection; independent inspection; wireless charging

0 引 言

随着社会经济的不断发展,电力需求也急剧增长,我国架空输电线路总长已达到70万千米。由于架空输电线路长期暴露在野外、所处地形复杂、工作环境恶劣,容易造成输电线路老化、损伤等问题^[1]。因此,为了及时发现输电线路的机械电气故障和安全隐患,必须要对架空输电线进行定期巡检^[2],常规的巡检方式有人工巡检、有人直升机巡检、无人机巡检以及线路机器人巡检^[3]。

人工巡检是我国架空输电线路铺设以来就存在的传统检测方式,其巡检效率低、工作强度大、安全保障差、巡检成本高等缺点^[4],且在异常天气及其导致的机械故障情况下不具备优势。有人直升机巡检可以随时在空中悬停、转弯以及垂直上升或下降,且具有巡检范围较大、巡检精度可控等特点^[5],但由于其受天气因素以及航空管制影响较大,且直升机巡检成本较高,故没有进行普遍使用。无人机巡检是近些年被应用到的新技术,相比使用直升机巡检,在保证灵活检测、定点巡检的同时,巡检成本也有所降低^[6],但

收稿日期:2022-04-24

* 基金项目:国家自然科学基金(62005077)、河南省科技攻关计划(工业领域)项目(192102210141)、河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2019GGJS082)项目资助

由于其所需飞控技术门槛较高,巡检续航时间短、可操作距离短等不足,无法适应我国输电线路点多面广、跨区域分布的特点^[7],短期内无法大规模的普及应用。机器人巡检与其他几种巡检方式相比,在保证巡检精度的前提下,即使遇到恶劣天气也可以长期在线工作,同时对人工干预的需求不大,具有一定的自主能力,具有安全风险小、可重复巡检、巡检周期短等优点^[8]。但目前机器人巡检要完成长线路的巡检,必须要在杆塔间进行越障^[9],导致机器人本体的体积较大、重量过高、越障机构复杂,严重阻碍了机器人巡检的发展。

因此,本文提出一种线路档间巡检机器人设计思路,设计开发了低成本架空输电线路巡检机器人系统,通过采集数据、改进识别检测模型、优化设计等措施,设计出一套具有自主行走、无线充电、图像采集、智能巡检、数据处理等功能的架空输电线路巡检机器人。可以安装到巡检需求旺盛的线路上,在保证安全性的情况下,有效降低输电线路巡检成本。

1 系统硬件设计

设计的巡检机器人系统原理框如图 1 所示。

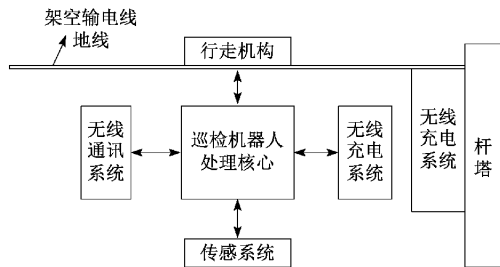


图 1 巡检机器人系统设计框图

架空输电线路巡检机器人采用杆塔间巡检工作和模块化设计理念,巡检机器人系统包括机器人本体处理核心、行走机构、无线充电系统、无线通讯系统、传感系统。机器人在机械结构设计上舍弃了复杂的越障机构,设计行走机构满足架空输电线路柔性钢缆表面行走的要求,机器人本体可搭载高分辨率的可见光相机、红外相机、激光雷达等不同传感设备,执行不同的巡检任务。机器人采用内置的锂电池供电,考虑到架空输电线路巡检机器人要长期在线作业,采用太阳能作为能量来源设计无线充电系统^[10],为机器人提供能源补给;同时杆塔上的供电侧系统支持对机器人充电参数及状态的监测,确保机器人的供电稳定可靠。机器人的无线通讯,支持 4G/5G 移动网络通讯,高通量的通讯设计确保了视频信息的高效传输和交互。巡检机器人及无线充电系统实物如图 2 所示。

机器人电气系统设计框图如图 3 所示。主控模块负责对无线充电模块进行管理和监测,并驱动电机执行运动行走,通过各类接口搭载多种传感器,可以实现自身定位、声音、图像的采集和环境温湿度的监测。

