DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0052-05.

基于无人机巡检的极端环境架空输电线路缺陷检测系统

孙 喆[1]，周来宏[2]，张 琰[2]

（1.西安电力高等专科学校，陕西 西安 710000；
2.国网陕西省电力有限公司培训中心，陕西 咸阳 712000）

摘 要：针对当前极端环境架空输电线路缺陷检测存在的不足，提高极端环境架空输电线路缺陷检测效果，设计基于无人机巡检的极端环境架空输电线路缺陷检测系统。采集环境数据，传送至无人机伺服模块，电子调速器依据数据调节无人机舵机偏转角度与转速，采集架空输电线路图像，图像利传送至地面数据处理中心，缺陷检测单元利用基于决策树方法得到缺陷检测结果。实验证明：系统可以有效检测架空输电线路的断线、断股、绝缘子散落等缺陷，提升架空输电线路的运行安全性。

关键词：无人机巡检；极端环境；架空输电线路；缺陷检测；系统设计

中图分类号：TP277.3；TM755 文献标识码：A 文章编号：1003−7241(2025)02−0052−05

Defect Detection System of Overhead Transmission Lines in Extreme Environment Based on UAV Inspection

SUN Zhe[1], ZHOU Lai-hong[2], ZHANG Yan[2]

(1. Xi'an Electric Power College, Xi'an 710000 China;
2. Training Center of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xianyang 712000 China)

Abstract: In view of the deficiencies in the current detection of overhead transmission line defects in extreme environments, and to improve the detection effect of overhead transmission line defects in extreme environments, a detection system for overhead transmission line defects in extreme environments based on UAV patrol inspection is designed. The environmental data is collected and transmitted to the UAV servo module. The electronic governor adjusts the deflection angle and rotation speed of the UAV steering gear according to the data. The image of the overhead transmission line is collected and transmitted to the ground data processing center. The defect detection unit obtains the defect detection results using the decision tree method. The experiment shows that the system can effectively detect the defects of overhead transmission lines such as broken wires, broken strands, scattered insulators, and improve the operation safety of overhead transmission lines.

Keywords: UAV patrol inspection; extreme environment; overhead transmission line; defect detection; system design

0 引言

架空输电线路是架设于地面之上的电力线路，由架空绝缘电缆、绝缘子串、地线、输电线路杆塔以及接地装置组成[1]。架空输电线路因结构简单、电能传输量大、施工方便等原因被广泛应用，已成为电力系统输送电能环节的主要输电方式[2−3]。干旱、沙尘暴、强风、洪涝、暴雨或暴雪等极端环境，均会影响架空输电线路的输电安全，极端环境容易产生风偏闪络、输电线路覆冰、污闪、雷击跳闸以及外力破坏等故障缺陷，因此对架空输电线路的巡检必不可少[4]。传统架空输电线路巡检作业分为定期巡检与临时巡检，采用人工巡检方式存在巡检效率低等弊端。若因巡检失误，导致架空输电线路故障缺陷未能及时检修，从而产生电力系统重大事故，后果不堪设想[5]。

无人机即无人驾驶飞行器，无人机的应用范围逐渐扩宽。利用无人机进行电力系统的架空输电线路巡检，已经成为电力领域的新型作业方式。无人机巡检方式提升了架空输电线路巡检的工作效率，作业成本低，改善人工巡检的误判率高以及耗时过长的问题。伴随智能化产品不断发展，用户对用电质量以及电能稳定性需求逐渐增加[6−8]，电力系统也在逐步完善。近年来已有相关研究人员对输电线路巡检问题进行研究，张家盛等人以深度学习为基础[9]，通过无人机采集架空输电线路图像，并利用MobileNets计算机视觉模型处理图像，获取线路金具锈蚀缺陷检测结果，该方法虽然具备较好的检测效果，但未考虑巡检现场环境变化对架空输电线路造成的隐患；顾超越等人提出利用无人机巡检架空输电线路[10]，以Faster−RCNN算法为基础，放大无人机巡检线路图像特征细

*基金项目：陕西省教育厅2022年度科研计划(22JK0388)

