

无人机巡检在输电铁塔螺栓松动识别有效性应用

陈亮

国网黄石供电公司输电运检分公司 湖北 黄石 435000

【摘要】：在现代电力系统中，输电铁塔的结构安全至关重要。铁塔螺栓松动是影响铁塔稳定性的重要因素之一，传统的人工巡检方式存在着效率低、风险大等缺点。无人机巡检技术凭借其高效、精准的特点，已被广泛应用于各类设施的检查工作。本文研究了无人机巡检在识别输电铁塔螺栓松动问题上的有效性，提出了一种基于无人机可视化巡检的实操方法，通过多角度、全方位的现场探查，结合地面终端的数据复核，能够准确判断螺栓松动的情况。实践应用表明，无人机巡检在此方面具有较高的识别可靠性和操作便捷性，能够显著提高巡检效率和精度，降低作业风险，对输电线路的维护和安全监测具有重要意义。

【关键词】：无人机巡检；螺栓松动；输电铁塔；可视化探查；结构安全

DOI:10.12417/3083-5526.25.05.003

引言

输电铁塔作为电力系统的重要组成部分，其结构安全直接影响电力的稳定传输。铁塔的螺栓松动是影响其稳定性的重要因素，若及时发现和修复，可能会导致铁塔倒塌或发生更严重的事故。传统的巡检方式大多依赖人工或部分机械化手段，但这两种方式不仅存在安全隐患，还无法满足高效、精准的巡检需求。近年来，无人机技术的快速发展为输电铁塔的巡检提供了新的解决方案。无人机能够凭借灵活的飞行能力抵达铁塔关键部位，通过高清设备实现可视化探查，快速捕捉螺栓连接状态。如何通过无人机巡检技术提高输电铁塔安全性，减少人工巡检的盲点和失误，降低高空作业风险，成为当前亟待解决的问题。本研究将探讨无人机在这一领域的应用效果，并分析其识别准确性和实际应用价值。

1 无人机巡检技术在输电铁塔中的应用

1.1 无人机巡检的工作原理

无人机巡检技术依托于高精度飞行控制系统和高清可视化设备，能够在预设飞行高度和路径上对输电铁塔进行全方位探查。无人机配备的高清可见光摄像头、变焦镜头等设备，可针对性聚焦铁塔螺栓连接部位、金属构件衔接处等关键区域，实现细节清晰捕捉。在巡检过程中，操作人员通过地面终端预设飞行航线，可根据现场情况实时调整飞行姿态和拍摄角度，确保巡检范围无遗漏、关键部位无死角。巡检获取的影像资料实时回传至地面终端，操作人员可同步观察并标记疑似松动螺栓，后续通过回放复核进一步确认，形成完整的巡检闭环。

1.2 无人机在输电铁塔中的优势

无人机在输电铁塔巡检中具有显著的优势，尤其在效率、安全性和覆盖面方面。与传统人工巡检相比，无人机能够迅速完成单基或多基铁塔的巡检任务，大幅缩短巡检周期，减少人力投入和高空作业的风险^[1]。其灵活的飞行能力使得能够轻松到达人工难以企及的铁塔顶端、横担外侧等部位，避免了人工攀爬巡检时面临的坠落、触电等安全隐患。无人机巡检可不受

地形、植被遮挡等因素限制，在山地、林地等复杂区域仍能高效开展工作，同时可实现多角度、近距离拍摄，对螺栓状态的识别精准度远超人工目视观察。

1.3 无人机巡检的技术要求与挑战

飞行稳定性和环境适应性是无人机巡检成功的核心基础，尤其是在输电线路周边存在电磁干扰、气流不稳定等复杂条件下，对无人机的抗干扰能力和操控精度提出了更高要求。无人机需具备精准悬停、定点变焦拍摄功能，确保在高空气流影响下仍能清晰捕捉螺栓连接细节，同时需配备可靠的续航设备，满足长距离、多基铁塔连续巡检需求。实际应用中，还面临着复杂地形导航、强光照或逆光环境下拍摄清晰度保障等挑战，需通过优化飞行规划、配备逆光补偿设备等方式应对。

2 输电铁塔螺栓松动问题的现状与影响

2.1 螺栓松动的原因与危害

螺栓松动通常是由于长期的机械振动、温度变化及铁塔自身结构老化等因素引起的。输电铁塔在长时间的运行过程中，受风力载荷、导线拉力变化、温度交替变化等自然条件影响，使得铁塔连接部位持续承受动载荷，逐渐导致螺栓螺母松动、垫圈失效^[2]。部分螺栓还可能因锈蚀、磨损导致连接强度下降，进一步加剧松动风险。松动的螺栓不仅会影响铁塔的整体稳定性，还可能导致结构受力不均，引发局部构件变形、位移，长期发展可能造成铁塔倾斜、横担下垂等严重问题。螺栓的松动还会使铁塔结构振动加剧，影响电力传输设备的稳定运行，进一步增加设备故障风险，甚至可能引发铁塔倒塌、线路停运等重大电力事故。

