

# 复杂地形条件下输电线路滑坡灾害形成机理及抗灾设计优化

邵洪良

南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

**摘要：**本文聚焦复杂地形下输电线路滑坡灾害。先阐述复杂地形分类、特征及输电线路工程特点，接着剖析滑坡灾害形成机理，包括地质、地形、气象、人类活动及多因素耦合作用。随后分析滑坡对输电线路的破坏机制，如杆塔基础、导线及金具损坏等。最后从地质勘察、杆塔基础、边坡防护等多方面提出抗灾设计优化策略，为保障输电线路安全运行提供参考。

**关键词：**复杂地形；输电线路；滑坡灾害

## 1 复杂地形条件及输电线路工程概况

### 1.1 复杂地形分类与特征

复杂地形类型多样，山地是典型代表。其地势起伏大、坡度陡，海拔差异显著，地质构造复杂，岩石种类多，断层、褶皱常见，为滑坡等灾害埋下隐患。且部分区域植被稀疏，水土保持能力弱，降雨易致土壤松动滑坡。丘陵地势起伏较平缓，有明显坡度变化，多为沉积岩分布区，土壤层厚度不一，表层土壤在长期风化、侵蚀下较疏松。同时，沟谷发育，水流对坡脚冲刷强，增加滑坡可能。

高原海拔高，地形开阔平坦，局部有起伏山地和丘陵<sup>[1]</sup>。气候寒冷，冻融作用强，岩石风化产生大量碎屑。春季融雪和夏季降雨时，水分渗入土体，降低抗剪强度，易引发滑坡。河谷由河流侵蚀和堆积形成，两侧坡体受河流侧蚀和下切影响大。地层多为松散沉积物，物理力学性质差异大、稳定性差，在河流水位变化、地震等作用下，坡体易失衡滑坡。

### 1.2 输电线路工程特点

复杂地形下，输电线路工程特点鲜明。线路路径选择困难，需避开不良地质区域，还要兼顾城市规划等多方面协调，限制多、难度大、工作量大。杆塔设计复杂，要承受更大水平与垂直荷载。山地风大，杆塔需抗风；河谷地基承载力低，基础要特殊设计。且杆塔运输安装挑战大，山区大型机械难进入，需特殊方式工艺。施工难度大，场地狭窄，设备布置、材料运输不便。山地基础施工开挖土石方多，堆放运输成难题，还可能遇地下水位高、岩石坚硬等不利因素，增加难度和成本。运维成本高，受自然环境影响大，滑坡等灾害频发，易致线路故障。为及时发现处理故障，需增加巡检次数和

人员，配备先进监测与抢修设备，运维成本上升。

## 2 复杂地形条件下输电线路滑坡灾害形成机理

### 2.1 地质因素影响

地质构造是滑坡形成的重要内在因素。断层破碎带是岩体中的软弱结构面，其强度较低，容易发生变形和滑动。当输电线路经过断层破碎带时，在自重和外力作用下，坡体可能沿着断层面发生滑动，形成滑坡。褶皱构造也会影响坡体的稳定性，背斜轴部岩层受到挤压，裂隙发育，岩石破碎，容易成为滑坡的滑动面；向斜轴部岩层相对完整，但两侧翼部岩层倾斜，在重力作用下也可能产生滑动。岩土体性质对滑坡的形成起着关键作用。不同岩土体的物理力学性质差异较大，如黏性土具有较高的塑性和黏聚力，但透水性差，在降雨作用下，水分难以排出，孔隙水压力增大，抗剪强度降低，容易发生滑动；砂土透水性好，但黏聚力小，在振动或水流冲刷作用下，容易发生流砂现象，导致坡体失稳。岩石的风化程度也会影响滑坡的形成，风化严重的岩石强度降低，容易破碎，为滑坡的发生提供了物质基础。

### 2.2 地形因素影响

坡度是影响滑坡形成的重要地形因素之一。一般来说，坡度越陡，坡体的重力分力越大，下滑力也就越大，滑坡发生的可能性也就越高。在复杂地形中，山地和丘陵地区的坡度较大，尤其是在陡坡和悬崖附近，坡体稳定性较差，容易发生滑坡。坡高也对滑坡的形成有影响，坡高越大，坡体的重力势能越大，在重力作用下，坡体下滑的趋势越明显。同时，高坡部位的岩土体受到的风化、侵蚀作用更强，岩土体的完整性较差，也增加了滑坡发生的风险。坡面形态也会影响滑坡的形成，凸形坡的坡面中部较陡，上下部较缓，坡体受力不

均匀，中部容易产生拉应力，导致坡体开裂和滑动；凹形坡的坡面中部较缓，上下部较陡，坡体稳定性相对较好，但在降雨等外力作用下，凹形坡容易积水，增加坡体的重量和孔隙水压力，也可能引发滑坡。