收稿日期：2023−02−22

节,检测巡检架空线路细节缺陷,有效提升架空输电线路巡检质量。但由于该方法复杂度较高,易影响巡检时效,仍须改进。

针对以上方法在架空输电线路缺陷检测中存在的问题,设计基于无人机巡检的极端环境架空输电线路缺陷检测系统,通过无人机巡检极端环境下的架空输电线路缺陷,提升传统巡检作业效率,保障检修人员以及电力系统安全。

1 极端环境架空输电线路缺陷检测系统

1.1 架空输电线路缺陷检测系统总体结构

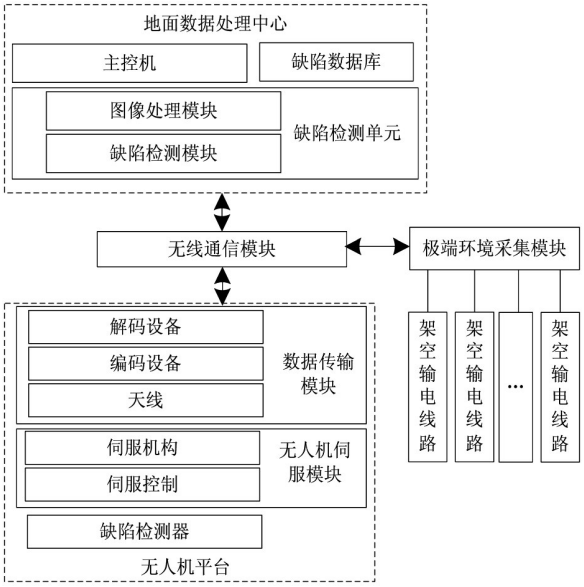


图1 缺陷检测系统总体结构图

考虑到极端环境对架空输电线路安全运行的影响,在架空输电线路杆塔上安装极端环境采集模块,利用该模块采集架空输电线路的极端环境参数,通过无人机采集架空输电线路图像及缺陷参数,实现基于无人机巡检的极端环境架空输电线路缺陷检测。极端环境架空输电线路缺陷检测系统的总体结构图如图1所示。分析图1的极端环境架空输电线路缺陷检测系统总体结构图,利用无人机平台搭载缺陷检测器,无人机飞行过程中,缺陷检测器利用双目相机采集架空输电线路图像,所采集的图像利用数据传输模块,进行编码与解码处理,解码处理后的架空输电线路图像利用无线通信模块传送至地面数据处理中心的缺陷检测单元;在架空输电线路上设置极端环境采集模块,利用极端环境采集模块,通过多个传感器结合,采集架空输电线路的环境数据。将所采集极端环境数据利用无线通信模块传送至无人机平台的无人机伺服模块,作为无人机舵机偏转角度以及无人机转速控制的依据。缺陷检测单元接收架空输电线路图像与极端环境数据后,利用图像处理方法和基于决策树的缺陷检测算法,输出极端环境架空输电线路缺陷检测结果。无人机伺服模块具备控制无人机飞行姿态功能,在无人机飞行过程中,地面需配备一名电力检修人员,通过遥控器控制无人机飞行姿态。无线通信模块接收极端环境数据以及架空输电线路图像等数据后将其传输至地面数据处理中心。检修人员利用主控机的显示界面,实时查看架空输电线路的极端环境数据以及缺陷检测数据,通过缺陷检测结果以及极端环境信息,制定架空输电线路检修作业内容,防止因检修时效问题或极端环境因素影响架空输电线路安全运行。

1.2 缺陷检测系统硬件设计

1.2.1 缺陷检测器

缺陷检测器搭载于无人机中,作用是在无人机飞行过程中采集架空输电线路图像。缺陷检测器以光学原理为基础,通过探头获取架空输电线路缺陷图像采集结果。缺陷检测器的结构图如图2所示。通过图2的光学检测器结构图可以看出,缺陷检测器中包含微控制器、光源、光学检测探头、双目视觉相机与通用寄存器等。缺陷检测器可以利用双目视觉相机采集架空输电线路图像。双目视觉相机选取可变焦镜头以及高性能成像芯片,即使镜头放大倍数至350 mm,依然能够采集到高分辨率的架空输电线路图像[11]。缺陷检测器的光学检测探头具有高精度测量与广角测量两种检测模式。缺陷检测器内置500 GB存储硬盘;最小显示单位为1 μm;广角测量范围为200 mm,适用于高精度大范围的架空输电线路测量。

