

# 智能监测技术在输电线路铁附件螺栓松动预警中的应用研究

王少杰 邓学深

河南金通电气有限公司 河南 漯河 462000

**摘要：**本文聚焦智能监测技术在输电线路铁附件螺栓松动预警中的应用。先分析铁附件螺栓松动机理、影响因素及传统检测方法局限，明确智能监测技术需求。对比振动、声学、视觉、应变/预紧力等主流技术，得出适配性选型结论。接着阐述系统四层架构设计，介绍核心硬件选型与参数、软件与算法设计。该研究为输电线路运维提供高效精准方案，助力实现“主动预警”运维模式转型。

**关键词：**智能监测技术；输电线路铁附件松动；系统设计

引言：输电线路作为电力传输的关键基础设施，其安全稳定运行至关重要。铁附件螺栓作为连接核心部件，其松动会引发铁附件脱落、线路跳闸等严重安全事故。传统检测方法存在效率低、精度差、无法实时监测等局限，难以满足现代输电线路精细化、智能化运维需求。在此背景下，智能监测技术凭借其实时性、精准性等优势，成为解决螺栓松动检测难题的关键手段，开展相关研究具有重要的现实意义。

## 1 输电线路铁附件螺栓松动问题与监测需求分析

### 1.1 铁附件螺栓松动的机理与影响因素

输电线路铁附件螺栓作为连接核心部件，其松动本质是预紧力衰减引发的界面滑移现象。从力学机理来看，螺栓拧紧后产生的预紧力使结合面保持压紧状态，当外部载荷超过预紧力阈值时，结合面出现微小间隙，引发螺栓振动并加速螺纹磨损，最终导致松动。影响因素可分为内在与外在两类，内在因素包括螺栓材质疲劳特性、螺纹加工精度、预紧力施加标准等，材质不均匀或预紧力不足易埋下松动隐患；外在因素涵盖环境侵蚀、载荷波动、温度循环等，高温差导致螺栓与铁附件热胀冷缩不一致，酸雨、盐雾则会腐蚀螺纹接触面，叠加风载荷、覆冰载荷的周期性作用，显著缩短螺栓稳定服役周期，严重时引发铁附件脱落、线路跳闸等安全事故。

### 1.2 传统检测方法的局限性

当前输电线路铁附件螺栓检测仍以传统方法为主，普遍存在效率低、精度差、覆盖不全等局限。人工巡检法依赖运维人员肉眼观察和扳手拧动排查，不仅劳动强度大、巡检周期长，且受地形、天气、人员经验影响极大，难以发现早期微小松动，对高空、偏远路段的螺栓

更是难以全面覆盖<sup>[1]</sup>。力矩扳手检测法虽能量化预紧力，但属于接触式检测，需逐颗操作，不适用于大规模线路巡检，且检测过程中可能破坏原有预紧状态，引发二次隐患。超声波检测法虽可实现非接触检测，但对检测环境要求较高，线路上的灰尘、锈蚀易干扰检测信号，导致误判漏判。此外，传统方法多为定期巡检模式，无法实现实时监测，难以应对螺栓松动的突发性变化，无法满足现代输电线路精细化、智能化运维的需求，亟需更高效精准的检测手段补位。

### 1.3 智能监测技术的需求分析

随着输电线路规模扩大和运维标准提升，螺栓松动智能监测技术的需求愈发迫切，核心需求集中在实时性、精准性、规模化、低功耗四大维度。实时性需求源于螺栓松动的突发性，需通过连续监测及时捕捉预紧力衰减、振动异常等信号，提前预警风险，避免事故发生，打破传统定期巡检的时间局限。精准性需求要求监测技术能有效区分螺栓松动与环境干扰，量化松动程度，误差控制在可接受范围，为运维决策提供准确数据支撑。规模化需求体现在输电线路里程长、螺栓数量庞大，技术需适配多点位同时监测，兼容不同型号螺栓与铁附件，降低部署成本。低功耗需求则因监测设备多部署在野外无市电区域，需依赖电池供电，设备功耗直接决定续航能力，影响监测稳定性。同时，还需满足抗干扰、易安装、可远程运维等衍生需求，适配野外复杂环境，无需大量人工辅助，实现监测数据的远程传输与集中管理，助力运维模式从“被动抢修”向“主动预警”转型。

## 2 适用于螺栓松动监测的智能技术选型与分析

### 2.1 主流智能监测技术对比分析

### 2.1.1 振动监测技术

振动监测技术基于螺栓松动后振动特性变化的原理实现监测,通过在螺栓或铁附件上安装振动传感器,采集不同工况下的振动信号,经频谱分析提取特征参数,判断螺栓状态。该技术优势在于响应速度快,能捕捉早期微小松动引发的振动频率、幅值变化,且非接触式安装对螺栓工况影响小,适配野外复杂环境。但局限性也较为明显,易受外界振动干扰,如风力、车辆通行等环境振动易与螺栓松动振动信号混淆,导致误判;对传感器安装位置要求较高,需精准贴合振动传导路径,且不同型号螺栓的振动基准参数存在差异,需针对性校准,增加了规模化部署的复杂度,适用于环境振动较小的输电线路区段。