### 2.3 气象因素影响

降雨是引发滑坡的最主要气象因素之一。在复杂地形地区，降雨往往具有强度大、持续时间长的特点。大量的雨水渗入坡体，增加了土体的重量，同时提高了孔隙水压力，降低了土体的抗剪强度。当降雨强度超过坡体的渗透能力时，地表会形成径流，对坡面进行冲刷，破坏坡面的植被和土壤结构，进一步降低坡体的稳定性，容易引发滑坡<sup>[2]</sup>。冻融作用在寒冷地区对滑坡的形成有重要影响，在冬季，坡体中的水分结冰，体积膨胀，对周围岩土体产生挤压作用，使岩土体产生裂隙；在春季，冰雪融化，水分渗入裂隙中，进一步软化岩土体，降低其强度。经过长期的冻融循环作用，岩土体的结构被破坏，稳定性降低，容易发生滑坡。气温变化也会影响滑坡的形成。气温的升高会导致坡体中的冰雪融化，增加坡体的水分含量；同时，气温的升高还会加速岩石的风化作用，使岩石破碎，为滑坡的发生提供物质基础。气温的急剧变化还会引起岩土体的热胀冷缩，产生应力，导致岩土体开裂和滑动。

### 2.4 人类活动因素影响

工程建设是引发滑坡的重要人类活动因素之一。在复杂地形地区进行输电线路工程建设时，开挖边坡、爆破作业、堆填土石等施工活动会破坏坡体的原始平衡状态，导致坡体应力重新分布，增加滑坡发生的风险。例如，在山地地区进行杆塔基础施工时，开挖基坑会破坏坡脚的自然支撑，使坡体失去平衡，容易引发滑坡。矿产开采也会对坡体稳定性产生影响，在矿山开采过程中，大量的矿石被采出，形成了采空区，导致上覆岩层失去支撑，发生变形和塌陷。同时，矿山开采还会产生大量的废石和尾矿，这些废弃物的堆放不当也会占用土地，破坏植被，增加坡体的荷载，引发滑坡。不合理的人类活动还会破坏坡体的植被覆盖，植被具有保持水土、调节气候、增加坡体稳定性的作用。当植被被破坏后，坡面的土壤容易受到雨水的冲刷，导致水土流失，坡体的稳定性降低。例如，在山区进行砍伐森林、开垦荒地等活动，会破坏植被，增加滑坡发生的可能性。

### 2.5 多因素耦合作用机制

复杂地形条件下输电线路滑坡灾害的形成往往是多种因素耦合作用的结果。地质因素为滑坡的形成提供了内在条件，地形因素决定了坡体的受力状态和稳定性，

气象因素提供了外力作用，人类活动因素则加速了坡体的破坏过程。这些因素相互影响、相互作用，共同导致了滑坡灾害的发生。例如，在降雨作用下，水分渗入坡体，降低了岩土体的抗剪强度；同时，降雨形成的径流对坡面进行冲刷，破坏了坡面的植被和土壤结构。如果坡体所在地区的地质构造复杂，存在断层破碎带等软弱结构面，那么在降雨和冲刷的作用下，坡体容易沿着软弱结构面发生滑动。另外，如果在该地区进行输电线路工程建设，开挖边坡等施工活动会进一步破坏坡体的稳定性，增加滑坡发生的风险。

## 3 滑坡灾害对输电线路的破坏机制

### 3.1 杆塔基础破坏

滑坡发生时，杆塔基础会受到巨大的推力和拉力作用。当滑坡体移动时，会对杆塔基础产生侧向挤压，使基础发生倾斜、位移甚至断裂。例如，在山地滑坡中，滑坡体沿着山坡下滑，对位于滑坡体上的杆塔基础产生巨大的侧向压力，导致基础倾斜，杆塔失去稳定性。此外，滑坡还会导致基础周围的地基土发生变形和失稳。滑坡体移动时，会带动周围的地基土一起运动，使地基土的应力状态发生改变，导致地基承载力降低。当杆塔基础的承载力不足以抵抗上部结构的荷载时，基础会发生下沉、不均匀沉降等破坏，影响杆塔的正常使用。

### 3.2 导线及金具损坏

滑坡引起的杆塔倾斜或倒塌会导致导线张力发生变化。当杆塔倾斜时，导线的弧垂会增大，导线之间的安全距离减小，容易发生闪络事故。同时，导线的张力分布也会不均匀，部分导线的张力会增大，超过其承载能力，导致导线断裂。滑坡还会对金具造成损坏，金具是连接导线和杆塔的重要部件，如悬垂线夹、耐张线夹等。当杆塔发生倾斜或振动时，金具会受到额外的应力作用，容易导致金具松动、断裂或损坏。滑坡引起的飞石、泥石流等也会直接撞击导线和金具，造成机械损伤<sup>[3]</sup>。

