

自动化监测在高速公路边坡中的应用研究

王一彪^{1,2}

1.中交天津港湾工程研究院有限公司,天津 300222

2.天津港湾工程质量检测中心有限公司,天津 300222

DOI:10.61369/ETQM.2025080026

摘要：在当前高速公路建设进程中，每个施工环节都需要进行严格的地质与技术监控，特别是对高速公路高边坡的监测更是重中之重。将自动化监测系统引入监控作业，能够有效提高高速公路建设过程中的安全系数和结构稳定性。本文阐述了自动化监测系统在高速公路边坡监测中的应用意义，分析了高速公路边坡自动化监测系统构成，深入探究自动化监测系统在高速公路高边坡监测中的具体应用策略。

关键词：自动化监测；高速公路；边坡监测；应用

Research on the Application of Automatic Monitoring in Highway Slope

Wang Yibiao^{1,2}

1.Tianjin Port Engineering Institute Co.,Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co.,Ltd.Tianjin 300222

2.Tianjin Port Engineering Quality Inspection Center Co., Ltd. Tianjin 300222

Abstract： In the current highway construction process, each construction phase requires strict geological and technical monitoring, with particular emphasis on the monitoring of high slopes. The introduction of an automated monitoring system into these operations can significantly enhance the safety and structural stability of highway construction. This paper discusses the significance of using automated monitoring systems in slope monitoring for highways, analyzes the components of such systems, and explores specific application strategies for monitoring high slopes in highway construction.

Keywords： automatic monitoring; expressway; slope monitoring; application

引言

高速公路边坡稳定状况受到多重因素交织影响，包括岩土介质属性、构造特征、气象水文变化以及施工扰动等，其动态演化具有高度不确定性与复杂性。因此，及时掌握边坡状态信息、实现风险的早期识别并采取科学防护手段，已成为保障工程安全与人员生命的重要环节。以往所采用的地质目测与人工设点监测方法，因依赖人为判断、监测周期长、抗干扰能力弱，且难以提供连续性和实时性的预警支持，逐渐暴露出明显局限。在此背景下，自动化监测技术应运而生，通过传感器网络与信息系统的深度融合，实现全天候、全时段的边坡动态监控，突破了传统手段在地形、气候及时间方面的限制。这类系统不仅扩大了监测覆盖范围，提高了数据获取的及时性与精度，更显著增强了预警机制的稳定性和响应能力，为边坡风险防控提供了更为坚实的技术保障^[1]。

一、自动化监测系统在高速公路边坡监测中的应用意义

大量实践表明，安全监测在应对边坡稳定性难题、剖析边坡变形破坏的内在规律与影响范围、防范地质灾害等方面，发挥着无可替代的重要作用。自动化监测系统的应用，不仅能有效预防边坡地质灾害，保障施工与运营安全，还能兼顾生态环境保护，助力优化边坡地质灾害治理设计与施工方案，实现成本合理管控，并对滑坡等灾害进行预警。

具体来看，该系统具备显著优势。首先，即使遭遇极端天气，也能通过远程自动化的方式采集监测数据，及时捕捉边坡滑塌前后的各类信息，并实时向监控平台发送预警信号，这对保障高速公路安全通行和行车安全意义重大。其次，多种传感器协同作业，通过交叉验证与分析，能够更精准地揭示边坡变形破坏的机制及演变趋势，及时评估应急支护措施的加固效果，为边坡工程设计与施工方案的优化提供有力技术支持。最后，构建远程自动化监测系统，既是开展边坡崩塌、滑坡等灾害调查、研究与防治工作的必要手段，也是获取灾害预报信息的关键渠道，同时还

作者简介：王一彪（1987.09—），男，汉族，天津人，本科，工程师，岩土工程勘察测试与安全监测技术；原位及室内试验应用研究。

能为高速公路日常运营管理和边坡养护提供科学的技术指导。

二、高速公路边坡自动化监测系统构成

自动化监测系统的构建是一项复杂且精细的工程，其架构由感知层、辅助层、网络层、数据层及应用层五大核心模块有机组成。

感知层作为系统的“神经末梢”，是数据采集的前沿阵地，主要由基准站与监测站两类设施构成。这些站点均配备了接收机、天线、观测装置以及避雷设施等精密元件。基准站通常被选址安装在基岩或结构稳固的永久性构筑物之上，其核心功能是为整个监测体系确立精准的变形基准，如同为监测工作树立了可靠的“标尺”。而监测站则被科学地部署在结构物的关键节点或潜在风险区域，这些位置往往是变形易发点，监测站通过持续运作，实时捕捉并记录结构物细微的变形动态，将获取的原始数据及时反馈至系统。

