

Modern Highway Geological Safety Inspection and
Natural Disaster Early Warning

现代公路地质安全检测与自然灾害预警

冶金辉 著



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

CIP INFORMATION

Title: Modern Highway Geological Safety Inspection and Natural Disaster Early Warning

题目：现代公路地质安全检测与自然灾害预警

Author: Jinhui Ye

作者：冶金辉

ISBN: 979-8-90040-152-2

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

**Modern Highway Geological Safety Inspection and Natural Disaster
Early Warning**
现代公路地质安全检测与自然灾害预警

Address: 100 N Howard St Ste R, Spokane, Wa, 99201. United States

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 16.25

Word Counts: 210.000

Edition: First edition in June 2026

Printing: First printing in June 2026

**CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL
SCHOLARS**

非开放获取·电子版请联络出版社购买·版权归出版社所有·侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher.
Infringement will be prosecuted.

前言 PREFACE

公路是国民经济的动脉，其安全畅通直接关系到社会稳定与人民生命财产安全。近年来，在国家“交通强国”战略的推动下，我国公路建设取得了举世瞩目的成就。然而，随着建设重心向西部崇山峻岭、复杂地质环境区域转移，高边坡、深埋长隧道、跨江跨海大桥等复杂工程不断涌现，公路沿线所面临的地质安全风险也呈现出多样化、复杂化和突发性的特点。极端气候事件的频发，更加剧了滑坡、泥石流、塌方等自然灾害对公路设施的破坏威胁。如何利用现代科学技术，准确探明地质隐患，实时监测工程状态，并及时有效地进行灾害预警，已成为当前公路交通行业亟待解决的重大课题。

基于此，我们撰写了《现代公路地质安全检测与自然灾害预警》一书，试图在总结现有工程经验的基础上，融合最新的科研成果与技术手段，为公路地质安全保障提供一套系统性的解决方案。本书的编写初衷，不仅是填补相关领域技术总结的空白，更是希望为一线工程技术人员提供一本“拿来即用、查之有据”的实用工具书，同时也为科研院校提供具有参考价值的学术资料。

在内容编排上，本书力求体现“理论与实践并重、检测与预警结合”的特色。前三章着重于基础理论与环境的铺垫，分析了影响公路安全的各类地质与环境因子，并梳理了地质雷达、遥感监测、GIS集成等核心技术的基础原理，为后续应用打下坚实基础。第四章至第六章，我们深入到具体的工程场景，分别针对路基、隧道和桥梁三大关键节点，详细阐述了稳定性检测与评价的方法，特别是针对隧道施工中的超前预报和桥梁桩基的完整性检测，结合了大量实际工程中的参数与标准，增强了实操性。

灾害预警是本书的另一大重点。第七章和第八章打破了单一灾种的限制，将地质灾害与气象灾害统筹考虑，构建了“空、天、地”一体化的监测网络

概念，并重点介绍了预警信息的发布机制，体现了从“被动防守”向“主动避灾”转变的理念。同时，本书并未止步于监测预警，第九章专门论述了应急响应与处置技术，强调了灾前、灾中、灾后全过程管理的重要性，形成了安全管理的闭环。

尤为值得一提的是，在第十章中，我们大胆展望了行业的未来。随着物联网、云计算、人工智能技术的爆发式增长，公路地质安全检测正迎来一场智能化变革。从智能传感器的广泛应用到基于大数据的风险评估模型，再到AI驱动自动预警系统，这些新技术的融合将彻底改变传统的人工巡检模式，实现更精准、更高效的防灾减灾。

本书在编写过程中，参考了国内外大量相关文献、标准规范以及课题组多年的研究成果，力求内容翔实、数据准确、观点新颖。但由于公路地质安全检测与预警技术发展迅速，加之作者水平有限，书中难免存在疏漏与不足之处，恳请广大读者与同行专家不吝赐教，批评指正。

最后，感谢所有为本书出版提供帮助的同事、朋友以及出版社编辑人员。愿本书的出版能为我国公路工程的安全运营贡献一份绵薄之力，助力行业向更安全、更智能的方向发展。

限于作者水平，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

目录 CONTENTS

第一章 现代公路地质安全检测与自然灾害预警绪论	1
第一节 公路地质安全检测概述	1
第二节 自然灾害预警技术发展现状	5
第三节 研究内容与方法	10
第四节 本书结构安排	15
第二章 公路地质环境特征分析	21
第一节 地质构造与岩土工程特性	21
第二节 水文地质条件评价	26
第三节 地形地貌特征分析	30
第四节 气候环境影响因素	35
第三章 公路地质安全检测技术基础	39
第一节 地质雷达探测原理与应用	39
第二节 地震波勘探技术	46
第三节 遥感与 GIS 技术集成	56
第四节 现场监测仪器设备	64
第四章 路基稳定性检测与评价	73
第一节 路基沉降监测技术	73
第二节 边坡稳定性分析	79
第三节 地基承载力测试	85
第四节 检测数据处理方法	92
第五章 隧道地质安全检测技术	99
第一节 隧道围岩质量评价	99
第二节 支护结构监测技术	105

第三节 地下水渗漏检测	110
第四节 超前地质预报系统	116
第六章 桥梁地质安全检测方法	123
第一节 桥基岩土工程勘察	123
第二节 桩基完整性检测	130
第三节 地基变形监测	136
第四节 检测标准与规范	142
第七章 地质灾害监测预警系统	151
第一节 滑坡监测预警技术	151
第二节 泥石流预警方法	157
第三节 地面沉降监测网络	163
第四节 预警信息发布机制	169
第八章 气象灾害预警技术	177
第一节 暴雨洪水预警系统	177
第二节 冰雪灾害监测预警	183
第三节 大风监测与预警	189
第四节 气象数据融合分析	195
第九章 应急响应与处置技术	203
第一节 应急预案制定	203
第二节 现场应急处置	209
第三节 抢险救援技术	214
第四节 灾后评估方法	219
第十章 新技术与发展趋势	227
第一节 智能检测技术应用	227
第二节 大数据分析平台	232
第三节 人工智能预警系统	238
第四节 未来发展方向展望	243
参考文献	249

第一章 现代公路地质安全检测与自然灾害 预警绪论

伴随着中国交通基础设施建设的迅猛发展，公路网络越来越密，越来越多的公路穿越复杂地质环境。因此公路所面临地质安全风险越来越严重，对公路地质安全检测和灾害预警技术提出了更高的要求。本章主要阐述公路地质安全的概念，在公路全寿命周期中的作用，为后面的研究提供理论依据。

第一节 公路地质安全检测概述

本节主要从公路地质安全的内涵和外延入手，对公路地质安全的基本定义、主要影响因素、公路地质安全与运营效益的关系进行分析，重点论述地质安全检测在公路全寿命周期规划、建设、运营各个阶段所起的重要作用，建立一个系统的认识体系。

一、公路地质安全的内涵与外延

公路地质安全是公路基础设施稳定、交通运输畅通的基础，内涵丰富、外延广泛，涉及工程地质、灾害学、经济学等诸多领域，深刻认识其多维度属性是开展有效管理的前提。

（一）公路地质安全的基本定义

公路地质安全是交通运输安全领域的重要分支，主要是在各种地质作用下保证公路基础设施结构稳定、功能完好，保证交通运输活动持续、安全、高效地进行。公路结构体的安全主要体现在两个方面：路基、边坡、桥梁基础、隧道围岩等工程实体内外地质作用下的稳定性和耐久性；公路运营环境的安全，即公路沿线区域的地质环境要保持相对稳定的状态，不能因为滑坡、崩塌、泥石流、地面沉降等突发性地质灾害而造成交通中断或者直接威胁行车安全。

公路地质安全属于动态且相对的概念，它并非绝对的零风险，而是在既有的

技术经济条件下,依靠科学的勘察、设计、施工和养护,将公路系统遭遇地质灾害的风险概率以及可能造成的损失,控制在社会能够接受的范围内。核心思想就是预防为主、防治结合,即在源头上发现并规避重大地质风险,在施工过程中进行地质病害的监测与治理,在灾害发生时可以做到及时预警,迅速应对,最大限度保障人民生命财产安全,保证国家交通大动脉畅通无阻。

(二) 公路地质安全的主要影响因素

公路地质安全受到诸多复杂因素的综合影响,这些因素互相交织、共同决定公路工程所遇到的地质风险程度。大致可以归结为内在地质条件和外在诱发因素两大类。

1. 内在地质条件:这是决定公路稳定性的最基本因素,也是产生地质灾害的前提。主要包含地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件。陡峭的山区地形为崩塌、滑坡的发生提供重力势能;软弱的土层或风化严重的岩体,由于物理力学性质差、承载能力低,在荷载作用下易产生不均匀沉降或者失稳;活动断裂带的存在会造成沿线构造变形,直接破坏公路结构;充沛的地下水或者地表水会软化岩土体,降低其强度,产生孔隙水压力,成为诱发滑坡、泥石流等灾害的重要原因。

2. 外在诱发因素属于触发地质灾害的“导火索”,内在条件基础上触发地质灾害的发生。自然诱因主要是强降雨、长时间降雨,是造成滑坡、泥石流等灾害最常见的自然因素。地震动能引起岩土体应力状态突然改变,造成大规模地质灾害链。人为活动,尤其是公路工程本身施工活动,比如不合理的边坡开挖、高填路堤、隧道掘进等,都会改变原来地应力平衡状态和岩土体结构,直接导致边坡失稳或地面塌陷。周边工程活动、水库蓄水引起的库岸再塑、不合理的土地利用等,都会间接影响公路廊道的稳定性。

(三) 公路地质安全与运营效益的关系

公路地质安全和运营效益之间是辩证的,深刻的,紧密的关系。地质安全是运营效益的实现和提高的基础,高效运营给地质安全的长期投入提供经济基础。两者互相依赖,一起成为公路可持续发展的重要支柱。为了保证地质安全而进行的前期投入,即详细的地质勘察、科学的选线设计和高质量的防护工程,表面上看会增加初始建设成本,但实际上是全寿命周期成本最有效的控制策略。

地质安全状况良好的公路项目,可以大大减少由于地质灾害造成的交通中断、

道路损坏、紧急抢修等事件的发生。这就直接表现为人流物流通行能力更强、运输服务更可靠，使人流物流畅通无阻，从而使通行费收入稳定，也带来巨大的社会效益。而忽略地质安全，频繁出现的塌方、滑坡等灾害会造成直接经济损失以及车辆损坏赔偿，长时间的交通中断还会带来更大的间接经济损失，给区域经济发展和居民出行造成严重的影响。地质安全上的投资属于高回报率、长期的投资项目，它可以减少以后的风险和运营费用，从而保证并提高公路项目总体投资效益和综合价值。

二、地质安全检测在公路全寿命周期中的作用

地质安全检测不是孤立的环节，是公路从规划、建设到运营、废弃全过程的系统工程。在公路全寿命周期各个阶段，它都起着不可替代的作用，它的有效发挥直接关系到项目成功、安全和效益。公路地质安全检测各个阶段的任务以及常用的方法如下表所示。

公路全寿命周期地质安全检测主要任务及方法表

阶段	主要任务	典型方法
规划阶段	地质选线与区域风险评估	遥感解译、区域地质资料分析、现场踏勘、工程地质勘察
建设阶段	工程质量控制与施工安全保障	钻探、物探、现场监测（位移、应力）、超前地质预报
运营阶段	长期健康监测与防灾减灾预警	全球导航卫星系统、合成孔径雷达干涉测量、倾斜传感器、无人机遥感、定期巡查

（一）规划阶段的地质选线指导作用

公路建设的规划阶段是决定项目成败的关键环节，地质安全检测在这个阶段的核心作用就是对路线选择的科学指导，即“地质选线”。地质选线就是通过区域地质稳定性评价、工程地质勘察，识别并避开对公路工程造成重大威胁的不良地质地段，即大型活动性断裂带、高风险滑坡体、大范围软土地基、岩溶高度发育区等。

通过遥感解译、区域地质资料分析、现场踏勘等方式可以初步圈定出地质灾害易发区、危险区。设计人员根据早期识别出的风险信息，在进行路线方案比选时，可以有针对性地避开“雷区”，选择地质条件较好、工程处治难度和造价都较低的廊带。以地质安全作为源头控制，是降低公路全寿命周期风险和成本最有

效的办法。科学合理的地质选线方案可以减少后期建设中被动调整、运营期安全隐患，避免地质问题造成工程返工、重大变更甚至项目废弃，对工程整体投资效益的正面影响是任何后期工程措施都无法比拟的。

本阶段地质安全评价还给确定公路设计标准、结构形式提供重要的依据。在地震高烈度区应提高抗震设防标准，在软土地区可以考虑用桥梁代替路基。在规划阶段充分考虑地质安全检测结果，可以保证路线方案在满足交通功能要求的同时，具备内在的、持久的、可靠的安全性，为建设一条安全、经济、耐久公路打下坚实的基础。

（二）建设阶段的工程质量控制作用

进入建设阶段以后，地质安全检测的作用就从宏观选线转向微观工程质量控制、施工安全保障。该阶段的检测工作具有很强的动态性、时效性，其主要工作是对设计方案的检验、对现场施工的指导、及时解决施工过程中出现的、与勘察设计阶段预测不符的地质问题，保证各项工程措施的有效落实。

地质检测人员对路基工程填料质量严格把关，压实过程中密实度、含水率等关键指标实时监测，保证路基有足够的强度和稳定性，有效防止以后出现不均匀沉降。高边坡、深基坑开挖时要布置位移、应力等监测点，实时观测岩土体变形情况并评价其稳定性；若出现异常数据就立即发出警报，指导施工单位改变开挖方法或者及时采取支护措施，有效防止塌方事故的发生。超前地质预报是隧道工程中保证掘进安全的重要手段，用物探等技术手段探测掌子面前方的地质情况，如软弱夹层、富水区、溶洞等，给支护参数的调整和施工方案的优化提供科学依据。

建设阶段地质安全检测起着连接设计与实体工程的桥梁作用，把设计的理论要求转化为施工过程中的可控行为，同时将施工中遇到的实际地质情况及时反馈给设计方进行动态调整。闭环管理可以有效保证路基、边坡、隧道等重要构筑物的施工质量，也可以直接关系到施工人员、机械设备的安全，是防范施工期间发生重大工程事故的屏障。

（三）运营阶段的防灾减灾保障作用

公路进入运营期以后所面临地质风险没有停止，而是在自然环境、交通荷载长久作用下发生变化的阶段。此时地质安全检测的主要任务是对公路沿线的地质环境、结构物状态进行长期健康监测、风险评估、灾害预警，其最终目的就是实现从被动的“灾后抢险”到主动的“事前防范”的根本转变，给公路的安全运营

提供强有力的防灾减灾保障。

该阶段的检测工作是长期的、系统的、预警的。通过建立高风险路段的自动化监测网,用全球导航卫星系统、合成孔径雷达干涉测量、倾斜传感器、无人机遥感等现代化技术手段,可以对边坡位移、地面沉降、结构裂缝等关键指标进行全天候、不间断的动态监测。长期的监测数据能发现灾害体的变形演变规律,也能对降雨、地震等诱发因素做关联分析,从而形成科学的预警模型。

当监测数据超过预设阈值的时候,预警系统就会自动启动,向管理部门发出警报信息,给采取封路、交通管制、人员疏散等应急措施争取宝贵的时间,最大限度地避免或者减少灾害造成的生命财产损失。定期开展地质安全巡查检测评估可以及时发现路基空洞、挡墙变形等病害,为科学制定预防性养护计划提供依据,对于发现的隐患要及时修补加固,把隐患消灭在萌芽状态。

运营阶段的地质安全检测属于公路“健康管理”的一部分,它像人体的神经系统一样,不断对公路及其周边环境做“脉搏式”的检测。依靠精确的监测和可靠的预警,共同构筑起保障行车安全、路网畅通的重要防线,是公路全寿命周期内实现可持续安全运营不可缺少的技术支撑。

第二节 自然灾害预警技术发展现状

自然灾害预警是防灾减灾的第一道防线,它的好坏直接关系到公路交通的安全和畅通。由于全球气候变化加剧、工程活动的影响,公路沿线地质、气象灾害具有突发性强、破坏性大的特点,给预警技术的时效性、准确性、覆盖面提出了更高的要求。本节主要对国际、国内在该领域技术的研究与应用情况做出梳理,并对它的发展过程以及未来的发展趋势进行分析。

一、国际地质灾害预警技术的研究进展

全球范围内地质灾害预警技术正在向根据具体的隐患点来测量、实时预警的方向发展。各国按照本国的地理条件、科技水平发展出不同的预警系统和技术途径。通过国际交流达到信息共享的目的,解决全球性问题,促进理论研究、技术研发、应用实践良性循环。

（一）欧美发达国家预警系统建设现状

欧美发达国家的地质灾害预警系统开始的比较早,已经形成比较完整的体系。这些系统一般是由国家级地质调查机构或者气象部门来主导,集成了先进的监测技术、数值模型以及应急响应机制,可以对风险的评价、实时的监测以及发布预警进行全过程的管理。美国地质调查局创建的全国范围的滑坡易发区划图和数据库,给土地利用规划、风险管理提供科学依据,将降雨阈值模型与实时降雨监测数据结合起来,对由降雨诱发的滑坡进行预警。尤其是在野火之后的地方,其泥石流预警模型准确性很高。

意大利是地中海地区地质灾害频发的国家,其民防部门和国家地球物理、火山学研究所合作建立起了国家级的地震、火山、海啸预警系统。意大利针对滑坡、泥石流灾害创建了多层次预警体系,该体系除了全国性的监测网络之外,还非常重视依靠历史灾害数据以及降雨强度—持续时间阈值的经验模型,并将这些经验模型同物理模型融合起来,从而给予区域性的风险预警。瑞士、奥地利等阿尔卑斯山脉国家在冰川融雪型泥石流、岩崩预警方面有较多经验,预警系统高度自动化,和地方应急管理部门紧密联系。

这些国家的预警系统有如下共性,观测数据长久且连续,为模型的创建和验证打下了根基,多学科交叉融合,地质学、气象学、水文学、计算机科学等知识汇聚一处,法律法规体系完备,各级政府及机构在预警和响应中职责分明,高度重视公众教育和风险沟通,借助各种途径普及防灾知识,保证预警信息能被有效地接收和响应。这些综合的、系统的建设经验为世界其它国家提供了一种参考。

（二）国际前沿监测技术装备研发动态

国际地质灾害监测技术装备正在朝着高精度、自动化、网络化、智能化的方向迅速发展,空天地一体化立体监测网络正从概念走向现实。前沿技术装备研制并投入使用之后,对灾害孕育与发生过程的感知能力得到了极大提升,从而给早期、精准预警赋予了核心技术支撑。

1. 星载和机载遥感技术把广域普查和精细识别结合起来。合成孔径雷达干涉测量技术凭借全天候、大范围、高精度观测地表微小形变的特点,在滑坡隐患早期发现以及活动性监测方面起着不可替代的作用。各国利用高分辨率雷达卫星星座,已经把重点区域的重复观测周期缩短到几天以内,可以有效地捕捉到滑坡的累积变形过程。无人机携带激光雷达或者高光谱相机,可以快速获得超高分辨率

