

山地风电项目场内道路边坡防护设计不足问题探讨

任雁飞

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司 四川 成都 611100

【摘要】：山地风电项目中，场内道路往往经过陡峭地形，一旦边坡防护设计不足，容易出现滑塌、冲刷和道路损坏等问题，影响施工运输与后期运行。本文围绕边坡稳定性不足这一核心问题，从常见设计缺陷入手，分析其成因及风险表现，并结合山地风电项目的地形特点，总结适用于道路边坡的经济实用型防护措施。提高前期地质调查精度、优化排水设计、采用因地制宜的加固方式，是减少道路损毁与运行风险的关键。本文的探讨对提升山地风电项目道路防护设计质量具有参考意义。

【关键词】：山地风电；场内道路；边坡稳定；防护设计不足；工程安全

DOI:10.12417/2811-0722.26.01.015

引言

山地风电项目大多建设在高差大、地形复杂的区域，场内道路不仅承担建设期间的设备运输任务，更关系到后期长期运维的安全性。然而在实际工程中，道路边坡防护设计常因勘测不足、方案简单化或忽视排水等问题而出现隐患，导致滑坡、坍塌、塌方等风险随时可能发生。针对这些普遍问题，有必要对边坡防护设计不足的表现、诱因及改进方向进行系统分析。通过探讨这些内容，可以为类似项目的道路建设提供更具操作性和安全性的借鉴，使边坡防护更加符合山地风电工程的实际需求。

1 山地风电场内道路边坡防护设计存在的主要问题

山地风电项目的道路多依附陡坡而建，一旦边坡防护设计不到位，隐患往往在施工或运行阶段集中暴露。实际工程中，部分道路在前期勘测阶段对地质结构、坡面形态及潜在软弱层的识别深度不足，导致设计方案偏离真实条件。边坡的岩土性质若评估不准，支挡结构或坡度控制往往失去针对性。一些项目将经验化作为主要依据，缺乏结合现场条件的力学分析，使得设计在抗滑、抗冲刷方面存在天然缺陷。局部地形复杂区域未进行精细化分段设计，出现“大坡小防”的情况，使边坡长期处于不稳定状态。

道路排水体系规划不完善也是设计不足的重要表现。山地降雨集中而急促，坡面径流强度大，如果排水沟、截水措施、坡脚排水设施布局不合理，雨季便容易造成冲刷、掏空和坡体松动。有些道路仅设置简单的边沟，缺乏针对陡坡区的多级排水结构；部分地段未设置急流槽或跌水井，导致水流直接冲刷裸露坡面。排水系统与防护设计脱节，使得边坡结构即便形式合理，也会在长期水蚀作用下逐渐削弱稳定性。特别是在强风区，雨水与风力叠加加剧坡体扰动，进一步增加道路维护难度。

边坡防护形式单一亦是常见问题。部分项目仅依赖喷混植生、挂网或低强度浆砌片石等基础做法，却未针对软岩、碎石层、强风化带等不同岩土条件进行差异化设计。缺乏对坡顶截水、坡脚加固、坡面稳定处理的整体协调，使防护体系呈现“点

状支撑”而非“系统防护”^[1]。在设备运输频繁的大型风电项目中，重载车辆对道路的震动作用会进一步削弱坡体稳定，若未在设计中考虑动态荷载及长期沉降影响，风险在运行期将不断累积。整体来看，这些设计不足使得山地风电道路在极端天气、长期运行及复杂地质条件下更易发生滑塌等问题。

2 道路边坡失稳的关键影响因素分析

道路边坡在山地风电项目中承受着复杂而多变的外部环境，其稳定性受到地质结构、岩土条件和施工扰动等因素共同影响。地层中的软弱结构面对反复的风雨作用极易发生变形，若坡体内部存在断层破碎带、松散堆积物或强风化层，边坡整体抗剪能力会明显下降。坡比控制若偏大，在重力作用下坡面会产生向外的滑移趋势，而设计中若没有充分考虑岩土强度参数变化和水文地质条件，计算出的边坡安全系数往往偏离实际情况。部分路段切坡深度大、坡脚空间受限，导致力学平衡条件被打破，坡面在外力扰动下迅速失去稳定。复杂地形环境使这些风险叠加出现，坡体内部结构一旦遭到破坏，后续再采取加固措施的难度也会显著增加。

山地地区暴雨集中、坡面径流量大，雨水进入坡体后会改变土体内部孔隙水压力，使有效应力下降，进一步降低土体抗剪强度。当排水体系不完善时，坡面水流沿裂隙进入深部形成局部饱和区，导致滑动面逐渐软化。在碎石土、红黏土等地区，形成泥化现象的概率更高。水流对坡面表层的冲刷作用亦不容忽视，坡体表层一旦遭到掏蚀，坡脚支撑能力减弱，整体稳定性便难以维持。部分风电项目地处高海拔区域，冻融循环显著，水分进入裂隙后反复膨胀和收缩，使裂隙不断扩展，坡体结构逐渐松散。风力与雨水共同作用，使得边坡具备更高的失稳敏感性。

