

# 大型水电站高边坡施工安全控制关键技术分析

赵海

中国水利水电第四工程局有限公司, 青海 西宁 810000

DOI:10.61369/EPTSM.2025050002

**摘 要：** 大型水电站高边坡施工过程中存在地质条件复杂、施工扰动大和自然环境影响显著等特点，极易引发边坡失稳及安全事故。为保障施工安全，需建立科学的边坡稳定性评价体系，合理划分风险等级，并采用主动与被动防护相结合的技术手段。通过实时监测、信息化管理和智能化预警系统的集成应用，可有效提升高边坡施工的安全控制水平，降低地质灾害发生概率，确保工程顺利推进与人员生命安全。

**关 键 词：** 大型水电站；高边坡；施工安全；稳定性控制；监测预警

## Analysis of Key Technologies for Safety Control in High Slope Construction of Large Hydropower Stations

Zhao Hai

Sinohydro Bureau 4 Co., Ltd. Xining, Qinghai 810000

**Abstract：** The construction process of high slopes in large hydropower stations is characterized by complex geological conditions, significant construction disturbances, and notable impacts from the natural environment, which can easily lead to slope instability and safety accidents. To ensure construction safety, it is necessary to establish a scientific slope stability evaluation system, reasonably classify risk levels, and adopt technical means that combine active and passive protection. Through the integrated application of real-time monitoring, information management, and intelligent early warning systems, the safety control level of high slope construction can be effectively improved, the probability of geological disasters can be reduced, and the smooth progress of the project and the safety of personnel can be ensured.

**Keywords：** large hydropower station; high slope; construction safety; stability control; monitoring and early warning

## 引言

在我国西部及山区能源开发进程中，大型水电站建设逐渐迈向深山峡谷，随之而来的高边坡施工难题日益突出。受限于复杂地质结构与极端气候条件，高边坡极易诱发滑坡、崩塌等安全隐患。如何在确保工程进度的同时有效管控施工风险，已成为水电工程建设中的关键课题。对高边坡施工安全控制关键技术的系统研究，不仅关乎工程本身的稳定性，更直接关系到建设人员的生命安全与项目的可持续发展。

## 一、大型水电站高边坡施工面临的安全挑战

大型水电站多建设于地形陡峭、地质条件复杂的山谷地区，高边坡作为其主体结构 and 施工区域的重要组成部分，直接关系到整个工程的安全与稳定。然而，在实际施工过程中，高边坡所面临的安全挑战远比常规边坡更加严峻。一方面，自然地质条件极为复杂，不同岩层间存在强烈节理、断层破碎带和软弱夹层，易形成潜在滑移面，降低整体稳定性；另一方面，降雨、地震、温度变化等外部自然因素，也在不断影响边坡力学状态，极易诱发滑坡、塌方等地质灾害。此外，水库蓄水过程中的水位涨落也会

引起边坡应力重分布，加剧边坡变形趋势，对施工及运营安全造成长期威胁。<sup>[1]</sup>

高边坡施工本身具有强扰动性，对边坡原有稳定结构产生重大影响。爆破开挖、机械作业及临时荷载的施加，均可能导致边坡局部失稳，诱发应力集中和裂缝扩展。同时，在施工组织过程中，由于工期紧、作业密度高，常常存在对安全控制重视不够、技术措施不到位等问题，使得高边坡的潜在风险未能得到及时识别和有效控制。此外，高边坡工程点多、面广，监测覆盖难度大，部分隐患往往在发生灾变前缺乏明显预兆，给现场管理和预警机制提出了更高要求。施工环境的高风险性决定了必须将高边坡安全控制纳入系统

