

# 基于深度学习的高压输电线路异物智能检测技术研究综述

李一鸣 左 军

淮北万特科贸有限责任公司 安徽淮北 235000

**摘 要：**高压输电线路异物侵扰是造成电网故障的重要隐患，传统的手工巡检方式已经不能满足现代电网安全高效运维的要求。近些年来，以深度学习为根基的机器视觉技术，给输电线路异物智能检测提供了新的解决途径。本文对机器视觉在电力巡检中的发展过程进行了梳理，从早期的图像处理方法、传统的机器学习、以卷积神经网络和Transformer为代表的目标检测模型等。对主流的深度学习算法、小样本学习、多模态融合等改进方法进行重点评述；对复杂光照、天气变化、跨区域部署等各种场景下提高适应性的技术进行分析，包括域自适应、模型轻量化、在线增量学习、抗干扰后处理等；最后给出支撑7\*24小时稳定运行的端边云协同架构、高可用性保障手段并对未来数字孪生、可信人工智能的发展方向进行展望，给学术研究、工程实践提供系统的参考。

**关键词：**高压输电线路；异物检测；深度学习；目标检测；机器视觉

## 一、引言与电力巡检中机器视觉的发展演进

### （一）高压输电线路安全运维的挑战与异物危害

高压输电线路长期处在复杂的自然环境和人为环境中，很容易受到外部异物的侵袭。风筝线缠绕导线会形成相间短路，塑料薄膜覆盖绝缘子会使它的绝缘性下降，施工吊臂进入安全距离内会造成放电事故，鸟巢堆积容易引起火灾。异物不但会危害电网安全，而且会造成大面积停电，给国家造成巨大的经济损失和社会影响。传统的依靠人工徒步或者望远镜巡检的方式周期长、效率低、盲区多，不能对数千公里线路进行高频次全覆盖监测，在山区、河网或者高海拔地区，巡检人员作业风险高、成本大。因此急需一种自动化的、智能化的、全天候的异物检测方式来提高电网主动防御能力。

### （二）传统人工巡检与早期自动化方法的局限性

在智能视觉技术没有普及之前，电力系统主要是通过定期人工巡检、用红外测温等辅助手段来进行隐患排查。虽然部分单位使用固定摄像头或者直升机航拍，但是图像判读仍然主要依靠有经验的运维人员，主观性强、标准不一，大量的图像数据无法高效处理<sup>[1]</sup>。早期的计算机视觉方法有Canny边缘检测提取导线轮廓、Hough变换识别直线结构、颜色空间阈值分割定位彩色异物等，在理想光照和简单背景下有较好的效果。但是实际输电场景中光照剧烈变化、背景植被复杂、天气干扰频繁，使得该类方法鲁棒性差、误报率高，不能满足工程实用的要求。

### （三）机器视觉在电力巡检中的引入与阶段性演进

由于图像传感器价格下降，计算平台性能提升，机器视觉逐渐成为电力巡检的主要技术手段。初期使用传统机器学习，研究者手工设计特征，例如局部二值模式、方向梯度直方图等，再用支持向量机或者随机森林分类器做异物判断。该方法在特定数据集上可以达到中等精度，但是特征泛化能力差，当遇到新的异物类型或者不同的地域线路时，性能就会急剧下降。深度学习的出现使这种情况发生天翻地覆的变化。卷积神经网络可以自动地获得从低级边缘到高级语义的多层特征表示，提高目标检测的准确率以及适应性<sup>[2]</sup>。从2015年开始，Faster R-CNN、YOLO、SSD等端到端检测模型被广泛应用于电力系统当中，输电线路异物检测进入智能化的新时代。

## 二、面向异物识别的深度学习算法体系评述

### （一）异物类型与检测难点分析

输电线路的异物形态千差万别，尺度范围很大，出现的位置也是随机的。轻质飘浮物如塑料袋受风力作用形变大，成像模糊；小型异物如断线风筝在图像中所占面积很小，容易被背景噪声所淹没；大型施工机械虽然尺寸大，但是多位于图像边缘或者远距离视角，分辨率不够<sup>[3]</sup>。异物与导线、金具、绝缘子等本体结构在颜色、纹理上很容易混淆，增大了识别的难度。因此检测算法必须要有高召回率、高准确率、强抗干扰能力。

