

输电线路无人机巡视应用与展望

山博轩¹, 杨郁²

¹纽卡斯尔大学科学、农业和工程学院, 英国 纽卡斯尔

²石家庄供电公司, 河北 石家庄

收稿日期: 2024年3月14日; 录用日期: 2024年4月30日; 发布日期: 2024年5月13日

摘要

随着人工智能、无人机等技术的迅速发展, 无人机在输电线路巡视方面应用越来越广泛。在数智化坚强电网建设中, 智能巡视是数智赋能赋效的典型应用场景之一。本文首先介绍了无人机巡视应用情况, 对此应用场景中涉及的图像处理等主要技术进行分类介绍和分析。在以上工作基础上, 讨论了技术应用时需注意的问题, 包括技术选型、管理跟进等。最后对无人机巡视的未来发展进行了展望, 包括自主导航、智能分析、数据应用等。

关键词

无人机, 人工智能, 图像处理, 图像识别, 输电线路

Application and Prospect of Unmanned Aerial Vehicle Inspection on Transmission Lines

Boxuan Shan¹, Yu Yang²

¹Faculty of Science, Agriculture & Engineering, Newcastle University, Newcastle UK

²Electricity Power Supplying Company of Shijiazhuang, Shijiazhuang Hebei

Received: Mar. 14th, 2024; accepted: Apr. 30th, 2024; published: May 13th, 2024

Abstract

With the rapid development of technologies such as artificial intelligence and unmanned aerial vehicle (UAV), the application of UVA in power line inspection is becoming increasingly wide-

文章引用: 山博轩, 杨郁. 输电线路无人机巡视应用与展望[J]. 人工智能与机器人研究, 2024, 13(2): 235-245.

DOI: 10.12677/airr.2024.132025

spread. In the construction of a strong digital smart power grid, intelligent inspection is one of the typical application scenarios empowered by digital intelligence. This article first introduces the application of UAV, and classifies and analyzes the main technologies involved in this application scenario, such as image processing. On the basis of the above work, the issues that need to be paid attention to when applying technology were discussed, including technology selection, management follow-up, etc. Finally, the future development of UAV was discussed, including autonomous flight, intelligent analysis, and data applications.

Keywords

UVA, Artificial Intelligence, Image Processing, Image Recognition, Transmission Lines

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

输电线路巡视是保障供电安全可靠的重要工作之一。目前,常用的线路巡视方式包括以下5种:人工巡检、直升机巡检、遥感卫星巡检、机器人巡检、无人机巡检。其中,无人机巡视融合多项技术,在线路巡视方面具有独特优势:更高效,适应性强,可以在复杂地形和恶劣环境下工作,覆盖传统方法难以到达的区域。无人机搭载各种传感器和摄像头,可以对输电线路异常进行全方位的监测,如断线、松动、异物侵入等。无人机巡检不仅可以实时传输图像和视频数据,还可以通过数据处理技术进行数据分析和诊断,实现故障预警。

无人机巡视输电线路的技术应用初期,无人机主要依赖手动操作,对操作人员的技能要求高。应用范围有限,主要用于简单的视觉检查。图像质量和传输效率较低,数据处理主要依赖人工分拣、标记,数据使用质量不高。

随着技术应用的逐步深入,无人机引入了GPS和自动稳定系统,提高了无人机的飞行稳定性和自动化程度,初步实现了数据的实时传输和一定程度的自动分析。无人机到达指定位置后,由人工操作巡视作业。飞行过程中一般只上传缩略图,待结束巡视后再行上传数据。对收集的图像可利用算法进行识别与判断[1]。

现阶段,无人机采用先进导航技术,可逐步实现自动规划、自主飞行。可实现无人机和地面站的高度集成,提高了数据传输的效率和安全性。应用机器学习和人工智能,可实现巡视结果智能分析,包括故障预警和自动缺陷识别。大数据技术的深化应用,可利用巡检数据开展设备运行分析和趋势预测。

2. 无人机巡视应用的主要技术

2.1. 图像处理技术

在无人机巡视应用的技术中,图像处理处于核心地位。巡视过程中的环境感知与导航、目标检测与识别、故障诊断与预测等,都基于有效的图像处理技术。

对输变电设备图像进行图像识别的研究内容包括识别线路设备种类、识别设备状态、发现设备缺陷和隐患、检测故障情况等。同时,可以进行环境监测,包括线路周围的环境情况,如植被覆盖情况、土地变化情况、施工作业情况等,为线路的维护和管理提供数据支持[1]。

2.1.1. 图形预处理

受拍摄设备分辨率、天气光照、拍摄时的摄像设备运动状态影响, 拍摄得到的图像质量可能较低, 影响基于人工智能技术的辨识方法的识别效果。同时, 受拍摄条件差、故障发生频次低等因素的限制, 部分应用场景训练样本数量较少。这就需要使用图形处理技术。

