

# 基于多源信息的高速公路边坡监测与稳定性分析

陈莲娟 雷刚\* 王鑫 张丹

宜宾学院 质量管理与检验检测学部, 四川 宜宾 644000

**摘要:**随着我国基础设施建设工程体量的增加,越来越多的山区、丘陵地带被开发为交通网络,高速公路边坡的稳定性直接关系到道路的安全运营和人民的生命财产安全。随着科技的不断发展,多源信息在高速公路边坡的监测与稳定性分析中发挥着越来越重要的作用。本研究重点针对传统边坡监测方法中测量精度低、监测参数类型单一及自动化程度低等问题,探讨了基于多源信息的高速公路边坡监测方法,包括地面监测、遥感监测、传感器监测和物联网智能监测等,并对这些信息进行融合处理,以提高监测的准确性和可靠性。在此基础上,对高速公路边坡的稳定性进行了分析,提出了相应的稳定性评价方法、预警机制以及稳定性提升措施。研究表明,多源信息融合能够更全面、准确地反映边坡的变形和稳定性状态,为高速公路边坡的安全管理提供有力支持。

**关键词:** 多源信息; 高速公路边坡; 监测; 稳定性分析

## 0 引言

高速公路边坡是高速公路的重要组成部分,其稳定性直接影响到道路的正常使用和行车安全。由于自然因素和人为因素的影响,高速公路边坡容易出现滑坡、崩塌等地质灾害,给人民的生命财产安全带来严重威胁。因此,对高速公路边坡进行实时监测和稳定性分析,及时发现边坡的变形和破坏迹象,采取有效的防治措施,具有重要的现实意义。传统的边坡监测方法主要依赖于人工巡检和单一的监测手段,存在监测效率低、数据不准确、自动化程度低等问题。随着信息技术的快速发展,多源信息监测技术逐渐应用于高速公路边坡监测领域。多源信息包括地面监测数据、遥感影像数据、传感器监测数据和物联网智能监测等,这些信息具有不同的特点和优势,能够从多个角度反映边坡的变形和稳定性状态。通过对多源信息进行融合处理,可以提高监测的准确性和可靠性,为边坡的稳定性分析提供更全面、更可靠的数据支持。

## 1 多源信息的高速公路边坡监测方法

### 1.1 地面监测

地面监测是高速公路边坡监测的传统方法之一,即通过整合多种传感器和设备,实现对边坡位移、变形、水文地质等参数进行实时监测。主要包括人工巡检、水准测量、全站仪测量等。人工巡检是通过定期安排专业人员对边坡进行实地检查,观察边坡的变形迹象、裂缝情况、

植被生长状况等,结合拍照、记录手册等方式,对比历史数据,标记异常变化区域,及时发现边坡的异常情况。水准测量和全站仪测量则是通过精确测量边坡上特定点的水平位移和垂直位移,获取高精度的变化数据,量化了解边坡的变形趋势与变形量。地面监测方法直观且结果可靠,能够直接获取边坡表面的变形信息。然而,该方法存在明显的局限性,如监测效率较低、劳动强度大、监测范围有限、易受环境影响、操作繁琐,且难以实现全天候、连续性的自动化监测。

### 1.2 遥感监测

遥感监测是利用遥感卫星、无人机等平台搭载光学或雷达传感器获取大范围边坡的影像与形变数据,通过图像处理和分析技术,提取边坡的几何信息、纹理信息、光谱信息等,对边坡的变形和稳定性进行监测<sup>[1]</sup>。常用的遥感监测技术包括光学遥感、雷达遥感和激光雷达遥感等。光学遥感通过卫星或无人机拍摄获取边坡的彩色影像,可识别边坡的植被覆盖情况、地表裂缝形态等视觉特征;雷达遥感利用微波穿透性监测地表微小位移捕捉毫米级形变趋势,具有全天候、全天时的特点,能够穿透云雾和植被,获取边坡的表面形变信息;激光雷达遥感通过激光点云生成高精度三维地形模型,能够精确测量边坡的三维地形,获取边坡的高程、坡度、坡向等几何信息。遥感监测具有监测范围广、监测速度快、不受地形条件限制、可穿透云雾动态监测区域地表位移等优点,能够及

时发现边坡的大范围变形和破坏迹象,适合宏观风险筛查。但存在分辨率限制、受大气干扰等不足。

### 1.3 传感器监测

传感器监测是现代高速公路边坡监测的重要技术手段。该方法通过在边坡体内部或表面布设各类传感器,实时、连续地监测边坡的关键物理参数,如位移、沉降、倾斜、内部应力及渗流情况等,从而获取边坡内部的变形与应力变化信息<sup>[2]</sup>。常用的传感器包括位移传感器、沉降传感器、倾斜传感器、应力传感器和渗流传感器等。传感器监测具有显著优势,其监测实时性强,能够及时发现边坡的动态变化,快速预警;测量数据精度高,能捕捉微小变化,为稳定性分析提供可靠依据;更能深入反映边坡内部的变形特征。然而,该技术也存在不足,主要体现在传感器安装过程复杂、成本高昂,以及后续的维护工作量大、存在误报与漏报风险且单个传感器的监测范围有限,难以覆盖整个边坡区域。

