

无人机智能巡检在输电线路中的应用与发展研究

李倩竹, 杜永永, 杨 阳

(国网成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:传统单一人工线路巡视存在劳动强度大、安全风险高、作业效率低等诸多不足,严重制约了输电线路运行维护的智能化转变。无人机智能巡检因其作业高效、缺陷发现率高等优点,不断被应用于输电线路的运行维护。通过研究无人机在输电线路巡检中的应用成果,分析了无人机巡检发展中的各种制约因素,探讨了实现无人机巡检智能化的关键技术,为无人机智能巡检在线路运行维护中的推广与发展提供了研究方向。

关键词:输电线路; 无人机智能巡检; 制约因素; 关键技术

中图分类号: TM726.3 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2020)03-0053-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.03.011

Application and Research on Intelligent Inspection of Unmanned Aerial Vehicle in Transmission Lines

Li Qianzhu, Du Yongyong, Yang Yang

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The traditional manual inspection of transmission lines has many deficiencies such as high labor intensity, high safety risks and low operating efficiency, which seriously restrict the intelligent transformation of the operation and maintenance for transmission lines. Unmanned aerial vehicle (UAV) inspection has been continuously applied to the operation and maintenance of transmission lines for its high efficiency and high defect discovery rate. The application results of UAV in the transmission line inspection are studied, various constraints in the development of UAV inspection are analyzed, and the key technology to realize the intelligence of UAV inspection is discussed, which provides the research direction of promotion and development in UAV intelligent inspection.

Key words: transmission lines; UAV intelligent inspection; constraints; key technology

0 引言

随着成都电网规模的不断扩大,对线路的运行维护效率和安全水平提出了更高的要求。成都电网所辖约30%的输电线路分布于丘陵、山区地带,巡视环境较为恶劣,给线路的运行维护带来了较大的困难。同时,输电线路的运行维护人员日趋老龄化,难以适应输电线路运行维护日益增长的安全需求,因此寻求新的线路运行维护模式并实现线路运行维护的智能化具有十分重要的意义^[1-8]。

传统人工巡视劳动强度高、作业安全风险大、缺陷识别率和精确率低且易受天气和地形等的影响,远远不能适应当今泛在电力物联网建设的需求。

无人机智能巡检通过搭载物联网装置(包括激光雷达、摄像机、红外测温仪等)实现了对输电线路运行状态数据的高效收集,对缺陷的精准识别,有效地提高了线路的安全运行水平。相比传统人工巡视,无人机智能巡检效率提高了2.5倍,一定程度上缓解了线路运行维护人员不足的困境。随着无人机新技术的不断发展,无人机智能巡检将逐步替代人工巡视成为线路运行维护的主要手段。

下面首先简述了无人机在输电运行检修中的应用成果,然后分析了无人机智能巡检发展中的各种制约因素,探讨了实现无人机巡检智能化的关键技术,为无人机巡检在线路运行维护中的深化使用提供参考。

1 无人机在输电线路巡检中的应用

1.1 杆塔本体的精细化巡检

通过无人机搭载高清摄像头,对杆塔绝缘子串、连接金具、保护金具等重要部件进行拍照,以第一视角完成对杆塔本体的精细化巡检。杆塔精细化巡检主要包括人工纯手动飞巡和无人机自主巡检两种方式。人工纯手动飞巡效率比较低,具有一定安全风险,且对无人机巡检作业人员(以下简称飞手)的飞行技能要求比较高,很难做到图像拍摄的标准化、统一化。因此,纯手动飞巡目前正逐渐被自主巡检所替代^[9]。