1) 图像增强技术

包括灰度法、空域滤波、频域滤波等。灰度变换在实际应用中需要根据具体场景进行调整和优化, 并且需要特别注意对比度的调整, 以避免过度增加对比度而导致图像失真、细节丢失等问题[2]。在空域滤波方法是在像素级上的滤波, 其中均值滤波会丧失一定的细节信息, 而中值滤波则可避免这种情况的发生。高斯滤波则可以较好地平滑图像、去除噪声[3]。锐化滤波方法则可提高图像的清晰度和轮廓, 但可能会增强图像的噪声。处理复杂滤波时计算量大, 可能涉及复杂的卷积计算, 耗时较多。频域滤波方法通过将图像转换为频域, 处理后再转换回空间域。在频域滤波方法中, 复杂的卷积运算可以转化为简单的乘法运算, 且去噪效果好, 可以直接在频域中去除噪声频率成分, 保留有用信号。常用的数字滤波器包括低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器、带阻滤波器等。

2) 图像分割技术

常用的图像分割算法包括阈值分割、区域增长、边缘检测等。

基于阈值的分割方法计算量小, 但对噪声敏感, 会出现图像中部分区域被误分类的问题, 同时针对灰度值分布不规则的图像, 使用基于单一阈值的分割方法可能导致分割结果不理想[4]。基于边缘检测的分割方法目前主要有 Canny 边缘检测、Sobel 边缘检测、Roberts 边缘检测等方法。基于区域生长的分割方法适用于形状复杂的对象分割, 可以得到连续区域, 但是需要手动或自动选择种子点, 对噪声和灰度不均匀的图像敏感。基于聚类的分割方法在聚类的过程中, 提取图像的特征向量, 能够更加准确地保留图像内容信息, 并且不会出现像阈值分割那样的断裂。具有精度高、不受先验知识干扰等优点。

3) 图像识别技术

图像识别是指通过计算机视觉技术, 对图像中的目标进行自动识别的过程。特征提取是从图像中提取有用的信息或特征(如颜色、纹理、形状等), 可以减少后续处理的数据量, 但手工设计的特征可能不具备足够的代表性和鲁棒性, 对于复杂场景的识别效果有限。分类器的分类方法中, 使用如支持向量机(SVM)、决策树、K 最近邻(KNN)等传统机器学习方法, 根据提取的特征对图像进行分类。分类器的性能受限于所选模型的复杂度和训练数据的质量。基于深度学习的分类方法, 主要通过卷积神经网络(CNN)等模型直接从原始图像中自动学习复杂特征并进行分类, 无需显式特征提取步骤。这些方法逐渐成为数字图像分类领域中重要的算法, 可以在图像分类、目标识别和目标跟踪等方面取得良好的效果[5]。

4) 应用实例

以线路为例。

图像预处理目的在于去抖、去噪, 提高清晰度和对比度, 增强其线性特征, 为边缘检测和直线特征提取做准备。电力线图像的预处理操作一般由图像灰度化、滤波、直方图均衡化以及图像分割等组成。图像灰度化用于去除航拍图像中的 RGB 颜色信息, 减弱光照对航拍图像的干扰, 同时还减少运算量、节省存储空间。与复杂背景相比, 航拍图像中的电力线目标较为细弱, 导致后续的电力线特征提取易受到噪声等干扰, 可通过滤波方法去除。图像分割时, 为了降低图像中电力线与背景的错误分割概率, 常用最大类间方差法、局部自适应阈值法等图像分割算法来获取最优二值化分割阈值。

直线检测是电力线识别的基础, 在图像中会有田地、道路和植被等含直线段的背景, 因此选取特征提取效果良好的直线检测方法很重要。霍夫变换鲁棒性好、算法原理简单, 易于理解和实现。无人机捕获的航拍图像不可避免地会出现复杂背景、失真和遮挡等问题, 而直线检测方法提取到的电力线可能会

不完整, 这就有必要利用 K-Means 聚类、卡尔曼滤波等算法对识别出的直线数据进行筛选和拟合[6]。

针对绝缘子, 文献 7 采用灰度均衡化突出细节特征, 结合超分辨率卷积神经网络(Super-Resolution Convolutional Neural Network, SRCNN)进行图像重建, 以实现图像增强。为了使灰度更加均衡, 对于彩色图像, 先分解成灰度通道, 分开计算后再逆向合成。SRCNN 基于深度学习模型, 能有效提高图像分辨率和质量, 实现了特征提取和非线性映射之后, 图像重建层进行上采样, 以恢复重建的高分辨率图像[7]。

文献 8 构建了基于背景差分法优化后的高斯模型, 利用 SIFT 特征提取算法完成视频图像的特征点匹配, 优化后的特征向量生成时间是原来的 30%~40%, 提取特征点的总时间是原来的 30%~50%, 能准确检测、跟踪运动目标并排除干扰[8]。