### 1.4 物联网智能监测

物联网智能监测是高速公路边坡监测的数字化方案。该方法通过在边坡部署位移、倾角、水文、应力等各类传感器来实时获取数据,再通过5G、北斗卫星等通信技术将数据传输至云端平台,利用大数据分析和AI算法对多源信息进行分析处理,最后快速精确的进行预警,从而实现边坡状态的智能化管理。物联网智能监测具有更为显著的优势,可实现分钟级的数据采集、自动化程度高、可弥补人工巡检盲区的不足、预警准确度高、也可实现边坡的三维可视化管理。物联网智能监测通过智能化手段降低了人工依赖,提升边坡监测的效率与安全性,是未来智慧交通的重要组成部分。

## 2 多源信息的融合处理

### 2.1 数据预处理

多源信息在采集过程中不可避免地会受到各种因素的影响,导致数据质量参差不齐。例如,传感器可能存在零点漂移或量程误差,遥感影像可能受到大气干扰而产生噪声,地面监测数据可能因人为记录或仪器问题导致不一致性。因此,在利用这些信息进行边坡监测与稳定性分析之前,必须进行严谨的数据预处理,这是保障后续分析准确性和可靠性的关键步骤。数据预处理主要包括数据清洗、数据校正和数据格式转换三个核心环节。数据清洗旨在识别并剔除或修正异常值、填补缺失值,去除明显错误或无用的数据,从而提升数据的准确性和一

致性<sup>[3]</sup>。数据校正则致力于消除或减弱系统误差,如通过标定消除传感器误差,通过几何校正处理遥感影像的变形,以提高数据的精度和可比性。最后,数据格式转换是将来自不同平台、不同格式(如文本、栅格、矢量)的数据统一转换为标准化的格式,为后续的多源数据融合与综合分析奠定基础,确保各类信息能够无缝对接、协同工作。

### 2.2 数据融合方法

数据融合技术是实现多源信息价值最大化的关键环节,其核心在于将来自地面监测、遥感影像、传感器网络、物联网智能监测等不同渠道、不同性质的信息进行综合处理,以提取出更为准确、全面且具有更高置信度的边坡状态信息。这一过程并非简单的数据叠加,而是通过科学的方法论实现信息的互补与协同。常用的数据融合方法体系丰富,其中基于概率统计的方法是经典途径,它通过构建严谨的概率模型,如卡尔曼滤波或贝叶斯估计,对不同来源的数据进行动态加权融合,有效处理数据的不确定性,提升状态估计的精度。基于人工智能的方法展现出强大的非线性处理能力,通过训练神经网络、支持向量机等智能模型,让机器从海量多源数据中自主学习、挖掘规律,精准提取边坡的细微变形特征与潜在稳定性信息。基于模糊逻辑的方法则擅长处理信息中的模糊性与不确定性,它通过设定一系列模糊规则,运用模糊推理机制,对多源信息进行综合评判,最终得出更具包容性和合理性的边坡稳定性评价结论。这些方法各有侧重,常结合应用以应对复杂的边坡监测分析需求。

### 2.3 融合结果的可视化

融合结果的可视化是连接复杂数据分析与用户理解的关键桥梁,其目的在于将经过多源信息融合处理后的边坡状态数据,转化为直观、易懂的视觉表现形式,极大地提升了信息的可读性和分析效率。这一环节对于非专业技术背景的管理决策者同样至关重要。实现可视化有多种有效途径,其中二维地图是最基础且广泛应用的形式,它能够将边坡的变形量、稳定性等级等关键信息,借助色彩渐变、特定符号或等值线等方式,清晰地标注在地理底图上,使得边坡的空间分布特征、变形区域及程度一目了然。更为先进的是三维模型可视化,它将融合后的地形数据与变形信息进行有机整合,构建出逼真的边坡三维场景。用户可以借助交互式操作,如旋转视角、缩放比例、剖切查看等,从任意角度、多维度细致观察边坡的形态、内部结构变化以及潜在失稳区域,提供了沉浸式的分析体验。此外,各类图表,如时间序列曲

线图能直观展示边坡位移随时间的变化趋势,柱状图或饼图可用于比较不同区域或不同时间点的稳定性状态,散点图则有助于揭示变量间的相关性。这些图表形式简洁明了,特别适合用于分析边坡变形的动态演变规律和稳定性状态的量化评估。通过综合运用这些可视化方法,能够全方位、多角度地呈现边坡的复杂状态,为科学决策提供有力支持。

