基于无人机巡检的电力线路智能缺陷识别技术研究

蔡润宇

南水北调中线信息科技有限公司　北京　100000

摘　要：随着电力系统的不断增大，输电线路巡检维护工作也面临着越来越大的困难。传统的手工巡检方法费时费力，而且安全性不高，周期较长，不能适应现代社会对于电网安全稳定运行的要求。而无人机巡检由于灵活方便，成本低，覆盖面广等原因，在电力线路上的应用日益广泛。但是无人机拍摄得到大量照片需要人工判断，容易造成主观性强，误判漏判率高以及不能及时响应等问题。本文从无人机巡检的角度出发研究电力线路智能化缺陷检测方法，主要介绍了图像预处理，目标检测，缺陷分类定位等相关内容，介绍了目前常用的深度学习，计算机视觉等人工智能技术用于缺陷识别的方法，以及如何利用多种信息结合，边缘计算等方式提高准确度。同时对目前存在的小样本学习，恶劣环境影响以及模型鲁棒性等问题进行了分析并提出了相关解决方案。以便更好地服务于智能电网自动化检修。

关键词：无人机巡检；电力线路；缺陷识别；深度学习；计算机视觉

引言

电力线路是输电重要组成部分，在户外运行容易遭受雷击、覆冰等问题，出现各种问题，影响电力供应。传统的有人工或者直升机巡检方式效率低下，成本高昂并且存在一定的安全隐患。近年来，无人机携带高分辨率相机以及红外热像仪等装置大大提高了巡检质量和范围，但是每次巡检都会产生成千上万张照片，依靠人工识别费时费力而且错误率高达 30% 以上。因此，智能缺陷检测方法被提出，结合计算机视觉以及深度学习进行电力设备及其缺陷的自动检测、分类和定位，极大地提高工作效率，减少人为因素造成的失误，有利于及时报警以及自主巡检。本文总结了相关研究工作的最新成果，介绍了主要的方法和技术难点，指出了存在的挑战并提出了建议，推动电力巡检向智能化发展。

1 无人机巡检系统概述

无人机电力巡检系统主要采用多旋翼、固定翼及复合翼垂直起降无人机平台：多旋翼机动灵活，适合近距离拍摄杆塔和绝缘子；固定翼续航强，适用于大范围线路巡视；复合翼则兼顾两者优势。传感器配置决定检测能力，可见光相机用于识别外观缺陷（如断股、鸟窝），红外热像仪探测接头过热或劣化绝缘子，紫外成像仪捕捉电晕放电，激光雷达则获取三维点云以分析弧垂与树障距离，多源传感器融合可显著提升缺陷发现率。巡检模式分为人工操控与自主航线飞行，后者通过预设航点和 RTK 厘米级定位实现标准化、可复现的数据采集，并结合激光雷达仿地飞行保持拍摄距离恒定[1]。为保障图像质量，需在光照均匀条件下作业，并针对逆光、雾霾或遮挡等复杂场景优化曝光、对焦及拍摄角度，必要时采用环视方式全方位记录设备状态。

2 电力线路常见缺陷类型与特征

依据《输电线路状态检修导则》中规定，一般缺陷有如下几类：①绝缘子类：伞裙破损、钢帽锈蚀、污秽严重等；②导线类：断股、磨损、散股等；③金具类：均压环偏移、防震锤滑移、线夹松动等；④通道隐患：鸟巢、树障、飘挂物等。这些缺陷大小悬殊（小到几毫米细丝，大到数米大鸟巢）、纹理各异，而且有些缺陷很难区分其是否为缺陷，增加了识别难度。

3 基于无人机巡检的智能缺陷识别关键技术

3.1 图像预处理

无人机拍摄的照片由于存在运动模糊、光照变化、雾霾等因素的影响，在未经处理的情况下用于检测会造成较大影响。因此需要对这些照片进行一些处理来突出目标细节并且减少噪声以及使所有照片大小一致。一般而言有以下几种方式：（1）去模糊：使用维纳滤波或者基于神经网络的 DeblurGAN 去除运动模糊；（2）去雾：用暗通道先验或者 AOD-Net 等方法增加对比度；（3）光照调整：用直方图均衡化、Gamma 变换或者 Retinex 来解决光照不均问题；（4）增强图像：用超分辨率恢复小型物体；（5）标注帮助：对图片进行裁剪、翻转、缩放、颜色抖动等方式增加训练集多样性。