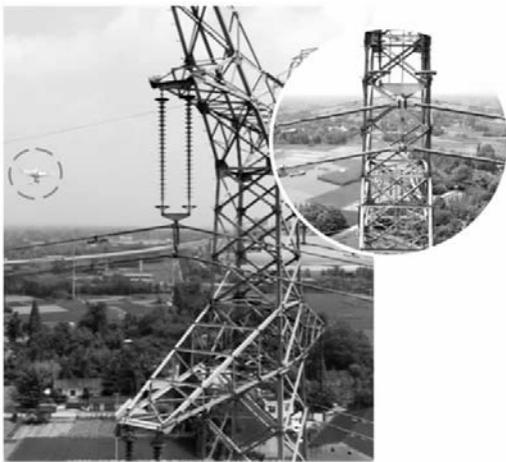


图1 无人机自主精细化巡检

无人机自主巡检按照不同的技术路线分为人工示教航线规划和激光三维建模航线规划两种。人工示教为通过手动飞行记录航拍点,再通过深度学习算法优化拍照位置,形成平滑连接的飞行航线。激光三维建模航线规划通过对输电线路进行激光点云三维建模,规划最精准、高效的巡检路径,自主完成杆塔巡检。

在输电线路的航迹规划中,人工示教对飞手的技能要求更高,而激光三维建模的数据处理较为复杂。但是采用激光三维建模的方法,得到的线路信息更全面,且可进行不同拍照点和拍摄角度的调整以及航点的优化重组。两种方法的优劣对比如表1所示。

表1 人工示教与激光三维建模航线规划的对比

航迹规划手段	飞手水平	数据处理	设备成本	航线编辑
人工示教	高	简单	较低	否
激光三维建模	低	复杂	较高	是

目前,人工示教和激光三维建模航线规划得到的应用都比较多,总体经济成本也相差不大,可以根据自身具备的条件及实际需求来选择合适的航迹规划方案。但从长远看来,激光三维建模航线规划的数据优势会越来越突出。

1.2 通道树障测距

目前,输电线路通道树障测距可采用激光扫描和可见光两种方法。

激光扫描树障测距是通过无人机搭载激光雷达对线路通道进行三维建模,并对电力导线和植被进行不同颜色的渲染,明确导线和线下树木的绝对坐标,从而获取线路和树木之间的精确距离。

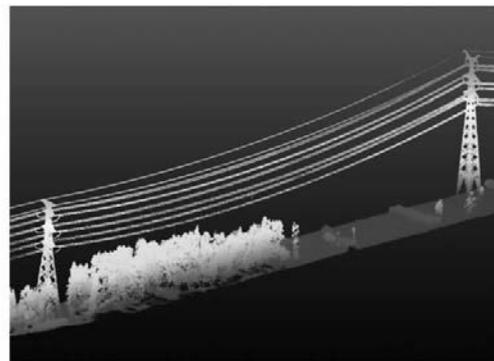


图2 输电线路通道激光三维建模

可见光树障测距是采用RTK技术采集杆塔坐标,在保证地面分辨率和飞行安全的情况下,自主规划巡检航线对线路通道进行正射拍摄,通过空三加密解算等实现导线和地面植被相对位置的计算。

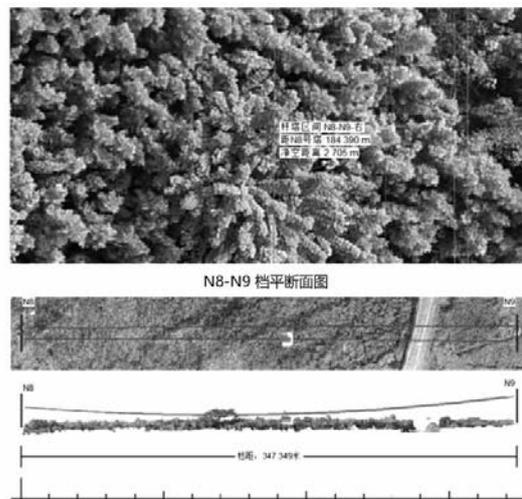


图3 输电线路可见光树障测距

目前,激光树障测距测量精度高,高程误差仅为±10 cm,且后续数据处理速度快,但经济成本较高,在经济欠发达的地区推广较难。可见光树障测距成本低廉,但数据处理耗时多,且测量精度较低,不利

于树障隐患的及时发现和管控。两种方法的对比情况如表2所示。

表2 激光与可见光树障测距的对比

测距方法	设备成本	测试精度	人工操作	数据处理
激光	高	高	复杂	耗时短
可见光	低	低	简单	耗时长

随着无人机技术的不断发展和市场的推广,激光树障测距的优势会越来越突出,将得到电力公司等越来越多的青睐。

1.3 输电线路应急抢险

采用无人机新技术,能够及时深入一线灾害现场,为快速抢险提供第一手资料,提高线路应急抢险的效率。如某供电公司110 kV线路杆塔所在区域发生山体滑坡,人员无法到达现场,使用无人机现场飞巡及时发现了杆塔基础边缘5 m处,有一条长几十米、深6~7 m左右的壕沟,如图4所示。这为抢险方案的制定提供了有力的数据支撑。



