

# Application of intelligent recognition technology of UAV inspection image in defect detection of UHV transmission line

Junqi Tang

China Energy Construction Group Yunnan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Power Grid Engineering Company, Kunming, Yunnan, 650051, China

## Abstract

In order to solve the problems of complex inspection scenes, various types of defects and low efficiency of manual judgment of UHV transmission lines, this paper proposes a method of applying intelligent recognition technology of UAV inspection images to transmission line defect detection. According to the structural characteristics of UHV transmission lines and their typical defect types, an intelligent defect recognition model based on deep learning algorithm is established. At the same time, combined with UAV inspection image acquisition technology and image preprocessing method, the automatic identification and accurate positioning of insulators, fittings, wires and foreign body defects are realized. This technology is applied to practical engineering and found that it can effectively improve the defect detection accuracy and inspection efficiency, in order to provide technical reference for the intelligent operation and maintenance of UHV transmission lines.

## Keywords

UAV inspection ; UHV transmission lines ; Defect detection ; Deep learning ; Intelligent identification

# 无人机巡检图像的智能识别技术在特高压输电线路缺陷检测中的应用

唐俊祺

中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司电网工程公司, 中国·云南 昆明 650051

## 摘要

为解决特高压输电线路巡检场景复杂、缺陷种类繁多以及人工判图效率低等问题, 本文提出一种将无人机巡检图像的智能识别技术应用于输电线路缺陷检测的方法。根据特高压输电线路结构特点及其典型的缺陷类型, 建立基于深度学习算法的缺陷智能识别模型, 同时结合无人机巡检图像获取技术和图像预处理方法, 实现对绝缘子、金具、导线以及异物缺陷的自动识别和精确定位, 并将此技术应用于实际工程中发现, 可以有效提高缺陷检测精度和巡检效率, 以期特高压输电线路智能化运维提供技术参考。

## 关键词

无人机巡检; 特高压输电线路; 缺陷检测; 深度学习; 智能识别

## 1 引言

特高压输电线路作为实现大容量、远距离送电的关键性设施, 由于所处环境恶劣及跨越距离长等特点, 在长时间自然环境以及运行过程中极易出现多种类、多样性的结构型缺陷, 对电网的安全可靠运行构成极大威胁。而传统的依靠人工巡视检查的方法存在着危险系数较高、工作效率较低以及受到地理环境因素限制较多等问题。无法满足特高压线路精细巡视的要求。采用无人机进行巡检可以提高巡检的覆盖率, 但是大量图片依靠人工判断还是会影响工作效率。因此,

【作者简介】唐俊祺(1987—), 男, 中国云南昆明人, 本科, 高级工程师, 从事架空输电线路设计研究。

本文将引入基于深度学习的图像智能识别技术, 实现缺陷自动检测与精准识别。

## 2 特高压输电线路特征及缺陷类型分析

### 2.1 特高压输电线路结构特征

特高压输电线路采用交直流混联架构, 核心部件包括导线、绝缘子串、金具、杆塔及附属设备。导线为高强度钢芯铝绞线, 导线分裂数 4~8 分裂, 分裂间距 0.4~0.6m, 耐受电压  $\geq 1000\text{kV}$ ; 绝缘子串主用复合绝缘子, 串长 10~15m, 均压环及均压屏蔽装置分布均匀; 金具有悬垂金具、耐张金具等, 连接精度  $\leq 0.5\text{mm}$ ; 杆塔主用猫头型、酒杯型钢结构, 高 60~100m, 埋藏较深, 下穿地基岩石或土层; 适用于山地、平原等多种地质地形状况; 线路长而分散, 沿线地区气候多变, 有大风、覆冰、雷电等恶劣环境的影响。

