

# 输电线路杆塔边坡稳定性分析

保斌斌

中国南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

**摘要:** 本文聚焦输电线路杆塔边坡稳定性, 阐述其理论基础, 涵盖边坡稳定性概念、杆塔-边坡相互作用机制; 分析地质、水文气象、人为与工程等核心影响因素; 介绍传统、数值模拟、现场监测与动态分析方法; 提出预防性防护、针对性加固及极端工况应急处置对策。此外, 还探讨了全生命周期管理策略、多学科协同与技术创新方向, 以及政策与标准完善建议, 旨在为保障输电线路杆塔边坡稳定、提升电网安全运行水平提供理论支持与实践指导。

**关键词:** 输电线路杆塔; 边坡稳定性; 地质灾害防控

引言: 输电线路作为能源传输的“大动脉”, 其安全稳定运行至关重要, 而杆塔边坡稳定性是保障输电线路安全的关键环节。一旦边坡失稳, 可能引发杆塔倾斜、倒塌, 造成大面积停电, 严重影响社会生产生活。当前, 随着电网建设规模的不断扩大, 输电线路所处环境愈发复杂, 地质灾害、极端天气等对杆塔边坡稳定性的威胁日益凸显。在此背景下, 深入研究输电线路杆塔边坡稳定性, 剖析其内在机理与外在影响, 提出有效的防护加固对策, 具有迫切的现实需求和重要的实践意义。

## 1 输电线路杆塔边坡稳定性理论基础

### 1.1 边坡稳定性基本概念

边坡稳定性是指坡体在自然或人为作用下保持原有平衡状态的能力, 其核心在于抗滑力与下滑力的动态平衡。根据破坏模式, 边坡失稳可分为滑动破坏、崩塌破坏及流土破坏三类。滑动破坏多见于土质边坡, 表现为沿潜在滑动面的整体移动; 崩塌破坏常见于岩质边坡, 因节理裂隙发育导致块体坠落; 流土破坏则与地下水作用密切相关, 表现为土体颗粒流失引发的局部塌陷。边坡稳定性系数( $F_s$ )是量化评估的关键指标, 定义为抗滑力与下滑力的比值, 当 $F_s < 1$ 时视为不稳定状态。工程中通常要求 $F_s \geq 1.2 \sim 1.5$ 以保证安全储备。稳定性分析需考虑边坡几何形态(坡高、坡角)、岩土体物理力学性质(内摩擦角、黏聚力)及外部荷载(地震力、风荷载)的综合作用。

### 1.2 杆塔-边坡相互作用机制

杆塔与边坡的相互作用体现为力学耦合与空间约束的双重效应。力学耦合方面, 杆塔基础通过传递上部结构荷载至边坡体, 改变原有应力分布; 边坡变形反作用于杆塔, 导致基础不均匀沉降或倾斜。空间约束方面, 杆塔位置影响边坡潜在滑动面的几何形态, 而边坡稳定性直接决定杆塔的安全间距。例如, 在软土地基中, 杆

塔基础易因边坡滑移产生拔出力, 需通过扩大基础尺寸或采用深基础形式增强抗拔能力<sup>[1]</sup>。另外, 杆塔导线张力在风偏工况下会加剧边坡侧向压力, 需在设计中预留安全余量。动态相互作用方面, 季节性冻融、降雨入渗等环境因素会削弱边坡抗剪强度, 需通过实时监测反馈调整杆塔运维策略。

## 2 输电线路杆塔边坡稳定性核心影响因素

### 2.1 地质因素

地质条件作为边坡稳定性的内在决定因素, 涵盖岩土体类型、结构面特征及地质构造等多个层面。岩土体类型中, 黏性土因渗透性极低, 在降雨入渗或地下水作用时, 内部孔隙水压力急剧上升, 形成超孔隙水压力, 使土体有效应力大幅降低, 抗剪强度随之骤降, 极易引发滑坡。砂土则在振动荷载(如地震、施工振动)下, 颗粒间联系减弱, 易发生液化现象, 导致土体失去承载能力, 引发流滑破坏。结构面特征方面, 节理裂隙的密度、走向及连通性对边坡潜在滑动面形成至关重要。顺层边坡因岩层倾向与坡向一致, 在重力作用下, 易沿软弱夹层发生顺层滑动。地质构造中, 断层破碎带、褶皱轴部等构造应力集中区, 岩体破碎、完整性差, 边坡稳定性显著降低。风化作用长期削弱岩土体强度, 需通过覆盖层厚度、风化程度等参数进行量化评估。

### 2.2 水文气象因素

水文气象条件是边坡失稳的重要外部诱因, 主要包括降雨、地下水及冻融循环等作用。降雨通过增加坡体自重, 使下滑力增大, 同时降低岩土体抗剪强度, 短时强降雨的冲击作用尤为显著, 易直接接触滑坡。地下水作用复杂多样, 静水压力增加坡体有效应力, 动水压力则削弱岩土体抗剪强度, 软化作用进一步降低岩土体强度, 使边坡稳定性下降。在季节性冻土区, 冻融循环引发土体体积反复膨胀与收缩, 导致裂隙不断扩展, 土体