2.1.2. 视觉检测方法

对于不同的设备, 视觉检测的目的和方法不同。

电力线识别, 多用于自动避障、保障低空飞行安全。绝缘子数量大、种类多、分布广, 长期暴露户外, 容易引发故障, 对绝缘子主要是缺陷识别。电力杆塔及附属设施检测, 及时发现电力杆塔故障对输电线路灾损评估和灾后抢修具有重要意义。金具种类繁多, 形态不一, 随着电力线使用寿命的增加, 金具会出现腐蚀、磨损、开裂、松动等迹象。由于部分金具及缺陷目标较小, 在输电线路中进行金具及缺陷检测困难较大。输电走廊在线监测目的在于发现危险地物。由于输电线路走廊较长, 异物(风筝、气球、塑料袋、鸟巢等)、植被、推土机和挖掘机等工程车辆不断侵入供电保护区域, 对供电安全构成严重威胁[9]。

对于以上不同类别设备的视觉识别, 应采用不同的技术路线。

文献 9 对各类设备的识别技术研究成果进行了总结。深度学习方法在特征提取等很多方面具有较大优势, 通过 DCNN 提取线路设备深度特征, 实现 end-to-end 的目标检测。从文献 9 的研究成果来看, 在不同深度学习算法下, 绝缘子、电力杆塔、防振锤等特征明显的电力设备检测准确率更高。深度学习算法依靠 CNN 自动学习提取特征, 具有高度的可扩展性, 同一网络模型适用于多种输电线路设备识别与缺陷检测, 在工程应用中具有普适性。one-stage 算法比 FasterR-CNN 等 two-stage 算法更适用于输电线路目标识别及缺陷检测, 多种深度学习网络模型融合有利于提高小目标的检测精度。

2.2. 自动驾驶技术

无人机飞行控制包括手动控制与自动控制两种方式。手动包括纯手动控制、增稳手动控制、含有姿态自稳的手动控制。自动控制包括通过导航设备自动控制、通过路径规划实现自动飞行、自行决策飞行。无人机巡视的飞行方式由手动逐步向自动发展, 使无人机可以在复杂多变的环境良好飞行, 自动、及时、有效的躲避各种障碍[10]。

2.2.1. 无人机巡视应用的自动驾驶相关技术

导航系统: 无人机配备了接收器后, 可以准确地获取当前的经度、纬度和高度信息, 实现定点飞行和航迹规划。

惯性导航系统: 利用加速度计和陀螺仪等传感器测量无人机的加速度和角速度, 通过积分计算无人机的位置、速度和航向。与导航相比, 惯性导航系统在短期内提供更精准的导航信息, 但随着时间的推移会出现累积误差。

视觉导航系统: 视觉导航系统利用无人机搭载的摄像头或其他传感器, 通过识别地标、地形特征或图像匹配等方式确定无人机的位置和姿态。这种导航方式通常用于室内环境或缺乏导航信号的情况下。

避障算法: 避障算法是无人机自动驾驶的关键技术之一, 通过传感器(如超声波传感器、激光雷达、

红外线传感器等)检测周围的障碍物, 并通过算法规避障碍物, 确保无人机的安全飞行。常见的避障算法包括最小回避距离法、人工势场法、模糊逻辑法等。

2.2.2. 应用实例

在巡检过程中, 如果仍由地面工作人员根据搭载在无人机上的视觉摄像回传的图像、GPS 等信息来控制无人机的飞行及拍摄, 则对操作人员有着极强的依赖性, 且工作强度大、效率低。自主任务是无人机输电线路巡检的必然趋势, 输电线路智能航线规划则是提高无人机自主飞行能力、保障飞行安全和提高巡检效率的关键技术之一。

文献 11 中提出一种基于三维点云分割的主动目标捕获方法。原生的三维点云数据在机上被迅速进行语义分割和体素化。采用 VoxBlox 原理, 使用截断符号距离函数(TSDF, truncated signed distance function)来重建障碍物表面, 并通过融合的欧几里德符号距离场快速规划无人机航线以避开障碍物, 从而快速到达目标[11]。

利用无人机与传统导航设备对架空输电线路进行检测, 存在传感器价格昂贵、数据处理困难、易受天气和环境因素影响等局限性, 文献 12 提出了一种利用单摄像头实现无人机在输电线路自主导航的新方法。由于单目视觉不能提供深度信息, 又训练了一种机器学习模型 faster RCNN 用于障碍物检测。该检测模型利用被检测输电线路的图像高度来表示与无人机的距离, 利用输电线路之间的图像宽度来寻找最宽的无障碍空间。实验结果表明: 定位检测算法的效果明显, 定位误差在使用误差范围内, 具有良好的可用性和应用价值[12]。