的地形地貌、植被信息，给单个滑坡的精细建模、应急调查提供有力的数据支持。

2. 地面监测技术向着多物理量、分布式、低功耗发展。全球导航卫星系统技术由于能提供毫米级的实时三维位移监测，已经成为了滑坡关键点位移监测的标准配置。新的分布式光纤传感技术只需一根光缆就能对几十公里范围内的应变、温度、振动进行连续监测，非常适合于公路、铁路沿线边坡稳定性监测。基于微机电系统的倾角仪、加速度计、各种地声、次声传感器正朝着低成本、低功耗、高集成度、无线组网的方向发展，可以支持大规模、高密度的监测网络部署。

地质灾害监测技术分类与特点

监测技术类型	主要特点	应用场景	优势	挑战
遥感技术				
InSAR	全天候、大范围、高精度地表形变监测	滑坡隐患早期识别、活动性监测	广域覆盖、非接触	受植被和大气影响、数据处理复杂
LiDAR	超高分辨率地形、地貌、植被信息获取	单体滑坡精细建模、应急调查	数据精度高、穿透植被能力强	成本高、数据量大、受天气影响
地面监测技术				
GNSS	毫米级实时三维位移监测	滑坡关键点位移监测、形变分析	实时性高、精度可靠	布设成本高、信号可能受遮挡
分布式光纤传感	几十公里范围内应变、温度、振动连续监测	边坡稳定性监测、结构健康监测	测量距离长、抗干扰能力强	光缆易损坏、安装维护要求高
MEMS 传感器	低成本、低功耗、高集成度、无线组网	大规模、高密度监测网络部署	体积小、成本低、部署灵活	易受环境因素干扰、精度相对较低

先进的设备研发趋势将会造就出具备多源数据融合、智能综合功能的检测系统。地质灾害监测技术分类及其特点表可以看出，把不同平台、不同传感器的观测数据融合在一起，并且利用人工智能和大数据分析技术，可以更加全方面的刻画出灾害体的状况，也能够动态地响应降雨、地震等诱发因素，进而提高预警模型的可靠性和时效性，把预警技术从经验判断转变成物理预报和数据驱动。

（三）全球范围内预警信息共享机制

地质灾害无国界，加强国际合作和信息交流，提高全球防灾减灾能力十分重要。近些年来，在全球性倡议以及区域性合作框架的带动下，预警信息共享机制

明显得到改善，创建起诸多重要的国际合作平台和数据共享网络。联合国减灾署等机构在全世界防灾框架下，努力推进各国创建完善的预警系统，重视信息的公开共享。

国际灾害宪章是航天机构整合全球卫星资源的典范，当发生重大自然灾害的时候，给受灾国免费提供紧急卫星观测数据，帮助受灾国进行灾害评估和救援。世界气象组织的全球电信系统为各国气象水文部门之间交换天气数据、预警信息等提供基础。国际滑坡联合会等许多国际项目与组织，都以举办学术会议、开展合作研究、建立全球滑坡数据库等形式来实现知识、技术和数据的交流。共享灾害案例及监测数据外还要研发预警模型、制定预警技术标准，推进预警技术的标准化和最佳实践的推广。

但是全球范围内的信息共享还存在障碍。数据格式不一致、共享政策壁垒、技术水平差异、敏感信息保密等各方面都会影响到信息的共享。未来发展走向就是创建一个开放、包容、标准化的全球灾害数据基础设施，依靠云计算、大数据、区块链技术保证数据安全可靠流动，从而达到人类共同应对地质灾害的目的。

二、我国公路气象与地质灾害预警现状

我国是公路总里程最长、地质环境最复杂的国家，公路沿线的滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害和极端天气事件的威胁很严重。随着公路网络向西部山区和复杂地质条件地区延伸，对公路运行安全保障的要求也越来越高。近些年来我国在公路灾害预警方面投入巨大，取得长足进步，初步建立监测网络和预警体系。

（一）我国公路地质灾害监测网建设情况

我国公路地质灾害监测网的建设由“群测群防”的人防阶段，向人防与技防相结合的智能化监测阶段跃进。尤其在“十三五”“十四五”期间，交通运输部、自然资源部等有关部门大力推进公路安全生命防护工程、地质灾害综合防治体系建设，监测网络逐步成型。截至目前全国公路系统已经排查出数万个风险隐患点，对其中数千个高风险、极高风险路段布置了监测预警设施。

监测网的建设是点、线、面相结合的。对已经查明的重大地质灾害隐患点，高陡边坡、大型滑坡体等，布设了以全球导航卫星系统、裂缝计、深部位移计、雨量计等传感器为依托的自动化监测站，实施“一坡一策”的重点监测。按照重要高速公路、国省干线，通过遥感普查和实地调查来确定易发灾害的路段，并对

区域性风险进行评价,开展长期监测。就广域遥感技术的使用来说,用合成孔径雷达干涉测量等方法定期对全国地质灾害易发区进行筛查,发现潜在变形区以及隐患点,实现隐患的早期发现。

国家层面开展科技攻关项目、示范工程,研究推广普适型、低成本、智能化的监测预警设备。利用北斗高精度定位、物联网通信、边缘计算技术,可以提高野外复杂环境下的设备可靠性和部署效率。同时国家级、省级地质环境信息平台也相继建立起来,其目的是为了汇集各种监测数据,达到信息互通以及综合分析的目的。经过不懈努力,我国公路地质灾害监测网覆盖范围、监测精度、自动化水平均得到明显提高,多次成功预警滑坡险情,对保障人民生命财产安全起到积极作用。

(二) 公路交通气象观测站网布局现状

公路交通的安全运行同气象条件有着密切联系,大雾、团雾、暴雨、冰雪、强横风等灾害性天气是造成交通事故和交通阻断的主要原因。为了提高交通运输部门对公路沿线恶劣天气的监测预警能力,在交通运输部门和气象部门的紧密合作下,我国正在大力推进公路交通气象观测站网的建设工作。早在 2012 年,中国气象局就发布了全国高速公路交通气象观测站网布局方案,意在建立全国干线公路的气象监测网。

经过多年的建设,我国在高速公路、重要国省干线沿线已经建成大量的交通气象观测站。这些站点一般按照一定的间隔(高速公路每 10 公里至 15 公里一个)来设置,在桥梁、隧道口、长下坡、临水临崖等重点路段还会增加站点密度。可以实时监测能见度、风向、风速、温度、湿度、降水量、路面状况(干湿、结冰、积雪)等气象参数。观测数据经由网络即时传送到监控中心,给交通管理部门赋予决策支撑,包含实行交通管制、发出预警信息并引领养护作业等。

近些年来,观测站网的创建更加看重科技创新以及多功能的整合。采用非接触式路面传感器以避免对路面开挖,用高清摄像头获取实景图像,积极探索雷达等技术对团雾等局地强天气现象进行短临预警。观测站网的布置和运行大大提高了公路沿线气象环境的感知能力,为建立以气象预警为先导的应急响应联动机制打下了基础,有效地提高了公路交通安全保障水平。

(三) 当前预警技术应用中存在的主要问题

虽然我国公路地质与气象灾害预警技术的应用已经取得了很大的成果,但是

在实际应用的过程中仍然存在着一些问题，这些问题影响到整个预警系统功能的发挥，是今后需要重点解决的方向。我国地域辽阔，地质气候条件千差万别，灾害种类繁多，变化莫测，给建立普适性强、精度高的预警模型带来了巨大的困难。

数据上存在的更严重的一种现象叫做“数据孤岛”。由于各个部门所采用的监测数据标准不统一、共享程度不高，因此很难形成有效的预警合力。部分监测设备的维护不到位造成数据的缺失或者异常，从而降低预警模型的准确性。历史灾害和监测数据的积累不足，缺少完整的灾害致灾过程数据，使得灾害机理很难被深入认识，预警阈值也很难准确确定。

技术、管理层面也存在瓶颈。目前预警模型的精度还不高，大部分模型都是根据统计关系建立起来的，对于复杂地质条件下灾害物理过程的刻画不够准确，容易造成漏报或者误报。“最后一公里”预警信息传递问题还没有得到解决，怎样才能把预警信息准确、及时地传递给受威胁的司乘人员和社会公众，并保证他们能够采取正确的避险行动，仍然是一个管理难题。除此之外，基层单位缺少专业技术人才，缺少对先进监测设备的运维能力以及数据分析能力，也制约了技术的应用。面对以上问题，需要依靠跨部门合作、推进数据共享、加强机理研究、革新预警发布方式等手段来全面提升我国公路交通灾害防御水平。

第三节 研究内容与方法

本章主要论述为了达到现代公路地质安全保障的目标所进行的探索，确定本书的主要研究内容和技术手段。通过对研究内容和技术方法的详细说明，目的是给后面章节的研究提供一个清晰的框架，保证研究的系统性、科学性。

一、本书主要研究内容

为适应公路地质环境日益增多的复杂性，本书主要对检测技术、预警模型、耦合机制三方面进行研究。三者互相配合、互相联系，共同组成公路地质安全主动式防控的理论和核心技术，以从根本上提高公路交通的韧性、安全性。

（一）公路地质安全检测技术体系构建

目前，公路地质安全检测工作存在技术手段单一、数据应用分散的问题，不能形成系统的灾害识别和评价能力。为改变现状，本文试图创建一个全方位的、

多维度的、立体化的现代公路地质安全检测技术体系。该体系能够给公路全生命周期地质安全控制工作提供全方位支持，包含宏观区域稳定性评价、微观隐患点精准识别等各个方面。

该技术体系的核心就是空天地一体化协同观测，也就是系统集成各种先进的检测技术，形成优势互补的综合感知网络。

“空天地”一体化协同观测技术构成

技术类别	主要技术手段	监测目标与能力	应用特点
天基遥感	合成孔径雷达干涉测量、高分辨率光学卫星图像	大范围、周期性普查与监测地表微小变形，早期发现与筛查潜在滑坡、沉降等隐患区域	覆盖广、成本相对低、非接触
空中探测	无人机搭载激光雷达、高光谱相机	对重点路段进行高精度、高效率巡检，获取厘米级数字高程模型和地表影像，支持精细化地质解译和隐患点勘查	精度高、效率高、机动性强
地面精细化监测	全球导航卫星系统、裂缝计、深部位移计、孔隙水压力计、地质雷达、高密度电法等传感器	对已识别出的重点隐患区域进行长期、实时、动态监测，获取灾害体内部及外部关键参数	实时性强、数据连续、直接反映灾害体状态

上表所示的技术体系建立目的，就是实现从数据获取到决策支持的智能闭环。它不是各种检测技术的简单物理叠加，而是数据融合和管理的一个标准化的平台。借助于该平台可以整合并分析各种来源、各种尺度下的监测数据，给公路地质灾害风险评估、养护决策、应急响应以及工程治理设计提供全方位、动态化、量化、科学的依据，把公路地质安全管理从事后的被动响应转向事前的主动预防。

（二）典型地质灾害监测预警模型研究

公路沿线地质灾害类型繁多，滑坡、泥石流、崩塌、路基沉降等典型灾害的孕育机理、演化特征都不一样，其预警指标、判据也有很大的差别。因此开发出针对某种灾害类型的监测预警模型，是提高预警精度和时效性的主要途径。这一部分主要是分析各类灾害的致灾特点，利用物理机理和数据驱动相结合的方法来创建精细化的预警模型。

针对不同灾害类型，模型研究的侧重点将有所不同，具体如下：

1. 对滑坡灾害：主要研究位移时间序列的预测模型。通过对滑坡各个阶段的变形速率变化规律进行分析，用机器学习算法（长短期记忆网络、支持向量机等）

对监测数据进行挖掘,找出前兆信号,从而建立起可以预测失稳时间的动态预警模型。同时研究降雨入渗、地下水位变化对滑坡稳定的影响,建立降雨阈值、土体含水率双控指标预警模型。

2. 崩塌和危岩体:研究岩体结构面的特征,风化程度以及外部触发因素(强降雨、冻融循环等)的关系。采用离散元等数值模拟的方法,再现危岩体失稳的过程,模拟崩塌落石的运动轨迹、冲击能量、堆积范围。根据以上分析的岩体微裂纹信号、声发射特征、关键块体位移监测数据来建立临灾预警模型,为主动防护措施的设计提供依据。

3. 对泥石流灾害:把流域作为一个整体,建立一个将水文过程和土力学过程结合起来的综合预警模型。核心就是确定该流域内能引发泥石流的临界降雨条件,即建立降雨强度与历时阈值曲线。模型还会考虑物源条件、沟道坡度等地理因素,模拟泥石流的起动、输送、堆积全过程,从而达到对泥石流峰值流量、影响范围、冲击力进行动态预测的目的。

本研究目的,就是使预警工作由原来的定性描述转变为定量的发布。每种模型定出预警等级,即关注、注意、预警、警报,并和公路管理应急预案相衔接,保证预警信息能够快速、准确地传递给相关部门及社会公众,最大程度上降低灾害风险,保障人民生命财产安全。

(三) 气象灾害与公路地质环境耦合机制

强降雨、长期干旱、冻融交替等极端气候条件会直接、活跃地引起公路地质灾害。认识气象灾害与公路地质环境复杂的相互作用,即耦合机制,是做好精准预报、有效防治的前提。本书将会探究不同的气象条件下公路边坡、路基等地质体的响应规律以及致灾机理。

研究的重点是降雨引发地质灾害的物理过程。通过室内土工试验和现场原位监测,分析降雨入渗使边坡土体含水率增大、基质吸力减小、孔隙水压力增加,进而造成土体抗剪强度下降,引发滑坡或者泥石流。研究会注意降雨的时空分布状况,探究短时强降雨,长历时累积降雨,“前期干旱-后期暴雨”等不一样的降雨形式对灾害发生时间,规模和类型产生的影响,探寻其中的滞后效应和累积损伤效应,给创建更为细致的降雨预警阈值赋予理论支撑。

除降雨外,其它气象因素的耦合作用也不能忽视。在高寒高海拔地区冻融循环会使岩体破碎、边坡失稳。通过现场微观气象、岩体温度场监测以及热力学数

值模拟,可以得出冻融作用下岩石裂隙扩展规律以及边坡稳定性能变差的过程。对于干旱半干旱地区来说,长期干旱造成土体龟裂,形成优势渗流通道,干旱后突发性降雨通过这些通道迅速入渗,加大了灾害发生的突然性及破坏性。通过研究这些耦合机理,希望建立起一个考虑到各种气象因素的公路地质灾害风险评价体系,在气候变化背景下提高对公路地质灾害的长期适应及主动防御能力。

二、技术路线与研究方法

为了保证研究工作的顺利进行及研究目的的实现,本文会采用一套系统、科学的技术路线与研究方法。该路线把理论和实践、数据与模型、案例和验证结合在了一起,用多种分析手段从多方面、多层次展开研究来保证研究结果的科学性、可靠性、实用性。

(一) 理论研究在现场实测相结合的方法

本研究坚持理论分析与现场实测相结合,用理论指导实测,用实测检验理论,两者互相促进、迭代优化。该种方式可以保证研究结果有扎实的科学依据,又与工程实际紧密结合,有效解决公路地质安全领域中存在的具体问题,避免理论脱离实际或者测量流于形式。

理论研究是整个工作的基础,它给灾害现象的理解、分析模型的建立提供框架和依据。这部分工作主要是对岩土力学、工程地质学、水文地质学、灾害动力学等学科的经典理论进行系统的整理与深入的学习。对边坡稳定性、泥石流运动、岩体破坏等主要过程的物理力学方程进行理论分析,为后面数值模拟和预警模型的建立打下良好的理论基础。追踪并借鉴国内外的最新研究成果,提出初步的研究假说和技术方案。

现场实测是理论与实践的桥梁,主要目的就是获得现实世界的一手资料,检验、修正和改进理论模型。研究中选择有代表性的公路灾害点或者潜在的隐患区作为试验场地。在这些场地上进行详尽的工程地质勘察,钻探、取样、地质填图等,查明场地的地质结构、岩土性质、水文条件。在此基础上建立长期自动监测网,对地表位移、深部变形、地下水位、降雨量、土体含水率等主要参数做长时间序列的数据采集。

理论和实测结合是不断反馈、修正的一个循环过程。现场实测得到的宝贵数据将被用来率定理论模型中各项参数,检验理论模型预测精度。当理论计算结果

与实测数据出现偏差的时候,会对偏差原因进行深入的分析,反思理论模型适用的条件和局限性,进而对它做出必要的修正和改进。经过理论、实测、再理论的螺旋式上升过程,不断加深对公路地质灾害孕育、发生机理的认识,最终形成可以准确反映客观规律的理论模型和技术方法。

（二）多源数据融合与数值模拟分析方法

现代公路地质安全研究的数据来源很多,时空尺度不同,结构复杂。为了从大量的异构数据中得到有用的信息,在本书中会采用数据融合和数值模拟分析相结合的方法。数据融合就是构建一个全面、一致的危害情景描述,数值模拟是在此基础上对灾害的发展过程进行推演和预测。

多源数据融合属于本书的主要技术手段之一。它指的是对来自不同平台、不同传感器的数据进行综合处理,这些数据有宏观尺度的卫星遥感影像,中观尺度的无人机航拍数据,微观尺度的地表和深部传感器监测数据,气象水文记录等。融合过程首先要对各种数据进行时空基准的统一以及标准化预处理。然后开发先进的融合算法,根据各个数据源的精度和可靠性来进行加权融合,从而达到信息互补的目的。例如,可以将大范围的合成孔径雷达干涉测量形变监测结果与关键部位全球导航卫星系统高精度位移数据融合起来,这样既能把握区域整体变形走向,又能准确捕捉局部关键部位的加速变形特点,为灾害识别和状态判断提供更为全面可靠的依据。

多源数据融合之后,数值模拟分析给深入认识灾害机理、预测灾害行为提供有力的手段。本书会使用有限元法、有限差分法、离散元法等数值计算方法,建立可以反映真实地质条件的二维或者三维精细化模型。融合后数据是建立模型的几何基础、赋值材料参数的基础、设置边界条件的来源。利用接近实际的数值模型,可以模拟降雨强度、地震动等不同的触发条件下边坡的应力应变场演化、塑性区扩展以及最终失稳破坏的过程。模拟不仅可以再现已经发生的灾害,更重要的是可以进行情景式的预测分析,评估未来可能出现的致灾因素带来的后果,给风险评价和防治工程设计提供定量的科学依据。

（三）案例分析与技术验证相结合的路径

一项研究结果的生命力在于它在实践中是否有效。为保证本研究的技术体系和预警模型有实际的参考价值,将采用案例分析和技术验证相结合的方式。通过复盘历史案例、实战应用在实际工程当中检验并优化所得到的研究成果,最终形

