

风力发电塔基础沉降监测方法研究

董礼军

西北水利水电工程有限责任公司 陕西 西安 710100

摘要: 风力发电塔基础沉降受多种因素影响, 监测需关注沉降量、速率和不均匀沉降程度等指标。监测技术包括传统、自动化和新型方法, 各有优劣。数据处理涵盖预处理、计算分析与质量控制。现有监测技术存在精度、效率等方面的局限, 可从设备、方法和流程上优化, 优化效果需围绕精度、效率等维度, 采用定量与定性结合方式评估。

关键词: 风力发电塔; 基础沉降; 监测技术; 数据处理

引言: 风力发电塔作为清洁能源领域的关键设施, 其基础沉降问题关乎运行安全与发电效率。基础沉降受岩土体性质、荷载特征及环境因素共同影响, 监测需关注沉降量、速率及不均匀沉降等核心指标。当前监测技术涵盖传统、自动化及新型方法, 但在精度、效率、适应性及成本等方面仍存局限。因此, 本文深入分析现有技术不足, 提出优化路径, 并构建评估体系, 以期提升监测效能, 保障风力发电塔长期稳定运行。

1 风力发电塔基础沉降相关基础认知

1.1 风力发电塔基础结构特征

风力发电塔基础的核心结构类型需结合塔体高度、重量及承载需求设计, 不同结构类型的承载特点各有侧重, 均以保障塔体长期稳定运行为核心目标。基础作为塔体的支撑主体, 主要承载塔体传递的竖向荷载、水平荷载及风荷载, 其承载能力和稳定性直接决定塔体的运行安全。基础沉降是基础在自身重力、外部荷载及周边环境综合作用下产生的竖向位移, 表现形式主要分为整体下沉和局部沉降两种, 整体下沉是基础均匀竖向位移, 局部沉降则是基础不同区域不均衡下沉。基础沉降会改变塔体垂直度, 导致塔体受力分布不均, 破坏结构力学平衡, 进而影响发电效率, 严重时会造成塔体结构损坏, 引发安全隐患, 因此明确基础结构特征及沉降影响至关重要。

1.2 风力发电塔基础沉降影响因素

导致风力发电塔基础沉降的主要因素包括岩土体性质、基础荷载特征和环境因素, 各因素通过不同作用机制共同影响沉降的发展。岩土体性质是核心影响因素, 岩土体的密实度、承载力和压缩性直接决定沉降幅度和速率, 密实度高、承载力强的岩土体可有效减少沉降, 反之则会加剧沉降, 岩土体的渗透性也会影响沉降发展速度。基础荷载特征的影响体现在荷载大小、分布均匀性和施加方式上, 荷载越大沉降幅度越大, 分布不均会导

致局部沉降加剧, 荷载施加快慢会影响沉降速率^[1]。环境因素通过改变岩土体物理力学性质间接作用于基础, 温度变化导致岩土体热胀冷缩, 降水和地下水水位变化会改变岩土体有效应力, 进而影响基础沉降, 各因素相互作用决定沉降的最终状态。

1.3 风力发电塔基础沉降监测核心指标

风力发电塔基础沉降监测的核心指标包括基础沉降量、沉降速率和不均匀沉降程度, 明确各指标的监测意义及判定标准是监测工作的核心。沉降量是监测点相对于基准点的竖向位移总量, 监测意义在于直观反映基础沉降的整体幅度, 判定标准需结合基础结构、岩土体性质及塔体运行要求, 确保不超出影响塔体安全的临界值。沉降速率是单位时间内的沉降幅度, 用于反映沉降发展快慢, 通过监测沉降速率可研判沉降趋势, 判定标准依据岩土体固结特性和基础稳定性要求, 避免沉降过快引发隐患。不均匀沉降程度是不同监测点的沉降量差值, 用于判断沉降均匀性, 不均匀沉降会导致塔体倾斜, 其判定标准结合基础刚度和塔体抗倾斜能力, 确保在可承受范围之内。

2 风力发电塔基础沉降监测技术分类及原理

2.1 传统沉降监测技术

传统沉降监测技术核心包括水准测量和三角高程测量, 均基于几何测量原理, 通过测量监测点与基准点的高差计算沉降量。水准测量的核心原理是利用水平基准面的稳定性, 操作流程包括仪器架设、整平、读数、记录和计算, 通过多次观测确保精度, 其技术特点是精度高、设备成本低、技术成熟, 但操作繁琐、人工工作量大, 受地形和天气影响较大, 无法实时监测, 适用于监测范围小、频率低且地形平坦的场景。三角高程测量通过测量水平距离和垂直角, 利用几何关系计算高差, 操作相对灵活, 无需铺设水准路线, 适用于地形复杂区域, 但精度略低于水准测量, 受大气折光和地球曲率影响较大,