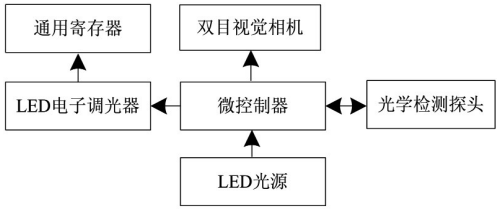


图2 缺陷检测器结构图

1.2.2 极端环境采集模块

利用极端环境采集模块采集架空输电线路所在位置的极端环境数据。极端环境对架空输电线路的影响主要体现在输电线路风偏、导线舞动、线路覆冰、微风振动以及输电线路污闪等。极端环境采集模块的结构图如图3所示。

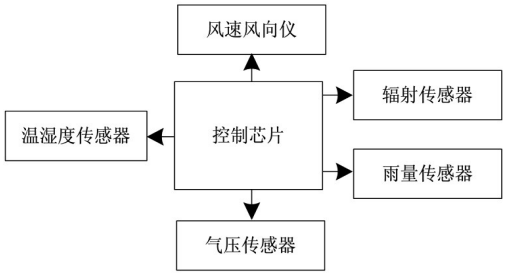


图3 极端环境采集模块结构图

分析图3的极端环境采集模块结构图可知，该模块由多个环境传感器以及控制芯片组成，分别介绍极端环境采集模块中各传感器如下：

(1) 风速风向仪。风速风向仪包含风速测量以及风向测量两部分。风速测量是利用微机技术同时测量瞬时与平均风速、风级等风力数据[12]，风速测量范围为0−30 m/s；风向测量是利用由风向标以及磁罗盘组成的自动指北装置测量风的方向。

(2) 温湿度传感器。温度传感器用于测量环境温度以及架空输电线路温度[13]，温度测量区间为−30℃至300℃。湿度传感器用于测量空气中的水含量，测量范围为0%−100%RH。