成一套行之有效的技术方案。

案例分析可以很好地检验理论和模型的适用性。研究将整理出国内外典型的公路地质灾害案例，特别是地质背景、监测数据、灾害演化过程比较完整的案例。对于这些案例将用本书构建的技术体系和预警模型进行回溯性分析，即事后诸葛亮式的复盘。通过对模型分析预警结果同实际发生的灾害过程进行比较，来评价所提出的方法是否准确、优点和不足。回溯分析属于成本最低、效率最高的模型检验方式之一，能够给方法的改进赋予明确的方向。

技术验证是对研究结果的最后检验，也就是真实环境中实践验证。在条件具备的公路线路中挑选一些高风险边坡或者地质灾害多发地段，建立技术应用示范区。示范区内会布置所有的监测设备、运行预警模型，建立完整的地质安全预警系统，并使之进入到准业务化运行。运行期间同公路管养单位密切配合，跟踪系统运行情况，对预警发布及时率、准确率、虚警率等指标进行评价。经过长时间的实际运行，一方面可以检验技术的可靠性、稳定性，另一方面也可以根据一线使用者的意见，对系统的人机交互界面、预警信息的发布流程等进行实用化的改造。

用案例分析和技术验证相结合的方法来形成一个由理论到实践，再由实践返回到理论的闭环反馈路。典型案例中发现的问题可以指引模型的改进，示范应用中积累起来的经验有利于技术的成熟。迭代验证的过程，可以保证本书的研究成果不但是学术上的成果，更是可以转化为公路地质安全保障的可靠工具，也可以为将来制定公路地质安全相关的技术标准、行业规范提供坚实的基础。

第四节 本书结构安排

本书主要研究现代公路建设和运营过程中遇到的地质安全问题，给出一套完整的检测技术和灾害预警方案。全书按照理论、实践、宏观、微观、技术、管理由浅入深，由简及繁地展开，努力给读者构建起完整的认知体系。

一、全书章节逻辑架构

全书结构严密，逻辑清楚，使读者逐步掌握公路地质安全全貌。宏观的理论框架、具体的技术应用、综合的预警管理三者互相联系、互相支撑，共同组成有

机的整体,保证知识体系连贯、完整。

(一) 绪论与基础理论部分的逻辑衔接

绪论部分主要阐述现代公路地质安全的重要性与紧迫性,提出研究背景、研究意义,概括本书主要研究内容和研究范围。本部分目的在于给读者提供一个宏观的认识框架,使读者对公路地质安全问题有一个初步而全面的认识。紧接着的基础理论章节会对工程地质学、岩土力学、灾害地质学等基本理论做系统的介绍,这些理论是理解后面检测技术及预警机制的基础。

绪论部分提出的问题和挑战在基础理论部分得到了学理上的回答。绪论中提到的公路高边坡失稳问题,会在理论部分通过岩土体剪切强度理论、极限平衡理论等进行详细的分析。这样设计可以使得读者带着问题去学习理论,又通过理论加深对问题的理解,实现由现象到本质的认知转变,保证理论学习的目的性和实践应用的科学性,为后面章节的展开打下了坚实的理论基础。

(二) 分项检测技术章节的设置依据

本书在坚实的基础上,从各个章节论述了各项重要的检测技术。这样的结构安排不是随意的,而是根据公路地质灾害种类多、影响范围不同、检测技术有针对性等特点精心设计的。公路工程沿线地质情况复杂,会遇到滑坡、崩塌、泥石流、路基沉降、隧道变形等各种地质问题,不同的地质问题其致灾机理、监测重点也不同。

本书根据检测对象的不同,对各项技术进行分门别类的阐述,主要依据如下:

1. 针对性、专业性,公路边坡、路基、桥梁、隧道基础是地质安全问题三大主要载体。它们的地质构造、受力性质和潜在的破坏方式存在很大的差别。因此,将高边坡监测技术、路基路面无损检测技术、隧道与地下工程围岩稳定性监控技术分别独立成章,使读者对各种情况下适用技术的有效性、操作要点和数据解译方法有更深刻的认识,保证专业深度。

2. 技术体系的完整性,每一个技术章节内按照技术原理、设备系统、实施流程、数据分析、工程应用的完整链条来组织。读者不但可以学会用什么,还可以理解为什么用、怎样用,从而形成一个完整的技术应用知识闭环。这样设置可以保证知识的系统性、可操作性,便于工程技术人员在实际工作中参照使用。

读者可以清楚地了解不同的公路结构体所面对的主要地质风险,并且掌握与之相对应的主要检测技术体系。以问题为导向、以对象分章的方式既体现出公路

地质安全复杂性，又给出解决这些复杂问题的具体技术路线图，本书的实践指导意义也就由此体现出来。

（三）预警系统与应急处置的层次递进关系

本书记述了各种检测技术之后，内容自然过渡到灾害预警系统与应急处置章节。这一部分的设置体现出了由监测数据、预警信息、应急行动三者之间的层次递进关系，是整个地质安全保障体系的高级阶段和最终落脚点。检测技术解决了“看得见、测得到”的问题，预警系统回答的是“何时发生、影响多大”的问题，应急处置解决的是“发生后怎么办”的实际操作。

该逻辑链条环环相扣，不可缺少。前端各种检测技术获取大量的、动态的地质体变形、应力、环境参数等数据，是预警系统的“眼睛”和“耳朵”，是信息来源的基础。预警系统章节主要阐述多源异构数据的融合处理方法，建立科学的灾害预测模型和判据，实现从数据到信息的转化，最后发布不同等级的预警。最后是应急处置章节，根据预警信息制定并启动应急预案，采取交通疏导、人员疏散、工程排险等措施，实现预警到行动的闭环管理。该种结构安排，很好地体现了现代公路地质安全管理由被动应对向主动预防的转变，突出技术、系统、管理三者之间的相互配合和相互促进。

二、各章节核心内容导读

为了帮助读者更好的掌握本书的精髓，本节对各个部分的主要内容进行了导读。导读主要是给读者提供一份清晰的学习地图，突出重点、把握难点，在阅读的过程中对关键技术、核心机制、未来发展动向三个主要方面进行介绍。

（一）地质安全检测关键技术导读

本部分为全书的技术核心，主要介绍了公路地质安全领域中应用最广、技术最先进的一些检测监测技术。其内容既有技术的理论基础，又有实际工程中应用的方法和案例分析，目的是培养读者解决实际问题的能力。读者将会了解到在不同的地质条件以及工程需求之下，怎样挑选出最合适的组合技术，从而达成对地质灾害风险的正确识别和监测。

公路地质安全相关的关键检测技术概览可见下表：

公路地质安全关键检测技术概览

技术名称	主要监测对象	关键特点与应用
合成孔径雷达干涉测量	广域地表形变（滑坡、沉降）	卫星遥感，毫米级精度，宏观快速发现隐患
全球导航卫星系统	边坡、桥梁、隧道结构位移	接触式，高精度三维位移监测
自动化全站仪	边坡、结构物表面位移	接触式，高精度、自动化周期监测
裂缝计	边坡、结构物裂缝开合、发展	接触式，直接量化裂缝动态
测斜仪（深部位移监测）	边坡、地基深层位移	接触式，监测地下深部位移趋势
三维激光扫描	隧道、边坡表面几何变形	非接触式，高密度点云获取，精细模型分析
应力应变监测	隧道围岩、支护结构内部受力	接触式，评估结构健康与稳定性
高密度电阻率法	路基、滑坡体内部结构	地球物理，探测空洞、松软层、滑动面
探地雷达	路基、隧道浅层结构	地球物理，高分辨率探测地下病害与界面
面波分析	路基、地基土体剪切波速	地球物理，评估土体密实度、稳定性

地质安全检测技术导读的主要内容是以空、天、地一体化监测的理念来展开。根据空间尺度重点介绍了合成孔径雷达干涉测量等广域普查技术。读者能够了解到怎样利用卫星遥感数据，对几千公里的公路沿线实施毫米级的地表形变监测，进而宏观、快速地找出潜在的滑坡、沉降等灾害隐患区。本部分用具体的案例来体现合成孔径雷达干涉测量技术在早期预警、风险区划方面所具有的强大能力，为后面详查、重点监控指明方向。

地面精细监测部分，本书就接触式监测和非接触式监测这两种方式做了详细的论述。对边坡稳定性监测将对全球导航卫星系统、自动化全站仪、裂缝计、深部位移监测（测斜仪）等技术的组合使用进行详细介绍，说明怎样用多物理量监测来反映边坡从稳定到失稳的全过程。对于隧道、地下工程等重点介绍了三维激光扫描、应力应变监测等技术，说明如何准确评价围岩稳定状况及支护结构健康状况。本部分主要论述多技术融合，使读者认识如何创建信息互相补充、功能互相配合的综合监测系统。

地球物理探测技术属于重要的无损检测手段，在本书中占有很重要的比例。内容有高密度电阻率法、探地雷达、面波分析等常用的检测技术。读者将会学会

怎样用这些技术去探测路基下面有空洞、松软层，找出滑坡体的滑动面位置和范围，评价隧道前方不良地质体的位置。本章导读中会特别强调数据解译的重要性，用对比分析的方法研究不同物探方法在同一场地的使用效果，使读者了解物探数据的多解性，掌握提高解译精度的方法。

（二）自然灾害预警机制导读

本部分内容主要阐述公路自然灾害预警的内在机理，对数据采集、模型建立到信息发布的全过程做了详细的说明。高效预警系统不是单纯的技术叠加，而应该有多学科交叉、多部门合作。导读会促使读者去思考怎样把零散的数据变成有决策支持的预警情报。

预警机制的中心就是科学的预测模型。本书主要对物理力学过程的不确定性模型、长期监测数据的经验统计模型这两种主流预警模型进行介绍。前者以经典滑坡为例，说明利用极限平衡理论或者有限元数值模拟进行稳定性分析的方法，并说明如何结合降雨、地震等触发因素来建立动态的失稳判据。后者将会说明怎样利用时间序列分析、机器学习等方法，从大量的位移、渗压等监测数据中挖掘出变形规律，建立以变形速率、加速度等指标为基础的临滑预报模型。读者可以从了解到各种模型的适用条件、优缺点以及建立模型所需要的参数。

一个完整的预警机制还要有高效可靠的预警信息发布与响应系统。本书会阐述预警信息的等级划分标准（蓝、黄、橙、红四级预警），说明怎样利用短信、广播、网络平台、现场警报装置等手段，把预警信息准确、及时地传达给管理部门、工程人员和社会公众。导读会突出信息传递的“最后一公里”问题，探究怎样保证信息接收者能够正确领会预警内容，并作出相应的避险举动。同时章节还会涉及到预警之后应急响应联动机制，保证预警信息真正转化为有效的防灾减灾行动。

（三）新技术与未来发展趋势导读

本部分是全书的结束语，着眼于未来，研究新的技术怎样影响公路地质安全领域，并预测未来的发展走向。导读目的在于促使读者进行前瞻性思考，使读者不但能掌握目前的技术，也能把握行业的脉搏，预见未来的发展趋势。内容会以智能化、精准化、系统化的发展方向为主要内容，给行业持续创新提供思路。

书中对物联网、大数据、人工智能等前沿信息技术的地质安全监测预警的运用作了详细的论述。物联网技术使成千上万的传感器可以低成本、低功耗地自组

织联网，形成一个无处不在的感知网络，对地质环境进行全天候、全要素的实时感知。大数据技术给处理传感器产生的大量数据提供了可能，分布式存储、并行计算使得多源异构数据可以快速处理、深度挖掘。尤其是深度学习算法正在从根子上改变灾害预测的方式。利用卷积神经网络自动识别出滑坡体，用长短期记忆网络更加准确地预测滑坡的演变趋势。读者将在本章中了解到这些新技术是如何相互配合的，把地质灾害监测预警带入了智能化的新时代。

公路地质安全保障体系未来的发展方向就是空天地一体化智能监测、主动式风险控制。未来的监测系统不会是单一技术的孤立使用，而是会把卫星遥感、无人机、地面机器人、分布式光纤、微机电系统传感器等手段结合起来，形成一个多尺度、多维度、高时空分辨率的立体监测网络。预测模型将由原来单纯依靠数据或者物理定律，发展成数据驱动和物理机理深度融合的“数字孪生”模型，可以在虚拟空间里实时再现并预演地质体的状态变化。由被动应对灾害转为主动预防，按照风险评估、情景演练所依据的规律进行主动维护和控制，以实现公路基础设施全生命周期内地层安全。

第二章 公路地质环境特征分析

公路属于线性工程，它所穿越的地质单元千差万别，公路的安全性同沿线的地质环境有着密切联系。对公路所在区域的地质构造、岩土工程特性、水文地质条件等环境要素进行详细的分析，是能够有效地识别出潜在的地质灾害风险、实施科学的检测和预警的前提。本章主要对公路工程所处的地质环境进行详细的描述，为后面风险评价和防治工作提供理论依据。

第一节 地质构造与岩土工程特性

地质构造的宏观控制作用和岩土体的微观物理力学性质，一起决定公路工程特别是路基、边坡的稳定性。全面认识这两个方面的特点，才能保证公路地质的安全。地质构造给工程稳定性提供宏观背景，岩土体性质直接决定工程响应和行为，两者互相联系，缺一不可。

一、地质构造对公路工程稳定性影响机理

地质构造是地壳运动留下的痕迹，断层、褶皱、节理等都是地质构造的表现形式。它们破坏了岩土体的完整性、均质性，成了地质力学上的薄弱环节。公路工程的建设活动，如开挖、填筑等，都会改变原始地应力状态，在这些构造薄弱带极易诱发失稳破坏，对公路的长期稳定造成严重威胁。

（一）断层破碎带对路基稳定性的影响

断层破碎带是断层活动时在强烈地质构造作用下形成的特殊地质体，内部岩石破碎、节理密集、胶结差，一般强度低、压缩性大、透水性强。当公路路基穿越断层破碎带的时候，就会遇到许多困难。破碎带内的岩土体承载力很低，在车辆荷载和自重的作用下，路基容易产生不均匀沉降，引起路面开裂、错台甚至塌陷。沉降不但是影响行车舒适性的因素，而且是对行车安全的威胁。断层破碎带一般会成为地下水良好的通道。在降雨或者地下水补给充分的时候，破碎带含水

量会迅速增大,岩土体进一步软化,强度急剧降低。动水压力存在时会带来细颗粒流失,造成地下冲刷、潜蚀,从而引起路基内部出现空洞,最终造成路基整体失稳。地震活动区断层带复活会造成路基剪切位移、撕裂,破坏是瞬间的、灾难性的。因此公路选线时应尽量避开大型活动断层破碎带,对无法避让的路段要对破碎带进行专门的工程处理,即换填、强夯、桩基加固、设置桥梁跨越等,保证路基长期稳定和耐久性。忽略断层破碎带的存在,会给公路工程留下长期安全隐患,后期整治成本很高,甚至无法根治。

(二) 节理裂隙发育对边坡岩体的切割作用

节理裂隙是岩体中普遍存在的地质缺陷,在岩体中形成了无数的细小分离面,把完整的岩体分成大小不一、形状各异的不同块体组合。这种切割作用使得岩体的整体强度和完整性大为降低,是控制岩质边坡稳定性的主要因素。节理裂隙的切割作用就是改变边坡潜在的破坏模式。存在不同产状的节理时,会互相组合形成不同的滑移体,例如平面滑动、楔形体滑动、倾倒式破坏等。当一组节理的倾向和坡向接近,倾角小于坡角时,就会沿着这组节理面发生平面滑动。当两组或两组以上的节理相交,交线倾向坡外、倾角小于坡角时,就可能形成楔形体,沿着交线方向向下滑动。高倾角的反倾向节理,受重力作用会倾倒破坏。节理裂隙的存在给降雨入渗提供了一条优势通道。雨水通过裂隙渗入岩体内部,一方面会产生静水压力和动水压力,使结构面的有效应力减小,从而大幅度削弱结构面的抗剪强度;另一方面,水的反复冻融、干湿循环作用会使裂隙进一步扩展、贯通,形成一个或者几个连续的滑动面,诱发边坡失稳。公路开挖活动会形成新的临空面,使岩体应力平衡状态发生变化,被节理切割的块体更易向临空方向移动。爆破震动会造成节理张开,进一步扩大。所以在边坡工程设计及施工中必须对节理裂隙的产状、密度、连通率、充填情况进行详细调查,再根据这些情况进行稳定性分析和支护设计,例如用锚杆、锚索、喷射混凝土等方式把分离的岩块锚固在稳定的母岩上,提高边坡的整体性。

(三) 地层产状与公路走向的空间关系

地层产状即岩层的产出状态,用岩层的走向、倾向和倾角三个要素来描述。公路属于带状构筑物,其路线走向与地层产状之间存在的空间几何关系,会对路基及边坡的稳定性产生非常重要的影响,在山区公路施工中尤为明显。根据公路走向与岩层走向夹角、边坡坡向与岩层倾向关系,边坡可分为顺向坡、逆向坡、

斜交坡等类型，其稳定性特征大相径庭。

边坡类型与稳定性特征对比表

边坡类型	岩层倾向与坡向关系	岩层倾角与坡角关系	稳定性特征	常见破坏模式
顺向坡	基本一致	小于边坡坡角	稳定性差，最为危险	顺层滑动
顺向坡	基本一致	大于边坡坡角	坡体较稳定	
逆向坡	相反		整体稳定性高	局部掉块、小型坍塌
斜交坡	斜向相交		稳定性介于两者之间	楔形体、平面组合滑动

- 从上表可见，不同边坡类型表现出显著的稳定性差异。
- 1. 顺向坡是岩层倾向与边坡坡向基本一致的边坡。岩层倾角大于边坡坡角时，坡体比较稳定。当岩层倾角小于边坡坡角时，岩体容易沿层间软弱夹层或者层面发生顺层滑动，这是最危险的情况之一，极易造成大规模的滑坡灾害。此时公路开挖切断了坡体的天然支撑，稳定性急剧降低。
 - 2. 逆向坡即岩层倾向与边坡坡向相反的边坡。岩层向山体内倾斜，整体稳定性好，不容易发生大规模顺层滑动，一般称为稳坡。逆向坡上常见的破坏形式主要是由于卸荷作用、风化剥蚀引起的局部掉块或者小型坍塌。
 - 3. 斜交坡就是公路走向与岩层走向斜向相交。该类边坡稳定性介于顺向坡和逆向坡之间，稳定性分析比较复杂，一般要进行三维分析。潜在的破坏模式是由于层理及其他构造面共同作用，形成楔形体或者平面组合滑动。

因此，公路选线时应该充分利用有利的地形地质条件，使路线走向与山体岩层走向成较大的夹角相交，尽量避免或者缩短顺向坡路段。对于不能避免的顺向坡，特别是岩层倾角小于设计边坡坡角的，必须采取强有力的支护措施，如设置抗滑桩、挡土墙或者削坡减载、坡脚反压等，保证工程的安全。

二、公路沿线岩土体物理力学性质特征

公路工程的安全性是建立在它所承载的岩土体上的。岩土体的物理力学性质，强度、变形特性、渗透性等是公路设计、施工的主要参数。这些参数种类繁多，受地质成因、应力历史、环境因素等影响很大，具有明显的复杂性、不确定性，必须加以系统深入的研究。