辅助层承担着保障系统能源供给的重要使命。在供电方案的选择上，充分考虑不同环境条件，采用太阳能供电、市电供电、风电供电以及风光互补供电系统等多元化方案。这些供电模式各有优势且相互补充，无论是光照充足的开阔地带，还是市电稳定的城市区域，亦或是风能资源丰富的特殊环境，都能确保自动化监测系统获得稳定电力，维持全天候不间断运行^[2]。

网络层的设计高度贴合监测现场的复杂状况，提供了丰富多样的组网传输选项。4G、5G 通信技术凭借其高速率与广覆盖的特点，适合将大量原始数据完整传输至后台进行深度解算分析；北斗短报文与卫星通信则在偏远地区或通信基础设施薄弱地带发挥关键作用，保障数据传输“最后一公里”的畅通。

数据层堪称整个系统的“智慧大脑”，由工作站、计算机局域网等硬件设施，以及服务器、数据库、防火墙等关键设备组成，同时搭载监测解算软件和设备远程管控平台等核心软件。该层负责接收前端传回的设备状态数据和解算结果，进行细致的处理、解析、存储，并对原始数据开展深度解算。通过建立数据仓库与分析模型，数据层不仅实现了数据的高效管理，更为系统的智能化决策提供了有力支撑。

应用层直接面向用户，通过专用的自动化监测系统平台或 APP，打造出一站式服务体系。用户不仅可以实时监控设备运行状态、管理监测数据、直观查看监测结果可视化图表，还能借助系统的智能分析功能，开展多参数安全模型分析。系统创新集成了短信、微信预警推送与现场声光报警等多种预警方式，确保安全信息第一时间触达相关人员。此外，系统的数据接口具备强大的兼容性，能够无缝对接多型号、多品牌的传感器，极大提升了系统的普适性和扩展性，使其在各类复杂监测场景中都能游刃有余地发挥作用。

整个系统在设计 and 实施过程中，会紧密结合所需监测项目的具体特征，灵活地进行数据采集、传输、处理与展示。它不仅实现了数据查询、实时展示、数据下载、用户管理、项目管理、预警告知、报表推送、监测频率调整以及稳定性分析等核心功能，

其数据接口还展现出强大的兼容性，能够适配多型号、多品牌的传感器，从而显著提升了系统的包容性与适用性，确保了在各种复杂监测场景下的高效运作^[3]。

三、自动化监测系统在高速公路边坡监测中的应用策略

（一）高速公路边坡变形监测

边坡稳定性监测是一项系统工程，需对边坡体自身形变过程及外部环境影响因素展开全面观测。在形变监测实践中，通常分为深部位移监测与地表位移监测两大类。其中，深部位移监测多借助钻孔测斜仪实施，地表位移监测则直接追踪地表变化情况。针对本边坡而言，因其潜在滑动方向不存在控制性软弱结构面，发生深层破坏的概率较低，故而监测工作的重点自然聚焦于地表变形监测^[4]。

当前地表变形监测主要采用两种技术路径：一是通过全球导航卫星系统（GNSS）进行绝对位移监测，二是利用表面裂缝计测量相对位移。GNSS 具备高精度和三维监测能力，适用于未出现明显变形的边坡，能全面反映其整体变形趋势；裂缝计则适合对局部裂缝区域开展精细化跟踪。本边坡尚无明显变形征兆，故以布设 GNSS 监测站为主，实现坡面全覆盖；同时，在坡顶后缘可能出现裂缝的位置增设少量裂缝计，作为局部补充。常用 GNSS 系统精度可达 $\pm 5\text{mm}$ ，足以满足大多数监测需求。考虑到该边坡已完成削坡与混凝土支护处理，便于设备安装，共设置 11 台 GNSS 监测站，分布于各级平台。为应对潜在的突发性位移，提高响应能力，GNSS 监测频率设定为每 300 秒采集一次数据。在坡顶裂缝监测方面，选用 2 套表面裂缝计，常规采样周期为 1800 秒。设备具备自适应变频功能，能根据变形速率动态调整监测频率，最快可达每秒一次，确保对突发变形的实时捕捉，为边坡安全提供及时、有效的数据支持^[5]。

（二）高速公路边坡降雨量监测

边坡稳定性预警预报体系是一套环环相扣的系统化作业流程，其核心环节可归纳为以下关键步骤：首先，布设在边坡现场的降雨量监测设备与各类变形监测仪器，会持续不断地将采集到的实时数据传输至中央监测预警大数据平台，以确保信息的及时性与完整性。其次，该大数据平台利用内置的先进预警模型算法，对实时监测数据进行深度处理，精准计算出反映边坡状态的关键参数，并与预设的预警等级阈值进行比对分析，从而科学评估并输出当前边坡的稳定性状态信息。最后，平台根据判定的预警等级，自动触发相应的信息发布机制，通过短信、语音电话等多种渠道，向预设的相关责任人和单位实时推送预警通告。