(3) 气压传感器。气压传感器主要用于测量大气压强，气压高代表天气为晴天；气压低则代表天气为阴天或有雨雪出现，通过气压传感器确定架空输电线路周围的天气变化。

(4) 雨量传感器。雨量传感器用于测量架空输电线路所在位置的降雨量、降雨强度、降雨初始与结束时间等，测量范围为0.3−10 mm/min。

(5) 辐射传感器。选取热电式太阳总辐射传感器作为极端环境采集模块的辐射传感器，该传感器用于测量太阳辐射能量，测量范围为0−2 000 W/㎡。

通过以上传感器采集架空输电线路所在位置的环境数据，合理安排架空输电线路检修作业，避免因极端环境影响架空输电线路安全运行。

1.2.3 无人机伺服模块

无人机伺服模块位于无人机平台中。选取微型旋翼无人机采集架空输电线路缺陷图像，利用无人机伺服模块控制无人机在空中的飞行姿态。无人机伺服模块的结构图如图4所示。

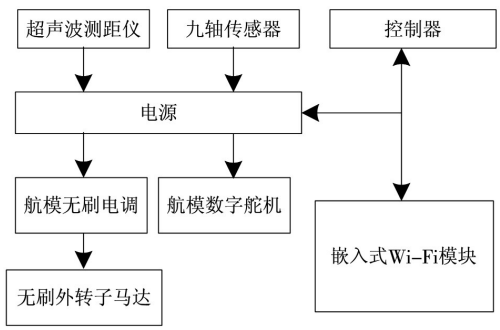


图4 无人机伺服模块结构图

通过图4的无人机伺服模块结构图可知，无人机伺服模块中的各部分元件电压均由电源提供，具体分析无人机伺服模块中各元件的运行情况如下：

(1) 无人机伺服模块采用脉宽调制技术为不同元件提供电压，其中航模无刷电调与数字舵机的电压为5 V，其余元件电压为3.3 V。

(2) 利用九轴传感器获取无人机陀螺仪等惯性导航器件数据，经电源模块传输至控制器中，以便解算无人机真实飞行姿态。

(3) 通过超声波测距仪测量无人机飞行数据，该数据包含无人机纵轴、垂直轴以及水平轴的飞行距离与高度，并由电源模块传输至控制器中。

(4) 利用嵌入式Wi−Fi模块支撑缺陷检测系统数据传输，同时支撑电源模块以及控制器之间数据的双向传输。

(5) 由控制器解析无人机飞行距离、高度以及姿态数据，获取无人机控制指令并将指令传输至电源模块中。

(6) 电源模块将控制指令传输至航模无刷电调模块中，利用航模无刷电调模块电子调速器，以所采集的极端环境数据为基础，调节无人机舵机偏转角度以及无人机转速等，实现地面检修作业人员对无人机飞行方向、角度及速度等飞行姿态的控制。

1.3 架空输电线路缺陷检测方法

1.3.1 基于高斯滤波算法的架空输电线路图像预处理

缺陷检测单元的图像处理模块，利用高斯滤波算法对所采集的架空输电线路图像进行滤波处理。设置x与y分别为架空输电线路图像的横轴坐标与纵轴坐标，定义高斯滤波算法表达式为：

$$G(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{1}$$

式中，σ代表高斯滤波二维标准差。

标准差是决定线路图像滤波处理效果的重要因素，标准差越高代表架空输电线路图像的滤波处理效果越好，反之则越差。经过预处理后的架空输电线路图像具备较好的平滑度，再对其进行干扰点与噪声去除处理，改善架空输电线路图像质量；通过直方图均衡化与中值滤波技术对改善后的架空输电线路图像进行增强处理，提取架空输电线路图像特征，完成架空输电线路图像预处理。

1.3.2 基于决策树的架空输电线路缺陷检测方法

依据所提取的架空输电线路图像特征，利用决策树算法，检测架空输电线路是否存在缺陷。缺陷检测单元接收架空输电线路图像后，利用最小二乘法对架空输电线路图像进行直线拟合处理，获取图像中心线。设置架空输电线路聚合度与阈值，计算架空输电线路聚合度的实际值与期望值方差，依据所设置阈值，确定该线路是否存在缺陷，完成架空输电线路缺陷检测。

定义架空输电线路的聚合度的公式如下：

$$J=Sgn(Kx_i+B-y_i)*\frac{Kx_i+B-y_i}{\sqrt{K^2+1}} \tag{2}$$

式中，K与B分别表示架空输电线路图像中心线与计算方差。

架空输电线路缺陷检测阈值表达式如下：

$$R=1.5\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}J \tag{3}$$

式中，m为待检测缺陷的架空输电线路数量。

架空输电线路缺陷检测的流程图如图5所示。以无人机所采集的架空输电线路图像为基础，建立架空输电线路缺陷样本数据库，通过图像处理与缺陷特征检测判断架空输电线路缺陷类型。分析图5可知，架空输电线路缺陷检测方法采用线路图像增强、图像分割以及图像分类等技术处理所采集图像，提取架空输电线路缺陷特征，利用决策树算法分类架空输电线路图像特征，对比架空输电线路图像特征与缺陷数据库内的缺陷特征后，获取架空输电线路缺陷检测结果。

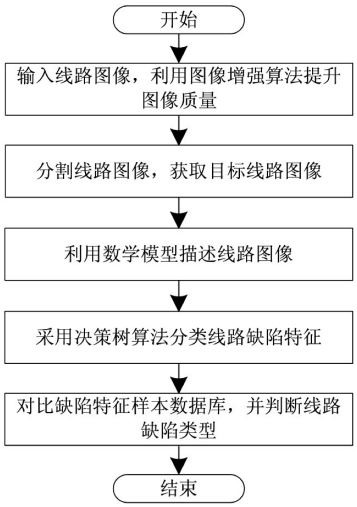


图5 架空输电线路缺陷检测流程图

2 系统测试

为验证所研究基于无人机巡检的极端环境架空输电线路缺陷检测系统的整体性能，将所设计系统应用于某电力公司中。该电力公司目前共运行74条架空输电线路，其中220 kV架空输电线路61条；500 kV架空输电线路13条。选取八旋翼无人机搭载双目视觉相机，该无人机的巡航速度为0−15 m/s，最大抗风能力为6级。选取我国北部的某区域作为研究区域，该区域冬季温度较低，容易出现线路覆冰等情况。极端环境是容易造成架空输电线路缺陷的主要原因。