需进行误差修正,同样依赖人工操作,无法实时监测。

2.2 自动化沉降监测技术

自动化沉降监测技术依托传感、数据采集和传输技术,实现监测过程自动化,核心包括静力水准监测、倾角传感器监测和卫星导航定位测量。静力水准监测利用连通管液体平衡特性,将监测点容器通过连通管连接,通过传感器监测液面高度差转化为沉降量,设备组成包括传感器、连通管、数据采集器和传输模块,自动化实现方式是数据采集器按预设频率自动采集传输数据,终端实时接收处理^[2]。倾角传感器监测通过感知基础倾斜角度间接计算沉降量,设备体积小、安装便捷,传感器实时感知倾斜变化,采集器自动采集传输数据,终端将角度转化为沉降量。卫星导航定位测量利用卫星信号确定监测点三维坐标,通过坐标变化计算沉降量,设备包括接收机、传输模块和终端,可实现大范围远距离自动化监测,无需现场人工干预。

2.3 新型沉降监测技术

新型沉降监测技术核心包括三维激光扫描和光纤传感监测,依托现代激光和光纤技术,具备高精度、非接触式等优势。三维激光扫描的应用原理是利用激光高精度测距能力,通过扫描仪向基础表面发射激光,记录发射与反射时间差计算距离,获取三维点云数据,对比不同时期数据分析沉降情况。其技术优势是非接触式监测、范围广、精度高,能捕捉微小沉降细节,应用前提是监测环境无遮挡,确保激光顺利传输,避免振动影响精度。光纤传感监测利用光纤光传输特性,将光纤布设在基础表面或内部,基础沉降使光纤产生应变,通过监测光信号变化计算沉降量。其技术优势是抗干扰能力强、精度高、可分布式监测,应用前提是合理布设光纤,确保与基础紧密结合,保证光纤完整性,避免破损影响监测效果。

3 风力发电塔基础沉降监测数据处理与分析

3.1 监测数据预处理

监测数据预处理是数据处理的首要步骤,核心是对原始监测数据进行筛选、异常值剔除、缺失值补全和格式标准化,确保数据真实、完整、规范。数据筛选是初步审核原始数据,剔除因设备故障、操作失误、环境干扰产生的无效数据,筛选出符合要求的有效数据,判断依据是数据变化规律和合理范围。异常值剔除是进一步识别去除与整体变化趋势不符的异常数据,通过对比不同监测点、不同时期的数据,确保数据一致性,避免异常数据影响结果。缺失值补全针对监测过程中出现的缺失数据,结合数据变化趋势和相邻、历史数据,采用合理方法补全,确保数据完整,避免与实际沉降情况偏差

过大^[3]。格式标准化是统一不同技术、设备采集的数据单位、记录格式和精度,消除格式差异,确保数据可比,为后续统一计算分析提供便利。

3.2 监测数据计算与分析

监测数据计算与分析是核心环节,核心是通过计算核心指标,结合分析方法研判沉降规律和均匀性。数据计算主要针对沉降量和沉降速率,根据监测技术不同采用对应方法,沉降量通过监测点初始与实时高程差值计算,需进行误差修正确保准确;沉降速率通过不同时期沉降量差值与时间差值计算,反映沉降发展速度。数据分析包括对比分析和趋势分析,对比分析是对比不同监测点的沉降量和速率,判断沉降均匀性,差异较大则说明存在不均匀沉降,需重点关注。趋势分析结合历史监测数据,分析沉降量和速率的时间序列变化,研判沉降发展趋势,预测变化方向和最终沉降量,判断是否超出合理范围,为安全防控措施制定提供数据支撑,确保分析结果科学可靠。

3.3 数据处理质量控制

数据处理质量控制贯穿数据处理全过程,核心是确保数据处理规范和结果准确,为监测工作提供可靠保障。首先明确精度控制要求,根据不同监测技术的精度标准和监测需求,设定数据处理误差范围,确保计算结果精度符合要求,避免因精度不足无法反映实际沉降情况。数据校验是对预处理后的数据、中间计算数据和最终分析结果进行全面审核,检查数据完整性、准确性和规范性,及时纠正遗漏、错误等问题^[4]。数据复核建立双人复核机制,通过不同人员、不同方法再次审核,避免个人操作失误导致错误。同时建立质量记录制度,详细记录数据处理各环节操作、数据来源、计算方法和校验复核结果,确保可追溯,便于后续检查验证和问题整改。