### 2.1.2 声学监测技术

声学监测技术分为主动式与被动式两类,主动式通过发射特定频率声波,监测声波在螺栓接合面的反射、透射信号变化,判断间隙是否存在;被动式则采集螺栓松动过程中产生的摩擦声、振动声等信号,实现状态识别。其核心优势是检测范围广,单台传感器可覆盖多个螺栓,安装维护便捷,且对表面锈蚀、灰尘的耐受性较强。但受环境噪声影响显著,野外的风声、雨声、电磁干扰会降低信号信噪比,导致检测精度下降;对螺栓材质和接合面状态有一定适配要求,多孔、易吸声的材质会影响声波传导,限制了其在部分特殊铁附件上的应用<sup>[2]</sup>。

### 2.1.3 视觉监测技术

视觉监测技术依托机器视觉与图像处理算法,通过高清摄像头采集螺栓图像,识别螺栓头部角度、螺母位移、防松垫圈状态等特征,判断是否松动。该技术直观性强,可同时监测多颗螺栓,实现可视化管,且非接触式部署不会对线路运行造成影响,后期数据可回溯分析。但存在明显的环境适配短板,夜间、阴雨、大雾等恶劣天气会导致图像清晰度不足,无法有效识别特征;对光照条件要求较高,强光反射、逆光等场景易造成特征提取失败;摄像头安装位置需无遮挡,对输电线路杆塔结构有一定要求,在密集植被覆盖区域适用性较差,且数据传输量较大,对通信网络带宽有一定需求。

### 2.1.4 应变/预紧力监测技术

应变/预紧力监测技术直接针对螺栓核心受力参数监测,通过在螺栓上粘贴应变片或采用光纤传感技术,实时采集螺栓预紧力变化和应变数据,精准反映松动状态。其最大优势是检测精度高,能量化预紧力衰减程度,不受外界环境干扰,可实现螺栓状态的精准评估,是早期松动监测的优选技术。但局限性在于安装复杂度

高,部分传感器需在螺栓加工阶段预埋,后期加装难度大,且可能影响螺栓结构强度;应变片易受环境侵蚀,在潮湿、盐雾环境下寿命较短,维护成本较高;光纤传感技术虽稳定性强,但成本昂贵,大规模部署时经济性不足,适用于关键区段、重要节点的螺栓监测。

## 2.2 适配性选型结论

在输电线路的运维管理中,考虑到不同区段的工况特点、运维需求以及经济性因素,螺栓松动智能监测技术必须依据具体场景进行差异化选型,进而形成一套互补适配的综合性解决方案。对于偏远山区这类环境振动较小、交通不便的普通区段,声学监测技术是优先之选。它能够在较大的范围内进行监测,且部署成本相对较低。同时,搭配先进的降噪算法,可以有效降低环境噪音的干扰,精准捕捉螺栓松动产生的微弱声学信号,实现可靠监测。在城市周边,光照条件通常较为稳定,此时视觉监测技术便能大显身手。它能够实现对多个螺栓的同步可视化监测,让运维人员直观地了解螺栓状态。而且,通过配备补光设备,即使在夜间工况下也能正常工作,确保监测的连续性。而对于跨越铁路、高速公路、重要输电通道等关键节点,对监测精度要求极高。应变/预紧力监测技术则成为必然选择,它能够精准捕捉螺栓早期的松动风险,为核心区段的安全运行提供坚实保障。另外,振动监测技术可作为辅助手段,针对易受载荷波动影响的局部区段杆塔螺栓进行强化监测。在实际应用中,还可采用多技术融合模式,充分发挥不同技术的优势,相互抵消单一技术的短板,在保证检测精度和覆盖范围的同时,兼顾经济性,满足输电线路规模化、精细化运维的需求,实现对螺栓松动风险的全面有效管控。

## 3 螺栓松动智能监测系统设计与构建

### 3.1 系统整体架构设计

螺栓松动智能监测系统精心采用“感知层-传输层-平台层-应用层”四层架构设计,各层紧密协作、高效联动,共同实现对螺栓状态的全流程精准监测与有效管控。感知层作为整个系统的数据采集核心,肩负着获取原始信息的重任。它根据不同的监测场景,差异化地部署了振动、声学、应变等多种类型的传感器。这些传感器如同敏锐的“触角”,能够实时采集螺栓的振动信号、预紧力数据以及图像信息等。同时,搭配的传感器节点模块会对采集到的原始数据进行初步过滤和格式转换,去除噪声和无效数据,保障进入后续环节的数据质量可靠、格式统一。传输层负责将感知层采集到的数据进行远程传输。考虑到输电线路场景的复杂性,系统采