工程管理中，贯穿设计、施工和运营全周期。<sup>[2]</sup>

随着工程规模不断扩大与施工技术日益进步，传统的安全管理方式已无法满足现代大型水电站高边坡施工的需要。当前亟须从风险评估、稳定性分析、结构加固、实时监测和智能预警等多方面入手，建立一套科学、系统、高效的安全控制技术体系。同时，强化设计阶段对边坡结构稳定性的仿真预测、优化施工方案的动态调整机制，以及现场信息化监控手段的智能集成，将是提高高边坡施工安全水平的关键路径。只有正视和应对这些挑战，才能从根本上提升大型水电站高边坡施工的安全保障能力，确保工程顺利推进与生态环境协调发展。

## 二、高边坡稳定性分析与风险分级方法

高边坡的稳定性分析是确保大型水电站施工安全的基础工作，其科学性与准确性直接影响到后续防护设计和风险控制措施的有效性。在进行稳定性分析时，首先应全面掌握边坡的地质结构特征，包括岩体类型、节理裂隙发育状况、软弱夹层分布、地下水活动规律等。通过钻探取样、地质编录、地球物理探测及遥感测绘等多种手段，建立三维地质模型，为稳定性分析提供可靠依据。在此基础上，可采用极限平衡法、有限元法、离散元法等计算方法，分析边坡在静力、地震、降雨及水位变化等多种工况下的变形破坏模式，确定潜在失稳区域及其破坏机制，从而为工程决策提供定量支撑。<sup>[3]</sup>

在边坡稳定性分析的基础上，开展风险分级是科学管理施工风险的重要手段。高边坡的风险分级需综合考虑边坡的失稳可能性、潜在破坏规模以及一旦失稳所造成的人员、设备和工程结构的损失程度。通常可将风险等级划分为高风险、中风险和低风险三个等级。高风险边坡往往具有结构松散、岩体破碎、地质灾害频发或邻近核心结构区等特点，需重点加强支护和实时监测；中风险边坡则应在规范施工管理的同时，根据现场情况采取局部加固措施；而低风险边坡则以常规防护为主。此外，风险分级结果应动态调整，在施工过程中根据监测数据和地质条件的变化及时更新，以保持风险评估的时效性和指导性。<sup>[4]</sup>

高边坡稳定性分析和风险分级不仅是单纯的技术评估过程，更是系统安全控制体系的关键一环。通过将分析结果与施工组织方案相结合，可优化施工顺序，避开高风险区域或提前完成加固作业，降低边坡扰动程度。同时，依据风险等级设置差异化的监测频率和报警阈值，做到“分区管控、重点防护”。近年来，随着数值模拟技术和大数据分析的迅猛发展，边坡稳定性评价已逐步向信息化、智能化方向迈进。将多源监测数据与地质模型实时融合，可实现边坡稳定性的动态预测与预警，从而构建集“识别—评估—分级—控制”为一体的高效风险管理体系。

## 三、安全控制关键技术的集成与应用

高边坡作为大型水电站建设中的重要地质工程对象，其施工安全控制需要多种关键技术协同配合与有机集成，以实现对不

定因素的全过程动态管控。安全控制的核心在于技术手段与管理体系的有效融合，既包括对边坡本体稳定性的增强，也涵盖对施工扰动影响的最小化。在工程实践中，常用的主动防护技术包括锚杆、锚索加固、喷射混凝土、框架梁支护等，这些措施可增强岩体结构整体性、提高抗剪强度；而被动防护则主要依赖于拦石网、挡土墙、排水系统等设施，起到阻挡和引导滑移体的作用，减少灾害对下方作业区的影响。两者相互补充，在不同地质环境和风险等级下进行合理配置，是提高边坡安全性的关键。<sup>[5]</sup>

除传统工程加固手段外，信息化与智能化技术的引入极大提升了安全控制的精准性与实时性。通过布设地表与深部监测设备，如倾斜计、测缝计、GPS、全站仪、地应力计和地下水位计等，可实现对边坡位移、裂缝变化、应力应变和地下水动态的全天候监控。此外，借助无人机航测、三维激光扫描和遥感技术，对边坡表面形变和潜在崩塌体的变化趋势进行宏观识别，形成多源信息融合的监测体系。通过数据中心与可视化平台的集成，技术人员可以实时掌握边坡安全状态，及时调整施工计划或启动应急响应，显著提高了风险应对的主动性。基于人工智能的智能预警系统可通过深度学习历史与实时监测数据，预测边坡失稳趋势，提前发布预警信息，为现场安全管理争取关键响应时间，提升风险防控能力。<sup>[6]</sup>