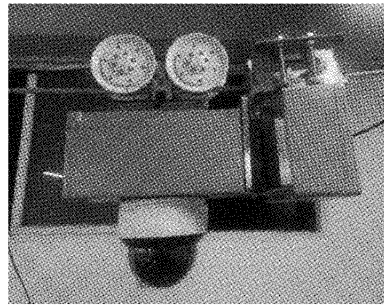


图 2 巡检机器人及充电系统

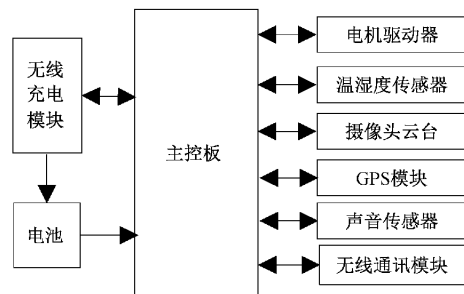


图 3 巡检机器人的电气系统框图

2 系统软件设计

本系统采用 C# 设计了一套专用软件,对机器人进行远程操控,完成巡检任务的全流程管理。机器人巡检具有自主巡检和遥控巡检两种操控方式,其中自主巡检又分为哨兵模式和巡逻模式,哨兵模式下,机器人能够主动观察线路通道上的房屋、树木、塔吊、烟火、导线异物、工程车辆等对线路造成的潜在威胁,并及时预警处理;巡逻模式下,机器人重点对线路的杆塔、塔基、金具、铭牌等信息进行监测和识别分析,对缺陷和异常及时发出预警。

程序的运行依次包括对当前巡检任务的检查、删除或新建巡检任务、填写机器人巡检信息等。在巡检信息填写中,需要对巡检点编号、预置位编号、开始与结束时间、停留时间等必要信息进行填写,确保机器人接收到指令后能够正确处理。软件的任务流程管理设计框图如图 4 所示。

图 5 为软件系统的主界面。左侧①为视频播放选项,可选择机器人传输并保存在本地的视频流进行播放;②为视频播放主界面,可最多同时播放 16 个巡检机器人的检测视频流,图中为四窗口显示,其中右下角显示无信号,则该窗口没有连接机器人或机器人出现通信故障;③处控件可实现云台转动、调焦等操控,以实现精确视角控制;④处控件控制机器人前进与后退,长按鼠标还可实现机器人的连续动作;⑤处控件可以查看已配置完成的巡检项列表、删除预置位和巡检项记录、调用预置位等功能。

3 智能巡检算法研究

3.1 巡检图像数据集的构建

为了实现智能化架空输电线路巡检的功能,需要构建

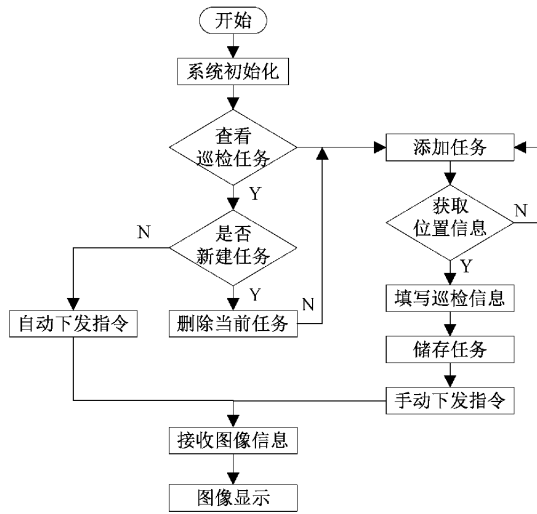


图 4 软件系统流程

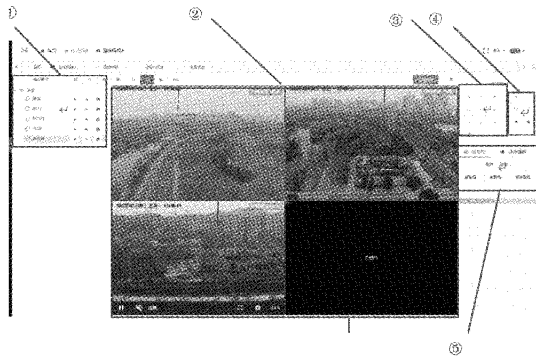


图 5 软件界面

架空输电线、杆塔金具及缺陷样本的数据集,为深度学习智能检测算法的训练和测试提供保障。

通过机器人系统的上线测试,共采集包含杆塔、导线、金具等各类目标对象的高清图像 14 000 多幅,人工标注各类样本 25 000 多个,构建的数据集部分图像如图 6 所示。