深入探究这一流程的具体实施细节可以发现：当监测数据显示边坡区域降雨量显著增加，且累计值超过预设的临界雨量阈值时，系统会即刻启动一级响应，发布蓝色预警信息。这一举措旨在对潜在的边坡变形风险进行前瞻性提示，为后续可能采取的应急措施预留时间窗口。如果监测数据进一步表明边坡体已开始出现变形迹象，就必须立即启动相关应急预案，尤其是要对可能受

影响的停车区域或其他人员聚集场所进行严格管控,并有序疏导区域内人员,以确保安全。当变形监测值达到橙色预警的警戒线时,预警级别明显提升,系统会通过短信和语音通话等更为直接的方式,紧急通知所有相关人员必须迅速撤离至安全地带。与此同时,应急指挥部门需要同步启动边坡影响范围内的道路交通管制程序,并做好随时封闭相关路段的准备,以防止次生灾害发生。一旦变形数据达到最为严峻的红色预警级别,就意味着边坡失稳的风险已迫在眉睫,此时应急响应进入最高级别,必须确保危险区域内所有人员百分之百安全疏散,相关道路交通也必须完全封闭,切断一切潜在威胁。这样做的根本目的在于最大程度规避灾害可能引发的人员伤亡,保障生命财产安全^[6]。

(三) 高速公路边坡地质灾害监测

以滑坡灾害为例,在典型滑坡体区域布设的远程智能监测系统,通过集成化传感网络与高效数据传输模块,持续记录坡体位移与降雨过程,系统性捕捉滑坡从微变到失稳的全周期响应特征。经现场调查与数据反演分析发现,该滑坡在降水驱动下呈现出以前缘发育为起点、逐步向后扩展的“渐进式后退滑动”破坏模式。其形变曲线变化与日降雨量存在高度相关性,整体呈现出阶梯型演进特征。结合裂缝演化趋势和位移特征判定,当前滑坡已步入加速变形阶段,风险等级显著上升,急需强化动态监管与实时预警机制。

为准确研判滑坡未来形变趋势,调取已构建的预测模型库,系统比对多类演化模型。结果表明,GM-AR融合模型在本次滑坡事件中表现优异,能有效刻画降雨对形变过程的驱动作用,预

测精度高,时效性强,为风险预控与预案部署提供了坚实的技术支撑。基于降雨诱发变形机制,应用加卸载响应比理论,在代表性区域布设多个监测点,实施为期7天的短周期动态观测。研究表明,响应比序列分别高度对应局部失稳与整体稳定性变化,表现出良好的阶段识别能力与敏感响应特征。该模型在揭示滑坡时序演化特性方面具有较高适用性,为现场判识与响应策略优化提供了科学依据。

考虑到高速公路边坡地质条件复杂、环境干扰强,自主集成研发了一套低成本、低功耗、高适应性的远程监测系统,涵盖数据采集、趋势分析与智能预警全流程。通过对关键监测变量及其演化模式的深入挖掘,构建了可推广的预警方法框架。实际应用表明,该系统运行稳定、响应高效,在提升高速公路边坡地质灾害防控能力方面具有良好的技术支撑与推广价值。

四、结束语

综上,自动化监测系统在高速公路高危边坡安全监控中的应用,体现了多种前沿信息技术的深度融合。该系统以高精度测量和短观测周期为优势,不仅保障了边坡稳定性,还大幅减少了传统人工监测的误差,规避了人为疏漏导致的漏报风险。从发展趋势看,自动化监测技术将成为边坡监测的主流方向,其核心价值在于缩短监测时间间隔、提升数据采集精度与频次,通过持续的数据验证分析降低结果不确定性,为高速公路边坡安全管理构建更可靠的技术支撑体系。

参考文献

- [1] 庄旭东. 自动化在线监测系统在高速公路边坡监测中的应用 [J]. 机电信息, 2018(21): 52-53.
- [2] 张昭. 自动化监测技术在地铁隧道施工中的应用 [J]. 自动化与仪器仪表, 2017(7): 178-179.
- [3] 梁中沛, 郭兴. 高速公路高边坡治理中对监测技术的应用 [J]. 中国高新科技, 2019(12): 94-95.
- [4] 欧耀祥. 高速公路高边坡变形监测方法及数据处理分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42(5): 22-23+2501.
- [5] 荣美, 黎付安, 满新耀. GNSS自动化监测系统在高速路边坡表面位移监测中的应用 [J]. 西部交通科技, 2020(2): 22-26.
- [6] 赵鹏涛, 张升彪, 鲁光银. GNSS自动化在线监测在高速公路边坡监测中的应用 [J]. 中国科技信息, 2019(18): 66-68.