通过无人机巡检该电力公司辖区内架空输电线路图像，无人机工作状态图像如图6所示。图6为地面工作人员拍摄的无人机巡检架空输电线路图像，本文系统将极端环境采集模块安装于架空输电线路杆塔上，通过极端环境采集模块中的传感器采集极端环境数据信息，便于线路检修人员了解极端环境的具体情况，从而制定相应的线路检修措施。架空输电线路情况由无人机搭载的缺陷检测器拍摄，利用无人机的飞行过程对架空输电线路进行巡检，处理架空输电线路的巡检图像获取缺陷结果，实现极端环境下的架空输电线路缺陷检测。



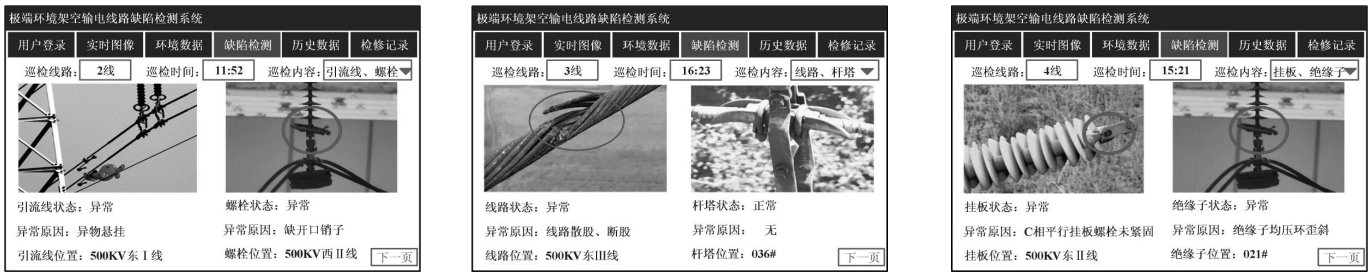
图6 无人机巡检架空输电线路图像

极端环境对架空输电线路存在较强的破坏力，实时采集架空输电线路的极端环境数据，利用环境数据观测天气变化是预防线路事故产生的方法之一。采用本文系统采集极端环境数据，统计2021年12月1日～10日架空输电线路的极端环境数据，统计结果如表1所示。通过表1实验结果可以看出，采用本文系统可以有效采集架空输电线路所在位置的极端环境数据，所采集的架空输电线路的极端环境数据，作无人机伺服模块的电子调速器，调节无人机舵机偏转角度以及无人机转速等飞行参数的基础。

表1 极端环境数据采集结果

日期	温度/℃	湿度/%RH	大气压力/kPa	风向
1日	-5	88	75	东北风
2日	-18	87	84	西南风
3日	-6	85	81	北风
4日	-13	88	94	南风
5日	-12	79	82	西北风
6日	-4	85	76	北风
7日	-5	89	73	东北风
8日	-6	87	98	西北风
9日	-17	84	91	东北风
10日	-5	86	88	北风

为验证本文系统对架空输电线路缺陷检测的有效性，通过本文系统的显示界面，查看无人机巡检架空输电线路缺陷情况，缺陷检测系统的架空输电线路缺陷检测界面图如图7所示。通过图7的架空输电线路缺陷检测系统界面可以查看无人机所采集的线路图像、极端环境数据以及线路或杆塔缺陷检测结果等信息。由图7可知，本文系统通过无人机采集的架空输电线路图像，确定2号巡检线路的500 kV东Ⅰ线出现引流线异物悬挂缺陷，为异常运行状态；500 kV西Ⅱ线出现缺开口销子缺陷，为异常运行状态；3号巡检线路的500 kV东Ⅲ线出现线路散股、断股缺陷，为异常运行状态；36#杆塔状态正常，未检测出缺陷情况。4号巡检线路500 kV东Ⅱ线出现C相平行挂板螺栓未紧固缺陷，为异常运行状态；021#绝缘子