4 风力发电塔基础沉降监测技术优化

4.1 现有监测技术存在的不足

现有风力发电塔基础沉降监测技术在精度、效率、适应性、成本等方面存在诸多局限性,制约监测工作质量和效率。传统监测技术精度较高、设备成本低,但人工工作量大、效率低,需大量现场操作,人力成本高,受天气和地形影响大,无法实时连续监测,难以满足大规模、高频率监测需求,监测范围有限。自动化监测技术效率高、可实时监测,减少人工工作量,但设备购置、安装和维护成本高,部分技术受环境影响大,复杂地形或恶劣环境下精度下降,设备稳定性和适应性不足,存在数据传输不稳定问题。新型监测技术精度高、具备非接触式优势,但应用门槛高,设备安装维护难度大,需专

业技术人员操作，技术和人力成本高，设备稳定性有待提升，长期监测易出现故障，应用范围受环境限制，各类技术还存在精度不均衡、方法单一等共性问题。

4.2 监测技术优化路径

针对现有监测技术的不足，结合监测实际需求，从设备改进、方法融合、流程优化三个方面提出优化路径，提升监测技术适用性和可靠性。设备改进聚焦精度、稳定性、便捷性和成本控制，加大研发投入，研发体积小、成本低、抗干扰能力强的设备，提升适配性，优化续航和数据传输效率，减少维护成本，升级自动化和新型设备核心部件，提升精度和稳定性，降低应用门槛。方法融合结合各类技术优势，将传统技术与自动化、新型技术结合，利用传统技术高精度优势复核监测结果，利用自动化技术实现大范围实时监测，利用新型技术捕捉微小沉降细节，形成全方位监测体系，兼顾精度和效率^[5]。流程优化简化设备安装、数据采集、数据处理流程，建立标准化操作规范，减少人工环节和人为误差，优化安装步骤缩短周期，合理设定监测频率避免数据冗余或缺失，利用智能化技术实现数据自动处理，提升监测效率。

4.3 监测技术优化效果评估

监测技术优化效果评估是验证优化措施有效性、保障优化技术可落地的关键环节，核心是明确科学的评估指标和评估方法，全面检验优化后监测技术的综合性能，为其实际应用提供有力支撑。评估指标需围绕优化目标设定，覆盖精度、效率、适应性、成本四个核心维度，与现有技术不足形成对应，确保评估针对性。精度指标主要衡量优化后技术的监测数据准确性，反映优化措施对监测精度的提升效果；效率指标聚焦监测全过程耗时、人工投入量，体现流程优化和设备改进带来的效率提升；适应性指标评估优化后技术在不同地形、环境条件下的应

用效果，验证设备抗干扰能力和适配性的提升；成本指标核算优化后技术的购置、安装、维护及人力成本，判断优化措施是否实现成本控制目标。评估方法采用定量与定性相结合的方式，确保评估结果科学可靠。定量评估通过对比优化前后监测数据的精度差值、监测周期时长、成本核算数据等，量化优化效果；定性评估结合监测现场实际应用情况，分析优化后技术的操作便捷性、稳定性及适配性，综合判断优化措施的合理性。

结束语：风力发电塔基础沉降监测对保障能源设施安全意义重大。本文深入剖析了基础结构、沉降影响因素及监测指标，系统梳理了传统、自动化与新型监测技术，并阐述了数据处理流程与质量控制要点。针对现有技术局限，从设备、方法、流程三方面提出优化路径，构建了涵盖精度、效率等多维度的评估体系。未来，随着技术发展，沉降监测将更精准高效，为风力发电塔稳定运行筑牢根基。

参考文献：

- [1]徐枪声,边卓伟,和海涛,等.风力发电塔基础沉降监测方法研究[J].中国设备工程,2022(6):162-163.
- [2]郭迪,李鹏飞,李建平.基础不均匀沉降对插环式风机基础受力性能的影响研究[J].河南科技,2024,51(15):58-61.
- [3]郑天堂,黄新波,赵隆,等.输电杆塔沉降状态感知技术研究[J].广东电力,2021,34(04):85-93.
- [4]喻文超,罗国甘,黄声富,等.基于光纤传感的混塔结构风机安全监测系统的应用[J].中国设备工程,2024,(S1):60-67.
- [5]王庆辉,杜飞洋,刘家强,等.基于北斗卫星导航系统的变电站沉降监测系统[J].沈阳大学学报(自然科学版),2024,36(05):411-417+455.