3.2 目标检测算法

目标检测任务是在图像上检测出电力设备（例如绝缘子、防震锤、线夹）并进行分类。传统的做法是基于手工提取特征（HOG、LBP、SIFT）结合滑动窗口以及分类器（SVM、Adaboost）的方法，但是这种方法鲁棒性较差，无法应对复杂背景。目前最常用的方法是基于深度学习的方法，主要有两种类型，即两阶段检测器和单阶段检测器[2]。两阶段检测器以 Faster R-CNN 为代表，先产生候选框，再对每个候选框进行分类及边界框回归，虽然准确率较高但是速度较慢。而单阶段检测器如 YOLO 系列、SSD、RetinaNet，直接回归目标的位置以及类别，速度快，适用于实时性要求较高的场合。对于电力线路巡检的应用场景下，改进型的 YOLOv5、YOLOv8 等在 NVIDIA Jetson 边缘计算平台上可以实现 30 帧以上每秒的效果。为了提高模型的效果，学者们也提出了许多方法来改进这些算法：第一，使用注意力机制（比如 CBAM、SE 模块）加强重要的特征通道；第二，使用特征金字塔网络（FPN）整合不同尺度的信息从而解决小目标（例如远距离的绝缘子）检测的问题；第三，用 Transformer 结构（例如 DETR）代替传统的卷积神经网络利用自注意力捕捉整个图的整体语义，对于被遮挡的目标有更好的鲁棒性。

3.3 缺陷分类与语义分割

根据缺陷特点可以使用分类网络或者分割网络。像绝缘子自爆、防震锤脱落这类有明显存在标识符的缺陷可以用单独一个分类网络（比如 ResNet、EfficientNet）来对裁剪出来的设备图片做二分类或者多分类。而像绝缘子裂纹、导线断股这种需要准确定位缺陷位置的情况则适合用语义分割或者是实例分割的方法。U-Net 及其衍生版本（Attention U-Net、U-Net++）在医学图像分割上表现良好，在电力缺陷上也可以做到像素级别的标注。Mask R-CNN 是在目标检测的基础上增加一个分割支路从而可以输出缺陷的掩膜[3]。缺陷严重程度估计是分类的一个扩展，可以建立一个回归模型预测损坏的比例或者裂缝长度这样的数值也可以用轻/中/重三个等级来进行划分。但是缺陷样本的类别不平衡的问题，正常样本远远大于缺陷样本，这样直接训练会造成模型偏向多数类。常用的解决方法有关过采样（如 SMOTE）、欠采样、Focal Loss 损失函数、以及生成对抗网络（GAN）生成缺陷样本等。

3.4 多源数据融合识别

单一可见光图像对部分缺陷不能有效识别，比如绝缘子内部低零值缺陷在可见光下无明显表现，但是红外热像可以发现其温差；导线内部断股在初期被外面其他股线遮挡，在紫外成像下可以观察到轻微电晕放电。所以多种传感器信息结合有利于提高识别率。而多源传感器信息融合方式有数据级融合、特征级融合以及决策级融合。数据级融合是将可见光、红外、紫外图像进行配准之后作为多个通道输入，但是需要精确的空间一致性；特征级融合是从不同模态中提取特征然后合并或者加权求和，在此基础上使用多模态深度学习网络（如多分支 CNN）进行联合训练；决策级融合是对各个模型预测结果进行投票或加权平均（如 D-S 证据理论），这种方法简单并且具有一定的鲁棒性。一般情况下采用红外与可见光双光相机同时拍摄，由可见光定位到相应位置之后提取该处对应的红外温度信息，判断是否发热缺陷。

3.5 边缘计算与在线识别

传统的做法是把图片传到云端或者地面站进行分析，这会导致很大的时延以及消耗大量的网络带宽，在一些 4G/5G 信号较差的地方，例如偏远山区，不能满足及时告警的需求。而边缘计算是将检测模型部署到无人机上的计算单元或者是杆塔处的边缘网关上，进行本地化处理[4]。机载计算单元比如 NVIDIA Jetson Xavier NX、华为 Atlas 200 等，有较高的算力可以运行轻量化的深度学习模型，模型轻量化的方法有以下几点：剪枝（移除无用连接）、权重量化（INT8 量化节省内存及运算量）、知识蒸馏（用大模型指导小模型训练）、采用轻量级网络结构（MobileNet、ShuffleNet、GhostNet）代替重模型。经过这些方法优化之后，可以在几十毫秒之内完成对一张图片的缺陷判断，一旦检测出危险缺陷就会让无人机停止并重新拍摄或者直接发出警报，极大地提高应急反应速度。