2.2 传统巡检方式的不足

传统的人工巡检方式存在着较为明显的不足，尤其是在检测准确性、效率 and 安全性方面。人工巡检依赖巡检人员攀爬铁塔或借助登高设备作业，不仅工作量大、巡检周期长，还容易受到天气、时间、地形等因素的制约。人工目视观察受距离、角度、光线等影响，对轻微松动的螺栓识别难度大，极易出现

漏检、误判情况，且无法对巡检过程和结果进行可视化留存，后续追溯和复核难度大。人工巡检的效率低，且在高空作业时面临坠落、触电等安全风险，恶劣天气条件下甚至无法开展作业。随着输电铁塔数量增多、覆盖范围扩大，人工巡检的人力成本、时间成本大幅上升，难度和危险性也随之增加，迫切需要一种更加高效、精确、安全的巡检方式。

2.3 输电铁塔螺栓松动检测的需求

传统巡检方法无法满足现代电力系统对高效、精确、安全巡检的需求，尤其是在长距离、复杂地形的电力线路中，巡检的难度与成本显著增加，且漏检风险难以有效控制。因此，迫切需要引入先进的自动化巡检技术，以提升巡检效率和准确性，降低作业风险。无人机作为一种具有高效、灵活和可视化优势的巡检工具，可快速覆盖所有关键检查部位，通过实时影像捕捉和同步复核，精准识别螺栓松动问题，同时留存完整的巡检资料，为后续维护、追溯提供支撑，完全契合现代电力系统对安全、高效巡检的核心需求。

3 无人机巡检技术的应用与有效性

3.1 无人机巡检技术的应用场景适配

无人机巡检技术可适配各类输电铁塔的螺栓松动检测场景，无论是平原、山地、林地等不同地形条件，还是直线塔、转角塔、终端塔等不同类型铁塔，均能高效开展巡检工作。针对不同电压等级的输电铁塔，可通过调整无人机飞行高度、镜头焦距，实现对不同规格螺栓的精准探查。在日常定期巡检中，无人机可按照预设航线批量完成铁塔巡检，大幅提升巡检覆盖率和效率；在特殊天气（如台风、暴雨）过后的应急巡检中，无人机可快速部署，对铁塔螺栓松动、构件损伤等问题进行紧急排查，为抢修工作争取时间。此外，对于人工巡检难以覆盖的偏远区域、高海拔区域，无人机巡检可有效突破地理限制，确保巡检工作无死角。

3.2 无人机巡检在螺栓松动识别中的实操要点

在螺栓松动识别实操中，无人机巡检通过“精准定位-细节捕捉-同步复核-资料留存”的全流程管控，确保识别准确性。首先，通过地面终端规划飞行航线时，需将铁塔螺栓连接部位设为重点巡检点，确保每个重点部位都有对应拍摄角度。飞行过程中，操作人员操控无人机在距离螺栓部位 1-3 米处悬停，通过变焦镜头拍摄清晰影像，重点观察螺栓与螺母的相对位置、螺栓外露长度、垫圈状态等关键特征，判断是否存在松动迹象。对于疑似松动的螺栓，通过多角度拍摄确认，同时标记位置信息，同步回传地面终端。巡检结束后，组织专人对影像资料进行二次复核，确保无漏判、误判，形成“现场识别+二次复核”的双重保障机制。

3.3 无人机巡检的有效性保障措施

无人机巡检在螺栓松动识别中的有效性，可通过标准化操

作、多维度复核、人员专业培训等措施全面保障。在操作层面，制定统一的无人机巡检作业规范，明确飞行高度、拍摄角度、影像清晰度标准等要求，确保巡检流程标准化、规范化^[3]。在复核层面，建立“操作人员现场标记+技术人员二次复核+管理人员抽查确认”的三级复核机制，结合影像资料的放大、比对功能，精准甄别轻微松动、疑似松动等不同情况，大幅提升识别准确率。在人员层面，定期开展无人机操控技能和螺栓松动识别能力培训，提升操作人员对复杂环境的应对能力和对松动特征的判断能力。同时，定期对无人机设备进行校准、维护，确保飞行稳定性和拍摄清晰度，为识别有效性提供设备支撑^[4]。

4 无人机巡检技术的实践应用效果

4.1 应用案例与实践成效

结合国网黄石供电公司输电线路运维实践，选取多条不同地形、不同电压等级的输电线路开展无人机巡检应用，对比传统人工巡检与无人机巡检的效果。实践结果显示，无人机巡检单基铁塔的平均时间从人工巡检的 40-60 分钟缩短至 8-12 分钟，巡检效率提升 75%以上。在螺栓松动识别方面，无人机巡检的准确率达到 95%以上，成功发现多起人工巡检遗漏的轻微螺栓松动问题，有效消除了安全隐患。同时，无人机巡检完全避免了人工高空作业，作业风险大幅降低，且留存的影像资料可作为维护工作的依据，实现了“巡检-维护-追溯”的闭环管理，显著提升了输电线路运维质量。