（一）常见岩土体的强度参数与变形特征

岩土体强度是岩土体抵抗剪切破坏的能力，一般用内摩擦角、黏聚力来表示。这两个参数是边坡稳定分析、地基承载力计算、支挡结构设计的重要输入。岩石的强度除了岩石本身完整强度外，很大程度上是由结构面的抗剪强度来控制的。结构面的抗剪强度比完整岩石低很多，是岩体力学行为中最为薄弱的环节。土体强度是由颗粒组成、密实度、含水量、应力状态决定的。砂土强度主要由颗粒间的嵌挤和摩擦构成，内摩擦角大，黏聚力几乎为零；黏性土的强度是由颗粒间的摩擦、土颗粒与水分子相互作用产生的黏聚力共同形成的，其强度对含水量的变化非常敏感。

岩土体变形特征是在荷载作用下岩土体形态和体积改变的性质，一般用压缩模量、弹性模量等参数来表示。岩土体不是理想的弹性材料，其变形一般由弹性变形和塑性变形两部分组成。荷载作用下土体中的孔隙被压缩，颗粒发生重排，造成明显的沉降。尤其是软土，天然含水量大、孔隙比大、压缩性高，在荷载作用下会产生很大的、长期的固结沉降，给公路路基平整度和稳定性造成严重威胁。

岩石的变形主要是结构面上的相对位移和块体的转动。工程开挖卸荷之后，岩体会产生回弹变形，造成节理张开，使岩体整体性降低。了解不同岩土体的强度和变形特性是做好合理设计的前提。软土地基上修建公路时，采用换填、堆载预压或者设置桩基的方式控制沉降；岩质边坡根据结构面的强度来确定合理的坡率和支护方案。

准确获取这些物理力学参数一般要依靠室内试验和原位测试相结合。室内试验可以准确控制试验条件，但是取样过程会扰动原状土结构；原位测试更能反映岩土体现场实际状态，但是成本高、受场地条件限制。因此，综合多种测试手段，结合工程经验进行判定，是取得可靠岩土参数的有效途径。

（二）特殊岩土的工程特性

除常见的岩土外，公路建设中还会遇到一些具有特殊工程性质的岩土，如软土、膨胀土等，给工程带来的问题更加突出。软土一般是指天然含水量高、压缩性大、抗剪强度低、渗透性差的黏性土或淤泥。主要分布在沿海平原、河口三角洲、湖沼盆地等地方。软土的主要工程问题是承载力很低，荷载作用下容易产生大量的不均匀固结沉降。直接在软土上修建路基，会造成路面沉降开裂，严重时还会造成路基整体剪切失稳。软土的固结过程十分缓慢，沉降会持续数年甚至数

十年,给公路的长期养护造成很大的困难。因此处理软土地基是公路工程的全球性难题,一般要采用桩基、真空预压、堆载预压、强夯等复杂而昂贵的处理技术。膨胀土是含蒙脱石等亲水性黏土矿物的一种特殊的黏性土,它最显著的特点就是遇水体积大幅膨胀,失水体积急剧收缩。胀缩变形会产生很大内应力,对工程结构造成极大的破坏。对公路工程来说,在干旱时期膨胀土路基会因失水而收缩,造成路基边坡、路面产生大量的网状裂缝,而这些裂缝给雨水入渗提供了一个快速通道。雨季来临的时候,雨水会渗入到裂缝里,土体吸水膨胀,强度急剧下降,造成路基软化、边坡坍塌、路面隆起等现象。干裂湿胀的循环作用造成膨胀土地区公路病害频发,难以根治。治理膨胀土的主要方法是“防水”和“控水”,即设置完善的排水系统、边坡封闭、换填非膨胀性土或进行化学改性等措施,使膨胀土的含水量保持稳定,抑制其胀缩变形。

(三) 岩土体物理力学参数的变异性分析

岩土体是自然地质作用形成的,由于其形成过程的复杂性,物理力学参数在空间分布上具有很大的变异性或者不确定性。同一地层单元内岩土体的强度、变形模量等参数也不是恒定不变的数值,而是有一定波动的随机变量。忽略该参数的变异性,只用确定性的、偏于保守的一个数值来设计工程方案,会造成工程方案不经济,甚至在某些局部区域存在安全隐患。因此,对岩土体参数进行变异性分析,用概率统计的方法来描述其不确定性,是实现公路工程精细化、可靠度设计的重要一步。参数变异性来源于岩土体物质组成和结构天然不均匀性、勘察取样及室内外试验过程中产生的误差、理论模型与实际情况不符所造成的转化不确定性。对参数的变异性进行分析,首先要通过大量的现场和室内试验,得到足够多的数据样本。用数理统计的方法绘制参数的频率分布直方图,求出参数的均值、标准差、变异系数等统计特征值,检验参数符合何种概率分布形式。掌握岩土参数的概率分布特征之后,就可以将它应用到基于可靠度的稳定性分析当中。与传统采用安全系数确定的分析方法相比,可靠度分析方法考虑了荷载和抗力两方面的随机性,评价结果以失效概率或者可靠度指标的形式给出,可以更加全面、科学地评价工程的安全性。在进行边坡稳定性评价的时候,可以将土体的黏聚力、内摩擦角作为随机变量,用蒙特卡洛模拟等方式计算在不同的参数组合下边坡发生破坏的概率,从而对风险进行量化的评价,为制定更加合理的支护方案和风险控制措施提供依据。

第二节 水文地质条件评价

水文地质条件属于影响公路稳定、安全的重要因素之一。水的存在和活动会对岩土体的物理力学性质造成影响，从而引发各种地质灾害，直接威胁到公路结构的安全。因此，准确评价公路沿线水文地质条件，是做好地质安全监测及灾害预警工作不可缺少的重要环节。

一、地下水动力学特征及其对工程的潜蚀作用

地下水的动态变化以及它对土体的侵蚀作用，也是引起公路工程长期病害的又一重要因素。它既会用物理溶解、化学溶蚀来改变岩土介质的组成，又会借助渗流动力过程，对路基、边坡的稳定产生持续威胁，所以必须对其动力学特性及潜蚀机理有深刻的认识。

（一）公路沿线地下水的补给、径流与排泄规律

公路沿线的地下水动态平衡是由补给、径流、排泄这三个环节来控制的，这三者共同构成了一个复杂的水文循环系统，对路基土的含水量和稳定性产生直接的影响。掌握好它的时空分布规律，是评价水文地质条件的前提。大气降水是地下水最重要的补给来源，降水入渗到地表补给浅层地下水。河流、湖泊、水库等地表水体的侧向渗透，农田灌溉回归水入渗等，在一定的区域内也起着重要的补给作用。补给量大小和速度受地形地貌、地层岩性、植被覆盖率、人类活动强度等因素的影响很大，存在季节性、空间差异。

地下水在含水层中运动的过程叫做地下水的径流过程，受地形坡度、水力梯度的控制。山区、丘陵地带的地下水一般是从高处流向低处，最后汇入沟谷或河流。平原地区径流方向受整个区域地下水流场总体趋势所决定。地层渗透性决定径流速度，砂卵石等地层水流速度快，黏性土层水流慢，甚至有隔水性。公路工程建设，如路基填筑、边坡开挖等，会改变原来的地表径流、入渗条件，扰乱局部地下水径流路径，容易在路基附近形成异常的地下水富集区。

地下水的排泄是地下水循环的最后一个环节，以泉水涌出、排泄到河流湖泊或者蒸发等方式排泄。地形切割较深的沟谷地区，地下水常以泉水的形式从地表溢出。滨河地段地下水和河流水位之间有水力联系，互相补给和排泄。植物蒸腾作用在夏季是浅层地下水的主要排泄途径。认识并量化补给、径流、排泄等环节

的动态关系，建立区域地下水均衡模型，对预测工程建设造成的地下水位变化，避免路基浸泡、边坡失稳有重大意义。

（二）地下水渗流对路基土体的潜蚀机制

地下水渗流对路基土体的潜蚀作用是隐蔽的、持久的破坏过程。水流的动水压力会把土体颗粒带离，在土体内部产生微小的渗流通道。在土力学、水文地质学中，称之为管涌或者潜蚀现象。其机理主要是渗流力的作用，即水在多孔介质中流动时对固体颗粒产生的拖曳力。当拖曳力大于土颗粒本身的有效重力以及颗粒之间的黏聚力时，土粒就会开始移动、迁移，造成土体结构逐渐破坏。

该过程发生发展的原因有很多。水力梯度即单位渗流路径上的水头损失，它是产生渗流力的直接原因，水力梯度越大，潜蚀发生的可能性及强度就越大。其次为土体性质，无黏性或者低黏性的粉土、细砂土由于颗粒间联结力较弱，最容易发生潜蚀破坏。土体的级配情况也很重要，级配不好的土体内部孔隙分布不均匀，容易形成优势渗流通道，加快潜蚀的发展。潜蚀开始时，只有最细小的颗粒被水流带走，在土体内部形成微小孔道；随着时间的推移，孔道逐渐扩大、加深，最终形成肉眼可见的洞穴，使路基承载能力大大降低，引起不均匀沉降或者突然塌陷破坏。

（三）地下水位波动引起的地基附加应力变化

地下水位的周期性或者非周期性波动，会使地基土体中的有效应力产生明显的变化，从而对公路地基的稳定状况和变形情况造成较大的影响。该现象的物理基础就是土力学中的有效应力原理，即土的总应力等于有效应力和孔隙水压力之和。地基的强度、压缩性主要是由骨架颗粒之间传递的有效应力决定的。

连续降雨或者洪水造成地下水位升高，这时土体中的孔隙水压力就会增大。按照有效应力原理，在总应力不变时，孔隙水压力增大必然导致土体骨架间有效应力减小。有效应力降低会直接降低土体的抗剪强度，降低其承载能力，饱和的砂土、粉土地基还会发生液化。水位上升后产生的浮托力可以减轻上覆土体自重压力，使地基稳定性降低。对于已经建成的公路来说，强度下降会造成路堤边坡失稳或者地基承载力不够。

相反，干旱季节或者人工抽水使地下水位降低的时候，孔隙水压力减小，土体的有效应力相应增大。相当于给地基施加附加的固结荷载，会使饱和软弱土层产生压缩、固结沉降。如果沉降发生在局部或者不均匀的地方，就会造成公路路面开裂、桥台下沉等问题。公路沿线的地下水位像不断作用的荷载一样改变地基

的应力状态，造成地基产生疲劳变形和长期强度衰减，成为公路慢性和突发性地质灾害的重要内因。

二、特殊路段水文地质条件探测与评价

对于岩溶、采空区、滨河等特殊地质环境，常规的水文地质调查方法很难达到工程安全评价所需的精度。这些路段水文地质条件极其复杂，若不用更加有针对性的探测技术和评价方法，不能识别出其中存在的水安全隐患，也无法保证公路的安全。特殊路段典型水文地质问题及相应的探测手段见下表。

特殊路段水文地质条件及探测方法概览表

特殊路段类型	主要水害风险	典型探测方法	工程影响（示例）
岩溶地区	地下管道流、溶洞塌陷、突水	地球物理勘探、人工示踪试验、钻探及孔内测试	路基失稳、桥梁地基破坏、结构变形
采空区	大面积积水溃决、地面塌陷、突水	瞬变电磁法、激发极化法、钻探及孔内成像	路基承载力不足、结构破坏、人员安全隐患
滨河路段	地下水位剧烈波动、渗流掏空、土体饱和软化、管涌	监测井群、水温示踪、环境同位素技术	边坡失稳、路基变形、路面开裂

（一）岩溶地区地下水管道流探测方法

岩溶地区地下水系统以管道流、裂隙流为主，非均质性、各向异性较强，流动路径不可预测，给公路工程造成巨大危害。探测隐藏在地下河床、溶洞管道等是岩溶区地质安全评价的主要工作。由于分布具有隐蔽性、复杂性，单一的探测方法效果不好，必须综合探测手段。

1. 地球物理勘探法属于圈定岩溶异常区无损探测的主要手段。高密度电阻率法利用地下介质电性不同来识别出含水的溶洞、管道或者破碎带，其电阻率异常。地质雷达法依靠高频电磁波反射原理，可以对浅层（一般小于 30 米）的溶洞、空洞做精细成像，分辨率高。有利于快速大范围地确定重点可疑区域，为之后的精确勘察指明方向。

2. 人工示踪试验是确定岩溶地下水流向、流速、水力联系最直接有效的手段。在已知的岩溶洼地、落水洞或者上游钻孔处投入荧光素钠、食盐等示踪剂，然后在下游泉点、钻孔或者河流中定时取样监测。根据示踪剂浓度随时间变化的曲线可以判断不同点之间水力连通性，管道的形态特征（有无地下湖）和地下水的实

际径流速度。

3. 钻探与孔内测试是对地球物理异常、示踪试验结果进行验证,也是取得岩溶形态直接信息的重要方法。钻孔可以查明溶洞的位置、大小、充填情况。为了克服钻孔“一孔之见”的缺点,一般还要配合孔内电视成像、声波扫描等测试来获得孔壁完整的结构信息。跨孔电磁波 CT 等技术是在不同的钻孔之间发射、接收电磁波,进行孔间介质层析成像,可以更准确的反映溶洞、管道的空间分布形态。

采用以上方法,从面到点、由浅入深逐步缩小目标范围,最后可以得到较为可靠的岩溶地区地下水排泄网络三维模型,为公路选线避让或者采取有针对性的加固措施提供可靠的依据。

(二) 采空区积水范围与深度评价

当公路穿越或者临近于煤矿等矿产开采形成的地下采空区的时候,就会遇到严重的地质风险。这些采空区积水后,就像公路下面悬着一个巨大的水袋,一旦溃决,就会造成灾难性的突水和地面塌陷事故。因此准确评价采空区的位置、形态、积水范围和深度就成为这类路段安全保障的中心问题。

探测采空区积水的基本物理条件就是积水体和围岩有明显的物性差异。积水采空区一般为良好的导体,电阻率低,为地球物理方法的应用打下了基础。瞬变电磁法是探测采空区积水的一种有效方法。该方法就是向地下发射一次电磁场,观测由地下良导体(即积水体)感应出的二次涡流场的衰减过程,根据它的衰减特征来反演地下低阻异常体的空间分布和埋深。探测深度大、抗干扰能力好,适合大面积富水采空区的查明。充电法或者称为激发极化法,可以区分空洞和充水空洞,因为含硫化物的矿化水体一般具有较高的极化率。地面物探成果和已有的矿山开采图纸资料互相印证,可以大致画出积水区的轮廓。为了得到更准确的深度、厚度信息,一般要物探异常区布设钻孔。钻探可以测量积水深度,可以采集水样进行化验,还可以利用孔内声呐成像技术详细地画出采空区的形状,为风险评价和疏放水、注浆充填等治理方案设计提供最可靠的参数。

(三) 滨河路段地下水与地表水的水力联系

滨河路段的公路工程地基、边坡稳定状况受到邻近河流和两岸含水层之间水力联系的影响。地下水和地表水之间不断、动态地交换着水量,这是控制该类路段水文地质条件的主要因素。准确判断水力联系强弱和方式,对洪水期或者枯水期工程可能出现的问题有着重大意义。

地下水与地表水交换的方向和强度是由二者水位差决定的。当河流水位高于两岸地下水位的时候,河水会通过渗透性较好的河床、岸坡补给地下水,使路基下方的地下水位上升。补给作用在洪水期间更加明显,河水快速上涨会使路基土体饱和,孔隙水压力急剧增大,有效应力和抗剪强度大幅度降低,极易造成路堤失稳或者浸水软化。相反,当河流水位低于两岸地下水位时,地下水就会向河流排泄,在岸坡土体内部产生渗流,在一定条件下还会掏空岸坡坡脚,对路基的整体稳定造成威胁。

评价水力联系常用的方法是沿垂直于河流方向设置监测井群,对河流水位及各监测井地下水位的变化进行长时间同步观测。根据水位波动响应关系来判定水力联系的紧密程度以及影响范围。利用水温作为天然示踪剂也是有效的,地表水温度随季节和昼夜变化剧烈,地下水温度相对稳定,通过观测地下水温度的变化来判断河水入渗的情况。氢同位素等环境同位素技术也被广泛应用,因为地下水中的氢含量远大于地表水,通过测量河岸带地下水中氢含量的梯度变化,可以定量计算出地下水向河流的排泄量。通过以上监测、分析得到的结果可以建立滨河路段的水文地质模型,对不同水文状况下路基的安全情况加以预测,从而给防洪、排导、加固等措施的制定提供一个科学依据。

第三节 地形地貌特征分析

地形地貌属于公路地质环境的主要要素,它既影响又塑造了公路沿线的地质构造以及应力场分布,对地质灾害的类型、规模、分布情况、活动强度有着深刻的影响。对公路穿越区域的地形地貌特征展开系统性分析,是识别潜在地质风险、评判工程稳定性的前提,也是公路选线、设计、施工以及长期运营安全保障的重要决策依据。

一、不同地貌单元公路地质灾害发育规律

公路工程所穿过的地貌单元种类繁多,有高山峡谷、平原丘陵、黄土地区等等,不同地貌类型其地质灾害发育规律具有明显的地域性差异。通过对不同地貌单元中公路地质灾害具体表现形式及内在机理的剖析,对制定差异化、精细化的勘察与防治措施有着十分重要的意义,是实现公路全生命周期地质安全韧性设计

的关键所在。

不同地貌单元公路地质灾害特征对比表

地貌单元	主要灾害类型	灾害特征	主要诱发原因
山地峡谷区	崩塌、滑坡、泥石流	高发性、突发性、链式效应、破坏力巨大、高位灾害源	地势高陡、高差大、构造频繁、岩体破碎、河流侵蚀、公路开挖、极端天气
平原微丘区	地基沉降（固结沉降、不均匀沉降）	缓慢持续、隐蔽性强、对结构耐久性破坏大、养护难度高	厚层松软土、高压缩性填土、荷载不均、地下隐患（古河道、暗塘）
黄土沟壑区	侵蚀（水力、潜蚀、洞蚀）、崩塌、滑坡	强度大、形式多样（溅蚀、面蚀、细沟、切沟）、垂直节理控制、湿陷性	黄土特性（大孔隙、垂直节理、湿陷）、不合理开挖、干湿冻融循环、水害

不同地貌单元公路地质灾害的具体特征，可见上表。下面将对这些地貌单元进行详细阐述。

（一）山地峡谷区公路地质灾害高发性特征

山地峡谷区是公路地质灾害发育最严重的地区之一，它的主要特征就是地势高峻、坡度陡峭。巨大的高差、陡峭的坡体蕴含着巨大的重力势能，给崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害的发生提供了得天独厚的动力条件。该区地质构造运动频繁，断裂、褶皱发育，岩体破碎，节理裂隙多，给灾害的发生提供丰富的物质基础。强烈的河流下切、侧向侵蚀不断掏空坡脚，破坏斜坡原有的平衡，使边坡的不稳定性更加严重。