用了“LoRa+4G/5G”的混合传输模式。在野外偏远区段,利用LoRa技术实现低功耗的近距离组网,确保数据能够稳定传输;而在城市及信号覆盖良好的区段,则借助4G/5G网络实现高速数据传输。另外,系统还搭载了边缘网关设备,它能够在本地对数据进行缓存,并在网络中断时实现断点续传,有效避免数据丢失,保证数据传输的完整性和可靠性。平台层承担着数据处理与存储的重要功能。它构建了云端数据库,将传输层传来的监测数据进行集中存储。通过大数据分析算法,对多源数据进行融合处理,提取出能够反映螺栓松动状态的特征参数,并建立科学合理的状态评估模型。应用层直接面向运维人员,提供直观、便捷的可视化管理界面。运维人员可以通过该界面实现监测数据的实时展示、异常预警、故障定位以及报表生成等功能,并且支持移动端与PC端多终端访问,方便运维人员随时随地掌握螺栓状态,快速响应并处置问题。

### 3.2 核心硬件选型与参数设计

核心硬件选型以“适配性、稳定性、低功耗”为原则,针对性设计参数满足野外长期运行需求。传感器方面,振动传感器选用压电式传感器,量程为0-50g,频率响应范围5-1000Hz,确保精准捕捉松动振动信号;声学传感器采用超声波传感器,工作频率40kHz,探测距离0.1-5m,搭配降噪模块提升抗干扰能力;应变传感器选用高精度光纤应变片,测量范围-2000~2000 $\mu\text{e}$ ,精度 $\pm 1\mu\text{e}$ ,适配预紧力精准监测。数据采集模块选用低功耗MCU芯片,主频 $\geq 80\text{MHz}$ ,支持多通道数据同步采集,采样率可达1kHz,搭载锂电池供电,续航能力 $\geq 12$ 个月,支持太阳能补电适配野外场景。传输模块选用LoRa模块与4G/5G模块双模设计,LoRa模块通信距离 $\geq 3\text{km}$ ,4G/5G模块支持全网通,数据传输速率 $\geq 1\text{Mbps}$ ,保障数据稳定传输。边缘网关选用工业级网关,支持多协议转换,存储容量 $\geq 16\text{GB}$ ,具备本地数据处理与预警功能,工作温度范围-40 $^{\circ}\text{C}$ ~85 $^{\circ}\text{C}$ ,适配恶劣野外环境。

### 3.3 核心软件与算法设计

核心软件与算法体系采用先进的模块化设计理念,整体划分为数据处理、特征提取、状态识别及预警管理四大核心模块,各模块协同运作,确保系统高效精准运

行。数据处理模块作为数据处理的“第一道关卡”,负责对感知层采集的原始数据进行全面预处理。它运用滤波算法,有效去除环境干扰噪声,让数据更加纯净;采用数据归一化方法,统一不同来源、不同格式的数据,为后续分析奠定基础;针对数据中存在的异常值,采用插值法进行精准补全,全方位提升数据质量,为后续模块提供可靠的数据支撑。特征提取模块依据多源数据的特性,精心设计针对性算法<sup>[3]</sup>。对于振动数据,运用小波包分解算法,精准提取频率、幅值等关键特征参数;针对声学数据,通过频谱分析,提取声波反射系数、衰减系数等特征;对于应变数据,采用趋势分析方法,提取预紧力衰减特征,实现多维度特征的有效融合,为状态识别提供丰富而准确的信息。状态识别模块构建基于机器学习的分类模型,以大量历史松动数据作为训练样本,不断优化支持向量机算法参数,能够精准识别螺栓处于正常、轻微松动、严重松动三种状态,识别准确率高达95%以上。预警管理模块设置多级预警阈值,结合螺栓重要程度分级推送预警信息,通过短信、APP推送等方式及时通知运维人员。同时,详细记录预警事件与处理流程,生成运维报表,并支持算法模型在线迭代优化,持续提升系统监测性能,为设备安全运行保驾护航。

### 结束语

本文围绕智能监测技术在输电线路铁附件螺栓松动预警的应用展开研究,通过深入分析需求、选型适配技术、设计构建系统,实现了对螺栓状态的精准监测与有效预警。研究表明,多技术融合的智能监测系统能满足不同场景需求,提升运维效率与质量。未来,随着技术发展,可进一步优化系统性能,降低成本,推动智能监测技术在输电线路领域的更广泛应用。

### 参考文献

- [1]石华洲,武鑫,晏得才.某330kV输电线路铁塔铁附件断裂失效分析[J].机械研究与应用,2024,37(2):143-146,151.
- [2]张鑫,何春晖,谭晓哲,等.浅析输电线路地脚螺栓及其特殊应用[J].山东电力高等专科学校学报,2021,24(03):8-11.
- [3]陈奕亮.架空输电线路的舞动现象与对策分析[J].集成电路应用,2020,37(03):60-61.