图4 110 kV某线路区域发生山体滑坡

此外,采用无人机搭载照明等装置可为线路抢修提供应急照明。如无人机对220 kV某线夜间更换架空地线进行持续3 h的抢修照明,如图5所示,有效地保证了施工的安全进行。



图5 220 kV某线路夜间更换架空地线

随着无人机技术的不断发展与日趋成熟,其应用将越来越广泛,无人机智能巡检模式将逐步取代传统的人工运检模式。

2 无人机巡检发展中的制约因素

1) 飞巡空域限制条件多

一是空域管制严格,申请流程复杂且周期长;二是空域管制机构多且多重管制区域划分不明确;三是部分适航区军事活动频繁;四是空域管制机构人员少且通讯占线率高。应优化空域申请的管理流程,提高飞巡空域的申请效率。

2) 无人机续航能力低

目前,纯电动无人机续航时间一般在30 min左右,不能满足连续大档距的输电线路巡检作业要求。对于油电混合的无人机,续航能力可达到2 h左右,但由于油电混合无人机体积较大,不方便单人作业且有发生爆炸的危险,故目前的推广使用受到较大的约束。

3) 无人机图传距离短

现市场上比较成熟的大疆系列无人机图像传输距离理想状态下一般在3~7 km,但在城区及近郊等地方,由于受到信号干扰以及建筑物的影响,只能保持2 km左右的图像传输。对于无人机杆塔巡检,当线下树木植被较高时,将进一步影响图像传输效果,导致图像传输距离不到1 km,严重制约了无人机巡检的质量。

4) 自主巡检RTK通讯链路信号差

无人机杆塔精细化自主巡检需要较强的RTK网络信号,但由于输电线路所处地区比较偏远,网络信号一般比较弱,很难满足自主巡检的要求,严重阻碍了无人机自主巡检的进程。

5) 手动无人机电力巡检效果欠佳

电力巡检因其具有高电压的风险,需要专业的电力培训和无人机飞巡实践才可实现输电线路通道和杆塔本体的精准飞巡,采集到满足生产需求的图像数据。但由于受到输电线路运维人员年龄结构偏大、学习新技术能力较差等的制约,目前输电线路的人工飞巡技能一直处于较低的行业水平。

6) 数据存储容量严重不足

通过统计某电力公司一运维班组3个小组6名运维人员年度杆塔精细化巡检和通道巡视的影像数据量大小发现,每个班组需要存储的数据达到84 TB(其中通道巡视视频所需容量为2 GB/档×40档/(组×天)×3组×20天/月×12月≈60 TB,杆

塔精细化巡检照片大小为 0.2 GB/基 × 1100 基 ≈ 0.2 TB, 年度 A、B 类树竹隐患通道扫描数据量为 180 档 × 5 GB/(次 × 档) × 2 次/月 × 12 月 ≈ 24 TB)。同时,为了保证数据的安全可靠以及后续的数据挖掘,对部分数据需要备份操作,故目前数据的存储容量基本不能支撑无人机巡检大规模的发展。可考虑配置大容量分布式阵列存储器解决以上问题。

7) 人工缺陷隐患判别工作量大

按照国网运行维护管理规定,对上述班组采集的图片数量估计,年度精细化巡检图片数据量为 1100 基 × 30 张/基 ≈ 3.3 万张,通道巡视视频为 60 TB。同时,通道 A、B 类树障测距数据处理时间需约 360 h(180 档 × 1 h/档 × 12 = 2160 h),给人工缺陷隐患的判别带来巨大的工作量。

3 无人机智能巡检的未来发展关键技术

随着泛在物联网建设的不断推进,无人机在输电线路巡检中的应用将得到越来越多的重视。无人机巡检将逐渐替代单一传统人工巡视,解放人员劳动力,降低线路运行维护成本,实现线路本体运行状态的精准把控,提高线路抗风险水平^[10-12]。