公路建设自身对山地环境造成的改变，比如开挖坡脚、坡体堆载等，都会扰乱岩土体的天然应力平衡，成为引发灾害的直接原因。山地气候多变，暴雨、融雪等极端天气事件时有发生，雨水沿裂隙入渗，一方面使岩土体自重增大，另一方面又使结构面的抗剪强度降低，极易诱发大规模连锁性地质灾害。因此山地峡谷区的公路工程会面临点多、线长、面广的灾害威胁，高发性、突发性、破坏力大的特点给公路的安全运营带来长期而严峻的挑战。

该地貌单元的公路灾害一般具有群发性、链式效应的特点。一次大规模的滑坡或者崩塌，其堆积物堵塞河道会形成堰塞湖，堰塞湖溃决则会引发下游洪水或者泥石流，灾害链的传递效应使影响范围和破坏程度呈几何级数增长。沿江峡谷路段一侧是高耸的危岩体，另一侧则是深切的河谷，崩塌落石不但是行车安全的直接威胁，而且其碎屑物质更是泥石流形成的重要固体物源，高位灾害源的存在

使得防治工作十分困难。

（二）平原微丘区公路地基沉降变形特征

平原微丘区地势比较平缓，地质灾害的突发性、破坏性比山区小，但是公路工程面临的主要问题集中表现为地基沉降和变形。该区域广泛分布有厚层松软土层，冲洪积淤泥、软黏土、高压缩性填土等均属于此类。这些土体力学强度低、压缩性高、透水性差，在公路路堤填筑和交通荷载的长期作用下，很容易产生较大的固结沉降和不均匀沉降。

地基不均匀沉降是平原微丘区公路最常见、最难处理的病害。会造成路面开裂、跳车、桥头搭板错台等问题，影响行车的舒适性、安全性，增加养护费用。不均匀沉降一般是由地基土层在水平和垂直方向上不均匀所造成的。路堤下卧软土层厚度变化、路堤两侧荷载不同、地下古河道或暗塘分布等都会引起局部沉降量过大，产生沉降差异。尤其在桥涵构造物和路堤过渡段，由于结构刚度、基础形式存在较大差异，不均匀沉降问题比较突出，是公路养护维修的重点、难点。缓慢而持续的变形过程，虽然不像滑坡、崩塌那样惊心动魄，但它对公路结构耐久性和长期服务性能的破坏却是不可忽视的。

（三）黄土沟壑区公路边坡侵蚀与崩塌特征

黄土高原沟壑纵横，地貌破碎，是我国乃至世界水土流失、地质灾害最严重的地方之一。黄土是风成沉积物，其特有的工程地质性质有大孔隙、垂直节理发育、结构疏松、遇水湿陷等。因此黄土地区公路边坡破坏形式为强烈的侵蚀，频繁的崩塌、滑坡。公路施工活动，例如开挖形成的直立或者接近直立的边坡，使黄土天然存在的状态发生改变，加速了灾害孕育和发生的过程。

黄土边坡的侵蚀方式有各种各样的，其中水力侵蚀最为突出。降雨时在坡面上很容易发生片状溅蚀、面蚀，然后汇集成细沟、浅沟甚至切沟，使边坡形态发生深刻变化。黄土的垂直节理给水分的下渗提供了一个有利条件，在坡体内部形成潜蚀、洞蚀，掏空土体，形成地下洞穴，最终导致表层土体塌陷。内外侵蚀共同作用使黄土边坡稳定性随时间不断变坏，为大范围失稳埋下了伏笔。

崩塌、滑坡属于黄土边坡更严重的灾害形式。由于垂直节理发育，在路堑开挖后形成的临空面上，黄土体常沿节理面发生坠落式或者倾倒式崩塌。特别在干湿循环、冻融循环的作用下，节理会继续扩大，造成岩土体进一步碎裂、剥落。当降雨或者灌溉水大量入渗，使黄土湿陷、抗剪强度急剧下降时，很容易沿某个

软弱带或者界面发生大规模的黄土滑坡。该类滑坡滑动速度快、影响范围广，对公路交通造成巨大的威胁。

黄土地区的人类工程活动同地质灾害的发生有着密切的关系。不合理的土地利用，如在坡顶进行农田灌溉，会不断给坡体补充水分，使边坡的稳定安全系数大大降低。道路建设中不合理的开挖破坏了坡体的完整性，也破坏了原来的应力平衡，是引起崩塌、滑坡的直接原因。因此，在黄土沟壑区进行公路建设及运营时，必须对黄土的特殊性有充分的认识，采取有针对性的防护措施，把水害防治放在首位。

二、地形因子与公路地质风险的相关性分析

地形因子是地质灾害形成、演化的决定性外在控制因素，地形因子会改变斜坡的应力分布状况、水文过程和物质的运移方式，从而影响地质风险水平。对坡度、坡向、地形高差、沟谷形态等主要地形因子与公路地质风险的相关性进行量化分析，可以宏观上识别出灾害易发区，给公路地质安全风险的精细化评价和区划提供科学依据。

（一）坡度与坡向对边坡稳定性的量化影响

坡度是边坡稳定性的主要地形因素。它直接控制斜坡上岩土体重力分量中下滑力的大小。在其它条件相同时，坡度越大，下滑力越大，抗滑力越小，边坡稳定性也就越差。工程实践与理论分析都表明存在一个临界坡度，当自然或人工边坡的坡度大于这个临界坡度时，失稳破坏的概率就会显著增大。不同的岩土体，其临界稳定坡度不一样。坚硬完整的岩质边坡可以保持较陡的坡度，松散的土质边坡或破碎的岩质边坡要保持稳定，则需要坡度更缓。

坡向通过影响边坡所接受的太阳辐射、降雨量、风化作用强度来间接影响边坡的长期稳定。

1. 阳坡日照时间较长、昼夜温差大，物理风化作用强，岩体容易被破碎。阴坡因为日照少、湿度大，化学风化、溶蚀作用更为明显，而且冬季积雪不易融化，融雪水入渗可能会威胁边坡的稳定性。

2. 坡向受盛行风向和降雨方向的影响。迎风坡、迎雨坡降水多，含水量大，水分入渗容易诱发滑坡、泥石流等地质灾害。背风坡比较干燥，但是由于风蚀作用表层松散。

量化分析坡度、坡向的影响一般使用地理信息系统技术，通过对数字高程模

型进行分析,得到区域坡度、坡向信息,然后与已发生的地质灾害点位进行统计叠加分析,建立灾害发生概率与这两个因子之间的函数关系。通过对某区域内地质灾害集中分布在哪个坡度区间、哪些坡向上进行深入研究,可以为该区域公路选线、边坡设计提供量化依据。这样就可以把抽象的经验判断变成具体的数字指标,极大地提高了地质风险评价的科学性、准确性。

(二) 地形高差对地质灾害势能的贡献分析

地形高差是区域内最高点和最低点的垂直距离,是反映地貌切割深度和地势起伏度的指标。它直接决定地质灾害特别是重力流灾害(滑坡、崩塌、泥石流)所具有的初始势能。巨大的地形高差表示,当斜坡发生失稳时,岩土体在向下运动的过程中,重力势能会转换成动能,速度很高,冲击力很大,灾害的影响范围更远、破坏力更强。

就能量而言,一个潜在滑坡体的重力势能可以近似地用其质量、重力加速度、质心高度三者相乘来表示。相似规模的滑坡体中,海拔越高、相对沟底高差越大,初始势能就越大。高势能是滑坡启动的动力,也是远距离滑动、高速冲击的能量来源。因此,在地形高差很大的高山峡谷地区,即使规模不大、能量较小的高位崩滑,也会因为能量的快速转换而演变为灾难性的高速远程滑坡,给几百米甚至几千米外的公路设施造成致命威胁。地形高差分析可以找出有演变成高能、远程灾害潜力的“高位”隐患点,这是传统上只用形态来评价稳定性的方法所忽略的环节。

(三) 沟谷形态对泥石流发育的控制作用

泥石流属于山区最危险的地质灾害,它的发生、发展都受着沟谷形态的限制。沟谷不但是松散固体物质的聚集场所,而且是水源汇集、泥石流流动的通道。沟谷的平面形态、纵坡、横断面形态共同决定了一条沟谷是否具有形成泥石流的有利地形条件。

平面形态上,漏斗状或者瓢状的汇水区最有利于泥石流的形成。该形态有利于短时间内积聚大量降水,给泥石流启动提供足够的水源动力。流域面积越大,潜在的水量物源量就越多,泥石流规模也就会越大。上游陡峭、中游平缓、下游开阔的阶梯状纵坡剖面组合,是泥石流孕育、加速、堆积的理想地形。上游陡峭的“形成区”给泥石流提供了大量的势能,有利于松散物质的启动和汇集;中游坡度适中、相对狭窄的“流通区”可以约束水流,保持高速运动,沿途侵蚀裹挟更多的物质,扩大泥石流的规模;下游开阔平缓的“堆积区”会使泥石流能量耗

散、流速降低，最终堆积成扇，淤埋冲击位于出山口的公路、桥梁。

沟谷横断面形态是 V 型或 U 型，同样会对泥石流的流动产生影响。窄深沟谷为 V 型，对泥石流有很强的约束作用，流体能量集中、流速快、侵蚀力大。宽浅的 U 型沟谷会造成泥石流能量分散、流速变缓，但是影响范围更广。因此对沟谷形态参数（沟长、比降、流域面积、沟道密度等）做详细的解译和分析，可以判断该沟谷发生泥石流的可能性及规模，为公路穿越沟口时采取绕行避让或者修建桥梁、拦挡、排导工程等防治措施提供重要的依据。

第四节 气候环境影响因素

气候和环境属于决定公路地质安全状况的关键外部因素，其变化会对岩土体的物理力学性质以及稳定状况造成深远影响。极端天气事件以及长期的气候模式变迁，可以通过多种途径引发或者加重公路沿线的地质灾害。认识这些影响因素作用机理，是建立地质安全预警体系、采取相应防护措施的科学依据。公路地质灾害的主要气候环境影响因素及机制如表所示。

气候环境因素对公路地质影响汇总表

气候因素	主要影响机制	主要地质灾害 / 病害
短时强降雨	快速提高孔隙水压力，降低有效应力	浅层滑坡、塌方
持续降雨	长期浸润增加自重，弱化黏聚力及内摩擦角	深层滑坡
暴雨 (特定地形)	形成临界水动力条件，侵蚀、搬运固体物质	山洪、泥石流
冻融循环	负温梯度下水迁移形成冰透镜体；冰劈作用	路基冻胀、融沉，岩体冻胀剥落
温度剧烈变化	矿物热膨胀不均，热应力疲劳；盐类结晶	岩体物理风化、剥落，危岩落石
长期干旱	土体失水收缩形成干缩裂隙	干旱后降雨时，快速渗透引发失稳

一、极端降雨事件对公路地质环境的触发机制

极端降雨，短时强降雨、持续性降雨等都会诱发滑坡、泥石流等地质灾害。降雨会改变坡体内水的赋存状态，从而迅速改变岩土体的力学平衡，给公路边坡、路基等基础设施的稳定性带来直接而严重的威胁。因此揭示降雨触发机制就成了

地质灾害预警工作的核心。

（一）短时强降雨对坡体孔隙水压力的累积效应

短时强降雨是短时间内强度很大的降雨过程，具有强度大、时间短的特点。在这样的降雨模式下，雨水下渗速率明显大于坡体内部的排水速率，水分不能通过地下径流及时排出。大量的雨水迅速地填充到岩土体的孔隙和裂隙之中，使坡体的浅层含水率迅速增大。水分迅速汇集造成孔隙水压力瞬间增大，在透水性差的黏性土或者风化程度高的岩质边坡中，此现象更加明显。

孔隙水压力增大，会产生很大的静水压力。该压力作用于土体颗粒或者岩体结构面上，抵消了颗粒间的接触应力，使有效应力降低。根据有效应力原理，土体的抗剪强度是由有效应力来决定的。因此孔隙水压力的累积和上升，直接造成坡体潜在滑动面抗剪强度大幅度降低。当强度下降到临界值的时候，坡体原有的平衡被破坏，当下滑力大于抗滑力的时候，最终造成浅层滑坡或者塌方，对公路造成严重破坏。

（二）持续降雨导致土体抗剪强度弱化机理

与短时强降雨的“速发性”不同，持续性降雨的影响是“渐进性”的，但破坏力也很大。长时间的连续降雨使雨水有足够的时间渗入到坡体深处。水不但填充孔隙，还会和土体颗粒发生一系列复杂的物理化学作用，使土体抗剪强度持续、深层地弱化。

一方面水分的长期浸润会明显增大土体的自重，使坡体下滑力增大，稳定性储备相应减小。另一方面也是更关键的一点就是水分对土体抗剪强度指标，即黏聚力和内摩擦角的劣化作用。黏性土中水分子进入会使颗粒间距离增大，颗粒间电解质引力减小，所以黏聚力明显降低。对于砂性土或者碎石土来说，饱和状态会消除因为毛细作用而产生的假黏聚力；水膜润滑作用会大大减小颗粒间摩擦系数，也就是降低内摩擦角。由于含水量增加造成的强度参数劣化是一个渐进的过程，当累积降雨量达到一定的阈值后，即使后续降雨量不大，也会因为土体强度被削弱而产生大规模的深层滑坡。

（三）暴雨诱发公路沿线山洪与泥石流的临界条件

在地形陡峭、地表松散物质多的山区公路旁，暴雨是造成山洪、泥石流的直接动力源。泥石流的形成除了要有足够的水源之外，还需要有丰富的固体物质来源和较大的沟谷比降。暴雨为泥石流的启动提供临界的水动力条件。

山洪和泥石流的发生一般都和一定的降雨量阈值有关。但是该阈值不是固定不变的，前期降雨量、流域地质背景、植被覆盖率等都会对它产生影响。临界条件一般可以从以下几个方面来确定，即

1. 降雨强度和历时组合，短时高强度降雨或者长时间中等强度降雨都会引起泥石流。存在一条临界强度与时间的关系曲线，实际降雨过程超出此曲线时，灾害发生的概率就会大大提高。比如 1 小时内降雨量超过 60 毫米或者 24 小时内累计降雨量超过 140 毫米的降雨，在具备形成条件的地区就有可能引发泥石流。

2. 前期有效累积降雨量：前期有效累积降雨量，就是能使沟谷中松散堆积物含水量饱和、孔隙水压力增大、土体强度降低的持续降雨过程。在此基础上，一次小小的触发降雨就会打破堆积体的暂时平衡，造成破坏性流动。所以前期累计降雨量是衡量泥石流风险的前导指标。

3. 汇流与侵蚀条件，暴雨产生的大量径流在沟谷中迅速汇集，产生很大的水流冲击力和侵蚀作用。水流剪切力超过沟床堆积物抗剪强度和起动应力的时候，水流就会大量侵蚀和搬运固体物质。当固体物质在水中体积分数大于 15% 的时候，流体的性质就会由牛顿流体转变为宾汉流体，高密度、强破坏力的泥石流随之产生。

二、冻融循环与干旱气候对岩土体的劣化作用

除降雨外，温度周期性变化、长期水分缺乏都会给公路岩土结构安全造成威胁。冻融循环主要影响季节性冻土区、高寒山区的公路稳定性，干旱气候改变土体物理性质，增大土体在雨季的水敏感性，形成典型的“先旱后雨”致灾模式。

（一）季节性冻土区路基冻胀与融沉机理

在冬季漫长而寒冷的季节性冻土区，公路路基冻胀和春季融沉病害十分普遍。冻胀的根本原因并不是土中原生水结冰体积膨胀（约 9%），而是由于负温梯度的作用，路基未冻结区的水分会不断向冻结锋面迁移、聚集，形成巨大的冰透镜体，造成路面不均匀隆起，这就是冻胀现象。水分迁移受土质、地下水位、冻结速率等多种因素影响，粉质土因有良好的毛细作用和透水性，为强冻胀性土。路基各部位（如路中和路肩、阴阳坡）温度场、水分补给条件不同，造成冻胀量分布不均，对路面结构产生很大的拉应力、剪应力，使路面开裂、变形。

春季气温回升的时候，路基自上而下开始融化。上层融化，下层仍处于冻结状态，形成封闭的饱水层，融化的水分不能下渗排出。使得土体含水量远远超过

饱和状态，强度急剧降低，几乎丧失了全部的承载能力。此时路基在车辆荷载的作用下就会产生严重的沉陷和翻浆现象，这就是融沉现象。融沉变形具有不均匀性，容易造成路面结构破坏，严重危及行车安全。冻胀和融沉的反复循环，使得路基结构年年变差，稳定性不断下降。

（二）温度变化导致岩体风化剥落的加速过程

温度剧烈变化，特别是日温差、季节温差大的时候是引起岩石物理风化的主要因素。公路沿线高陡边坡或者隧道洞口围岩的影响最明显。岩石是由多种不同的矿物组成的，不同矿物的热膨胀系数是不同的。温度反复升降的时候，矿物颗粒之间会因为不协调的膨胀和收缩而产生内应力，长期作用下，就会造成颗粒间的胶结破坏，使岩石结构松动。

热应力作用在岩体表面最明显。白天岩石表面受到太阳照射温度会迅速升高，膨胀；夜晚温度突然降低又会引起急剧的收缩。这样的反复的膨胀收缩，就如同材料的疲劳破坏一样，会促使岩石表面产生微裂隙。当含盐的水分渗入这些裂缝之后，就会大大加快破坏的进程。冬季冻融循环时，裂隙水结冰产生的巨大体积膨胀力可以将裂隙撑大，在干旱或者半干旱地区，水分蒸发后盐类结晶的生长压力也可以起到楔裂的作用。随着时间的推移，微裂隙会越来越大，直到贯通为止，这时岩体表面就会出现片状或者块状剥落，形成危岩落石，直接威胁到下方的公路。

（三）长期干旱气候引起土体开裂与渗透性增强

长期干旱气候对于土质边坡、路基的影响是隐蔽的、滞后的。在高温少雨的环境下，黏性土路基或者边坡会因为失水而发生体积收缩，在地表形成密集的干缩裂隙网。裂隙直接削弱土体的整体性、表层强度，更重要的是给后续降雨快速入渗提供通道。

干缩裂隙的深度和宽度由土的性质、干旱时间、强度等决定。雨季一到，降雨就会沿着裂隙网络快速下渗到土体深处，从而避开表层土的缓冲和调蓄作用。由此产生两个后果，一方面雨水很快地抵达潜在的软弱层面或者滑动带，使该处的孔隙水压力迅速增大；另一方面裂隙两侧土体在迅速吸水后，会出现不均匀湿化膨胀，产生额外的内应力，并且有可能会使裂隙闭合，并且包裹一部分气体，从而增大孔隙压力。先旱后雨的模式使得土体对降雨的反应非常迅速而剧烈，干旱期之后第一次或者几次强降雨就很容易造成失稳破坏，滑坡启动的临界雨量阈值也因此可能大幅降低。