关键技术的集成不仅体现在设备与方法的协同应用上，更体现在全生命周期的管理理念中。安全控制技术应贯穿勘察、设计、施工与运行各阶段，实现全过程动态管控。开挖前，通过数值模拟优化坡率与支护布置，降低扰动风险；施工中，借助信息化手段动态调整加固措施，使支护策略与地质变化同步；运行阶段则需持续监测与隐患排查，保障长期稳定。此外，建立多专业协作机制，融合岩土、结构、水利及信息技术等力量，能实现边坡风险的多维识别与应对。通过整合关键技术，构建系统化、多层次的安全控制体系，可有效应对复杂地质条件下的施工挑战，全面提升大型水电站高边坡工程的本质安全水平。

## 四、智能化监测预警系统在高边坡施工中的作用

高边坡施工过程中，地质结构复杂、外界扰动频繁且环境条件多变，极易诱发滑坡、坍塌等地质灾害。传统人工巡查或定点监测方式在信息获取的及时性与全面性方面存在明显局限，难以满足现代大型水电站工程对施工安全高效率、高精度的需求。随着信息技术和智能装备的快速发展，智能化监测预警系统应运而生，成为高边坡安全控制的关键技术支撑。这类系统融合多种传感设备、数据通信技术与智能分析平台，能够实现对边坡变形、应力、水位、裂缝等多维数据的自动采集与传输，为施工单位提供连续、实时、高精度的安全信息。<sup>[7]</sup>

在实际应用中，智能化监测系统主要由感知层、传输层和决策层三部分构成。感知层包括各种监测传感器与图像识别设备，布设于边坡关键部位，实时采集边坡物理状态信息；传输层依托无线网络、光纤通信或卫星链路，将数据快速回传至监控中心；决策层则借助数据处理平台、分析模型与智能算法，对采集到的

信息进行融合、比对与趋势预测，从而判断边坡的稳定状态。特别是在复杂施工阶段，通过对监测数据的动态分析，系统可提前识别潜在风险点，快速发布预警信息，有效提升对突发事件的响应效率和科学决策能力。相较传统方式，智能化系统具备覆盖范围广、数据密度高、响应速度快和预警能力强等突出优势。<sup>[8]</sup>

智能化监测预警系统不仅提升了高边坡风险管理的科技水平，也推动了施工管理方式的变革。在施工组织层面，可根据实时监测结果动态调整作业安排、优化支护措施，实现“数据驱动”的精细化管理。在工程管理层面，预警系统可与边坡风险分级、应急响应机制深度融合，建立从信息采集、风险识别到预案启动的闭环管理链条。此外，系统生成的历史监测数据库还可为类似边坡工程提供有价值的参考资料，推动经验积累与知识转化。随着人工智能、物联网和大数据技术的持续演进，智能化监测预警系统将在高边坡施工中发挥越来越核心的作用，不仅为大型水电站建设提供安全保障，也代表了地质工程智能化发展的方向。

## 五、高边坡施工安全控制技术的发展趋势与优化路径

随着水电工程向更高海拔、更陡峭地形及更复杂地质条件拓展，高边坡施工安全控制技术也正不断向系统化、信息化与智能化方向迈进。传统依赖经验判断与静态分析的控制方式已难以满足现代大型水电站工程高效率、高安全的要求。未来的发展趋势将聚焦于全过程、全要素、全周期的综合安全控制体系构建，通过多学科融合与技术集成，打通设计、施工、运维各阶段的信息壁垒，实现边坡安全状态的动态感知、实时分析与智能决策，全面提升高边坡施工安全的科学管控水平。<sup>[9]</sup>