结构逐渐破坏,边坡易发生失稳。气象因素中,台风带来的强风荷载、地震产生的巨大惯性力等极端荷载,会突破边坡原有静态平衡,需通过动力分析法评估其影响<sup>[2]</sup>。例如,地震作用下边坡可能发生惯性力型或弱面型失稳,需结合峰值加速度与持续时间综合判断。

### 2.3 人为与工程因素

人为活动与工程措施对边坡稳定性的影响具有双重性。不合理开挖、爆破作业等会直接破坏边坡原有平衡状态,形成高陡临空面,增大边坡失稳风险。而科学的支护工程,如挡墙、锚杆等,则可通过提供抗滑力、约束坡体变形等方式,有效提升边坡稳定性。杆塔施工过程中,基础开挖深度、回填土压实度等关键参数直接影响地基承载力。例如,浅基础在软土地基中,易因地基不均匀沉降导致杆塔倾斜,影响输电线路安全。运维阶段,导线张力调整、绝缘子更换等操作可能改变杆塔受力状态,需通过有限元分析等手段验证其安全性。此外,植被破坏会削弱坡面防护能力,降低边坡稳定性;而人工植草则可通过根系固土作用,增强表层土体抗冲刷性,提升边坡整体稳定性。

## 3 输电线路杆塔边坡稳定性分析方法

### 3.1 传统分析方法

传统分析方法中,极限平衡法(LEM)占据重要地位。它通过预先假设滑动面的形状,像圆弧形、折线形等,进而计算边坡的稳定性系数。其中,瑞典条分法是典型代表之一,该方法假设条间力为零,计算过程相对简便,主要适用于均质土坡的稳定性分析。Bishop法在瑞典条分法的基础上进行了改进,考虑了条间水平力的影响,使得计算结果精度更高。而Morgenstern-Price法更为复杂,它通过引入条间力函数,能够处理复杂几何形状的边坡稳定性问题。传统分析方法具有计算简便、工程经验丰富等优点,在许多工程场景中得到了广泛应用。然而,它也存在明显局限,无法考虑边坡材料的应力-应变关系,对于非均质、非线性材料的适应性较差。而且,其假设的滑动面可能与实际破坏模式存在偏差。在实际工程中,为了快速评估边坡稳定性,常结合经验公式,如泰勒稳定数法,为工程决策提供参考依据。

### 3.2 数值模拟分析方法

数值模拟分析方法主要包括有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)以及离散元法(DEM),这些方法能够模拟边坡变形的全过程以及材料的非线性行为。有限元法通过将边坡区域划分为众多的小单元,然后求解每个单元的应力场,适用于处理连续介质问题,在分析边坡应力分布方面具有优势。有限差分法,以FLAC3D为

代表,采用动态松弛技术,在处理大变形问题时表现出色,能够更真实地模拟边坡的变形过程。离散元法,如PFC,通过颗粒接触模型来分析岩土体的破裂过程,对于研究边坡的破坏机制具有重要意义<sup>[3]</sup>。数值模拟的优势显著,它可以考虑复杂的边界条件,如地震波输入、孔隙水压力等,还能揭示边坡失稳的渐进破坏机制。例如,通过FLAC3D模拟发现,杆塔基础附近存在应力集中区域,这为局部支护的设计提供了重要依据。不过,数值模拟对参数的敏感性较高,需要结合现场试验来校准模型,以确保结果的准确性。

### 3.3 现场监测与动态分析方法

现场监测是获取边坡稳定性数据的重要手段,通过在边坡上布设各类传感器,如倾角仪、测斜仪、孔隙水压力计等,能够实时获取边坡的变形、应力以及水文数据。这些数据为动态分析边坡稳定性提供了基础。动态分析方法包括时序分析法、灰色预测模型以及神经网络预测等。时序分析法通过对监测数据进行拟合,分析其变化趋势,从而预测边坡的未来状态。灰色预测模型适用于小样本、贫信息的场景,能够在数据有限的情况下对边坡稳定性进行预测。神经网络具有强大的非线性处理能力,但需要大量的训练数据。例如,某500kV线路通过安装GNSS位移监测系统,结合LSTM神经网络预测,提前3天预警边坡滑移,成功避免了杆塔倒塌事故。现场监测需要与数值模拟紧密联动,形成“监测-反馈-修正”的闭环管理体系,通过不断反馈监测数据,修正数值模拟模型,提高对边坡稳定性的分析和预测能力。