2.3. 无线通信技术

无人机巡视使用的无线通信技术包括多种种类, 主要根据通信距离、数据传输速率、功耗和可靠性等需求来选择合适的技术。以下是一些常见的无线通信技术:

1) Wi-Fi (无线局域网): Wi-Fi 技术常用于短距离通信, 适用于无人机与地面控制站之间的通信。它提供较高的数据传输速率, 但通信距离相对较短。

2) 蜂窝网络(4G, 5G): 4G 和 5G 蜂窝网络广泛应用于远程无人机通信, 提供较大的通信范围和高速数据传输。5G 技术相比 4G 有更低的延迟和更大的带宽, 适用于实时传输高清视频和其他大规模数据。

3) LPWAN (低功耗广域网): 适用于长距离通信, 功耗较低。LoRa (长距离射频)和 NB-IoT (窄带物联网)是 LPWAN 的两个常见标准, 用于连接无人机与远程服务器。

4) 卫星通信: 卫星通信可提供覆盖全球的通信服务, 适用于远程或偏远区域的无人机巡视。通过卫星链路, 无人机可以实现长距离的实时数据传输。但也存在自身的应用局限。如卫星通信误码率较高, 且信息传输延迟较大, 也容易出现通信中断风险, 会危及无人机飞行安全。

5) 中继通信

选择小型多旋翼无人机作为巡检无人机, 在无人机上搭载高清相机、红外相机、数据传输、图像发射等任务设备。再选择一架小型多旋翼无人机, 将其作为中继无人机, 主要负责搭载通信中继设备, 而地面计算机控制中心则集成了数据传输设备和图像接收设备。此时, 中继无人机携带的中继设备作为传输媒介, 实现了巡检无人机与地面控制中心数据的有效传输。

在研究设计中应增大发射功率, 提高基带信号处理速度, 使用特殊编码方式增加编码校验功能, 减少误码率, 提高通信信号抗干扰性能。因中继无人机与电力巡检无人机有着较大的相对移动速度, 应进行相对运动实验, 明确不同相对移动速度下的通信情况, 指导系统通信信号设计[13]。

由于在巡检过程中无人机需要实时传输图像数据, 分析故障点, 因此巡检过程中对通信信号的质量有着较高要求。在设计无人机巡视路径时, 应充分考虑到通信质量的约束问题。

针对由于通信受限所引起的检测效果下降问题, 文献 13 提出了 5G 信号约束下的多无人机协同电力巡检路径规划方法。首先, 基于 5G 信号传输特性, 建立了面向电力巡检大尺度空间的传播损耗模型; 继而, 基于遗传算法架构, 提出了综合 5G 信号质量、飞行里程、巡检目标共同约束的多无人机路径规划方法; 最后, 对基于 5G 信号的多无人机协同电力巡检路径规划方法进行了仿真验证。结果表明, 相较于传统方法, 约束后信号质量较差路径的飞行长度减少了 45.2%, 并且无人机会在距离相差较小的情况下优先巡检信号较强的杆塔, 进而提升巡检任务的检测效果, 从而可以保证在大范围环境下的使用[14]。

2.4. 数据处理技术

数据处理技术包括: 数据采集与预处理、数据标注与增强、数据管理与存储、特征提取与模型训练、分析结果反馈与迭代改进。无人机处理数据大多为图像数据, 关于图像的预处理、增强、特征提取前文已述。这里重点讨论数据集的管理。

深度学习需要大量样本数据进行支撑, 由于输电线路巡检行业的特殊性, 深度学习在电力设备目标检测中应用面临的首要问题就是缺乏公开数据集。同时, 存在目标之间的差异性、算法的多样性, 在结果反馈和迭代改进方面, 电力设备识别及缺陷检测还缺乏统一的评价标准。

针对样本缺乏统一管理。质量层次不齐。标注标准不统一。图像元数据种类多。等问题, 国网公司 2022 年开始建设公司高质量样本库, 制定了统一的缺陷命名标准和质量标准规范, 归集和管理国网公司高质量图像样本, 解决人工智能模型开发过程中由样本造成的瓶颈问题。基于 CV 和 NLP 技术, 提出基于 3 大模型组件 9 个模型的智能化数据治理体系。包括质量准入组件, 由质量判别模型、人工标记识别模型、重复度判别模型构成; 数据清洗组件, 由相似度判别模型、脱敏模型构成; 元数据标签分类组件, 由基础元数据模型、名称元数据模型、内容分类模型和智能标注模型构成。依托高质量样本库平台, 模型组件不断迭代升级, 模型准确率越来越高, 将大幅降低人工工作量, 提升数据清洗效率, 保障了高质量训练集的产出质量和效率[15]。