#### 2.4 数据关联分析

数据相关分析通过挖掘多源监测数据之间隐藏的关系,提高了高速公路边坡监测的准确性。在时空维度上,构建了时间序列因果模型来分析降雨等外部因素对边坡位移的滞后效应,并利用空间插值生成多参数云图来识别高度相关的区域。在数据交互验证方面,通过异构传感器的交叉验证消除单一数据偏差,通过耦合多学科数据进行综合分析。对于异常相关挖掘,构建多参数协同预警指标,匹配历史异常模式,提前识别风险。此外,关联规则算法、图神经网络(GNN)和贝叶斯网络等技术工具为数据相关性分析提供了方法支持,将零散数据转化为因果逻辑知识,并能够从历史数据中提取预测规律,帮助斜坡监测从被动响应转向主动预警。

### 3 高速公路边坡的稳定性分析

#### 3.1 稳定性评价方法

高速公路边坡的稳定性评价是保障道路安全运营的核心环节,其目的是通过对边坡的变形特征、力学参数及稳定性信息进行系统分析,科学判断边坡当前所处的稳定状态,预测其未来发展趋势,并为工程决策提供依据。目前,工程实践中广泛应用多种稳定性评价方法,其中最具代表性的包括极限平衡法、有限元法以及离散元法。极限平衡法是传统且应用广泛的方法,它基于力学平衡原理,通过分析潜在滑动体上的各种作用力(如重力、支撑力、滑动力等)的平衡条件,计算得出边坡的安全系数,以此作为判断稳定性的主要指标<sup>[4]</sup>。有限元法作为一种数值模拟技术,则通过建立精细的边坡力学模型,能够模拟边坡在荷载作用下的应力分布、变形场及塑性区发展情况,从而更全面地分析其稳定性。离散元法则特别适用于分析具有明显块体结构的岩质边坡,它将边坡离散为相互作用的单元,模拟块体间的接触、运动和破裂过程,直观揭示边坡的渐进破坏机制。这些方法各有侧重,常结合使用以获得更可靠的评价结果。

#### 3.2 影响边坡稳定性的因素分析

高速公路边坡的稳定性并非孤立存在,而是受到多种复杂因素共同作用和影响的结果。对这些影响因素进行深入分析,是准确评估边坡稳定性的前提。主要的影响因素可以归纳为地质条件、水文条件、气候条件以及人为因素四大类。地质条件是边坡稳定性的内在基础,它涵盖了边坡岩土体的物理力学性质(如强度、岩性、渗透性)、地质构造(如断层、节理裂隙的分布与发育程度)以及地下水的天然赋存状态等。这些因素直接决定了边坡材料的力学特性和潜在的破坏模式。水文条件则主要通过水的赋存和运移对边坡稳定性产生影响,包括降雨的入渗、地表径流的冲刷、地下水的动态变化等,它们会改变岩土体的含水量和孔隙水压力,显著影响边坡的强度和稳定性。气候条件,如温度的周期性变化、湿度的波动、风力的侵蚀等,虽不直接导致大规模破坏,但长期作用会加速岩土体的物理化学风化过程,改变其结构,诱发或加剧变形<sup>[5]</sup>。最后,人为因素在高速公路建设和运营过程中扮演着重要角色,如边坡的开挖、填筑、加载、爆破作业、植被破坏以及工程排水措施不当等,这些活动会直接改变边坡的几何形态、应力状态和边界条件,从而对稳定性产生显著甚至决定性的影响。准确识别并量化这些因素的作用,对于边坡稳定性评价至关重要。

#### 3.3 稳定性预警机制

稳定性预警机制是高速公路边坡安全防护体系中的关键组成部分,其核心目标在于实现对边坡潜在失稳风险的早期识别和及时响应。该机制通过建立并运行基于多源监测数据的边坡变形与稳定性分析模型,对边坡的状态进行持续的、实时的监控与趋势预测。当监测数据反映的边坡变形速率、位移量、应力水平等关键参数达到预设的预警阈值时,系统能够自动触发预警流程。稳定性预警机制的设计与实施涉及多个环节:

(1) 预警指标的选取,这些指标需能有效反映边坡的动态变化和稳定状态,如地表及深部位移、沉降、倾斜角度、内部应力应变、孔隙水压力等。

(2) 预警阈值的科学设定,这需要综合考虑边坡的具体地质条件、水文地质特征、气候环境以及工程安全等级等因素,通过理论计算、历史数据分析及专家经验综合确定不同级别的预警界限。

(3) 预警信号的产生与发布,现代监测系统通常能自动分析数据、判断状态、生成预警信息,并通过短信、专用APP推送、邮件、声光报警、广播等多种渠道,迅速将预警信息传