### （二）主流目标检测模型在电力场景中的适配与改进

两阶段检测器Faster R-CNN因为其区域建议机制，

在复杂背景下对小目标和遮挡目标的识别能力强，被广泛用于高精度的离线分析。但是推理速度一般达不到每秒10帧，不能在无人机上运行。研究者提出了许多改进的方法，加入注意力机制加强特征提取、设计多尺度融合模块提高小目标检测能力。单阶段模型如YOLO系列由于结构简单、推理速度快，因此是实时巡检系统首选的模型。YOLOv5、YOLOv8通过改进的锚框设计、损失函数、训练方法，在保证30帧每秒以上速度的同时，大幅度提高了小异物的检测率。近期基于Transformer的目标检测模型DETR及其变体开始探索，其全局建模能力有利于区分密集背景下的异物，但是计算开销仍然限制着它的大规模应用。

### （三）小样本与弱监督学习策略应对标注稀缺问题

高质量的标注数据是深度学习模型训练的基础，但是输电线路异物样本很少，标注成本高。为了克服数据瓶颈，研究者使用迁移学习，在COCO这样的通用数据集上预训练模型之后再微调到电力场景上，从而提高初始性能。进一步地，小样本学习方法元学习、原型网络，用来用少量的样本来快速适应新异物类别<sup>[4]</sup>。用图像级的标签代替边界框标注，使用类激活图定位出潜在的异物区域，可以大大地降低标注负担。使得模型迭代、部署周期大大缩短，在工程中应用起来非常方便。

### （四）多模态融合方法提升识别鲁棒性

单一的可见光图像受到光照、雾霾的影响较大，红外热成像可以得到异物与导线之间的温差特征，激光雷达点云可以得到准确的三维空间信息。多模态融合依靠互补信息来加强检测的可靠性。可见光与红外图像在特征层或者决策层进行融合，能够较好地识别出在夜晚或者雨雾天气条件下出现的异物；点云和图像联合建模可以判断出异物是否真正进入到安全距离内，避免平面投影造成误判。虽然多模态系统硬件成本较高，但是已经逐步在一些重要的输电通道上进行试点应用。

## 三、多场景适应性优化与系统鲁棒性增强技术

### （一）复杂环境干扰因素建模

实际巡检环境动态变化，强光反射造成导线过曝，雨雪雾霾使图像清晰度降低，植被摇曳造成动态干扰，都会对检测稳定性造成严重影响。为了解决上述问题，研究者创建出包含各种天气、光照、季节条件的合成或者实采数据集，用来训练泛化能力更强的模型<sup>[5]</sup>。同时在预处理阶段使用图像增强技术，自适应直方图均衡化、去雾算法、超分辨率重建等来提高输入图像质量，给后

续的检测提供更好的基础。

### （二）域自适应与迁移学习在跨区域部署中的应用

不同地区的输电线路结构、背景地貌、常见异物类型不一样，造成一个地区训练好的模型在另一个地区性能降低。域自适应技术就是最小化源域和目标域的特征分布差，从而使模型迁移时零障碍。无监督域自适应方法，例如对抗训练、特征对齐等，不需要目标域标注就可以提高模型的适应性。利用联邦学习框架可以让各个区域节点共同训练出全局的模型，保护了数据的隐私又提高了模型的泛化能力，给跨省电网协同巡检提供了一条新的途径。

### （三）轻量化模型设计与边缘计算部署

为了满足无人机、巡检机器人等移动平台实时性、功耗的要求，模型轻量化就成为关键技术。研究者利用网络剪枝去掉多余连接、参数量化把32位浮点数转成8位整数、知识蒸馏用大模型指导小模型训练等方式，在几乎不损失精度的前提下大大减小了模型的体积和计算量。典型轻量化模型MobileNet、YOLO、EfficientDet Lite等都可以在国产AI芯片上完成端侧部署，推理延迟小于50ms，可以实现每秒20帧以上异物检测。

### （四）在线增量学习与模型自更新机制

电网运行环境不断改变，新型异物不断出现，静态模型很难长期有效。在线增量学习让系统在部署之后不断接收新样本来不断更新模型，从而避免出现灾难性遗忘。设计记忆回放机制、弹性权重固化等手段，可以使模型在学会新的类别之后，仍然保留以前的知识。部分系统可以云端自动启动模型重训练流程，边缘设备上报未知样本达到阈值后就会触发标注、训练、下发的一整套闭环。