3. 推广应用无人机巡视技术应注意的问题

无人机巡视的技术应用初期投资较大, 无人机及其支持系统(如数据处理和分析平台)的购置和开发, 都需要较大的初期投资。且在应用过程中, 还持续产生运维成本, 包括无人机的定期维护、修理以及操作人员的培训等。因此, 在技术应用时应充分考虑当地特殊情况, 选用适用技术, 并采取与技术配套的管理措施, 以取得满意的效果。

3.1. 以问题为导向

输电线路的无人机巡视涉及的技术门类多, 每一技术门类中的选择项也较多, 众多的技术和模型适用于不同的设备、不同的区域、不同的巡视目的。

一是针对本地区的薄弱点和管理难点, 设计更有针对性的应用路径。

文献 16 针对江西省河流、湖泊众多, 鸟类资源丰富, 鸟害导致输电线路跳闸的事故时有发生的情况, 利用无人机巡视重点开展鸟害及隐患识别, 取得良好效果。

主要做法是, 建立了输电线路涉鸟故障、危害鸟种图像数据集。提出了一种基于深度卷积神经网络 EF-YOLO 目标检测的输电线路鸟害检测方法和一种基于改进深度卷积神经网络 YOLOv5n 目标检测的输电线路涉鸟故障危害鸟种智能识别方法。两种方法配合使用能在远端快速发现入侵输电线路的鸟类, 触发摄像头拍摄鸟种图像并准确地识别出鸟种类型, 在及时发现鸟害进而启动驱鸟器驱鸟的同时, 将入侵危害鸟种的类型、危害等级、数量及所处方位等检测结果通过通讯技术反馈给输电线路巡检人员, 巡检

人员可针对实际情况快速执行有效的驱鸟方案, 达到及时消除各种鸟害隐患的目的[16]。

二是针对亟需解决的问题, 不能企求面面俱到。针对无人机手动模式巡检存在操作安全隐患、作业效率低、飞行时间短等问题, 文献 17 依托三维激光雷达点云算法积累, 研究基于激光点云数据的复杂航迹划方案。通过将深度学习和三维点云相结合, 对输电走廊激光点云数据精确分类, 识别标记杆塔部件和模型, 并进一步利用杆塔三维点云空间信息识别特征点, 遵循电力行业安全作业标准规划智能巡检路径, 输出高精度地理坐标的航线以供多旋翼无人机进行自主导航飞行作业[17]。

三是充分考虑当地的环境影响因素, 如雨、雪、强风等气候影响, 如山区、密林、水域等地形影响, 以及通信方式的限制等。在山区或丘陵地带, 尽可能选择能够进行垂直起降、具有强大飞行稳定性和避障能力的无人机, 以应对复杂地形和多变的气流。平原地区则可以选择具有更长续航能力的固定翼无人机进行大范围快速巡视。

3.2. 同一问题可能有不同解决方法

无人机技术落地过程中, 面对同样的问题, 可能有不同的解决方法。在结合本地区实际情况的基础上, 从图像技术、无人机技术、通信技术等多方面综合考虑, 找到最有效的方法。

深度学习虽然在许多复杂场景中表现出色, 但其高昂的计算成本和对大量标注数据的需求限制了在某些应用中的深度应用。比如, 针对无人机拍摄图像质量差的问题。这个问题可以通过前述图像处理技术加以解决, 也可以通过其它方式解决。文献 18 设计基于深度学习的三维点云杆塔部件自动识别算法, 实现电力杆塔部件自动准确的识别和边界提取, 并提出基于光照、无人机定位精度和相机性能约束的视点自适应优化算法, 保证拍摄视点位置最佳与数量最优科学的航线设计, 保障拍摄视点位置最佳与数量最优[18]。文献 8 设计了一套巡检视频成像质量评价和高危点信息补充标准, 形成了基于巡检初步在线诊断结果的重拍、补拍策略, 实现了无人机巡检在线智能控制与精细化管理。

3.3. 技术落地涉及相关管理问题

无人机巡视是工作方式的改变, 随之而来必有管理的方式改变。

对无人机巡视业务的全面管理, 包括无人机管理、巡视飞行管理, 明确巡视路线、时间和频次, 明确巡视的质量标准和数据收集要求。更重要的是建立高效的数据管理系统, 充分利用图像处理、人工智能等技术提高巡视获取数据的分析效率和准确性, 及时发现并处理输电线路的潜在问题。同时, 无人机巡视过程中会获取大量图像和数据, 对这些数据资源应建立统一的管理标准, 充分挖掘其数据价值, 为线路维护乃至全生命周期管理提供决策支持。

文献 19 建立基于深度学习的无人机全周期输电智能巡检平台, 实现无人机巡检作业海量多维数据存储、数据分析处理、数据价值挖掘辅助决策的全过程管控、海量巡检数据资产全生命周期管理, 以数字化的方式固化和落实全新的巡检作业标准化管理, 实现管理精益化提升[19]。