## 2.2 典型缺陷类型分类

特高压输电线路的典型缺陷共分为四类：导地线缺陷有断股、磨损、腐蚀、覆冰以及接头发热，其中断股缺陷根据其严重程度分为轻度（≤3根）、中度（3~6根）和重度（>6根）三个级别；绝缘子缺陷有积污、破损、闪络、自爆以及伞裙老化，其中绝缘子积污程度按照盐密度分为0~IV共五个等级；金具缺陷有变形、锈蚀、松动、脱落和缺销，主要故障类型为螺栓脱落；主要故障部件包括铁塔锈蚀、铁塔弯曲、铁塔下沉以及金具破损，其中对塔身稳定性的故障比较重要。各故障具有形状复杂、大小不一、背景噪声多等特点，对输电线路的安全可靠运行至关重要，及时准确地检测出故障是关键。

## 3 无人机巡检图像采集与预处理技术

无人机巡检图像采集采用“定点拍摄+巡航扫描”结合模式，针对导地线、绝缘子等关键部件，按5~10m拍摄距离、30°~60°拍摄角度进行定点聚焦采集；线路整体巡检采用巡航扫描模式，图像重叠率设置为30%~50%，确保无死角覆盖。预处理流程包含四步核心操作：使用自适应中值滤波结合小波阈值降噪的方法对含高斯及椒盐噪声的图像进行降噪以提高图像信噪比，并利用Retinex增强方法对

光照不均匀图像进行亮度和对比度调整来增强缺陷与背景之间的灰度差别，接着借助改进的Canny边缘检测以及语义分割方法精确提取出线路部件感兴趣区域，并去除天空、植物等多余背景；最终利用SIFT特征点法进行图像间的配准并用图像拼接方法得到整条线路的大致图景以供缺陷检测使用<sup>[1]</sup>。

## 4 基于深度学习的输电线路缺陷智能识别模型构建

### 4.1 缺陷智能识别总体架构

缺陷智能识别采用“数据输入层-特征提取层-缺陷检测层-结果输出层”四层递进架构，如图1所示。

数据输入层支持可见光、红外多模态图像同步输入，适配不同巡检场景数据需求；特征提取层由卷积层、池化层与注意力机制模块组成，通过多层卷积操作捕捉缺陷低级纹理特征，结合CBAM注意力模块强化关键缺陷特征权重；缺陷检测层包含区域生成与分类回归两个子模块，实现缺陷区域精准定位与类型判定；结果输出层输出缺陷坐标、类型、严重程度及置信度，生成标准化识别报告<sup>[2]</sup>。该架构通过模块化设计，实现特征提取与缺陷检测的高效协同，提升模型推理速度与识别精度。

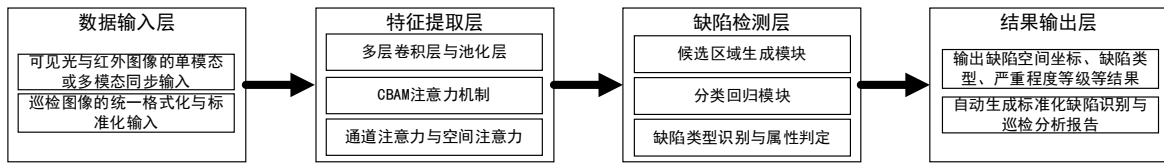


图1 缺陷智能识别架构

### 4.2 缺陷数据集构建与标注规范

数据集是由真实特高压输电线路巡检图像组成，并包含有导地线、绝缘子、金具及杆塔4大类共12个类型缺陷共计20000张图片的数据集，并以7:2:1比例划分成训练集、验证集和测试集。该数据集涵盖了不同光照条件下的、不同天气中的、不同地貌上的图像，具备较好的数据多样性与泛化性。对于每幅图像采用VOM格式进行标注，缺陷标注规范：首先经过人工筛选出不清晰、无效图片后，由相关运维检修及算法工程师共同完成缺陷标注工作，并用标注框框住缺陷部位，在标注信息中填写缺陷名称、大小、严重程度等信息；对于数量较少的缺陷进行SMOTE过采样处理并利用随机切割、翻转、增减亮度值以及添加高斯白噪声等方式实现对数据集的增强，以此来提高识别准确率。