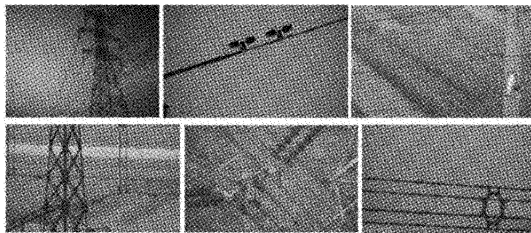


图 6 输电线及金具数据集部分图像

同时,多种途径收集各类架空输电线路缺陷照片,包括导线异常、底线锈蚀、导线烧伤、金具锈蚀等 34 种缺陷,构建缺陷检测数据集,该数据集部分图像如图 7 所示。

3.2 YOLOv4-M 算法

基于深度学习的目标检测算法相对于传统的目标检测

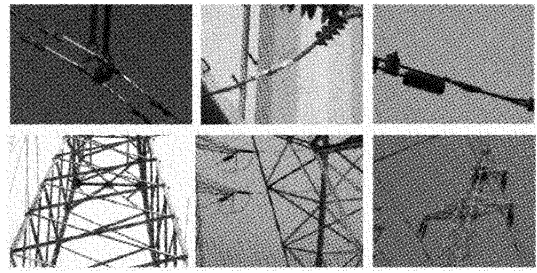


图 7 建立的缺陷数据集部分图像

算法具有精度高、鲁棒性高、实时性强等特点^[11-12],而基于深度学习的目标检测算法也分为基于区域的卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)算法和基于回归的目标检测算法,后者的算法主要有 YOLO(you only look once, YOLO)系列检测算法等^[13]。由于对检测算法的实时性要求较高,故采用 YOLOv4 算法模型对输电线及金具、缺陷进行检测,并对其进行改进^[14]。

YOLOv4-M 模型在 YOLOv4 基础上的改进主要包括:

1) 数据增强处理

针对室外复杂多变的光照环境、故障信息不明显、缺陷样本数量少等特点,通过各种翻转、旋转、缩放、裁剪、位移等方式扩充数据集^[15],增强模型训练的泛化性能。

2) 优化先验框

由于数据集中缺陷点具有尺寸变化大、形状各异等特性,采用 K 均值聚类(K-means)方法根据缺陷图像不同的输出尺度来优化模型目标检测的先验框尺度。

3) 改进模型结构

YOLOv4-M 模型如图 8 所示,使用了 5 个基本组件: CBL 由 Conv+Bn+Leaky_relu 激活函数三者组成;CBM 是 YOLOv4 网络结构中的最小组件;Res unit 借鉴 Resnet 网络中的残差结构,让网络可以构建的更深;SP 采用 1×1 , 5×5 , 9×9 , 13×13 的最大池化,进行多尺度融合;SPx 借鉴 CSPNet 网络结构,由卷积层和 X 个 Res unit 模块拼接组成。

结构改进主要是对每个检测层前增加空间金字塔池化结构(Spatial pyramid pooling, SPP),将 PANet 层进行卷积以及上采样后的结果与 CSPDarknet53 的输出层进行拼接,再对其进行 5 次卷积输出到 Head 模块;预测输出端在原模型的基础增加了新的 152×152 检测层,提升算法对不同尺度目标物体的检测性能。

YOLOv4-M 模型的总损失函数 $loss$ 由置信度损失 $loss_1$ 、分类损失 $loss_2$ 以及回归框损失 $loss_3$ 三部分组成^[15],其公式如下:

$$v = \frac{4}{\pi^2} (\tan^{-1} \frac{w^{gt}}{h^{gt}} - \tan^{-1} \frac{w}{h})^2 \quad (1)$$