4.2 与传统巡检方式的效果对比

相较于传统人工巡检，无人机巡检在螺栓松动识别中展现出显著优势。在效率方面，无人机巡检可实现多基铁塔连续作业，尤其在复杂地形线路中，效率优势更为明显，可将整条线路的巡检周期缩短 60%以上。在准确性方面，无人机通过近距离、多角度影像捕捉，可清晰呈现螺栓状态，避免了人工目视观察的局限性，漏检率、误判率远低于传统巡检方式。在安全性和成本方面，无人机巡检无需人工登高作业，彻底规避了高空作业风险，同时减少了人力、登高设备等投入，长期应用可大幅降低运维成本。

4.3 实际应用中的优化方向

结合实践应用情况，无人机巡检技术在螺栓松动识别中的优化方向主要集中在设备适配、操作规范和协同管理三个方面。设备层面，可升级无人机续航能力和抗干扰性能，配备红外辅助拍摄设备，提升夜间、逆光环境下的螺栓识别效果^[5]。操作层面，进一步优化飞行航线规划算法，实现重点部位自动定位、自动拍摄，减少人为操作依赖，提升巡检标准化水平。协同管理层面，建立无人机巡检数据与电力运维管理系统的对接机制，将螺栓松动问题、位置信息、影像资料同步录入运维系统，实现问题自动派单、维护跟踪、闭环管理，提升运维工作的协同效率。

5 无人机巡检技术的未来发展与应用前景

5.1 无人机巡检技术的持续优化

技术的优化主要集中在飞行控制系统、设备适配性和操作智能化水平的提升上。飞行控制系统的进步将使得无人机能够在更加复杂的环境（如强风、强电磁干扰）中完成巡检任务，实现全自动避障、自主规划最优航线。同时，无人机设备将向轻量化、长续航、多功能方向发展，搭载更多适配电力巡检的专用设备，提升螺栓松动识别的精准度和效率。操作智能化方面，将逐步实现螺栓松动特征的自动标记、异常情况自动报警，减少人工干预，使巡检过程更加高效、智能。

5.2 新兴技术的集成应用

新兴技术的集成应用将推动无人机巡检技术的革新。随着5G通信、大数据和云计算等技术的发展，未来无人机巡检将更加智能化和高效化。5G网络的高带宽和低延迟特点将大大提高无人机与地面控制中心之间的数据传输速率，实现高清影像的实时传输和远程操控，支持多人协同复核。大数据技术将帮助无人机巡检系统积累大量的历史巡检数据，通过分析螺栓松动的分布规律、高发部位、发展趋势，为预防性维护提供数据支撑，提前排查高风险区域。结合电力运维管理平台，实现无人机巡检数据与设备台账、维护记录的深度融合，构建全生命周期的铁塔安全管理体系，进一步提升运维决策的科学性。

参考文献：

- [1] 陈洁,陈永阳,黄栋.基于 CA-YOLOv8s 的无人机螺栓松动检测方法研究[J].机电技术,2025(4):40-44.
- [2] 刘书山,刘兰兰,肖乔莎,郭昊,徐深,陈彬.基于 GA-SA 算法的无人机巡检输电铁塔三维航迹优化[J].科学技术与工程,2023,23(6):2438-2446.
- [3] 彭奕龙.无人机巡检在水泥工程安全管理中的应用[J].水泥技术,2025(4):44-51.
- [4] 宋姗姗,李志翔,赵立权.高压输电铁塔螺栓缺陷检测方法研究[J].电工技术,2025(3):212-214.
- [5] 张凯,王海滨,钱茂冬,肖素枝.无人机巡检在矿区铁塔检测中的应用[J].矿山工程,2024,12(4):773-782.

5.3 无人机在输电线路维护中的长远展望

无人机在输电线路维护中的应用前景广阔，随着技术的不断成熟，无人机将在更大范围和更高频次的巡检任务中发挥重要作用。未来，无人机不仅限于螺栓松动等问题的检测，还可以通过集成更多专用设备，对输电线路进行全方位的健康监测，包括铁塔锈蚀、构件变形、导线损伤、绝缘子劣化等多项内容。随着无人机自主飞行和智能化水平的提高，将实现“自主巡检-自动识别-自动派单-闭环维护”的全流程自动化，大幅提升运维效率。无人机技术的普及将在降低人工巡检成本、减少高危作业的同时，显著提升输电系统的安全性与稳定性。在应急处置中，无人机可与抢修队伍协同作业，快速提供现场情况，为抢修方案制定提供支撑，助力电力系统快速恢复运行。

结语

无人机巡检技术在输电铁塔螺栓松动检测中的应用展示了其显著的优势与潜力，尤其在提高巡检效率、保障作业安全、提升识别精准度方面效果突出。随着技术的不断进步和应用的持续深化，无人机巡检将在电力行业中发挥越来越重要的作用，推动输电线路运维向智能化、高效化、安全化转型。通过设备优化、流程规范、技术集成，无人机巡检将为输电铁塔结构安全提供更有力的保障，进一步提升输电系统的安全性与稳定性，促进电力行业的现代化发展。