### 4.3 缺陷检测算法选型与改进

缺陷检测以YOLOv8为基本检测算法，结合输电线路缺陷特性对其进行改进。将ECA通道注意力模块嵌入骨干网中，提高模型对小目标缺陷特征的学习效果；利用自适应锚框聚类方法根据训练集缺陷大小统计情况构建最佳锚框，从而获得更高的缺陷检测精度；将BiFPN特征金字塔结构引入到颈部网络中，进行多尺度缺陷特征有效融合，

从而解决小尺寸缺陷检测精度不够的问题；损失函数选用CIoU损失+Focal损失加权形式：

$$L_{total} = \alpha L_{CIoU} + (1 - \alpha) L_{Focal}$$

其中， $\alpha$ 为权重系数（取值0.7）， $L_{CIoU}$ 为边界框回归损失， $L_{Focal}$ 为分类损失，通过该损失函数缓解正负样本不平衡问题，提升模型对困难样本的识别能力<sup>[3]</sup>。

## 5 工程应用系统集成与运行流程

### 5.1 智能巡检系统整体架构

智能巡检系统采用“感知层-传输层-处理层-应用层”四层分布式架构，各层级通过标准化接口实现数据无缝流转，如图2所示。

感知层由多类型无人机巡检平台、高清/红外传感器、地面基站组成，负责巡检图像与环境数据的实时采集；传输层基于4G/5G+边缘计算架构，采用加密传输协议，实现采集数据的低时延、高可靠传输，同时完成部分轻量化数据预处理；处理层部署深度学习推理服务器、数据存储节点及算法引擎，集成缺陷识别模型、数据管理模块与诊断分析工具，承担图像智能分析、缺陷判定与数据存储任务；应用层包含运维管理平台、移动端APP与可视化监控中心，实现缺陷

查询、报表生成、工单下发等功能，并对运维人员进行远方遥控操作<sup>[4]</sup>。系统采用微服务架构技术，具有良好的弹性伸缩性和故障隔离特性，可以满足多种长度、复杂程度特高压线路运维场景。

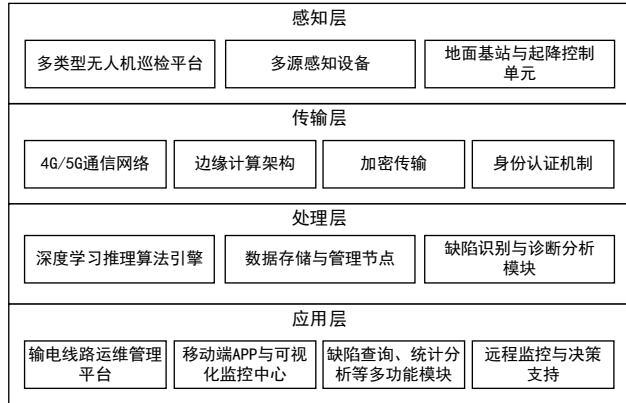


图2 智能巡检系统架构

## 5.2 与现有输电运维系统的融合方式

融合方式采用“接口标准化-数据互通-功能互补”策略，确保系统与现有输电运维平台无缝对接。接口层面，遵循 IEC 61850 标准协议，开发统一数据交互接口，支持缺陷数据、图像数据、诊断报告等信息的双向传输；数据层面，建立统一数据字典与共享数据库，将智能巡检系统的缺陷数据与现有系统的线路台账、检修记录、气象数据进行关联融合，实现数据同源同根与全生命周期追溯；功能层面，将智能识别结果嵌入现有运维流程，补充现有系统的智能化缺陷检测能力，同时借助现有系统的工单管理、资源调度功能，实现巡检任务与运维处置的协同联动<sup>[5]</sup>。融合后，运维人员可通过单一平台完成线路状态监控、缺陷识别、工单处理等操作，无需跨系统切换，大幅提升运维效率，同时为线路状态评估与预防性运维提供全面数据支撑。