文献 20 通过信息化手段, 把 GPS、4G/5G 通讯、无人机拓展应用、可视化管理等技术相结合, 设计输电线路巡检系统, 系统包括从输电线路智能运检管控平台的后台端和移动应用平台两部分, 其中, 移动作业平台包括人巡移动作业终端、无人机智能操作系统、缺陷隐患分析软件以及树障分析软件。智能巡检系统解决了巡检到位管理、巡视周期管理、缺陷闭环管理、检测综合管理等难题, 在新余供电公司 220 kV 及以下电压等级的线路得到了成功应用[20]。

4. 发展展望

未来, 打造数智化坚强电网, 将通过人工智能、边缘计算、数字孪生、区块链、安全防护等数字技术、先进信息通信技术等为电网赋能赋智。一方面实现电网全环节全链条全要素的灵敏感知和实时洞悉。

另一方面, 实现电网生产运行的业数融合互动, 做到实时感知重要的信息来源, 改变电网单一环节决策信息分散、决策依据不充分的问题。

输电线路智能巡检作为数智技术综合应用的典型场景, 将强化电网全过程、全环节智能感知和自主运维, 有助于提高供电可靠性和对自然环境的适应性, 将取得更进一步的发展并发挥更大的作用。

无人机巡视输电线路的应用场景中, 涉及人工智能、机器学习、无人机技术、传感器及通信技术等多个门类。这些技术在各自领域独立发展, 但是在这个特定的应用场景中, 互相之间又有一定影响和制约。未来无人机应用场景中, 最核心的功能可归结为自主导航和智能分析, 并在业数融合中实现数据价值的充分利用。

4.1. 自主导航

自主导航功能的实现, 要求高精度的定位系统、先进的传感器以及能够处理复杂环境和任务的飞行控制算法, 使无人机能够在复杂的地形和气象条件下, 自主安全地飞行, 避免障碍物, 按照预定或实时计算的最优路径完成巡检任务。

无人机技术方面, 存在资源限制和动力需求之间的矛盾。一方面, 采用视觉和传感器融合技术, 结合高分辨率摄像头、红外传感器、雷达和 LiDAR 等多种传感器, 可以实现在复杂环境下的精准自主飞行和障碍物避让。另一方面载荷也会对无人机的动力提出更高的要求。因此, 未来无人机将更多应用轻量化、芯片化传感器技术, 在不降低传感器的性能和精度的前提下减少无人机的负载压力。同时, 通过提高电池能量密度、采用更高效的电机和推进系统, 增强无人机的载荷能力和续航时间。

人工智能方面。无人机将集成更为复杂的 AI 算法, 结合深度学习、增强学习、多智能体增强学习, 使无人机在与环境和其它无人机的交互过程中学习最优策略。通过奖励(或惩罚)机制, 无人机能够在飞行中实时调整其行为, 以适应环境变化和完成复杂任务。

在实际应用中, 可以通过动态调整与智能优化, 灵活选择和调整所需传感器, 采用高效的飞行路径规划和飞行模式优化算法, 满足巡视要求的前提下, 减少不必要的飞行动作和能量消耗, 提高总体能效。

4.2. 智能分析

结合机器学习、深度学习以及图像和数据处理技术, 能够对无人机采集的大量数据进行快速而准确的分析和处理。包括从复杂背景中识别输电线路和相关设施的状态, 检测和诊断各种故障和缺陷, 预测潜在的风险。未来应用场景中, 不仅要求巡视的准确性和处理数据的速度, 还会对实时监控、预防性维护、大数据价值挖掘提出更高要求。

4.2.1. 更优化的云边协同

尽管输电线路的巡检问题已经得到了较好解决, 但是大部分研究执行识别诊断等任务仍然是在边缘服务器或者云服务器上。无人机更多只承担数据采集的工作, 这样的巡检效率较低, 时延较大。在无人机等终端上部署边缘智能设备并执行故障诊断, 从而实现终端级的边缘智能, 效率将更高[21]。但是无人机体积有限, 其搭载容量和数据信息处理能力也有限, 为进一步提升应用场景智能化水平, 就要求释放无人机对数据处理及数据存储的压力, 采用云计算、云存储。对电网而言, 在边缘完成基础数据分析, 是应对通信压力的有效解决方案。更优化的云边协同要求边缘计算装置有更高的性能、更有效率的就地数据挖掘算法、更科学的差异化任务管理。

在智能巡检场景中, 一方面优化边缘计算, 对于实时性要求高、数据处理量不大的任务, 如故障诊断、环境感知等, 可以在无人机的边缘智能设备上直接处理, 以减少延迟和节省宽带资源。另一方面云计算辅助, 对于数据量大、计算复杂度高的任务, 如大规模数据分析、复杂环境的仿真模拟等, 可通过

