

铁塔基础沉降对输电线路安全的影响评估

苏 宸 李明胜 唐保科

国网新疆电力有限公司阿克苏供电公司 新疆 阿克苏 843000

摘 要：铁塔基础沉降是输电线路安全运行的关键因素。本文系统分析了均匀沉降、不均匀沉降及局部沉降三种基本模式及其地质、施工、环境等成因，深入揭示了基础沉降对铁塔结构、导地线、金具连接件及线路运行参数的多维度影响机理。在此基础上，梳理了传统与新型智能监测技术及数据处理方法，构建了涵盖多维度指标的安全评估模型与四级风险划分标准，为输电线路基础沉降风险的精准识别、预警防控及运维决策提供了理论依据与技术支撑。

关键词：铁塔基础；不均匀沉降；输电线路；安全评估

引言：输电铁塔是电力系统的核心支撑结构，其基础沉降问题直接关系线路安全与电网稳定运行。随着输电线路规模不断扩大，塔位地质条件日趋复杂，基础沉降引发的铁塔倾斜、导线弧垂异常、金具损伤等问题频发，已成为威胁线路安全的主要隐患之一。然而，现有研究多聚焦于单一因素分析，缺乏对沉降影响机理的系统性评估与量化分析。本文从沉降类型与成因出发，系统剖析其对线路各环节的影响机理，结合监测技术与评估模型，旨在为线路安全运维提供科学依据。

1 铁塔基础沉降的类型与成因分析

1.1 基础沉降的基本模式

输电铁塔基础沉降是岩土体与基础结构相互作用产生的竖向位移现象，依据位移形态、分布特征及变形规律，可划分为均匀沉降、不均匀沉降、局部沉降三种核心基本模式。均匀沉降表现为铁塔四个基础支点竖向位移基本一致，整体呈垂直下沉状态，沉降差值通常控制在极小范围内，铁塔整体倾斜度无明显变化，结构几何形态保持完整。不均匀沉降是线路运行中最常见、危害最大的模式，各基础支点沉降量存在显著差值，会直接引发铁塔倾斜、基础扭转等变形。局部沉降多发生在单根或两根基础位置，沉降范围集中、区域性特征明显，常出现在地质条件不均的塔位场地^[1]。三种沉降模式并非独立存在，长期运行中局部沉降可逐步发展为不均匀沉降，轻微均匀沉降虽短期无明显危害，但持续累积后仍会威胁线路安全稳定运行。

1.2 主要成因

铁塔基础沉降的成因可归纳为地质环境、工程施工、外部环境及人为因素四大类。地质环境是核心先天因素，塔位场地土层分布不均、土体压缩性差异大、

存在软弱夹层或回填土层压实度不足，都会导致土体受荷载后压缩变形，引发基础沉降。地下水动态变化影响显著，雨季地下水水位上升会软化土体、降低地基承载力，水位骤降会使土体有效应力增大，加剧土层压缩沉降。工程施工因素包含基础开挖扰动原状土体、混凝土浇筑质量不达标、基础埋深不足、回填土分层夯实不到位等施工缺陷，为后期沉降埋下隐患。外部环境与人为因素方面，线路长期承受导线覆冰、大风等交变荷载，会持续冲击地基土体；周边土方施工、机械碾压、地下工程开挖等人类活动，会破坏塔位原有土体结构，进一步诱发和加剧基础沉降问题。

2 基础沉降对输电线路安全的影响机理

2.1 对铁塔结构的影响

铁塔作为输电线路的核心支撑结构，对基础沉降变形敏感度极高，不同沉降模式会对铁塔结构产生差异化破坏作用。均匀沉降对铁塔结构性损伤较小，仅会造成铁塔整体小幅下沉，不会产生附加结构应力，短期不影响铁塔承载性能，但持续均匀沉降会改变铁塔设计标高，间接影响线路整体受力平衡。不均匀沉降是破坏铁塔结构的主要诱因，基础沉降差值会使铁塔主材、斜材产生额外拉压应力，导致构件变形、螺栓松动、焊缝开裂。沉降差值持续扩大时，铁塔会出现明显倾斜、扭曲，结构内力分布严重失衡，局部杆件应力远超设计阈值，引发杆件屈曲、变形断裂。长期反复的沉降变形会累积结构损伤，降低铁塔整体刚度和稳定性，极端情况下会导致铁塔倾覆、坍塌，引发重大线路安全事故。