达给管理决策人员、现场作业人员及相关应急部门,为采取有效的防治、加固或疏散措施赢得宝贵时间,最大限度地降低灾害风险。

### 3.4 稳定性提升措施

工程防护技术是提升公路边坡稳定性的核心手段,通过多种结构的组合应用形成立体防护体系。挡土墙作为传统防护结构,根据边坡地质条件选用重力式、悬臂式或扶壁式,依靠自重与结构力学性能抵抗土体滑动。抗滑桩深入稳定岩层,通过锚固段锚固力与桩身强度截断滑坡体,适用于深层滑动治理。锚杆技术对岩土体施加预应力,将不稳定的岩体与稳定的岩体结合以提高整体的稳定性,常与格构梁结合形成加固网络。对于土质边坡,可采用生态袋、蜂巢约束系统等柔性防护,兼具工程加固与生态修复功能。

排水系统的优化是消除与减弱水害隐患的关键,需构建地表与地下排水相结合的综合排水网络。将地表截水沟布设置在坡顶拦截汇水,防止雨水冲刷坡面,排水沟采用U型或矩形断面。地下排水通过斜向排水孔、盲沟与排水井降低地下水位:斜向排水孔延伸至滑动面以下,通过虹吸或重力作用排出地下水。对裂隙发育的岩质边坡,采用排水孔幕技术形成连续排水屏障。同时路面采用透水沥青或多孔混凝土等透水材料加速雨水渗透,通过地下管道集中排放,减少坡面汇水下渗影响。

要实现边坡稳定与环境保护之间的平衡,需采取恰当的生态修复技术,通过植被与工程措施的协同作用提升稳定性。植被混凝土技术是将水泥、保水剂与植物种子混合料喷射至坡面,形成具有一定强度与保水性的生长层,既可加固边坡又能为植物生长提供基质。三维土工格栅能够有效防治坡面水土流失,促进草本、灌木植物根系的生长,以提升边坡的抗冲刷能力。同时植被蒸腾作用可以降低岩土体含水量,间接提升稳定性。此外,结合边坡景观设计与乡土植物物种配置,可构建多层次生态系统,实现工程防护与生态美学的统一。

### 4 结语

本研究探讨了基于多源信息的高速公路边坡监测与稳定性分析方法。通过融合地面监测、遥感监测、传感器监测及物联网智能监测等多维度数据,能够更全面、精确地把握边坡的变形特征与稳定性状态。稳定性分析结果证实,

多源信息的有效整合显著提升了边坡稳定性评价的准确性与可靠性,为高速公路边坡的安全管理提供了坚实的技术支撑。构建的稳定性预警机制能够敏锐捕捉边坡失稳风险,及时发出警报并指导采取防治措施,有力保障了道路的安全运营。同时,高速公路边坡的稳定性提升措施的综合应用,可显著提高边坡的稳定性,保障交通运营安全与可持续发展。展望未来,随着信息技术的飞速发展,多源信息在边坡工程中的应用将更加深入。研究方向应聚焦于优化信息融合算法与模型,提升融合精度与效率;并积极引入人工智能、大数据等前沿技术,打造智能化监测分析系统,实现边坡状态的实时感知、精准预测与主动预警。此外,深化对边坡稳定性机理的研究亦至关重要,可为边坡防治设计与施工提供更科学的理论指导。

### 参考文献:

- [1] 林森,邓温悌,田卿燕等.基于免像控无人机技术的高速公路边坡快速检测方法研究[J].甘肃水利水电技术,2022,58(10):28-32+38.
  - [2] 姚学涛.视觉识别技术在公路边坡裂缝检测中的应用[J].集成电路应用,2024,41(05):204-205.
  - [3] 马旭东.山西某高速公路黄土边坡稳定性分析及抗滑桩设计[J].工程技术研究,2023,8(05):171-173.
  - [4] 郭凌霄.高速公路边坡设计及稳定性分析[J].中国新技术新产品,2022,(15):100-102.
  - [5] 张正鑫,岳家明,周薇.公路边坡稳定性分析及治理方法[J].交通世界,2022,(16):131-133.
  - [6] 齐新炬,高小霞,纪超等.论地质灾害项目中边坡稳定性及滑坡治理[J].价值工程,2024,43(31):61-63.
  - [7] 陈荣娟.水土保持工程中生态修复技术的应用分析[J].水上安全,2024(19):89-91.
- 作者简介:陈莲娟(2005.06-),女,汉,四川,宜宾学院,本科,边坡稳定性分析)
- 通讯作者:雷刚(1990.05-),男,汉,四川,宜宾学院,博士,边坡稳定性分析)
- 项目信息:本论文得到省级大学生创新创业训练计划支持项目(项目批准号S202410641110)资助