无线通信技术将数据传输到云端服务器进行处理, 再将结果或指令反馈给无人机。在具体应用中, 可以采用压缩与预处理技术减少传输的数据量, 以降低对带宽和存储的需求。同时通过智能化的任务调度算法, 根据任务紧急程度、计算资源需求和当前网络状况动态决策数据处理位置, 以优化资源使用效率。

4.2.2. 更适用的人工智能模型

大模型可能发挥特有作用。目前在输电线路无人机巡视方面还存在训练样本匮乏且不平衡, 小目标缺陷效果不佳、小样本部件及缺陷检测还有局限性。大模型发展有可能解决以上问题。

对小样本的优势方面。ChatGPT 类大模型具有快速学习能力和先进的预训练技术, 能够通过分析少数几个相似案例, 快速提供可能的故障原因和解决方案, 辅助维护人员做出决策, 大幅提高设备运维的决策能力。历史数据的修补恢复方面。ChatGPT 类大模型具有比现有生成对抗网络、卷积神经网络更强的数据恢复能力, 能够对多类型、大体量、多场景的设备历史数据进行学习理解, 具备很强的学习能力和泛化能力。可以通过学习掌握电力设备正常运行的数据演变规律, 判断数据缺失及质量偏低, 制定不同的修补恢复策略, 完善数据体系[22]。

小模型的优化应用。电力设备图像视频的目标检测和缺陷识别, 综合考虑电力设备智能终端边缘计算的要求, 为了减少模型空间占用和识别精度损失, 提高模型推理计算的速度, 需要研究深度神经网络模型压缩和剪枝等模型轻量化技术以及高性能的神经网络硬件加速技术。

应注意到, 大规模需要更多的标注数据和更长的训练时间, 其初期开发周期偏长。大模型的部署同样需要高性能硬件设备和大规模存储设备, 因此部署和维护成本或将高于以往的轻量化视觉模型。同时, 在人工智能应用场景中, 数据和算力并不是决定性的因素, 如何利用有限资源进行创新才是关键, 对现有模型性能的精细调整和优化, 实现模型应用的综合性, 并提升适应性, 这些问题是智能巡视研究者必须充分考虑的[23]。

4.3. 业数融合互动

目前, 无人机巡视尚属新兴应用, 重点在无人机的“用起来”, 未来, 随着无人机应用的逐步推广, 业务管理形态将发展变化, 重点在于巡视数据“用起来”。即通过前端巡视数据要与后端业务管理充分融合, 实现大数据价值的充分发掘。

4.3.1. 采集数据多端融合

多传感器数据融合。将来自不同传感器的数据(如图像、放电、温度、声音等)融合在一起, 以获得更全面的实时信息。多视角融合。将来自无人机不同视角的图像融合在一起, 以获得更完整的场景信息。多专业融合。将智能巡视数据, 与电网运行数据融合, 包括天气、负荷、电量等, 这样可能实现更高级别的数据分析。

可以通过数据中心将不同来源的原始数据归结整合, 也可以分别提取特征, 进行特征融合, 比如利用 CNN 卷积神经网络进行特征提取。多物理量微型传感器件与电力定制化传感芯片的融合, 也是未来的研究热点, 涉及到微型传感器件设计和芯片环境的多物理场分析等多方面内容[24]。

4.3.2. 支持构建数字化电力设备

新型电力系统对设备状态以及运行环境等信息感知深度和广度提出了更高的要求, 有研究者提出利用先进的数字化和信息化技术对传统电力设备进行升级, 构建新一代的数字化电力设备。

通过无人机智能巡视, 可以全面、及时、准确地获取电力设备在网运行、服役环境、健康状态等关键信息, 为设备研发设计和智能运维提供全面支撑。同时, 将以上数据与设备管理中的电力设备设计制造、运行维护、退役回收等全生命周期管理各环节深度融合, 通过云平台、区块链等技术实现全生命周

期数据的安全共享和互通[25]。

4.3.3. 从数据到知识

随着无人机智能巡视的深入应用, 将产生海量多源数据和电网边缘侧沉淀形成的判断决策机理和运行机制。这些数据除了与电网运行管理结合产生数据价值, 还有更深层次的知识价值。未来, 有必要构建电网数据 - 知识协同发现模型, 通过专家的电网知识和数据驱动的电网知识的融合, 以及对电网知识的全面评价和动态更新, 使数智化电网的知识库成为一个不断进化的动态系统, 显著增强电网的自我发现和自我学习能力, 从而实现人工智能与电网业务应用的深度融合[26]。