2.2 对导线与地线的影响

铁塔基础沉降会改变杆塔的相对高差与水平间距，直接扰动导线、地线的悬挂状态和受力体系，引发一系

列安全隐患。当铁塔发生不均匀沉降并产生倾斜时,导线悬挂点高度出现偏差,原有设计的弧垂值发生改变,部分区段导线弧垂增大、松弛度提升,极易引发导线对地、对交叉跨越物安全距离不足的问题,增大放电、短路跳闸风险。部分区段导线会因悬挂点高差减小被拉紧,导线轴向张力大幅上升,长期超荷载受力会加速导线线材疲劳老化、断股损伤^[2]。地线与导线受力规律一致,沉降引发的张力失衡会导致地线偏移、舞动幅度增大,加剧线路风振损伤。同时,多基杆塔连锁沉降会造成整条线路张力分布紊乱,导线、地线受力不均,大幅提升线路断线、掉线故障的发生概率。

2.3 对金具与连接件的影响

输电线路金具及连接件是保障导线、地线与铁塔可靠连接的关键部件,基础沉降引发的杆塔变形与线路张力变化,会对其产生持续性机械损伤。基础沉降导致铁塔倾斜、线路张力偏移后,悬垂线夹、耐张线夹会偏离原始安装角度,产生额外剪切力和扭转力矩,长期受力会造成线夹螺栓松动、夹持力下降,出现导线滑移隐患。防震锤、间隔棒等防护金具,会因线路舞动、张力波动出现偏移、脱落,失去原有防震、控弧垂的防护作用。塔上挂板、抱箍、连接螺栓等钢结构连接件,会在铁塔结构形变产生的附加应力作用下,出现金属疲劳、锈蚀加速、裂纹扩展等问题。长期累积的损伤会导致金具连接件机械性能大幅衰减,连接可靠性下降,极易引发金具断裂、导线脱落等故障,严重威胁线路稳定运行。

2.4 对线路运行参数的影响

铁塔基础沉降通过改变线路几何形态和受力状态,直接扰动输电线路多项核心运行参数,影响电网供电稳定性。基础沉降引发的导线弧垂变化,会改变线路相间距离、对地安全距离,直接影响线路绝缘配合参数,使线路工频放电电压、操作过电压耐受能力下降,雷雨天气下闪络跳闸风险显著提升。线路张力分布失衡会改变导线的电气导通稳定性,引发线路电阻小幅波动,影响输电效率。同时,杆塔倾斜、线路偏移会改变线路固有振动参数,增大线路风振、舞动幅值和频率,加剧线路动态荷载冲击。此外,沉降导致的线路结构形变会改变线路波阻抗参数,影响线路过电压传播特性,降低线路防雷性能,最终导致线路故障率上升、供电可靠性下降,影响电网安全稳定运行指标。

3 基础沉降监测技术与数据获取

3.1 传统监测方法

传统铁塔基础沉降监测是线路运维的基础手段,以人工接触式测量技术为主,包含水准测量、全站仪测量、沉降观测标测量等核心方法。水准测量依托精密水准仪,通过定期观测塔位基准点与基础观测点的高差变化,精准获取基础竖向沉降数据,测量精度高、数据可靠性强,适用于各类常规塔位的静态沉降监测。全站仪测量主要用于监测铁塔倾斜、基础水平位移及沉降耦合变形,可通过三维坐标测算实现多点位同步观测,适配复杂地形塔位监测^[3]。沉降观测标法则通过在基础承台、塔身设置固定观测标识,长期跟踪标识高程变化,记录沉降累积量。传统监测方法技术成熟、成本较低、精度可控,但存在明显短板,依赖人工现场作业,监测周期长、时效性差,无法实现全天候实时监测,且山区、偏远塔位作业难度大、安全风险高,难以捕捉瞬时沉降变形数据。

3.2 新型智能监测技术

随着智能电网技术的快速发展,各类新型智能化监测技术逐步应用于铁塔基础沉降监测领域,有效弥补了传统人工监测在时效性、覆盖范围及精度等方面的短板。GNSS 卫星定位监测技术可实现全天候、全自动三维沉降位移监测,通过在铁塔基础布设专用监测终端,依托多星联合定位数据实时采集竖向沉降与水平位移信息,适配大范围、偏远地区输电线路的长期连续监测需求。光纤传感监测技术涵盖光纤光栅与分布式光纤两类方案,可将传感元件嵌入基础土体及钢结构内部,实时感知微小沉降变形与应力应变变化,具备抗电磁干扰、耐腐蚀、使用寿命长等突出优势,尤其适配高压复杂电磁环境下的线路在线监测。另外,无人机航拍三维建模、雷达遥感监测、物联网倾角传感监测等技术也已在线路运维中得到广泛应用,可快速获取塔位场地地形变化、铁塔倾斜角度及基础沉降状态,实现非接触式高效监测,大幅提升监测效率与数据实时性,满足输电线路精细化智能运维需求。