场内道路常需重型运输车辆通行，碾压作用会增加坡体应力水平，若未提前进行边坡整体稳定性验算，可能在短时间内诱发滑塌。部分施工过程未严格执行分层开挖、坡面整修或支护同步推进的原则，坡面暴露时间过长，雨水与风化对坡体的破坏作用迅速积累。一些项目为缩短工期而减少防护结构设置，如截水沟未按规范布置、坡顶未设置加固措施、坡脚未进

行可靠支撑，使边坡长期处于高风险状态^[2]。缺乏运维阶段的定期监测亦是问题根源之一，裂缝扩展、坡面沉降等早期表现未能得到及时处理，最终演变为较大规模的失稳事件。综上所述，地质条件、水文作用和人为干扰共同构成了道路边坡失稳的关键影响因素，对这些因素缺乏系统性认识与有效控制，是山地风电道路安全风险频发的重要原因。

3 典型设计不足导致道路安全隐患的现场表现

山地风电场内道路在投入使用后，边坡防护设计不足往往以多种形式在现场显现，其中最为直观的是坡面滑移及局部坍塌的反复发生。坡面出现纵向裂缝、台阶状跌落等现象，多与前期边坡强度评估不足、坡比偏陡或未设置有效支挡结构有关。滑移体在雨季会出现明显的下滑趋势，部分路段形成剪出口，导致路基受压不均，引发路面鼓胀、沉降及裂缝扩展。当滑动面贯通坡体后，道路的稳定性迅速下降，重载车辆通行时振动作用更会加剧滑移规模，使得局部坡段在暴雨或连续降雨条件下发生整体性坍塌。对地质条件复杂的区域而言，设计方案缺乏针对性通常会导致“轻防护、重灾害”的局面，一旦失稳，就会影响设备运输以及施工安全。

常见的表现为坡脚出现被水流冲刷后的掏空现象，外露的泥岩或风化岩层呈现蜂窝状破坏，局部边沟积水严重，截水沟无法有效将径流导离坡体。山地降雨具有集中、急促的特点，若道路排水体系不足以应对强降雨，短时间大量水流会直接冲击坡面，使坡体表层的植生和浅层防护材料被剥离^[3]。坡面裸露后，进一步加大雨水入渗量，形成饱和区，加速深层软化。部分风电项目施工道路的边沟断面偏小、坡底排水设施不连续，甚至某些路段未设置跌水或急流槽，使得水流在落差较大的坡段产生强烈冲刷力量，引起大范围的坡面剥蚀。在风力强劲的山岭地区，风雨交织会加剧水流对坡面的扰动，使本就薄弱的防护结构难以有效抵抗不利外力。

例如部分路段采用喷混植生作为主要防护方式，但坡度过陡、岩土条件松散，使得植生层难以有效成活，后期形成大面积脱落；挂网防护在软弱岩层中更容易形成“悬空”状态，无法提供足够的压贴力；浆砌片石因基础处理不到位，长期受水蚀后出现开裂或松动，导致支护能力逐渐削弱。在重载运输频繁的场景下，道路边坡未考虑车辆荷载的动态影响，会出现加固结构变形、土钉松动或坡面鼓出现象。部分临时道路因建设周期紧张，仅采取简单覆盖或轻型支护措施，缺乏长期稳定性设计，在长期运行阶段逐渐暴露出沉降、滑移、裂缝扩大等问题。若道路维护不到位，这些早期隐患会迅速累积并发展为重大不稳定事件，不仅造成道路断通，还会对风电设备运输、吊装计划甚至运行安全造成严重影响。

4 针对山地风电道路特点的防护措施优化路径

山地风电场内道路在投入使用后，边坡防护设计不足往往

以多种形式在现场显现，其中最为直观的是坡面滑移及局部坍塌的反复发生。坡面出现纵向裂缝、台阶状跌落等现象，多与前期边坡强度评估不足、坡比偏陡或未设置有效支挡结构有关。滑移体在雨季会出现明显的下滑趋势，部分路段形成剪出口，导致路基受压不均，引发路面鼓胀、沉降及裂缝扩展。当滑动面贯通坡体后，道路的稳定性迅速下降，重载车辆通行时振动作用更会加剧滑移规模，使得局部坡段在暴雨或连续降雨条件下发生整体性坍塌。对地质条件复杂的区域而言，设计方案缺乏针对性通常会导致“轻防护、重灾害”的局面，一旦失稳，就会影响设备运输以及施工安全。

常见的表现为坡脚出现被水流冲刷后的掏空现象，外露的泥岩或风化岩层呈现蜂窝状破坏，局部边沟积水严重，截水沟无法有效将径流导离坡体。山地降雨具有集中、急促的特点，若道路排水体系不足以应对强降雨，短时间大量水流会直接冲击坡面，使坡体表层的植生和浅层防护材料被剥离^[4]。坡面裸露后，进一步加大雨水入渗量，形成饱和区，加速深层软化。部分风电项目施工道路的边沟断面偏小、坡底排水设施不连续，甚至某些路段未设置跌水或急流槽，使得水流在落差较大的坡段产生强烈冲刷力量，引起大范围的坡面剥蚀。在风力强劲的山岭地区，风雨交织会加剧水流对坡面的扰动，使本就薄弱的防护结构难以有效抵抗不利外力。