## 6 工程应用实例与效益分析

### 6.1 特高压输电线路工程概况

某 ±1100kV 特高压直流输电工程线路长度为 896km，涉及多种地形，如山地、丘陵、沼泽地等，沿线气候多变，年平均雷暴日达 32d，年平均覆冰期长达 45d，全线共有铁塔 216 座，采用 8 分裂 LGJ 导线，安装复合型绝缘子和重型金具，主要被检测对象为导地线、绝缘子、金具、杆塔基础以及附属设施等。之前采取人工巡检的方式，存在着边远地区难以覆盖、容易发生漏检、运维费用高昂等诸多缺点，急需进行智能化改造。

### 6.2 无人机智能巡检实施方案

无人机智能巡检以“多旋翼+固定翼”巡检模式开展，固定翼无人机进行全线快速巡航扫描检查，多旋翼无人机对重点部位及疑似缺陷点进行定点详细检查；配备搭载有高清可见光相机及红外热成像仪的无人机，按照规划好的航线进行自动飞行，图像重叠率为 40%，主要设备拍摄距离不超

过 8m。将采集到的图像经过 4G/5G 传输到边缘节点预处理后，上传至处理层对图像使用改进 YOLOv8 模型进行缺陷识别。系统自动生成缺陷诊断报告，运维人员根据报告派发工单，开展精准检修与闭环管理，整个流程实现自动化与智能化协同。

### 6.3 应用效果对比分析

系统连续运行 6 个月，累计完成 3 轮全线巡检，应用效果与传统人工巡检形成显著差异，具体数据如表 1 所示。

表 1 应用效果

评估指标	传统人工巡检	无人机智能巡检	提升/改善幅度
全线巡检周期	45 天	8 天	缩短 82.2%
缺陷识别准确率	72.30%	94.80%	提升 22.5%
缺陷漏检率	18.50%	3.20%	降低 15.3%
单公里巡检成本	1280 元	420 元	降低 67.2%
人均巡检效率	2.3 公里/天	18.7 公里/天	提升 7.1 倍
夜间/恶劣天气巡检覆盖率	35%	98%	提升 63%
缺陷处置响应时间	72 小时	12 小时	缩短 83.3%

无人机智能巡检将全线巡检周期从 45 天缩短至 8 天，降幅 82.2%；缺陷识别准确率提升至 94.8%，漏检率降至 3.2%；单公里巡检成本降低 67.2%，人均巡检效率提升 7.1 倍。同时，夜间及恶劣天气巡检覆盖率达 98%，缺陷处置响应时间缩短 83.3%，全方位提升了特高压输电线路巡检的效率、精度与应急处置能力。

## 7 结语

本文详细研究了无人机巡检图像智能识别技术在特高压输电线路缺陷检测中的应用，包括了线路特点及缺陷类型划分、图像获取及预处理、深度学习模型建立及工程系统实现并进行案例检验等方面的内容。并对 YOLOv8 进行了改进，同时结合系统集成进行了完善。大幅度提高缺陷发现率及巡检覆盖率，降低运维工作量，有效改善传统巡检难题。未来可进一步探索多模态数据融合、多无人机协同巡检及数字孪生技术融合应用，持续提升特高压线路运维的智能化、精准化水平，为能源互联网安全稳定运行提供更强支撑。

### 参考文献

- [1] 咎鹏程,王旭.基于无人机巡检的输电线路智能检测与故障诊断技术[J].产品可靠性报告,2025,(10):54-55.
- [2] 徐小云,李欢欢,王红蕾,等.无人机航拍输电线路小金具缺陷检测方法[J].信息技术,2025,(09):173-178.
- [3] 刘文明,吉宝贤,陆丽娟,等.无人机巡检图像缺陷识别技术在架空线路中的应用[J].智能城市,2025,11(06):63-66.
- [4] 曹明兰,李亚东,张丽丽,等.架空输电线路无人机电力巡检的技术流程和发展趋势[J].装备制造技术,2025,(05):110-114.
- [5] 徐军,郭智鹏.基于无人机影像识别的输电线路自动巡检系统分析[J].电子技术,2024,53(11):268-269.