$$loss = loss_1 + loss_2 + loss_3 \quad (2)$$

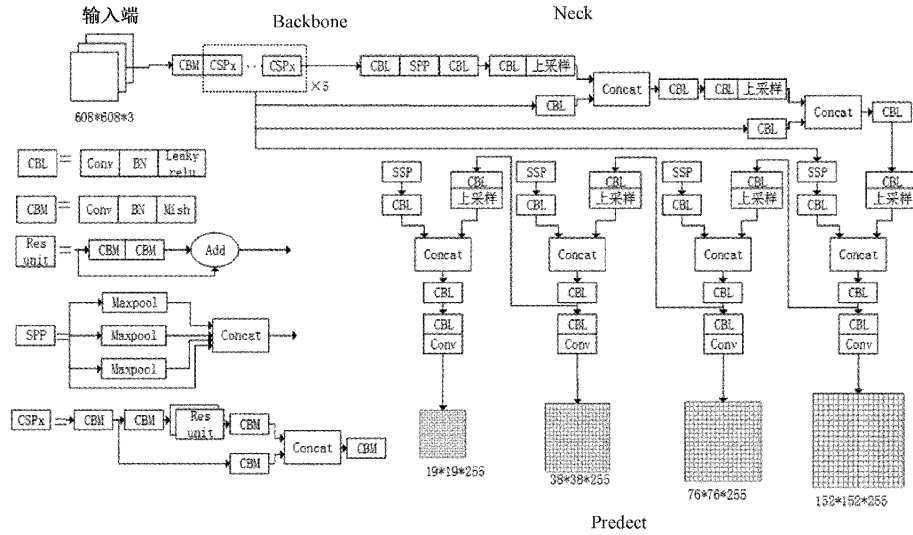


图 8 YOLOv4-M 目标检测模型

$$loss_1 = - \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^B I_{ij}^{obj} \left[\log(C_i^j) + (1 - \widehat{C}_i^j) \log(1 - C_i^j) \right] - \gamma_{noobj} \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^B I_{ij}^{noobj} \left[\widehat{C}_i^j \log(C_i^j) + (1 - \widehat{C}_i^j) \log(1 - C_i^j) \right] \quad (3)$$

$$loss_2 = - \sum_i^2 \sum_j^B I_{ij}^{obj} \sum_{c=1}^C \left[\widehat{p}_i^j(c) \log(\widehat{p}_i^j(c)) + (1 - \widehat{p}_i^j(c)) \log(1 - \widehat{p}_i^j(c)) \right] \quad (4)$$

$$loss_3 = 1 - IOU + \frac{\rho^2(b, b^{gt})}{c^2} + \frac{16}{\pi^2} \frac{v}{1 - IOU + v} \quad (5)$$

式(1)中, v 用来测试长宽比的一致性, w^{gt} 和 h^{gt} 为真框的宽、高, w 和 h 为预测框的宽、高;式(3)中 C_i^j 为第 (i, j) 个网格的置信度, I_{ij}^{obj} 为置信度损失的权重系数, γ_{noobj} 表示无目标;式(4)中, $\widehat{p}_i^j(c)$ 表示标签类别, p_i^j 表示为第 i 个预测为 c 类的类别。式(5)中, c 为 A、B 最小包围框的对角线长度。

4 实验分析

架空输电线路巡检机器人系统完成测试后,在户外实际线路上进行了巡检实验,对行走、充电、巡检信息采集及处理等各项功能进行了验证,在巡检过程中采集的图像数据,如图 9 所示。

4.1 金具与缺陷识别

使用训练好的 YOLOv4-M 模型来对采集到的导线金具进行识别,识别结果如图 10 所示。

针对导线异常、底线锈蚀、导线烧伤、金具锈蚀等种缺陷异常监测,算法对测试数据集中样本进行了实验。图 11 为系统对导线烧伤的识别,图 12 为系统对防震锤掉头的识别,图 13 为横担鸟巢的目标识别。