(a) 2号巡检线路 (b) 3号巡检线路 (c) 4号巡检线路

图7 缺陷检测系统界面图

均压环歪斜，为异常运行状态。经检修人员现场检测，相关线路状态符合系统缺陷检测结果，证明设计的缺陷检测系统可以有效检测出架空输电线路缺陷。

表2 架空输电线路缺陷检测结果

检测时间	架空输电线路位置	缺陷检测结果
8:11:15	导线	断线
9:15:52	引流线	断股
10:05:15	导线	断线
11:15:23	线夹	松动
15:21:34	绝缘子	歪斜
16:12:17	导线	断股
11:52:13	引流线	异物悬挂
9:12:13	防震锤	缺失
10:18:18	引流线	断股
16:47:39	绝缘子	散落

采用本文系统检测架空输电线路缺陷，监测结果如表2所示。通过表2实验结果可以看出，采用本文系统可以有效检测架空输电线路缺陷，对于架空输电线路中的断股、断线等缺陷，均可以精准检测，验证本文系统在电力线路的缺陷检测中，具有较高的应用性。所设计系统符合检测架空输电线路表面污秽、线路外伤、线路裂缝等缺陷检测需求，适用于电力系统巡检的实际应用中。

3 结束语

将无人机巡检技术作为架空输电线路缺陷检测的重要技术，结合通信技术、图像识别技术等技术，实现架空输电线路的缺陷检测，降低电力领域的巡检人员的人力投入，实现输电线路的高效巡检，具有较高的实用价值。无人机具有受雨、雾等极端天气影响较小的特点，优越的巡检性能，实现架空输电线路的安全、快速巡检。利用无人机搭载的缺陷检测器中设置的双目视觉相机，采集高清的架空输电线路图像，输出输电线路缺陷检测结果，解放大量人力，使用价值高。

参考文献：

[1] 胡志鹏，李忠魁，高峰，等.考虑时变故障率的架空输电线路最优巡检策略研究[J].电力系统保护与控制，2020，48(1)：9−17.

[2] 王红星，陈玉权，张欣，等.基于离线高斯模型的输电线路无人机巡检缺陷智能识别方法研究[J].电测与仪表，2022，59(3)：92−99.

[3] 杨罡，孙昌雯，王大伟，等.基于无人机前端和SSD算法的输电线路部件检测模型对比研究[J].太原理工大学学报，2020，51(2)：212−219.

[4] 戚银城，武学良，赵振兵，等.嵌入双注意力机制的Faster R−CNN航拍输电线路螺栓缺陷检测[J].中国图象图形学报，2021，26(11)：2594−2604.

[5] 张毅，刘天立，刘越，等.深度学习在输电线路无人机巡检中识别防振锤缺陷的应用[J].武汉大学学报(工学版)，2022，55(10)：1065−1071.

[6] 罗潇，於锋，彭勇.基于深度学习的无人机电网巡检缺陷检测研究[J].电力系统保护与控制，2022，50(10)：132−139.

[7] 王昕，何鑫，范正吉，等.无人机飞控设备环境温度控制装置设计[J].电子器件，2022，45(2)：455−459.

[8] 李念思，刘小勇，李亮，等.无人机锂离子电池高低温极端环境适应性研究[J].中国安全科学学报，2020，30(8)：177−182.

[9] 张家盛，梁进兴.基于深度学习的无人机巡检架空输电线路金具锈蚀缺陷检测方法[J].湖南电力，2022，42(5)：75−78.

[10] 顾超越，李喆，史晋涛，等.基于改进Faster−RCNN的无人机巡检架空线路销钉缺陷检测[J].高电压技术，2020，46(9)：3089−3096.

[11] 李飞伟，郁云忠，袁林峰，等.基于无人机的配电导线断股缺陷检测系统设计与实现[J].测绘地理信息，2021，46(4)：132−135.

[12] 董军，李博，翟洪达，等.基于多旋翼无人机的复合绝缘子憎水性带电检测装置研究[J].电力科学与技术学报，2020，35(6)：171−179.

[13] 王怡爽，苑朝，翟永杰.一种新型架空输电线路巡检机器人的机构设计[J].西北工业大学学报，2020，38(5)：1105−1111.

作者简介：孙喆(1988−)，男，硕士，高级工程师，研究方向：输电线路智能化运检。