第三章 公路地质安全检测技术基础

地质雷达是先进、高效、成像直观的无损检测技术，在公路工程安全领域的作用越来越大。本章主要论述地质雷达技术的基本理论，研究地质雷达技术在公路路基病害识别、数据采集、处理等各方面的应用，为公路地质安全检测提供有力的理论支持和技术指导。

第一节 地质雷达探测原理与应用

地质雷达又称为探地雷达，其基本工作原理就是用高频电磁波对地下介质进行扫描。主机利用发射天线发出高频宽频电磁脉冲，当电磁波到达不同介质的界面时（比如不同土层、空洞、管道等），会有一部分能量被反射，被接收天线接收到。对接收到的反射波走时、振幅、波形等进行分析，就可以得到地下目标的深度、形态、物性。这和声波回声定位的原理类似，只是介质和探测波不同。

一、地质雷达电磁波传播理论与介质响应

地质雷达探测效果，从根本上讲就是电磁波与地下介质相互作用的结果。电磁波在地下介质中的传播情况，即电磁波的传播速度、能量衰减以及不连续界面上的反射和散射等等现象，这些就是雷达图像解译所需要的物理基础。对这些物理过程有深入的理解，对准确判断地质异常体有重要的意义。

（一）电磁波在不同介质中的传播速度与衰减规律

电磁波在地下介质中传播速度主要是由介质的相对介电常数来决定的。对大多数岩土等非磁性、低损耗介质来说，传播速度近似等于真空光速除以介质相对介电常数的平方根。介质的相对介电常数越大，电磁波在介质中的传播速度就越小。电磁波在干燥砂土中传播速度快，在含水量大的黏土中传播速度慢，因为水的相对介电常数比岩土颗粒大得多。速度差就是雷达信号走时计算目标深度的物理基础。

电磁波传播时能量会慢慢衰减，这也是决定地质雷达探测深度的重要因素。能量衰减主要是由于两方面原因造成的：一是介质对电磁波能量的吸收，与介质的电导率有关，电导率越高，介质吸收作用越强，衰减就越快；二是电磁波能量随传播距离增加而产生的几何扩散。介质非均一性造成的散射也会引起能量损耗。

高频电磁波的衰减速度比低频电磁波快。因此，在地质雷达探测时要对探测深度和分辨率进行权衡。高频天线分辨率高，但是探测深度小；低频天线穿透能力强，可以探测深部目标，但是分辨率低。准确地知道地质条件下的电磁波传播、衰减规律，是选择合适的探测参数和正确解译雷达数据的前提。

（二）介质介电常数与电磁波反射系数的关系

当地质雷达发射的电磁波传到两种不同介电常数的介质界面上的时候，会发生反射和折射。反射回波的能量强度由该界面的反射系数决定，而反射系数的大小又与界面两侧介质相对介电常数的差别有关。两种介质的介电常数差别越大，反射系数就越大，界面在雷达图像上产生的反射信号就越强。

反射系数用菲涅耳公式来计算。对于垂直入射的电磁波，反射系数可以简化为界面两侧介质介电常数平方根之差和两者的比值。当电磁波从介电常数小的介质进入介电常数大的介质时（比如从干燥的路基进入含水区域），反射波的相位和入射波相同，在雷达图像上一般表现为白 - 黑 - 白或者正极性的强反射。相反，当高介电常数介质进入低介电常数介质（如从混凝土路面进入其下方的空洞）时，反射波的相位就会反相 180 度，即黑 - 白 - 黑或者负极性的强反射。

地质雷达识别地下异常体的主要原理就是以此为基础的。路基中的空洞内填充物一般是空气（相对介电常数约 1）或者水（相对介电常数约 81），与周围的密实土体（相对介电常数一般在 4 ~ 15 之间）存在明显的介电差异。差异会在雷达剖面上形成很强的反射界面，空洞就可以被有效地识别出来。不同的土层、污染土和原状土的交界、路面结构层之间的分层等，也可以通过分析反射系数来区分。

（三）电磁波在非均质地质体中的散射特征

当地下介质不是均匀层状的，而是有很多尺寸与雷达波长相当或更小的不规则、不连续体的时候，电磁波的传播就会变得复杂，散射现象会成为主导。散射是电磁波遇到非均匀体时能量向四周扩散的现象，和在平界面上发生的镜面反射不一样。公路路基中碎石、块石、不均匀填料、裂隙密集区等都是典型的散射体。

散射的强度和方向性是由非均质体的尺寸、形状、介电特性以及与周围介质的不同所决定的。当非均质体的尺寸远小于电磁波波长的時候，会发生瑞利散射，散射能量小，分布均匀。当非均质体的尺寸接近波长的時候，就会发生米氏散射，散射方向性较强。雷达图像中强烈的散射表现为无规则、不连续的“麻点状”或者“鱼群状”信号，同相轴连续性差，能量分布杂乱无章。

了解散射特性可以作为判定一些地质异常的依据。路基中的松散区或者级配不良的填石区，由于内部颗粒大小不一、孔隙较多，造成雷达图像波形杂乱、能量衰减较快。岩体中发育的断裂破碎带或者裂隙，由于岩石破碎、裂隙交错，也会产生较大的散射效应，在雷达剖面上的反射波形就会变得破碎、不连续。掌握散射现象有助于区分这些非层状的复杂地质异常，使其与层状结构或者孤立目标体区分开。

二、地质雷达在公路路基病害识别中的应用

公路路基是公路的基础结构，它的好坏直接影响到公路的使用寿命和行车安全。地质雷达由于无损、快速的探测特点，在路基空洞、松散、含水异常等常见病害的早期识别和评价方面起着不可替代的作用，给公路养护维修提供准确的决策依据。

（一）路基空洞与松散区的雷达波形识别

路基空洞、松散是两种对公路安全造成严重危害的病害。地质雷达通过对波形和图像特征进行分析，可以对这两种病害进行有效的识别。虽然两者在雷达图像上有很多相似之处，但是也有明显的不同，正确区分是正确解译的关键。

1. 路基空洞一般会形成边界清楚的强反射异常体。当空洞内填充空气时，顶界面由于介质由高介电常数的土体变为低介电常数的空气，会产生一次相位相反的强反射，在图像上表现为典型的黑、白、黑；底界面由于介质变化相反，会产生同相的强反射。在二维剖面图中，一个孤立的近似圆形空洞一般会出现典型的倒悬双曲线反射，双曲线的顶点对应空洞顶界面的中心。不规则或者大空洞的顶界面反射同相轴表现为连续、振幅大、形态清晰的特性。

2. 路基松散区的雷达图像特征就更复杂、模糊。空洞的边界是清晰的，但是松散异常区没有边界线，雷达反射强度较低。在水平剖面图中它是零星散乱的。纵剖面上松散区常出现同相轴横向不连续、波形杂乱的情况，局部可见许多微小

绕射双曲线叠加的现象。松散区内部的介质分布是不均匀的，有很多随机分布的孔隙和颗粒，造成电磁波强烈地散射、不规则地反射。信号能量穿过松散区后会很快衰减，使它下面的地层反射信号变得模糊不清。

（二）路基含水异常区的雷达图像特征分析

水分是影响路基稳定性的主要因素，过多的水分会大大降低土体的强度和承载力。地质雷达对于水体比较敏感，所以可以用来探测路基含水异常区。水的相对介电常数约为 81，比干燥的岩土介质大很多（一般小于 10），这样的巨大的介电差异，就是雷达探测含水区的基础。

当路基层部区域含水量增大的时候，该区域整体的介电常数会显著增大，进而产生两个主要变化：电磁波在该区域的传播速度急剧下降。雷达时间剖面上，含水区下面的所有反射界面比正常区域出现明显的下拉或者下垂，这就是速度陷阱效应。同相轴整体延迟是判断富水区最直观、最可靠的指标。

富水区电导率增大，对电磁波能量的吸收和衰减也加大。雷达图像上表现为：穿过富水层后，下层地层反射信号振幅明显减小或者消失，图像变暗，高频成分优先被吸收。富水区顶界面由于介电常数突然增大，会产生一个较强的同相反射。综合这些特征——强界面反射、同相轴下拉、下部信号快速衰减，就可以有效地圈定出路基中含水异常的范围和大致位置。

（三）路面结构层厚度与脱空检测方法

地质雷达也被广泛应用于评价路面结构层的健康状况，主要测量各个结构层的厚度，检测面层底部脱空病害。对于新建道路质量验收以及在役道路结构评价来说都非常重要。

路面结构层厚度的测量原理比较直接。公路路面由沥青混凝土面层、水稳基层、底基层等不同材料铺设而成，由于各层材料的介电常数不同，在层与层之间就会产生反射界面。雷达剖面图上这些界面是连续的、平行的强反射同相轴。通过拾取两个反射界面之间双程走时（时间差），再根据该层材料的电磁波传播速度，就可以准确得到该结构层的厚度。电磁波速度可以通过查阅材料典型值、现场取芯标定或者采用宽角法等方法准确测量。

路面底部的脱空就是面层和基层之间由于各种原因而产生的分离间隙。该病害在雷达图像上会有不同的反射特征。由于脱空区一般被空气所填充，其介电常数非常小，在混凝土或者沥青面层（高介电常数）与脱空层（低介电常数）的交

界面处会产生一次极性相反的强反射。同时由于脱空层内部电磁波能量衰减很小，在脱空层顶、底界面之间会多次来回反射，产生一系列等时距、振幅逐渐减弱的“多次谐振波”或者“振荡波组”，这是判断脱空存在的典型标志。重复的反射信号在正常压实区域不会出现，所以识别度很高。

三、地质雷达数据采集参数与干扰压制技术

地质雷达数据质量的好坏直接影响到后期解译的准确性、可靠性。为了得到真实反映地下地质情况的高信噪比数据，在数据采集阶段要科学合理地设置各项参数，掌握有效的干扰压制技术。这是一个需要在探测目标、地质条件、设备性能三者之间综合考虑的系统工程。

（一）天线中心频率选择与分辨率控制

天线的中心频率是地质雷达系统中一个非常重要的参数，它直接决定探测的分辨率和穿透深度，二者之间存在此消彼长的关系。分辨率是雷达系统区分两个相邻近目标的最小能力，分为垂直分辨率和水平分辨率。垂直分辨率是由电磁波脉冲宽度决定的，脉冲宽度又和天线中心频率成反比。频率越高，脉冲越窄，可以分辨的层状介质厚度越薄，垂直分辨率越高。

水平分辨率就是雷达在水平方向上区分两个并排目标的能力，它主要受天线波束角、目标深度的影响，也与频率有关。高频天线波束窄，水平分辨力好。因此，在浅层、精细探测的任务中，例如检测路面结构层厚度、查找混凝土中的钢筋、探测浅埋小尺寸的管线，应该选择高中心频率的天线（900MHz、1.5GHz等）来获得清晰的图像。

地质雷达天线频率与探测特性对照表

频率范围	典型应用场景	垂直分辨率
1500-2500	混凝土内部钢筋、薄层沥青、浅层管线	极高 (mm 级)
900-1500	路面结构层厚度、浅层空洞、路基缺陷	较高 (cm 级)
400-900	路基病害、中浅层管线、地下障碍物	中等
200-400	较深路基病害、基岩面、大口径管线	较低
50-200	深部地质构造、地下水位、大型空洞	低 (20-50 cm 以上)

高频电磁波在介质中传播时能量衰减快，穿透深度很小。当地质雷达探测要针对较深的地质目标，比如深部路基空洞、基岩界面或者断裂带的时候，就不得

不牺牲一些分辨率，选择中心频率较低的天线（100MHz、250MHz等）。低频天线发射的电磁波波长较长，能量衰减慢，穿透能力强，可以探测几十米深的地下结构。因此根据预估目标埋深、尺寸选择合适的天线频率十分重要，有时甚至要采用不同的天线频率组合探测，以满足深度、分辨率要求，如下表所示。

（二）时窗设置与采样率优化原则

时窗就是雷达系统记录反射信号的时间长度，时窗影响探测可以到达的最大深度。时窗设置过短，会造成深部目标的反射信号不能被完整记录；时窗设置过长，就会记录大量的无用的深部噪声，既增大了数据存储量，又会影响到图像显示效果。合理的时窗设置要以预估探测目标最大埋深、介质平均波速为基础，长度略大于目标最大埋深处反射信号的双程走时（即2倍最大深度除以平均波速），并留有一定余量。

采样率就是单位时间内的数据点数目，它决定雷达波形被数字化的细节。按照奈奎斯特定理，采样频率至少要大于信号最高有效频率的两倍，才能不失真的还原原始波形。地质雷达的采样间隔要足够小，才能保证高频信号被完全采集。采样率太低会造成波形失真，失去高频信息，降低分辨率；采样率过高会增大数据量，加重数据处理和存储的负担。

优化的原则是在满足奈奎斯特定理的基础上，根据所用天线的中心频率来选择采样率。一般情况下，一个波长内应该有10到20个采样点来保证波形的保真度。现代地质雷达设备一般会主动给与所选天线频率相匹配的采样率，但是操作人员还需要根据实际信号频谱的特点进行适当的调节，以获得最佳的数据采集效果。

（三）环境噪声干扰的滤波与去除技术

地质雷达在野外作业时不可避免地会受到各种电磁干扰，即噪声。噪声会混在有效反射信号里，降低数据的信噪比，严重的时候甚至会把微弱的目标信号淹没，给图像解译造成很大的困难。因此掌握有效的噪声压制技术对于数据处理来说是十分重要的。

1. 外部环境噪声，常见的有附近电力线、通信基站、广播电视信号、未屏蔽的发动机火花等。这些外部电磁源所造成的干扰一般会形成水平的、贯穿整个剖面的连续条纹。对这种固定频率特征的噪声最常用的方法是频域滤波。对数据进行傅里叶变换，在频谱图上找到噪声对应的异常频率尖峰，设计带阻或者陷波滤波器将其滤除，再反变换回时域，即可去除水平条纹干扰。

2. 系统固有的噪声,除了外部环境干扰之外,雷达系统本身也存在天线之间直达波、沿地面滑行的空气波等固有噪声。表现为剖面顶部的强能量带,常常会掩盖浅层有效的反射。因此可以采用背景去除法,即计算所有道数据的平均波形,再从每一条道的数据中减去这个平均道,从而减少水平方向相关性强的直达波和空气波。在复杂背景下的随机噪声、相关噪声处理中,F-K 滤波、小波变换去噪、经验模态分解等高级的信号处理技术也被使用,目的是在去噪和保留有效信号细节之间取得更好的平衡。

四、典型地质异常体的雷达波形特征分析

地质雷达图像解译的关键就是识别各种地质体或者异常体的波形特征。这些特征是由目标体的物理性质、几何形态以及埋藏环境等各方面因素共同作用的结果。熟悉地下管线、基岩界面、断裂破碎带等典型地质异常的雷达图像模式,是做正确地质解译的前提。

(一) 地下管线与金属结构的强反射特征

公路沿线埋设有各种材质、用途的地下管线,有金属给排水管道、燃气管、通信电缆,也有非金属的 PVC 管道、混凝土管道。这些管线在雷达剖面图上一般会形成非常典型的双曲线反射形态。双曲线是点状或柱状绕射体在雷达共偏移距扫描方式下的标准响应,它的形态形成原因就是天线在地面移动过程中,与地下固定点状目标的距离先变小后变大,反射波走时相应地发生改变。双曲线顶点对应的是管线的最小埋深,宽窄和管线的埋深、介质波速有关,埋深越浅、波速越慢,双曲线开口越大。

金属管线因为导电性极好,几乎是电磁波的全反射体,所以会产生振幅非常大、极性相反的反射信号,双曲线形态清晰、能量集中。有时金属管线下方会出现多次反射产生的“振铃”效应或者虚假镜像。非金属管线虽然也呈双曲线形态,但是其反射信号强度一般比金属管线弱,电磁波可以部分穿透管体,在管底形成另一条相位相同的双曲线,构成一对双曲线特征。因为地质雷达具有这样的强反射、双曲线等特点,所以它成为定位和识别地下管线的有效手段。

(二) 基岩界面的连续强反射信号特征

确定覆盖层的厚度、基岩面的起伏形态,对公路设计及边坡稳定性评价有着非常重要的作用。当地质条件适宜的时候,地质雷达能很好地跟踪到基岩界面。

基岩及其上覆的松散沉积物（土层、风化层等）在密度、含水量、岩性等各方面都存在较大的差异，因此基岩与松散沉积物之间形成了一个明显的介电特性分界面。

基岩界面在雷达剖面图上一般为连续的、稳定的、振幅大的反射同相轴。反射同相轴的形态可以反映基岩顶面的起伏情况，基岩面比较平坦时，反射同相轴呈水平或缓倾斜状；基岩面有沟谷或凸起时，反射同相轴相应地出现下凹或上拱。反射波能量强度与上覆土层和基岩的介电常数有关，介电常数差别越大，反射就越强。在信号可以穿透的深度范围内，连续的强反射界面就是判断基岩顶面的主要依据。追踪该同相轴的走时，结合覆盖层的波速信息，可以得到测线上的覆盖层厚度变化。

（三）含水断裂破碎带的波形杂乱与衰减特征

断裂破碎带是公路工程中需要重点关注的不良地质构造，其自身力学强度低，常常作为地下水活动的通道，对岩土体的稳定性造成很大的影响。地质雷达对这类构造有较好的识别能力。由于断裂带内岩石破碎、裂隙发育、结构紊乱，常被泥质或者水充填，所以物理性质与两侧完整围岩存在较大差别。

雷达图像上断裂破碎带最明显的特征就是反射波形杂乱无章，电磁波能量很快衰减。由于带内存在大量的随机分布的裂隙和破碎岩块，电磁波在其中传播时会发生强烈的散射和不规则反射，造成图像上出现密集的、不连续的、杂乱的反射信号，正常的层状反射同相轴在这里会错断、扭曲或者消失。如果破碎带中含有较多的水分，由于其较高的电导率造成电磁波能量急剧吸收，使穿过该异常带后下方信号迅速减弱，剖面图像变暗，形成能量吸收带或屏蔽区。波形杂乱、同相轴中断、能量快速衰减的组合特征，可以用来判断含水断裂破碎带。

第二节 地震波勘探技术

地震波勘探技术属于现代公路地质安全检测的关键手段，依靠人工激发的地震波在地下介质中传播的规律，从而了解地质结构。该技术可以无损、高效地分析地震波的运动学和动力学特性，获取公路沿线地下一定深度范围内的地质信息，为路基稳定性评价、不良地质体探测、工程地质灾害预警提供重要的地球物理依据。

一、弹性波理论在岩土工程检测中的基础

弹性波理论是地震勘探的物理基础，主要研究波在岩土这种弹性介质中传播的规律。岩土体受到短暂外力作用时会产生变形，以波动的形式向外传递能量，这些波动就是弹性波。只有对弹性波的基本原理有充分的认识，才能正确地采集、处理、解释地震数据，从而准确地评价岩土工程性质，使它具有实际意义。