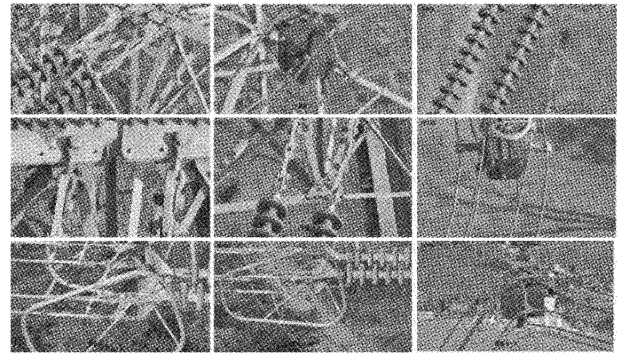


图 9 输电线及金具数据

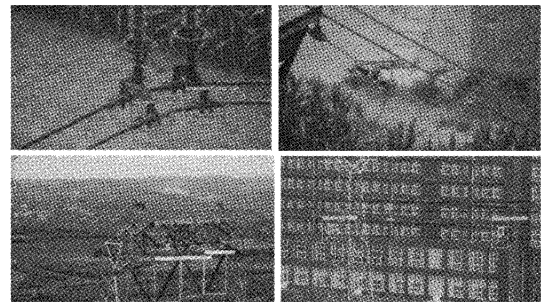


图 10 输电线及金具检测

从检测识别结果可见, YOLOv4-M 算法能够实时的识别出架空输电线路上的各类金具,以及导线烧伤、防震锤掉头、横担鸟巢等缺陷异常,并可以实现多目标的同时识别检测,对于较为远处模糊的图像和小目标物体,识别度仍能达到 90% 以上。

4.2 系统评价

在利用 YOLOv4-M 模型对建立的样本数据集进行训练时,其训练集上的误差收敛迅速。图 14 所示为缺陷样本的训练情况,训练 20 轮次,误差损失值就趋于稳定。

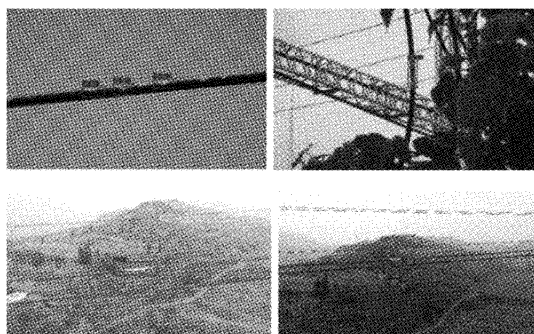


图 11 导线烧伤检

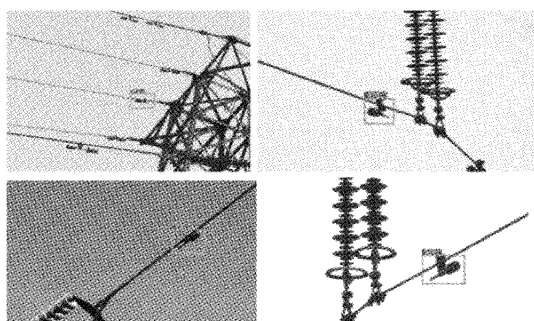


图 12 防震锤掉下检测

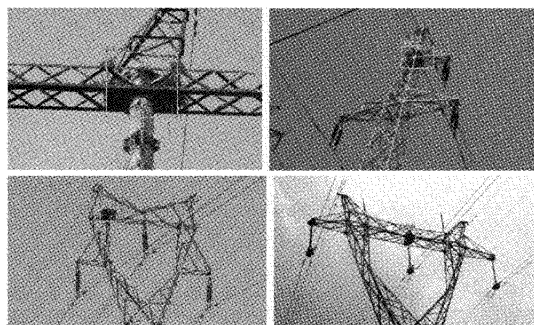


图 13 横担鸟巢检测

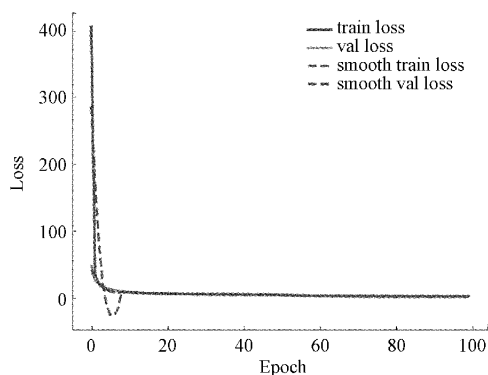


图 14 YOLOv4-M 训练损失值

为验证 YOLOv4-M 与其他算法的对比效果,本文以相同数据集分别使用 YOLOv3、YOLOv4、YOLOv4-M 进行模型训练和测试,得出不同模型的检测结果对比如表 1

所示。YOLOv4-M 在 0.5 阈值下的检测准确率相对其他两种模型有所提高,AP0.75 从 12.36% 增加到 60.55%,具有显著的优化效果。召回率相对 YOLOv4 也有 10.5% 的提升。

表 1 不同模型结果对比 %

模型	AP0.5	AP0.75	Recall	Ap
YOLOv3	53.43	12.36	50.00	80.00
YOLOv4	68.30	31.07	76.00	82.00
YOLOv4-M	88.05	60.55	84.00	91.00