无人机巡检提高了线路运行维护的效率,但仍存在续航能力不足、图像缺陷识别差异性大等明显不足,未来将主要从以下几方面实现输电线路运行维护的自主化、智能化。

3.1 “巢-巢”巡检新模式

对于线路距离较短、供电密度较大的区域,选择有条件的变电站部署无人机机巢(如图6所示)。结合激光导航、视觉识别、RTK精确定位等技术,实现无人机巡检过程中的精准降落、自主更换电池、快速充放电等操作。通过远程指令实现“巢-巢”之间的接力续航和无人机的自主巡检,从而解决了无人机续航能力低的问题,并保证了重要负荷地区输电线路的高可靠性运行维护。

对于分布比较偏远、距离较长的线路,部署无人机机巢将需要巨大的经济成本和维修费用,故主要采用人工操控无人机配置移动充电车辆(如图7所示)进行杆塔本体精细化巡检,并结合固定翼无人机进行远距离通道巡视。

3.2 “5G+”通信实现低延迟自主巡检

目前,无人机自主巡检主要依赖于4G网络信



图6 无人机机巢

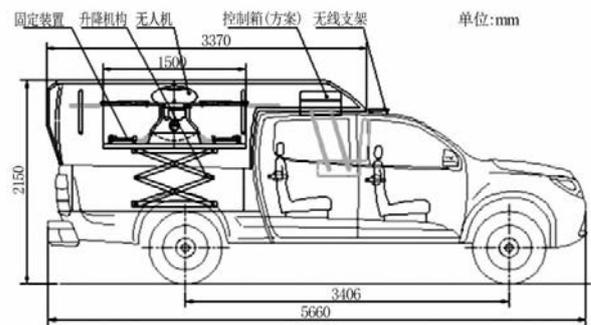


图7 移动充电车辆

号,控制信号存在 200 ms 左右的延迟,不利于无人机的精准悬停和对杆塔本体部件位置的精准拍摄,同时易造成无人机在飞行中出现碰撞等事故。因此利用5G通信技术低延迟、高效的优点,将更加有利于无人机自主巡检影像数据的精准采集以及巡检过程的安全可靠,解决了自主巡检中RTK通讯链路信号差的问题。

3.3 超短波远程高清图传技术

为了保证无人机巡检图像传输的效率,无人机通常采用压缩算法对图像进行压缩,因此无法保证图像的清晰度。同时,目前无人机的图传距离尚不能满足远距离自主巡检的需求,且容易受到周围无线电信号的干扰,故选择合适的图像传输技术对于缺陷的及时发现具有十分重要的意义。超短波通信因其传输性能好、频带较宽等优点,目前正逐渐应用于无人机的远距离高清图传。

3.4 图像缺陷的全过程实时智能识别

大量的机巡作业使得采集到的线路影像数据呈几何级增长,给人眼对图像缺陷的识别带来巨大的工作量,很难保证缺陷的精准识别和缺陷识别的实时性。在条件合适的变电站、供电所、机巢等部署边缘计算处理器,将传输至此的机巡作业

(下转第63页)

参考文献

[1] 张志磊, 郭涛, 田石金, 等. 配电线路电容与PT电感阻抗比对铁磁谐振电压电流特性的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2019, 287(1): 77-81.

[2] 曾祥君, 杨先贵, 王文, 等. 基于零序电压柔性控制的配电网铁磁谐振抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1666-1673.

[3] 杨鸣, 司马文霞, 段盼, 等. 铁磁谐振过电压柔性控制的试验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 647-653.

[4] 雷娟, 郭洁, 高媛, 等. 铁磁谐振仿真模型的探讨[J]. 电瓷避雷器, 2007(4): 33-37.

[5] 余宇红. 铁磁谐振过电压的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[6] 朱岸明, 王倩. 配网铁磁谐振过电压的非线性动力学分析及制措施的研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(3): 28-34.

[7] 由志勋, 刘楠. 水电站内部铁磁谐振及抑制措施仿真研究[J]. 高压电器, 2019(1): 128-134.