（一）纵波、横波与面波在岩土体中的传播差异

地震波分为体波和面波，它们在岩土体中的传播特性不同，正是这些差异才使地震勘探方法能够区分不同的地质目标。体波在介质内部传播，又分为纵波和横波。纵波质点的振动方向与波的传播方向一致，引起介质交替的压缩和拉伸，传播速度最快，可以在固体、液体、气体中穿行。横波的质点振动方向与波的传播方向垂直，使介质产生剪切变形，只能在有剪切弹性的固体中传播，速度一般比纵波慢。在均质岩土体中纵波速度大约为横波速度的 1.7 倍。

面波是体波传播到地表或者岩土层界面时产生的，能量集中在近地表，沿地表传播，振幅大，传播速度比体波慢。常见的面波有瑞利波和勒夫波。瑞利波使介质质点在垂直平面上做逆时针的椭圆运动；勒夫波使介质质点在水平面上做剪切振动。由于面波的传播深度与波长有关，不同频率（波长）的面波对不同深度的介质有不同的敏感性，频散特性就是面波勘探技术的核心原理，被广泛地应用到浅层地质结构调查中。

在公路工程检测中，纵波由于传播速度快、衰减小，一般用来探测深层构造、确定基岩面。横波对岩土体的剪切强度、密实度比较敏感，速度可以用来评价路基压实度和地基承载力。面波由于频散特性，在无损检测路基压实均匀性、划分浅部土层等方面有明显的优势。综合分析这三类波的特性，可以给公路地质安全提供更全面的信息。

（二）波的反射与折射定律在浅层勘探中的应用

地震波在传播过程中遇到不同的岩土介质分界面的时候会发生反射、折射现象，其路径遵循斯涅尔定律。这两个基本物理规律就是反射波法、折射波法这两种主要浅层勘探方法的核心理论依据。当地震波从一种介质进入另一种波阻抗（密度和波速的乘积）不同的介质界面上时，一部分能量会被反射回去，另一部分能量会被折射到第二种介质中。

反射定律指出反射角等于入射角，反射波、入射波、界面法线共面。反射波法就是利用这一原理，在地面布置一系列检波器来接收地下界面的反射信号。根据反射波到达各个检波器的时间（即旅行时）可以反演出反射界面的深度、形态、产状，从而准确地反映地下层状结构、构造起伏、断层等地质现象。该方法对地质剖面有较高的分辨率，能很好地发现隐伏构造。

折射定律说明波通过界面的时候会发生方向的变化。当波由低速层到高速层传播，并且入射角达到临界角的时候，折射波会在界面上滑行，不断地向地表辐射能量，形成首波或者滑行波。折射波法就是利用最先到达检波器的折射首波进行探测。通过分析首波时距曲线（旅行时与炮检距的关系图），可以求出地层速度和界面深度。此方法适合探测覆盖层厚度，确定风化层和基岩界面，在公路勘察中常被用作快速查明坚硬基岩埋深的首选。

（三）岩土体弹性参数与波速的理论关系

岩土体的杨氏模量、剪切模量、泊松比等弹性参数，是反映岩土体力学性质的重要指标，对地基承载能力、稳定性起着举足轻重的作用。地震波在岩土体中的传播速度与弹性参数存在一一对应的关系，所以我们可以用波速来无损、原位地评估岩土体的力学参数。把地震勘探从单纯进行地球物理测量的活动，扩展为可以直接评价岩土工程参数的工作。

理论上对于均匀各向同性的弹性介质，纵波速度 V_p 、横波速度 V_s 都可以用介质的弹性模量、密度（ ρ ）来表示。纵波速度 V_p 与介质的压缩性、剪切性质有关，关系式为 $V_p = \sqrt{((K+4/3G)/\rho)}$ ，其中 K 是体积模量， G 是剪切模量。即纵波传播既有体积的变化，又有剪切变形。

横波速度 V_s 只和介质的剪切模量、密度有关，表达式为 $V_s = \sqrt{(G/\rho)}$ 。因为横波是剪切变形的传播，所以它对介质的抗剪切能力非常敏感。岩土工程中剪切模量是反映土体刚度和变形特性的重要参数，横波速度就成为衡量土体刚度和变形特性的指标。通过现场测定横波速度和岩土密度，可以直接求出剪切模量。

杨氏模量 E 、泊松比 ν 在工程实践中应用较多，也可以通过纵波、横波速度换算得出。泊松比可通过 V_p 和 V_s 的比值得出，公式为 $\nu = ((V_p/V_s)^2 - 2) / (2(V_p/V_s)^2 - 1)$ 。求出泊松比和横波速度之后，杨氏模量就由下式求出， $E = 2G(1 + \nu) = 2\rho V_s^2(1 + \nu)$ 。因此，现场测量的波速数据可以快速、大范围地用来

评价公路沿线地基土的弹性力学性质，给设计和施工提供定量依据。

二、折射波法与反射波法在公路勘察中的应用

折射波法、反射波法属于地震勘探的经典方法，也是公路勘察不可缺少的方法。利用不同的地震波传播途径和信息，在宏观地质结构调查和精细构造探测方面各有优势，给公路选线、桥梁与隧道设计、不良地质体排查等提供可靠的地下地质模型。

（一）折射波法在基岩埋深探测中的应用

折射波法是确定公路沿线基岩埋深和覆盖层厚度的经典而有效的方法。该方法利用低速覆盖层和高速基岩界面处发生的临界折射，用最先到达地表检波器的折射波（首波）走时来反演地下结构。准确掌握基岩面起伏形态，对公路建设中路基设计、桥梁桩基选型、隧道洞口位置的确定都起着非常重要的作用。

折射波勘探的应用流程通常包括以下几个步骤：

1. 数据采集：在测线上布置一系列检波器，用锤击、爆炸等方法在测线的一端或者两端激发地震波。对每个检波器接收到的全部地震波形进行记录。

2. 时距曲线绘制：从地震记录中选出每个道集的初至波到达时间，绘制初至波旅行时（ t ）随炮检距（ x ）变化的曲线，即时距曲线。该曲线一般是由直达波和各个界面的反射波组成的，各波段斜率可以反映出各层的视速度。

3. 解释与计算，通过对时距曲线转折点及各段斜率的分析，求出覆盖层厚度、速度、基岩速度、界面深度。常用的方法有截距时间法、临界点法、差时法等，对于不同的界面形态，根据实际情况选择适合的方法。对于起伏较大的基岩面，广义互换法或者层析成像技术可以得到更准确的结果。

在丘陵或者山区进行公路设计时，沿路线布设折射波剖面，可以连续追踪基岩深度的变化，准确圈定基岩裸露区、浅埋区和深埋区，为路堑开挖方量估算、高填方路段地基处理方案提供依据。折射波勘探还可以快速查明桥墩下基岩的深度，判断是采用扩大基础还是桩基础，并且可以预估桩长。由于折射波法操作简单、成本低，且对深部高速体响应清楚，因此常被用作公路前期勘察阶段进行区域地质普查的快速方法之一。

（二）浅层反射波法在断层探测中的分辨率分析

浅层地震反射波法是探测公路沿线隐伏断层、破碎带等精细地质构造的有效

方法,其探测能力的好坏直接取决于分辨率。分辨率分垂直分辨率和水平分辨率。垂直分辨率指的是在垂直方向上能够区分两个相邻地质体的最小厚度,它受信噪比和地震子波主频的影响。理论上最小可分辨厚度大约是子波波长的四分之一。为了提高垂直分辨率,数据采集时要使用高频震源、高频检波器,数据处理时要采用反褶积等方法来拓宽频带。

水平分辨率即水平方向上能分辨两个地质体的最小距离,受到菲涅耳带半径和偏移成像技术的影响。菲涅耳带就是地震波在一个界面上反射能量的主要贡献范围,它的大小与界面的深度以及波长成正比。在未经过偏移处理的剖面上,任何小于菲涅耳带的地质体都无法分辨出来。因此精确的偏移成像对于提高水平分辨率来说是至关重要的。把反射波的能量归位到它真实的地下空间位置上,偏移处理可以使绕射波收敛,断点清晰,从而正确地反映断层的产状、规模。

公路工程中几十米以浅的断层探测十分重要,因为它们会对路基的稳定性和隧道的安全造成影响。因此必须采用高分辨率的采集参数,即小道距、小炮检距、多次覆盖等来获得高信噪比、高频、高空间采样率的原始数据。数据处理的时候,精细的速度分析、准确的静校正、先进的叠前时间偏移或者叠前深度偏移技术,都是保证最终剖面质量的重要因素。对高分辨率反射地震剖面做细致解释,可以识别反射同相轴的错断、弯曲、消失或绕射波出现等断层标志,进而确定断层位置、延伸范围和破碎带宽度,为公路设计规避风险或者采取相应的加固措施提供直接依据。

(三) 地震波勘探在桥址地质剖面绘制中的应用

桥梁是公路交通网络的重要节点,基础是否稳定安全,全在桥址地质情况是否准确。地震波勘探,尤其是反射波法和跨孔地震 CT 技术,给绘制精细的桥址地质剖面提供无损、高效的手段,可以清楚地表现出桥墩、桥台基础之下地层的空间分布、岩性变化和构造情况。

浅层地震反射法在桥址勘察中的应用,主要是沿河流两岸或水域布设测线,采集反射波数据并进行处理,获得沿测线方向的二维地质剖面。该剖面可以清楚地反映出河床覆盖层厚度的变化、基岩面的起伏情况、软弱夹层的分布情况、有无断裂、岩溶等不良地质现象。高分辨率地震剖面可以给每一个桥墩下面的地层结构提供详细的信息,让工程师能够优化桩基深度、桩基类型,不把桩基设在软弱土层或破碎带之上,保证基础承载力、稳定性。

对勘察要求较高或者在复杂的地质条件下,尤其是桩基之间地质情况的探查

上,跨孔地震 CT 技术有着明显的优势。该技术把震源和检波器分别放置在两个或多个钻孔里,测量穿过孔间岩土体的直达波旅行时,用层析成像算法反演出孔间介质的波速分布图像。波速高低能反映岩土体的软硬情况及完整状况。桥址勘察时,在拟建桥墩两侧钻孔处开展跨孔 CT 探测,可以得到一幅高分辨率的地质透视图,准确圈定孔间存在的溶洞、软弱夹层或者岩体破碎带,精度远超仅依靠钻孔点状信息做推断的结果,给评估桩基施工风险、桩周岩土体质量提供了宝贵的定量支持。

三、面波勘探技术在路基压实度评价中的应用

面波勘探技术,特别是多道分析瞬态瑞利面波法,属于一种先进的无损检测方法,具备广阔的应用前景,在公路工程质量控制当中有着诸多的应用。它利用面波的频散特性反演出地下剪切波速度的结构,进而快速、准确地评价路基压实度,给公路长期使用性能提供技术保障。

(一) 瞬态瑞利面波法的数据采集方法

瞬态瑞利面波法的数据采集是获得高质量频散曲线的关键步骤。主要使用多道地震仪,检波器呈线性排列,对一次瞬态冲击产生的宽频带瑞利波信号进行记录。现场数据采集一般都会有一个过程,以保证所采集到的数据是可靠的、可重复的。采集工作一般由一个激发点和 12 或 24 个等间距排列的低频检波器组成,检波器与地面必须保证良好的耦合。

激发源属于数据采集的一部分。根据探测深度和所要的频带来选择锤击源,可以是手锤或者电动大锤。重锤激发能产生更多的低频能量,有利于探测深部路基结构;轻锤富含高频成分,对评价表层压实状况更有利。激发点一般设在检波器阵列的一端或者两端,有时也会在阵列中间激发,以增强信号。

地震仪记录下每一个检波器接收到的随时间变化的地层振动信号,得到一个共炮点记录。为了提高信噪比,一般会对同一点进行多次激发,并做垂直叠加。关键参数的采集要依照勘探目标深度以及分辨率的要求来优化设计,采样率、记录长度、检波器间距、炮检距等均属此类。较小的检波器间距有利于接收高频(短波长)面波,提高浅层结构分辨率;较长的排列长度有利于接收低频(长波长)面波,得到更大的探测深度。

完成一个测点的采集之后,将整个检波器阵列和激发点沿着测线向前滚动一

个固定的距离，进行下一次测量。滚动采集的方式可以对路基压实情况进行连续、快速的剖面检测。整个数据采集过程高效、无损，对交通和环境影响小，适合于已建公路质量复检和在建公路实时质量监控。

（二）面波频散曲线的反演与剪切波速提取

面波频散曲线的反演是面波勘探技术的关键步骤，其目的就是将现场采集到的面波信号从时空域转换到频率速度域，最后反演出地下介质剪切波速 V_s 随深度变化的剖面。整个过程主要是由生成频散曲线和非线性反演两个部分组成。通过对多道地震记录做二维傅里叶变换或者类似的数学变换，就可以将原始波场数据转换成能量谱图，横轴为频率，纵轴为相速度。

能量谱图上不同的频率面波能量集中在不同的相速度值附近，形成一条能量集中的轨迹，这条轨迹就是实验频散曲线。直观地体现了不同频率（或波长）的瑞利波是以怎样的速度传播的。在正常的层状介质中，低频面波的穿透深度大，反映的是深部介质的性质，高频面波的穿透深度小，反映的是浅层介质的性质。提取这条能量轨迹，就得到反演用的频散数据。

接下来就是反演过程，反演的本质是迭代优化的过程，其目的就是找到一个一维或者二维的剪切波速度模型，使得该模型计算出的理论频散曲线与现场实测的频散曲线最接近。该过程一般用初始 V_s 深度模型作为起点，利用正演计算方法求出该模型的理论频散曲线，再将实测曲线与之比较，计算两者之间的误差。根据误差大小，用非线性最小二乘法或者遗传算法等优化算法不断调节 V_s 模型，重复正演计算和误差比较，直到误差收敛到允许的范围内为止。得到的 V_s 模型就是地下介质剪切波速随深度的最佳估计。剪切波速剖面是评价路基压实质量最直接的物理依据，其与压实度的关系见下表。

剪切波速与压实度对应关系示例表

路基材料类型	压实度 (%)	典型剪切波速 V_s (m/s)
砂土 (中密)	90	180-250
砂土 (密实)	96	250-350
粘土 (中硬)	90	120-200
粘土 (硬塑)	96	200-300
碎石土 (密实)	90	300-450
碎石土 (很密实)	96	450-600

注：以上数据为典型参考值，具体应根据室内标定试验结果确定。

（三）基于剪切波速的路基压实度评价指标

把面波勘探得到的剪切波速用在路基压实度评价上，就是这项技术在公路工程质量控制中最终的应用。压实度是路基施工质量的重要控制指标，传统的灌砂法等点式、破坏性检测方法效率低，代表性差。用剪切波速为基础的评价方法，提供了一种快速、连续、无损的替代方案，其理论依据是岩土体的剪切波速与岩土体的密实度（即压实度）存在正相关关系。

建立剪切波速与压实度之间的关系是应用该方法的关键。这通常通过以下步骤实现：

1. 室内标定试验，对某种路基填料在实验室中制作不同压实度（90%、93%、96%等）的试件。在含水量等条件一致的情况下，用专门的试验设备（共振柱仪或者压电陶瓷传感器）测量每个试件的剪切波速。

2.2) 建立经验关系式，对不同压实度下的剪切波速进行统计回归分析，得到该填料的“ V_s -压实度”经验关系曲线或公式。该关系式把地球物理参数和工程指标（压实度）联系起来。

3. 在公路现场，用面波勘探得到路基不同深度的剪切波速剖面。将现场测得的 V_s 值代入事先建立好的经验关系式中，即可得到该位置、该深度处的压实度值。不仅可以得到单点的压实度，还可以得到沿测线方向连续的二维压实度剖面图，直观地反映路基内部压实度的均匀性及薄弱处。

利用此法可以迅速发现压实不足的地方，比如填挖结合部、台背回填区等重要部位，给施工过程中的质量控制及返工决策提供及时准确的指导。剪切波速是反映路基刚度、承载能力的参数，其数值可以较好地反映路基长期变形情况及动态稳定情况。

四、地震波信号数据处理与成像解释技术

地震波信号数据处理和成像，就是把野外采集到的原始地震记录，转化为可以清楚显示地下地质构造图像的重要步骤。经过一系列的数学运算和物理运算，压制干扰、加强有效信号、准确地定位信号，最后得到高质量的地震剖面。在此基础上，地质解释依靠地质背景知识，对剖面上各种地球物理异常加以分析，给它们赋予具体的工程地质含义。

（一）地震记录资料的预处理与静校正

地震记录资料的预处理是整个数据处理流程的开端，它的主要目的就是对外采集到的原始数据进行格式转换、道编辑以及初步的噪声压制，为之后的处理步骤做好干净、格式统一的数据准备。主要工作是将野外数据由仪器特定格式转换成标准的处理格式，删除无效或者质量极差的地震道（坏道），用初步滤波技术去除高频随机噪声或者特定频率的工业电干扰。

静校正作为预处理之后极其重要的一步，它的主要目的就是消除地表高程变化、近地表低速风化层厚度以及速度不均匀性所引起的地震波旅行时异常。这些因素会造成水平地下反射层在原始记录上出现同相轴扭曲，严重影响之后的速度分析以及叠加成像。静校正的核心就是计算一个时间校正量，使所有的激发点和接收点都校正到同一个水平基准面上，使所有的测量都像在同一水平面上进行。

静校正量计算方法多样，常用的有基于微测井或小折射调查的高程校正和风化层校正，这些方法直接有效但是成本高。一般采用利用初至波信息计算的层析静校正方法。层析静校正通过大量的初至波走时数据进行反演，得到一个精细的近地表速度模型，再根据该模型计算出准确的静校正量。静校正后近地表因素引起的同相轴畸变被校正，为动校正和叠加打下了坚实的基础，也是获得可靠的构造形态的前提。

（二）地震波速度分析与动校正叠加技术

速度分析与动校正叠加，在地震数据处理过程中起着提高信噪比的作用。基础为共中心点多次覆盖观测技术，即对地下同一点进行多次、不同的炮检距观测。因为炮检距不同，来自同一反射点的反射波到达地表的时间也不同，在 CMP 道集上形成双曲线形的同相轴。动校正（Normal Moveout, NMO）目的就是消除由炮检距造成的时差，把双曲线拉成一条直线。

动校正的好坏取决于准确的速度信息。速度分析就是从 CMP 道集中提取出做动校正的最佳速度（一般称为叠加速度）的过程。常用的方法有速度谱法，该方法采用一系列试验速度对 CMP 道集做动校正，然后计算校正后的各道在不同的时间窗口内相干能量，最后得到一张速度谱图。速度谱中能量最集中的亮点所对应的速度就是该时刻的最佳叠加速度。拾取一系列这样的速度点，就构成了该位置的速度函数。