使用 YOLOv4-M 模型对架空输电线金具及其缺陷进行检测,并统计相关结果如表 2 所示,除微小导线烧伤痕迹因样本较少导致检测准确度在 80% 左右,其他金具集缺陷的检测准确度均达到 90% 以上,数据集中的几类典型缺陷的平均检测也达到 97.6% 的精度,在 2080Ti 显卡的加速下,检测速度可以达到 45 fps。可见改进的目标检测识别模型 YOLOv4-M,对于检测效果及性能提升较大,在架空输电线路巡检中具有良好的应用效果,提高了复杂背景下架空输电线路巡检的目标识别检测精度和响应速度。

表 2 YOLOv4-M 检测精度及响应时间

组件及缺陷	导线 (烧伤)	防震锤 (掉头)	杆塔 (鸟巢)	间隔棒 (掉头)	平均
无缺陷	94%	96%	99%	99%	99.5%
耗时/ms	23	24	21	21	22
有缺陷	82%	97%	96%	97%	97.6%
耗时/ms	24	23	23	22	24

5 结 论

本文设计了一种档间架空输电线路巡检机器人系统,通过行走机构在一档跨距间进行巡检,并利用无线充电系统进行在线的能源补充,借助无线通讯模块实现远程的监测与交互。设计的基于 C# 的巡检机器人系统专业软件程序,可以实现对巡检机器人巡检信息的可视化展示,基于任务的流程设置,简化了对机器人的远程操控和管理功能。

在智能巡检算法研究方面,在 YOLOv4 算法基础上,通过数据增强、先验框优化、模型结构改进,建立了 YOLOv4-M 目标检测模型,并成功应用在了架空输电线路巡检的各类金具识别与缺陷检测上,提高了复杂背景下架空输电线路巡检的目标识别检测精度。

参考文献

- [1] 刘珍娜. 高压输电线路巡检机器人研究综述[J]. 科技经济导刊, 2016(30): 56.
- [2] 王吉岱, 王智伟, 孙爱芹, 等. 架空线路移动作业机

- 器人平台关键技术与应用研究[J]. 中国科技成果, 2019, 20(2): 64-65.
- [3] 钱迎鑫. 浅析架空输电线路智能机器人全自动巡检技术[J]. 军民两用技术与产品, 2017,(12): 154.
- [4] 张柯, 李海峰, 王伟. 浅议直升机作业在我国特高压电网中的应用[J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 45-46.
- [5] 于德明, 武艺, 陈方东, 等. 直升机在特高压交流输电线路巡视中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 29-32.
- [6] 彭向阳, 陈驰, 徐晓刚, 等. 基于无人机激光扫描的输电通道安全距离诊断技术[J]. 电网技术, 2014,(11): 3262-3267.
- [7] 陶承志, 黄禹铭, 李宇程, 等. 无人机在输电线路巡检中的应用[J]. 中国科技信息, 2016(16): 36-37.
- [8] 岳经纬, 陈悦寒, 张兴国, 等. 一种新型输电线巡检机器人设计及仿真[J]. 科技创新导报, 2020, 17(27): 58-62.
- [9] 彭向阳, 吴功平, 金亮, 等. 架空输电线路智能机器人全自主巡检技术及应用[J]. 南方电网技术, 2017: 11(4): 14-22.
- [10] 吴功平, 杨智勇, 王伟, 等. 巡检机器人自主充电对接控制方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(7): 118-124.
- [11] 卢笑, 曹意宏, 周炫余, 等. 基于深度强化学习的两阶段显著性目标检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6): 34-42.
- [12] 张培培, 王昭, 王菲. 基于深度学习的图像目标检测算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(8): 34-39.
- [13] 吴亚辉, 刘春阳, 谢赛宝, 等. 基于视觉深度学习的机器人环境感知及自主避障[J]. 电子测量技术, 2021, 44(20): 99-106.
- [14] 应斌, 唐斌, 潘俊杰, 等. 基于 YOLOv3 的电力杆塔检测算法研究[J]. 浙江电力, 2021, 40(5): 53-59.
- [15] 邵延华, 张铎, 楚红雨, 等. 基于深度学习的 YOLO 目标检测综述[J]. 电子与信息学报, 2022, 44: 1-12.

作者简介

王鹏, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制、电力系统安全和可靠性分析。

E-mail: sdumwb@sina.com

闫付乐, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统安全和可靠性分析。

E-mail: 731711585@qq.com