[8] 王鹏, 郭洁, 齐兴顺, 等. 35 kV 中性点经消弧线圈接地系统几种铁磁谐振消谐措施有效性分析[J]. 电瓷避雷器, 2010(6): 34-37.

[9] 石文江, 李春平, 王睿, 等. 铁磁谐振在调度端的典型特征[J]. 电力系统自动化, 2015(7): 194-197.

[10] Abbasi H R, Heydari H, Afsari S A. Elimination of Chaotic Ferroresonance in Power Transformer by ISFC[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, 68(12): 132-141.

[11] 黄艳玲, 司马文霞, 杨鸣, 等. 实测铁磁谐振时间序列的非线性动力学分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 126-134.

[12] 龚庆武, 张静, 雷加智, 等. 基于原子分解法的中性点不接地系统铁磁谐振检测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 1114-1124.

[13] 何智强, 李欣, 范敏, 等. 基于消谐器抑制铁磁谐振过电压研究分析[J]. 电瓷避雷器, 2017(5): 77-84.

[14] 张业. 电力系统铁磁谐振过电压研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

[15] Yue Sh, Li P, Guo Jd, et al. A Statistical Information-based Clustering Approach in Distance Space[J]. Journal of Zhejiang University, Science, 2005, 6(1): 71-78.

作者简介:

朱子民(1991), 工程师, 主要从事电力系统运行与控制研究。
(收稿日期: 2020-03-09)

(上接第56页)

图像数据进行AI识别预处理, 筛选大类明显缺陷并将统计信息发送至后台数据处理中心, 同时将其他图像数据进行流式计算, 采用更精确的人工智能算法实现对细小缺陷的精准识别, 保证缺陷识别的实时性和可靠性。

4 结语

现阶段无人机巡检仍然主要依赖于搭载摄像机、红外测温挂件等对线路进行状态监测, 虽然智能化水平不足, 但仍然具有广阔的应用前景。随着无人机巢技术、图像智能识别技术、超短波通信技术、边缘计算等的快速发展, 将逐步实现输电线路的无人机全线自主巡检、图像的实时传输、缺陷的智能识别、缺陷的实时上报等全天候、全天时、全自动的线路运行维护, 进一步提高线路运维效率和质量, 增强线路智能化运行维护水平。

参考文献

[1] 万康. 无人机在山区高压输电线路隐患巡检中的应用[J]. 南方农机, 2019, 50(23): 269-270.

[2] 陈剑刚, 姚璞, 杨俊武, 等. 无人机在架空输电线路巡检中的应用研究[J]. 湖南电力, 2019, 39(5): 74-77.

[3] 罗星云. 无人机在输电线路中的应用[J]. 低碳世界, 2019, 9(9): 115-116.

[4] 刘军, 刘健辉. 无人机在输电线路巡检中应用的探索[J]. 中国新通信, 2019, 21(17): 109.

[5] 陈泌丞, 范菁. 无人机在输电线路巡检中应用的探索[J]. 电工技术, 2019(3): 80-81.

[6] 黄谨益. 电力输电线路巡检中无人机的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(1): 233.

[7] 罗昞昞, 米立, 王原. 无人机在输电线路巡检中的应用[J]. 通信电源技术, 2018, 35(12): 98-99.

[8] 王刚, 孟莹梅. 多旋翼无人机在输电线路巡线中的应用[J]. 山东工业技术, 2019(9): 179-180.

[9] 彭福先, 张玮, 祝晓军, 等. 基于激光点云精确定位的输电线路无人机自主巡检系统研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 117-122.

[10] 胡智敏, 李凯, 汤国锋, 等. 一种输电线路无人机“巢-巢”巡检新模式[J]. 江西电力, 2018, 42(12): 13-15.

[11] 韦舒天, 李龙, 岳灵平, 等. 输电通道人机协同巡检方式的探索[J]. 浙江电力, 2016, 35(3): 10-13.

[12] 李建峰, 段宇涵, 王仓继, 等. 无人机在输电线路巡检中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 62-65.

作者简介:

李倩竹(1989), 硕士研究生, 工程师, 现从事输电线路巡检技术管理工作, 主要研究方向为线路智能运检工作。

(收稿日期: 2020-02-18)