## 4 输电线路杆塔边坡稳定性防护与加固对策

### 4.1 预防性防护措施

预防性防护是保障输电线路杆塔边坡稳定的基础,核心目标在于降低边坡失稳风险。地质勘察的优化是首要环节,需将物探与钻探方法有机结合。物探中的电阻率法可依据地下介质电阻率差异,探测出隐伏的软弱夹层;地震波法通过分析地震波在地下传播的速度和特征,精准识别断层等地质隐患。钻探则能直接获取岩土样本,为分析边坡土体的物理力学性质提供一手资料。排水系统设计遵循“截、排、降”原则,截水沟可有效拦截坡顶外的地表水,防止其冲刷坡面;排水孔能降低坡体内的地下水水位,减小水对土体的浮力和渗透压力;盲沟可疏干坡体内部的水分,增强土体的抗剪强度。植被恢复方面,选择深根系植物至关重要,紫穗槐、狗牙根等植物的根系能深入土体,像无数“锚钉”一样固定土壤,增强坡面的抗冲刷能力。例如,某山区输电线路通过种植混交林,边坡的侵蚀模数大幅降低了

60%，有效减少了水土流失，为杆塔的稳定运行提供了良好环境。

#### 4.2 针对性加固技术

针对性加固需根据边坡的失稳模式，精准选择技术方案。对于浅层滑坡，柔性支护方式更为合适，格构护坡通过钢筋混凝土框架与坡面紧密结合，限制坡体浅层的滑动；三维植被网则利用其网状结构固定植被，同时增强坡面的整体性。对于深层滑动，刚性支护必不可少，锚杆框架梁中，锚杆深入稳定岩层，提供强大的拉力，框架梁则分散压力，将力传递到稳定地层，适用于岩质边坡；抗滑桩凭借桩身强大的抗剪力，插入土体阻止滑体移动，适用于土质边坡。在新型材料应用方面，纤维增强土（FRP）能显著提高土体的抗拉强度，增强土体的整体性；纳米材料可改善土体的水稳定性，减少水对土体的侵蚀<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 极端工况应急处置

极端工况应急处置需构建完善的“预警-响应-恢复”机制。在预警阶段，与气象部门建立紧密的信息共享机制，及时获取台风、暴雨等极端天气的预警信息，迅速启动应急预案，为后续处置争取宝贵时间。响应阶段，对受威胁的杆塔采取紧急措施，临时支撑如钢管桩能快速为杆塔提供额外的支撑力，防止其倒塌；导线降负荷可减少杆塔的受力，降低风险。恢复阶段，采用注浆加固、基础置换等技术修复受损边坡，聚氨酯注浆能快速填充边坡裂缝，增强坡体的整体性；基础置换可更换受损的基础，恢复杆塔的稳定。例如，2021年河南暴雨期间，某线路通过无人机巡检发现边坡裂缝，立即采用聚氨酯注浆填充，成功避免了杆塔倒塌。应急处置还需配备移动式支护设备、快速硬化材料等物资，确保在短时间内完成抢修，恢复输电线路的正常运行。

### 5 输电线路杆塔边坡稳定性管理策略与未来展望

#### 5.1 全生命周期管理策略

输电线路杆塔边坡稳定性管理应贯穿规划、设计、施工、运维全生命周期。规划阶段，结合区域地质灾害分布图，避开高风险区域；设计阶段，根据地质勘查结果，合理确定杆塔基础形式与边坡防护等级；施工阶

段，严格监控开挖、支护等工序，确保施工质量；运维阶段，建立定期巡检与动态监测机制，及时发现并处理隐患。

#### 5.2 多学科协同与技术创新

边坡稳定性分析涉及地质学、岩土力学、结构工程等多学科知识，需加强跨学科协作。同时，推动技术创新，如研发智能监测设备，实现边坡变形、应力等参数的实时传输与自动分析；利用大数据与人工智能技术，构建边坡稳定性预测模型，提高预警准确性。此外，探索新型生态防护技术，如微生物固土技术，实现边坡防护与生态修复的有机结合。

#### 5.3 政策与标准完善

政府应出台相关政策，鼓励企业加大边坡稳定性研究投入，推动技术成果转化。同时，完善行业标准，明确边坡稳定性评估方法、防护设计要求及施工验收规范，为工程建设提供技术支撑。例如，制定边坡防护材料质量标准，规范市场秩序，保障工程质量。

#### 结束语

输电线路杆塔边坡稳定性关乎电网安全，其研究意义重大。通过深入剖析理论基础、影响因素与分析方法，提出针对性防护加固对策，并从管理策略与未来展望角度，为边坡稳定性保障提供新思路。未来，需持续加强多学科交叉研究，推动技术创新，完善政策标准，构建更加科学、高效的边坡稳定性管理体系，以应对复杂环境下的挑战，确保输电线路长期稳定运行，为社会经济发展提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1]陈刚.一起边坡滑移导致输电线路杆塔失稳隐患分析及处理[J].广西电力,2020,43(05):27-31+45.
- [2]俞伟勇,吴朝峰,戴建华,等.山区输电线路杆塔边坡防护方案选择及应用[J].电力勘测设计,2020,(06):67-72.
- [3]刘明,郭金根,朱文卫,等.输电线路杆塔边坡稳定性分析[J].安全与环境学报,2025,25(3):968-977.
- [4]王龙,何春晖,宋卓彦,等.输电线路杆塔预应力锚索基础及其对边坡稳定性的研究[J].国网技术学院学报,2020,23(5):6-9.