4 技术挑战与应对策略

4.1 小样本与类别不平衡问题

电力缺陷样本存在严重的长尾问题：常见的缺陷（如绝缘子污秽等）样本丰富，但很少见的缺陷（如导线断股、均压环脱落等）样本稀少，而深度学习需要大量的标注样本，在小样本的情况下容易发生过拟合现象。为了解决这个问题可以采用以下几种方法：（1）基于元学习（MAML、ProtoNet）的思想让模型会“学习”，只需要少量的样本就可以泛化到新的缺陷类型；（2）基于迁移学习，在大规模的通用数据集（如 ImageNet、COCO 等）上进行预训练之后再针对电力缺陷的数据集进行微调；（3）通过 GAN 或者扩散模型生成高质量的假缺陷图片以增加小类别的样本数量；（4）使用半监督学习的方式用大量的无标签图片与少量的有

标签图片一起进行训练从而减少人工标注的工作量。

4.2 复杂环境干扰

野外环境光照变化大（强逆光、阴影）、天气恶劣（雨雾、雪、霾）、背景复杂（树林、建筑物、其它杆塔遮挡等）对检测造成很大影响。解决方法有：（1）建立大量不同天气、不同时间、不同角度的数据集并使用风格迁移（CycleGAN）把正常图片变为各种天气情况下的假图；（2）利用领域适应让模型由源域（实验室获取）迁移到目标域（真实野外环境）而不需要重新标注；（3）在预处理中利用基于物理的方法进行图像修复（例如大气散射去除薄雾）；（4）基于注意力机制使网络更加注重前景设备而不是背景。

4.3 模型泛化能力不足

由于不同的电压等级、不同的杆塔类型、不同的生产厂家的产品外观差别很大，在不同无人机拍摄条件下（高度、角度、分辨率等），同一个模型会出现性能急剧下降的情况，因此需要一个具有良好跨域泛化能力的模型。解决方案有以下几种方式：（1）在训练过程中加入领域随机化，在图片上随机调整亮度、对比度、分辨率等模拟不同的传感器特性；（2）使用集成学习的方式训练出多个结构不同的或者训练集不同的子模型然后进行表决来决定最后的结果；（3）设计一种可解释性的方法找出模型所关注的一些“虚假联系”，比如模型误判天空为绝缘子背景等，并用反事实的数据增强进行对抗。

4.4 实时性与精度权衡

由于边缘设备计算能力不足以及高精度模型（例如基于 Transformer 模型）参数量大、推断时间长，在保证一定检测速度的同时还需要保证较高准确率。一种方式是利用神经架构搜索（NAS）得到适用于该设备轻量化网络结构；另一种方法是根据图像难易程度进行动态选择，在较简单的图像上使用简单网络即可完成识别工作，在较为复杂的图像上则需调用更深网络来解决；还有一种方案即为云边结合的方式，在边缘侧先进行一次过滤操作，把疑似有问题图片传送到云端进一步判断。

5 结语

本文详细研究无人机巡检下电力线路智能缺陷识别方法。首先对无人机平台、传感器配置以及各类典型缺陷图像特征进行说明；其次着重介绍图像预处理、目标检测、缺陷分类与分割、多源数据融合和边缘计算等方面技术难点并阐述深度学习在这几个方面的应用。对于小样本、环境影响、模型泛化能力以及实时性等问题给出了元学习、域自适应、知识蒸馏以及云边协同解决方案。这项技术正在使电力运维由传统的“人工判读”变为“机器视觉”，可以做到全天候、全自动、高可靠监测，助力现代化智能电网发展，但目前还需进一步完善数据集生成、统一标准测试以及实际应用等工作以弥补理论研究与实践之间的鸿沟。

参考文献

[1] 张国辉, 董宇鹏, 孙学昌, 等. 无人机移动机场赋能电力线路智能化巡检 [J]. 无人机,2025,(S1):110-113.

[2] 蒋钰, 何强, 宋治, 等. 基于无人机的电力线路安全巡检系统设计 [J]. 电力安全技术,2022,24(6):40-42.

[3] 王冬生. 无人机技术在电力线路故障检测中的作用分析 [C]//《中国招标》期刊有限公司. 新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题（第三册）.[出版者不详],2025:737-741.

[4] 郭介愚, 刘建忠. 基于无人机的电力线路实时监测与隐患预警系统设计 [J]. 无人机,2025,(11):27-29.