3.3 监测数据处理

铁塔基础沉降监测原始数据存在噪声干扰、数据缺失、异常波动等问题,需通过标准化数据处理流程,保障数据精准有效。数据预处理是核心基础环节,通过剔除设备故障、环境干扰导致的异常数据,补全缺失监测数据,消除温度、风力、降雨等环境因素对沉降数据的干扰,还原真实沉降变形规律。随后采用数据滤波、拟合分析方法,对离散监测数据进行平滑处理,去除随机波动噪声,提取基础沉降的时序变化趋势、沉降速率、累积沉降量等核心参数。同时,结合塔位地质条件、运

行工况,对多维度监测数据进行融合分析,关联沉降数据与铁塔应力、线路张力、环境参数的对应关系。最终形成标准化监测数据集,为后续沉降风险评估、变形预测、隐患预警及运维决策提供精准、可靠的数据支撑。

4 基础沉降对线路安全的评估模型构建

4.1 评估指标体系建立

构建科学完善的评估指标体系是精准判定铁塔基础沉降安全风险的核心前提,需遵循科学性、系统性、针对性及可量化原则,覆盖地质、结构、运行、环境四大维度。地基土层指标包含土体压缩模量、地基承载力、土层含水率、回填土密实度等,反映沉降产生的先天地质条件;基础沉降特征指标涵盖均匀沉降量、不均匀沉降差值、沉降速率、沉降累积时长,是判定沉降危害的核心参数。铁塔结构指标包含塔身倾斜度、构件应力应变、螺栓紧固状态、结构变形量;线路运行指标包含导线弧垂偏差、线路张力波动、金具损伤程度、绝缘性能参数。同时纳入环境影响指标,如地下水水位变化、极端天气频次、周边施工扰动强度,形成多维度、多层次评估指标体系,全面覆盖沉降隐患的诱发因素与危害表现。

4.2 有限元仿真分析

有限元仿真分析是量化研究基础沉降对输电线路结构受力及安全状态影响的重要技术手段,可实现复杂工况下的精细化模拟分析。首先依托铁塔实际结构参数、基础尺寸、场地地质参数,建立铁塔-基础-地基一体化三维有限元模型,精准还原构件材质属性、连接方式、地基约束条件及线路荷载工况。通过模拟不同沉降模式、不同沉降量的工况,计算铁塔主材、斜材的应力应变分布、位移变形规律,以及导线、金具的受力变化特征。对比不同沉降程度下结构应力峰值、变形极值与设计允许阈值,精准定位结构薄弱区域和高风险点位。同时可仿真模拟持续沉降、极端天气耦合沉降的复杂工况,预判结构损伤演化趋势,弥补现场监测无法模拟极端工况的短板,为安全评估和隐患治理提供量化仿真依据。

4.3 风险等级划分标准

结合沉降监测数据、仿真分析结果及线路运行规范,可建立四级基础沉降风险等级划分标准,实现隐患分级管控。一级为低风险状态,基础沉降量微小、沉降速率趋于稳定,无不均匀沉降差值,铁塔结构、线路参数无异常,不影响线路正常运行,仅需常态化定期监测。二级为一般风险状态,存在轻微不均匀沉降,沉降速率缓慢可控,铁塔小幅倾斜、线路弧垂轻微偏差,无结构损伤,需加强监测频次,跟踪沉降变化趋势^[4]。三级为较高风险状态,沉降差值超标、沉降速率加快,铁塔结构出现附加应力、金具存在轻微损伤,线路运行参数偏移,需及时制定整改方案,开展基础加固处理。四级为高风险状态,不均匀沉降严重、沉降持续加剧,铁塔倾斜超标、构件变形损伤,线路存在放电、断线、倒塔隐患,需立即采取停运检修、紧急加固措施,杜绝重大安全事故发生。

结束语

铁塔基础沉降对输电线路安全的影响具有多维性、累积性和突发性特征,亟需建立系统化的监测评估体系。本文通过分析沉降成因与影响机理,结合传统与智能监测技术,构建了多维度评估指标体系与四级风险划分标准,实现了从数据采集到风险判定的全链条覆盖。未来应进一步融合人工智能与数字孪生技术,推动沉降预测由被动监测向主动预警转变,持续提升输电线路运维精细化水平,为电网安全稳定运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 孙鹏程.110kV 输电线路运维中铁塔基础沉降智能识别方法 [J]. 通信电源技术,2025,42(19):231-233.
- [2] 高瑾,杨臣剑,支建东,等.临近高压输电线路的铁塔组立施工技术及安全管控 [J]. 电力安全技术,2026,28(1):46-51.
- [3] 谭勇,向钟,甘磊.输电线路铁塔组立施工安全精细化管理策略研究 [J]. 电力与能源,2025,46(6):585-590.
- [4] 刘源,熊鹏文,曾云飞,等.面向输电线路铁塔组立施工承力系统安全检测的力传感器设计 [J]. 中国测试,2024,50(3):116-122.