5. 结语

无人机智能巡视是电网运行管理技术的一次提升, 智能巡视与人工巡视相比, 具有巡视操作无人化、结果分析自动化、电网监测实时化、业务管理智能化等特点。无人机智能巡视也是电力系统对多门类信息技术综合运用的典型应用场景。从这个场景中, 也可以看到多技术综合运用的赋能效果。未来, 智能巡视将发挥更广更深的作用, 也将出现更多的综合应用场景为电网赋能。

参考文献

- [1] 许家文, 阴酉龙, 刘小双, 等. 输电线路人机协同巡检模式的研究与应用[J]. 电气时代, 2021(5): 24-29.
- [2] 谢庆, 张焯宇, 王春鑫, 等. 新一代人工智能技术在输变电设备状态评估中的应用现状及展望[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 1-16. <https://doi.org/10.13296/j.1001-1609.hva.2022.11.001>
- [3] 阎巍. 计算机数字处理技术在图像处理中的应用[J]. 数字技术与应用, 2022, 40(9): 99-101.
- [4] 乔宝民. 数字图像处理技术在通信工程中的应用方法探析[J]. 数字通信世界, 2022(4): 60-62.
- [5] 张宏宇. 计算机数字图像处理研究进展[J]. 信息记录材料, 2023, 24(8): 24-26, 30. <https://doi.org/10.16009/j.cnki.cn13-1295/tq.2023.08.016>
- [6] 刘传洋, 吴一全, 刘景景. 无人机航拍图像中电力线检测方法研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2023, 28(10): 3025-3048.
- [7] 张庆, 苗海东, 晏永, 等. 基于图像增强与迁移学习的破损绝缘子识别[J]. 现代电子技术, 2024, 47(5): 75-79. <https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2024.05.013>
- [8] 郭锋. 面向巡检无人机的嵌入式智能多目标诊断响应与导线避障关键技术及应用[Z]. 浙江省, 国网浙江省电力有限公司台州供电公司, 2021-12-20.
- [9] 刘传洋, 吴一全. 基于深度学习的输电线路视觉检测方法研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(19): 7423-7446. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.221139>
- [10] 王正任. 人工智能在无人机领域的应用分析[J]. 科学技术创新, 2020(15): 56-57.
- [11] 戴永东, 王永强, 高超, 等. 电力输电线路无人机巡检航线智能规划方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(9): 253-260.
- [12] 戴永东, 姚建光, 李勇, 等. 输电线路无人机巡检自主导航算法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(11): 221-228.
- [13] 易淑智, 杨帆, 贾恒杰. 无人机在电力系统中的远距离通信支持分析[J]. 机电信息, 2022(18): 39-41. <https://doi.org/10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2022.18.010>
- [14] 黄郑, 高超, 赵轩, 等. 5G 信号约束下多无人机协同电力巡检路径规划技术[J]. 电子测量技术, 2023, 46(15): 81-88. <https://doi.org/10.19651/j.cnki.emt.2211738>
- [15] 陈思宇, 陈振宇, 刘识, 等. 应用于电力人工智能样本库建设的智能化数据治理体系[C]//中国电机工程学会电力信息化专业委员会, 国家电网公司信息通信分公司. 2022 电力行业信息化年会论文集. 北京: 中国工信出版集团, 2023: 5.
- [16] 蒋昌辉. 基于深度学习的输电线路鸟害及危害鸟种智能检测研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2023. <https://doi.org/10.27232/d.cnki.gnchu.2022.001583>
- [17] 郭庆华. 北斗+轻小型激光雷达无人机自主飞行关键技术研究及电力巡检应用[Z]. 北京市, 北京四维空间数码

科技有限公司, 2020-07-30.

- [18] 王红星. 输电线路无人机智能巡检关键技术研发及应用[Z]. 江苏省, 国网江苏省电力有限公司, 2021-03-02.
- [19] 韩双立. 智能化目标识别跟踪系统及在电力巡线中的示范应用[Z]. 天津市, 天津市万贸科技有限公司, 2020-09-30.
- [20] 郑健. 输电线路智能巡检系统的设计与实践[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [21] 仝杰, 齐子豪, 蒲天骄, 等. 电力物联网边缘智能: 概念、架构、技术及应用[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-22. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231196>, 2024-03-10
- [22] 江秀臣, 臧奕茗, 刘亚东, 等. 电力设备 ChatGPT 类模式与关键技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4033-4045. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231419>
- [23] 赵振兵, 冯烁, 席悦, 等. 大模型时代: 电力视觉技术新起点[J/OL]. 高电压技术, 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1239.tm.20240227.1412.001.html>, 2024-03-22.
- [24] 江秀臣, 许永鹏, 李曜丞, 等. 新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 1-10. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20211649>
- [25] 盛戈皞, 钱勇, 罗林根, 等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1765-1778. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230623>
- [26] 李鹏, 习伟, 蔡田田, 等. 数字电网的理念、架构与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5002-5017. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212086>