当前及未来一个重要发展方向，是以大数据和人工智能为核心的预测性安全控制。借助物联网传感器、遥感影像、激光扫描

等手段获取的多源监测数据，在 AI 算法的支持下实现数据清洗、异常识别、趋势预测和决策辅助，提升边坡变形与失稳的预测能力。同时，基于三维地质建模与数值仿真技术，可实现对边坡结构响应的可视化模拟，辅助优化支护设计与施工组织方案。此外，智能预警系统将逐步向自动响应与闭环控制演化，不仅限于风险提示，更能触发现场的应急机制，推动边坡安全管理从“被动响应”向“主动预防”转变，增强施工组织的柔性与适应性。<sup>[10]</sup>

在技术提升的同时，高边坡施工安全控制还需在管理机制与应用路径上实现优化。首先，应推动安全控制理念前置化，从项目立项与勘察设计阶段即引入边坡稳定性分析与风险分级体系，提升源头管控能力；其次，应加强跨专业协同，建立地质、结构、施工、监测等多领域的信息共享与联动机制，实现技术与管理的一体化协同；最后，应注重从典型工程中提炼关键技术路径与案例经验，推动标准化、模块化安全控制体系的构建，提高工程通用性与复制性。通过不断优化技术路径与管理方式，将有力提升高边坡施工的本质安全水平，为大型水电站建设提供坚实保障，也为山地基础设施工程的安全发展探索出更具前瞻性的方向。

## 六、结语

高边坡施工作为大型水电站建设中的关键环节，其安全控制技术直接关系到工程的整体稳定与施工安全。通过深入分析高边坡面临的风险挑战，构建科学的稳定性分析与风险分级体系，集成应用加固、防护、监测和预警等关键技术手段，已成为保障边坡安全的核心路径。未来，应持续推动智能化、系统化发展，强化多技术协同与管理机制优化，不断提升安全控制的精准性与前瞻性，为高边坡工程的高质量、高安全建设提供坚实技术支撑与保障基础。

## 参考文献

- [1] 陈吉. 高边坡施工安全控制 [J]. 价值工程, 2016, 35(26): 94-96. DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2016.26.034.
- [2] 张传虎, 胡浩, 曹中升, 苑善玉. 高陡边坡快速优质开挖施工技术 [J]. 电力勘测设计, 2019(03): 55-58+64. DOI: 10.13500/j.cnki.11-4908/tk.2019.03.011.
- [3] 谭尧升, 陈文夫, 郭增光, 林恩德, 林鹏, 周孟夏, 李俊平. 水电工程边坡施工全过程信息模型研究与应用 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2020, 60(07): 566-574. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxsb.2020.26.004.
- [4] 樊启祥, 林鹏, 蒋树, 魏鹏程, 李果. 金沙江下游大型水电站岩石力学与工程综述 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2020, 60(07): 537-556. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxsb.2020.26.011.
- [5] 包文成, 朱炜. 扩建道路开挖高边坡的稳定性劣化机理与施工安全控制技术 [J]. 中国科技信息, 2022(03): 30-31.
- [6] 张俊. 高速公路高边坡施工安全风险评估与控制 [J]. 中国储运, 2022(02): 117-118. DOI: 10.16301/j.cnki.cn12-1204/f.2022.02.064.
- [7] 文佳. 高速公路的高边坡施工安全风险控制分析 [J]. 运输经理世界, 2022(28): 140-142.
- [8] 李颀峰. 高速公路路堑高边坡施工安全风险控制研究 [J]. 交通世界, 2023(14): 11-13. DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2023.14.041.
- [9] 张腾霄, 田海涛. 高速公路高边坡施工及其风险评价与过程控制 [J]. 云南水力发电, 2023, 39(10): 72-76.
- [10] 张竞. 水运工程高边坡施工安全风险分析与防范策略 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024(14): 179-181. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202414060.