### （五）抗干扰后处理策略

为了降低误报率，系统一般都会用时空一致性校验。连续多帧检测结果做轨迹关联，剔除瞬时噪声，用地理信息系统判断异物位置是否靠近导线。除此之外，利用规则引擎进行二次过滤（面积阈值、长宽比限制等）来剔除非物理合理目标。后处理策略虽然会增加一些计算量，但是可以大大提高告警的准确率，是工程落地不可缺少的环节<sup>[6]</sup>。

## 四、7×24小时稳定运行架构与工程落地实践

### （一）端边云协同的智能巡检系统架构

为了使高压输电线路异物检测系统能够全天候、高可靠地工作，现代电力巡检系统大都采用了端边云协同

的三级结构。端侧采用轻量化深度学习模型完成无人机、巡检机器人或者固定摄像头的原始图像采集和初步推理,对异常物体进行初步判断并发出本地告警,减少数据传输带宽。边缘侧设在变电站或者区域汇聚节点处,高性能计算设备对接收到的多路端侧数据进行融合分析、结果核对、事件聚合,具有较强的模型承载能力、上下文理解能力,可以执行复杂的后处理逻辑。云端相当于系统的大脑,主要做全网巡检任务调度、模型训练更新、历史数据存储、可视化展示等工作,并且可以实现跨区域的知识共享、策略优化。分层架构可以保证响应的实时性,也可以实现资源的弹性扩展,是大规模线路智能巡检的基础。

### (二) 高可用性保障机制

7×24小时不间断运行的系统中,必须具备完备的容错、自愈能力。硬件上使用冗余电源、双网卡绑定、边缘节点集群部署等方法提高物理可靠性,软件上使用心跳监测、服务自动重启、任务队列持久化等手段保证单点故障不影响整个服务。通信链路使用多通道备份的方式,在4G、5G信号较弱的地方自动切换到卫星或者Mesh自组网,保证数据回传的连续性。另外模型推理引擎内部带有异常输入过滤、超时熔断,图像坏掉或者极端天气不会造成系统堵塞。这些高可用性设计一起构成了工业级应用稳定运行的基础。

### (三) 典型工程案例分析

近几年来,国家电网、南方电网在许多省份开展基于深度学习的异物智能检测规模化应用。某省级电网公司建立起了5000公里长的特高压线路无人机自动巡检系统,每天处理图像达到10万张以上,异物识别准确率达到92%以上,年减少人工巡检工时2万小时以上。案例可见沿海强台风区出现多起农膜飘挂预警时,用可见光、红外双模态边缘智能终端进行预警从而避免重大跳闸事

故。由以上可知深度学习技术已经从实验室走向了工程应用,被证实可以提高运维效率并降低安全风险。

### (四) 当前挑战与未来方向

尽管取得了很大进步,但是异物智能检测系统还存在一些问题。缺少统一标准的高质量标注数据集会阻碍算法的横向比较和迭代,模型可解释性差会降低运维人员的信任度,对抗样本攻击等安全风险还没有引起足够的重视。未来的发展方向就是创建共享开放的电力视觉基准平台,应用可信AI技术(不确定度估计、因果推理等)提升巡检水平,把异物检测系统嵌入到电网数字孪生系统中,由“看得见”过渡到“看得懂”再进入“能决策”。

### 参考文献

- [1]王海鹏,谭腾腾.基于深度学习的高压输电线路检测技术[J].灯与照明,2025,49(05):121-123.
- [2]李鑫.基于多无人机的智能化高压输电线路异物巡检研究[D].长春工业大学,2025. DOI: 10.27805/d.cnki.gccgy.2025.000099.
- [3]才大阔.基于改进YOLOv8n的输电线路异物巡检系统研究与实现[D].东北农业大学,2025. DOI: 10.27010/d.cnki.gdbnu.2025.000063.
- [4]王鸿鹏.基于深度学习的高压塔异物检测方法研究[D].沈阳理工大学,2025. DOI: 10.27323/d.cnki.gsgyc.2025.000042.
- [5]李中良.基于深度学习的多标签图像分类研究及在输电线路障碍物识别的应用[D].广东工业大学,2024. DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2024.001154.
- [6]代龙刚.基于深度视觉感知的电力系统多目标检测方法研究[D].沈阳航空航天大学,2023. DOI: 10.27324/d.cnki.gshkc.2023.000290.