### 3.3 输电线路整体功能失效

滑坡灾害对输电线路的破坏往往是综合性的，会导致输电线路整体功能失效。当滑坡造成多基杆塔倒塌或损坏时，导线会断裂落地，导致输电线路中断供电。此外，滑坡还可能破坏输电线路的附属设施，如通信线路、接地装置等，影响线路的正常运行和维护。滑坡灾害还会对电力系统的安全稳定运行产生严重影响。输电线路是电力系统的重要组成部分，其故障会导致电力供应中断，影响工农业生产和居民生活。同时，输电线路故障还可能引发连锁反应，导致整个电力系统的不稳定，甚至引发大面积停电事故。

## 4 复杂地形条件下输电线路抗灾设计优化策略

### 4.1 地质勘察与评估优化

在输电线路工程前期，应加强地质勘察工作，采用先进的地质勘察技术和方法，如地质钻探、物探、遥感等，全面了解线路沿线的地质条件，包括地质构造、岩土体性质、地下水情况等。对地质灾害隐患点进行详细调查和评估，确定滑坡、泥石流等地质灾害的危险等级和影响范围。建立地质灾害数据库和预警系统，对线路沿线的地质灾害进行实时监测和动态评估。根据地质勘察和评估结果，合理选择线路路径，避开地质灾害高风险区域。对于无法避开的地质灾害隐患点，应制定针对性的防治措施，确保输电线路的安全运行。

### 4.2 杆塔基础设计优化

根据复杂地形条件下的地质特点和杆塔受力情况，优化杆塔基础设计。对于地质条件较差的地区，如软土地区、断层破碎带等，应采用深基础形式，如桩基础、沉井基础等，提高基础的承载能力和稳定性。在山地地区，可采用不等长基础，根据地形坡度调整基础的高度和尺寸，减少基础开挖量，降低对坡体的破坏。加强基础与杆塔的连接设计，提高连接的可靠性和稳定性。采用高强度螺栓连接、焊接等连接方式，确保基础与杆塔之间能够传递足够的荷载。同时，在基础设计中应考虑抗震、抗风等要求，提高基础的抗灾能力。

### 4.3 边坡防护与加固设计优化

对输电线路沿线的边坡进行防护和加固处理，提高边坡的稳定性。根据边坡的地质条件、坡度和高度等因素，选择合适的防护和加固措施。对于土质边坡，可采用植草护坡、植树护坡、浆砌石护坡等措施，防止坡面水土流失，增强坡面的稳定性。对于岩质边坡，可采用锚杆加固、喷锚支护、格构梁加固等措施，提高岩体的整体性和抗剪强度。在边坡防护和加固设计中，应充分考虑排水问题，设置合理的排水系统，及时排除坡体中的水分，降低孔隙水压力，提高边坡的稳定性。

### 4.4 排水系统设计优化

合理的排水系统设计是防止滑坡灾害的重要措施之一。在输电线路工程中，应根据地形和地质条件，设计

完善的排水系统，包括地表排水和地下排水。地表排水可采用截水沟、排水沟、跌水等设施，将坡面的雨水及时排出，减少雨水对坡面的冲刷。地下排水可采用盲沟、排水管等设施，降低坡体中的地下水位，减少孔隙水压力，提高坡体的稳定性<sup>[4]</sup>。在排水系统设计中，应注意排水设施的合理布局和施工质量，确保排水系统畅通有效。

### 4.5 监测与预警系统设计优化

建立完善的输电线路滑坡灾害监测与预警系统，实时监测线路沿线的地质灾害情况。采用先进的监测技术和设备，如位移传感器、倾角传感器、雨量计等，对坡体的位移、倾斜、降雨量等参数进行实时监测。利用现代信息技术，如物联网、大数据、人工智能等，对监测数据进行分析和处理，建立滑坡灾害预警模型，及时发出预警信息。当监测数据超过预警阈值时，系统能够自动发出警报，通知相关部门和人员采取应急措施，减少滑坡灾害对输电线路的损失。

### 结束语

复杂地形条件下输电线路滑坡灾害影响重大，其形成机理复杂，涉及多因素耦合。滑坡对输电线路破坏严重，威胁电力系统安全稳定。通过地质勘察评估、优化杆塔基础、加强边坡防护、完善排水及监测预警系统等优化策略，可有效提升输电线路抗灾能力。未来，还需持续深入研究，不断完善抗灾设计，保障输电线路安全运行。

### 参考文献

- [1]范新广,韩勇.优化电力输电线路施工质量的关键技术[J].电力设备管理,2024,(19):203-205.
- [2]邹丹,余霜鸿,邵戎等.考虑复杂山地风加速的架空线路风偏闪络故障分析[J].陶瓷避雷器,2022(04):185-193.
- [3]刘孟龙,吕洪坤,罗坤等.真实山地地形条件下输电塔线体系风致响应数值模拟[J].振动与冲击,2020,39(24):232-239.
- [4]郑伟栋.高压输电线路铁塔组立施工技术研究[J].电力设备管理,2024,(21):216-218.