例如部分路段采用喷混植生作为主要防护方式，但坡度过陡、岩土条件松散，使得植生层难以有效成活，后期形成大面积脱落；挂网防护在软弱岩层中更容易形成“悬空”状态，无法提供足够的压贴力；浆砌片石因基础处理不到位，长期受水蚀后出现开裂或松动，导致支护能力逐渐削弱。在重载运输频繁的场景下，道路边坡未考虑车辆荷载的动态影响，会出现加固结构变形、土钉松动或坡面鼓出现象。部分临时道路因建设周期紧张，仅采取简单覆盖或轻型支护措施，缺乏长期稳定性设计，在长期运行阶段逐渐暴露出沉降、滑移、裂缝扩大等问题。若道路维护不到位，这些早期隐患会迅速累积并发展为重大不稳定事件，不仅造成道路断通，还会对风电设备运输、吊装计划甚至运行安全造成严重影响。

5 场内道路边坡防护设计改进的关键控制要点

场内道路边坡防护设计的优化需要围绕地质条件、坡体特性与施工实际进行全过程控制，其中前期调查的精细化程度是影响设计质量的关键环节。提高地质勘查深度，准确识别软弱夹层、风化带厚度及地下水活动情况，可使边坡的稳定性分析更加贴近真实条件。现场地形起伏大、岩性变化频繁，更需要采用分段调查与分级评价的方式，明确不同坡段的危险性等级，以便在设计阶段形成差异化防护策略。坡比、开挖高度、坡脚稳定条件等参数必须在充分的岩土试验数据基础上进行分析，使拟定的防护方案具有可靠的力学依据。通过提高前期调查的准确性，可大幅减少因认识不足导致的防护失效情况。

强降雨条件下，道路排水能力直接决定坡体是否能够保持稳定，而排水设施的布置是否合理往往比加固结构本身更具影响力。设计阶段应采用“坡顶截水、坡面导流、坡脚排水”相结合的系统性思路，使各类水流路径明确且能迅速远离坡体。对于陡坡路段，应增加急流槽、跌水井等结构，避免径流在坡面形成高速冲刷；对于渗透性强的岩土层，则需配合盲沟或渗沟以减轻孔隙水压力。坡脚排水设施需保持连续性，避免出现因断点或坡度不足导致的积水。将排水体系与边坡加固设计同步考虑，可在源头上降低滑移、泥化及坡脚掏蚀的发生概率，使防护结构在长期运行中保持稳定。

面对碎石土、强风化岩、黏性土等不同坡体特征，应采用分层支护、锚固加固、网面压贴、植生护坡等多种措施组合的方式，使支护体系具备整体性与协同性。对于高陡边坡，可适度增加抗滑桩、土钉墙或锚杆框架，以提高整体抗滑能力；对于需要长期保持稳定的主干道路，必须严格考虑重载车辆的动

态荷载影响，以确保支护结构不因反复振动而松动或变形^[5]。施工阶段的质量管理同样不能忽视，坡面修整、基础夯实、材料强度、锚固深度等关键细节直接决定防护体系能否达到设计效果。投入运行后，需建立定期巡查与风险预警机制，通过监测裂缝、沉降、坡面变形等早期特征，及时实施加固或维护措施，使道路边坡在全寿命周期内保持稳定可靠的状态。

6 结语

本文围绕山地风电场内道路边坡防护设计的薄弱环节进行了系统分析，从失稳因素、现场隐患到改进要点都进行了有针对性的探讨。通过梳理影响边坡稳定的关键因素可以看出，前期调查、排水体系和防护结构的协同设计是提升道路安全性的核心。若能在项目建设全过程中严格落实这些控制要点，边坡长期稳定性将得到有效保障。未来在更多山地风电项目实施中，仍需持续推进精细化设计与动态管理，使道路工程具备更高的可靠性与适应性。

参考文献：

- [1] 张洪斌,陈红贤,赵维军.山地风电场道路平台施工监理动态控制[J].建设监理,2025,(11):46-50.
- [2] 沈嘉铖,孟家玮,刘勇,等.降雨工况下山地风电场道路高陡回填边坡稳定性分析[J].黑龙江科学,2025,16(02):92-95.
- [3] 万军,杨苏东,张金博,等.复杂山地条件下风电场道路选线及景观协调建设研究[J].交通科技与管理,2024,5(24):170-172.
- [4] 史东瑞.山地风电场道路设计、施工及运行风险要素分析[J].电力勘测设计,2021,(11):76-80.
- [5] 李煜.浅谈山地风电场项目水土流失防护措施[J].农业与技术,2021,41(14):64-67.