得到准确的速度函数后，就可以对 CMP 道集进行动校正了。校正后道集上

一次反射同相轴被拉平，而多次波、随机噪声等干扰波由于它们的时距关系和一次波不同，不能完全被拉平。此时，将道集中所有的道相加（叠加），有效的有效一次反射信号因为同相叠加而得到显著增强，未被拉平的干扰信号则因相位各异在叠加过程中被相对压制。动校正叠加之后，多个 CMP 道集的数据就被压缩成一条，得到信噪比高、构造形态清晰的水平叠加时间剖面，为后面的偏移成像和地质解释打下基础。

（三）地震剖面的偏移成像与地质解释

地震偏移成像作为地震数据处理的最后一步，其基本目的就是将叠加剖面上的地质构造图像修正成真实的地下形态。在地层倾斜或者构造复杂的地区，水平叠加剖面上的反射界面会出现位置偏移、形态畸变的现象，断点、尖灭点等不连续处还会产生绕射波，使构造细节变得模糊不清。偏移的作用就是将倾斜的反射体归位到真实的空间位置，把绕射波能量集中回绕射点，从而大大提高剖面的空间分辨率和成像精度。

偏移算法有多种，主要有积分法偏移（克希霍夫偏移）、有限差分法偏移、频率 - 波数域偏移。根据处理流程的不同，又可以分为叠后偏移、叠前偏移。叠后偏移处理已经叠加好的剖面，计算效率高，但是成像效果受复杂构造的限制。叠前偏移直接对 CMP 道集进行偏移处理，可以较好地适应速度的横向变化，是目前复杂构造区成像的主要技术。根据所用速度模型的不同，偏移又可以分为时间偏移和深度偏移；深度偏移使用更精确的深度域速度模型，可以处理横向速度变化剧烈的复杂情况，从而得到更准确的构造图像。

地震地质解释是物探工作最后一步，也是实现地质目标的最终环节。解释人员按照高质量偏移剖面上的地震波组特征（振幅、频率、连续性等）以及地质规律来识别和追踪主要的反射层位，标定断层、褶皱、不整合面等地质构造。对整个测网剖面进行综合解释可以得到目标层位的构造图、厚度图以及地质剖面图。根据钻孔资料和区域地质背景，对公路沿线地层结构、岩性变化、构造发育情况做出综合评价，为地质灾害风险评价和工程设计提供决定性的依据。

第三节 遥感与 GIS 技术集成

遥感同地理信息系统相融合已经成为公路地质安全研究的新技术。把宏观区域普查同关键点位精细化监测加起来进行跨尺度分析,能明显加快地质灾害识别、监测以及预警的速度与准确率。

一、高分辨率遥感影像地质解译技术

高分辨率遥感影像因为具有丰富的地表细节信息,已经成为公路沿线地质环境判读、灾害隐患早期识别的主要数据源。利用专业的影像解译技术可以得到地质构造、岩性分布、不良地质现象等关键信息,并且能快速、直观地得出结果。

(一) 光学遥感影像的纹理特征与色调分析

光学遥感影像的纹理、色调,是地质解译最直接的视觉要素。纹理特征体现地表物质的粗糙程度、排列方式和均质性。结构完整、纹理粗糙不均的基岩,松散的第四纪沉积物多呈细腻均匀的纹理。不同岩性在影像上出现的色调差别,是由其矿物组成、含水量以及风化程度的差异所造成的。一般坚硬的火成岩、变质岩色调偏深,沉积岩中的砂岩、灰岩多为浅色调。水体存在会明显降低地物的反射率,形成深色。植被覆盖情况对影像色调也有着重要的影响,健康茂密的植被在假彩色合成影像上呈鲜红色,在真彩色影像上呈绿色,植被的分布规律可以间接反映下伏岩土体的性质和稳定性。

根据公路沿线影像的纹理、色调分区,大致确定各个岩土体单元的分布范围。影像中条带状分布、色调、纹理均出现突变,一般代表岩性接触带或者断裂构造所在。根据区域地质资料对视觉特征进行综合分析,就可以依靠这些特征组合起来的规律迅速地判断出潜在的软弱岩层、破碎带等与某种岩性有关的不良地质现象。为之后重点勘察、稳定性评价提供方向,并提高地质调查的针对性和效率。

(二) 基于高分辨率影像的线性构造解译方法

线性构造是由地质作用形成、呈直线或缓弧形展布的线状地质形迹,例如断层、节理密集带、岩脉、部分地层界线等。这些构造控制着区域地质格架,又是斜坡失稳、岩体崩塌等地质灾害的重要内在因素。高分辨率遥感影像上线性构造常常会表现出一些独特的影像特征,给地质解译提供重要的线索。沟谷、水系等线状地形、山脊、陡坎的突然错断或转向、植被、土壤色调沿直线方向的变化、

湖泊、沼泽呈串珠状排列等都属于该类特征。

解译过程一般先通过目视判读或者计算机辅助方法，在影像上识别并勾画出具有线性延伸特征的影像标志，从而得到线性构造解译图。单一的线性影像特征可能是由于多种原因造成的，不能轻易下结论，需要经过综合分析加以证实。一条笔直的河谷既可以是断裂构造，也可以是顺岩层走向侵蚀的产物。判断它的性质必须结合区域地质图、地形地貌特点和线性构造之间相互切割的关系进行综合分析。对疑似断裂构造区还要注意其两侧地层错动、伴生破碎带等地质现象的影像反映。

对公路穿越区域的线性构造进行详细的分析，可查明活动断裂带的位置和分布，找到公路工程稳定性受威胁的节理密集区。这给评价区域构造稳定性打下了基础。此方法特别适合于交通不便、人类活动稀少的山区，可以以较低的成本、较快的速度完成大面积构造格架的调查，为公路选线、地质灾害风险评价提供重要的科学依据，是现代公路勘察设计阶段不可缺少的技术环节。

（三）大型滑坡体边界与形态特征的遥感识别

大型滑坡属于影响公路安全的重大地质灾害，它在遥感影像中常常会留下特有的形态印记和影像特征，因此可以实现远距离识别。成功识别的关键就在于正确把握滑坡在二维影像上所投影的规律。近期发生的滑坡由于地表扰动剧烈、植被破坏严重，其影像特征一般比较明显：滑坡后壁常呈圈椅状或马蹄形陡坎，形态清楚，色调上因为新鲜岩土裸露而与周围环境形成明显对比。滑坡体本身呈紊乱破碎状，地表不平，有时可以看见张拉裂缝形成的弧形纹理。滑坡前缘即堆积区，多呈舌状或扇状，凸起明显，有时可堵塞河道形成堰塞湖。

对植被已恢复的老滑坡要仔细辨认，注意寻找微小差异。此时圈椅状的后壁形态虽然已经被侵蚀、植被模糊，但是其整体轮廓仍然可以辨认出来。双沟同源、坡脚处不协调的“大肚子”地形、山坡上与周围地形不一致的平台或洼地，都是判识老滑坡的典型地貌标志。老滑坡体土壤含水量高、植被种类和长势也与周围不同，多光谱或高光谱影像上常常会表现出色调和光谱特征的异常。用立体像对或者基于高精度的 DEM 所生成出的三维晕渲图，可以明显提高对于微地貌特征的感知能力，从而大幅度提升大型滑坡，特别是古滑坡、潜在不稳定斜坡的识别准确率。

二、InSAR 技术在地表形变监测中的应用

合成孔径雷达干涉测量技术属于主动微波遥感的一种，具有全天时、全天候、高精度、大范围监测地表微小形变的能力，在公路沿线地质灾害预警中发挥着越来越重要的作用，是保障公路运营安全的重要技术。

（一）合成孔径雷达干涉测量基本原理

合成孔径雷达干涉测量的基本原理是，利用雷达传感器在相近的位置、不同的时间获得的一幅或多幅 SAR 复数影像，经过差分干涉处理，准确反演地表三维形态和微小变化。SAR 系统发射电磁波照射地面，然后对反射回来的电磁波振幅、相位进行采集。其中振幅信息表征地物后向散射的强度，相位信息精确记录卫星到地面目标点的距离。当获取两幅 SAR 影像的时候，如果地表发生位移，那么目标点到卫星的距离就会发生变化，这种变化会直接反映在两幅影像的相位差上。

干涉处理的核心步骤是把两幅 SAR 影像精确定位之后，对每一个像素的复数做共轭相乘，从而得到干涉图。干涉图上每一个像素都有相位差信息，该相位差一般由五部分组成：参考椭球体造成的平地相位、地形起伏造成的地形相位、两次观测期间地表位移造成的形变相位、大气延迟差异造成的相位以及噪声。在引入精确数字高程模型消除了地形相位之后，并结合轨道参数消除了平地相位之后，剩下的相位差主要体现为地表形变和大气效应。因此，通过解算干涉相位就可以获得沿雷达视线方向的毫米级地表形变信息。

（二）D-InSAR 技术在微小形变监测中的应用

差分合成孔径雷达干涉测量是在常规的 InSAR 技术的基础上发展起来的，主要是对地表的微小形变进行精确的监测。其基本思想就是引入外部数字高程模型，消除干涉图中由于地形起伏所造成的相位贡献，使形变信息更加明显。具体操作流程为，先利用 DEM 模拟出地形无变形时的地形干涉相位，再从实际生成的干涉图中减去模拟地形相位，得到的差分干涉图就更纯粹地反映地表形变。

D-InSAR 技术对于公路地质安全监测有很高的应用价值。公路沿线边坡蠕滑、路基不均匀沉降、采空区地面塌陷等灾害，在早期阶段的形变量很小，传统的测量手段很难实现大范围、高频率的捕捉。D-InSAR 技术可以以厘米级或者毫米级的精度，一次性获取沿线数十至上百公里范围内坡体和路基的形变场。经过解析

差分干涉图以后,形变区的范围、量级以及空间分布就可以被清楚地识别出来。干涉图上出现密集彩色条纹的地方,一般表示存在大的形变梯度,是潜在的地质灾害发育区。

采用 D-InSAR 技术对公路进行长期健康监测时,可以每隔一段时间就产生沿线形变速率图,从而对已经存在的隐患点的发展情况做出动态的跟踪,并且可以及时发现新的形变异常区。这就给养护部门赋予了前所未有的宏观视角,使其可以从被动的事后抢险变成主动的事前预防,科学地安排勘察、加固等养护工作,将安全隐患扼杀在萌芽之中,从而极大地提高公路运营的安全性、可靠性。

(三) 时序 InSAR 技术的形变时序分析

虽然 D-InSAR 技术在形变监测中起着重要作用,但是单次差分干涉的结果容易受到大气延迟、时间失相干等因素的影响,不能得到连续、可靠的形变时间序列。为克服以上局限,时序 InSAR 技术应运而生,其中最具有代表性的就是永久散射体雷达干涉测量和小基线集技术。

PS-InSAR 技术利用多幅长时间序列 SAR 影像进行分析,可以找出长时间内相干性较高的点状目标,即永久散射体,比如建筑物、桥梁、裸露岩石等。由于这些 PS 点回波特性稳定,受失相干效应影响小,可以作为高质量的地面测量点。利用该技术可以对 PS 点建立网络,根据其相位时间序列分析得到线性形变速率、高程残差和大气相位,进而获得毫米级精度的形变时间序列。SBAS-InSAR 技术利用选取时空基线较短的影像对合成多组小基线集干涉图,可以抑制失相干噪声。它既利用了高相干性的点目标,又考虑到了部分相干性较好的分布式目标,采用奇异值分解等方法得到整个监测区域的形变时间序列,提高了监测点的空间密度,特别适合于非城市区域。

这两项技术的应用,使公路沿线的地表形变监测实现了从“快照”模式向“连续剧”模式的升级。

1. 揭示形变过程,可以得到各个监测点的形变历史曲线,分析滑坡、沉降的形态变化是线性匀速发展,还是阶段性加速,也可以观察到降雨、库水位等因素对滑坡、沉降的影响关系。

2. 提高预警的可靠性,用长时间序列的形变数据来建立更加可靠的形变预测模型。当形变速率突然增大并且超过预设阈值的时候,系统就会自动发出预警,给应急措施的采取争取宝贵时间。

通过对上述三种主要 InSAR 技术的对比，其特点和适用场景可见下表。

InSAR 技术对比表

技术类型	监测对象	监测精度	优点	缺点	主要应用场景
D-InSAR	较大变形区域	厘米级	适用范围广，对单一形变事件响应快	易受大气效应、失相干影响，难以获取时间序列	短期形变监测，如地震、火山、滑坡初发
PS-InSAR	稳定点目标（PS 点）	毫米级	精度高，能有效抑制大气效应和失相干，获取长期时间序列	监测点稀疏，不适用于非城市区或植被覆盖区	城市沉降、桥梁位移、建筑物形变
SBAS-InSAR	具有一定相干性的分布式目标	毫米级	监测点密度更高，能有效抑制大气效应，获取长期时间序列	数据处理量大，计算复杂	大范围非城市区形变，如水库库区、边坡蠕变

从表中可以看出，不同 InSAR 技术在监测精度、适用对象和应用场景上各有侧重。

三、基于 GIS 的多源空间数据叠加分析方法

地理信息系统是功能强大的空间数据管理、分析、可视化平台，可以将遥感、地面调查等途径获得的地理空间信息进行整合并深入挖掘，给公路地质环境的综合评价和决策支持提供主要的工具。

（一）矢量数据与栅格数据的空间配准技术

公路地质环境评价数据来源多样，格式也不尽相同，主要可以分为矢量数据和栅格数据两大类。矢量数据用点、线、面来表示地理实体，公路中心线、断层线、滑坡范围边界等都是矢量数据，栅格数据由像素矩阵组成，每个像素代表一个区域的属性值，遥感影像、数字高程模型、降雨量分布图等都是栅格数据。为了能够有效进行综合分析，首先要对各种数据进行空间位置上的精确对齐，也就是空间配准。空间配准是指建立所有的数据统一地理坐标系，使影像上的每一个像素点都对应到地质图上相应的位置。

配准一般需要完成以下步骤，用精度最高或者覆盖面积最大的数据做基准，即经过正射校正的遥感影像或国家标准地形图。然后选择待配准数据（如扫描的地质图）和基准数据之间的若干个同名控制点。在两种数据上都可以清晰地识别

出来,例如道路交叉口、河流交汇处等。根据这些控制点在不同坐标系下的数学变换模型(仿射变换、多项式变换等)来求解转换参数。利用该模型对整个待配准数据进行几何校正和重采样,使它和基准数据在空间上完全一致。准确的空间配准是后面所有空间分析的前提,任何配准误差都会的分析过程中被传递、放大,从而影响最后的结果。

(二) 多源地理信息图层叠置分析原理

图层叠置分析属于 GIS 空间分析的主要功能之一,其原理同多张不同主题的透明地图叠加类似,观察并分析叠加之后所产生新的空间关系以及属性组合,以此来发现地理现象之间的相互联系。GIS 中地层岩性、坡度、土地利用等专题要素都是单独以图层的形式保存的。叠置分析用几何求交运算将两个或者更多的输入图层组合起来,产生一个新的输出图层。新的图层几何边界为所有输入图层的边界的交集所决定的范围,它的属性继承了在它上面各个输入图层所包含的信息。

用地质构造图层、坡度分级图层、降雨量等值线图层做叠置分析。分析结果会得到一个新的多边形图层,每个多边形单元都会带有原始图层的属性,即属于某断层影响带、坡度在 25 度到 35 度之间、年均降雨量大于 1000 毫米等。可以直观地找出满足某种组合条件的区域。在公路地质灾害风险评价当中,它起着十分重要的作用,既可以对单因素进行简单的考虑,也可以对多灾因耦合作用进行量化的分析。

通过对新生成的多边形单元属性进行查询筛选,可以快速找到同时满足多种致灾条件的“高危”区。如筛选出所有“活动断裂带附近”、“高陡边坡”、“强降雨区”的图斑,这些地方就是滑坡、崩塌等地质灾害极易发生的地方。叠置分析将分散、独立的地质环境要素信息整合到一个统一的分析框架里,给复杂的地质问题的空间化、量化研究提供强有力的技术支持。

(三) 基于 GIS 的公路地质环境分区评价方法

基于 GIS 的公路地质环境分区评价就是用多种空间因素综合分析的方法,在空间上划分公路沿线地质环境的优劣或者地质灾害的危险等级。该方法的核心就是建立一个可以反映地质灾害产生机理的评价模型,并使用 GIS 叠置分析功能将模型进行空间化。根据评价目标(滑坡易发性评价)选择评价因子。评价因子一般有地形地貌(坡度、坡向、高程)、地质条件(地层岩性、构造距离)、水文条件(距水系距离、年均降雨量)和人类工程活动(土地利用类型、道路开挖影

响)等。

将每一个评价因子制作成专题图层,根据地质灾害发生影响程度对其进行量化分级。坡度因子可以分为小于 15° 为稳定、 15° 至 25° 为较稳定、 25° 至 35° 为欠稳定、大于 35° 为不稳定。所有因子完成分级量化之后,用GIS的栅格计算器或者矢量叠置分析功能,将所有的因子图层按照预设的评价模型(如加权求和模型等)进行叠加运算。加权求和模型中每个因子权重由致灾过程中重要性决定,一般用层次分析法或者专家打分法确定。最终系统会生成一个综合评价值的栅格图或者矢量图,图中每个单元的数值代表该区域地质环境综合情况或者灾害易发程度。根据评价值的大小,将公路沿线划分为高易发区、中易发区、低易发区和非易发区,并用不同的颜色进行可视化表示,得到直观的公路地质环境分区评价图。

四、公路地质环境遥感动态监测系统构建

创建集数据采集、处理分析、信息发布和预警功能为一体的遥感动态监测系统,就是实现公路地质环境从静态评价向动态监测预警跨越的重要手段。该系统利用现代信息技术来实现公路沿线地质灾害隐患的连续、实时的监测。

(一) 遥感数据获取与实时传输链路

公路地质环境遥感动态监测系统正常运转的基础就是建立稳定、高效、多源的遥感数据获取和传输体系。数据源的选择要兼顾宏观与微观,定期和应急的需求。宏观上依靠各种卫星遥感平台,高分辨率光学卫星进行灾害普查、形态识别,雷达卫星进行大范围地表形变监测。卫星数据覆盖范围广、重访周期固定,是区域动态监测的主要数据源。微观上对于已知的重点隐患点或者突发灾害区,无人机遥感由于自身所具有的灵活、高精度等特点,可以迅速获取厘米级分辨率的影像和高程数据,给精细化分析和应急响应提供有力的支持。

数据实时或者准实时传输是动态监测的瓶颈。系统要建立可靠的传输链路,也就是和卫星数据中心建立网络联系,用自动化脚本定时获取覆盖研究区的最新数据。无人机等现场获取到的数据可以通过5G、卫星通信这些无线网络快速传送至监测中心。地面监测设备(GNSS位移计、雨量计、裂缝计等)采集到的点位数据,利用物联网技术实时地汇集到系统数据库里。从而形成一个集天、空、地多平台观测数据于一体的立体化数据流,为之后动态分析和及时预警打下了坚

实的数据基础。

（二）遥感变化检测算法在灾害体识别中的应用

遥感变化检测属于动态监测系统的重要分析功能，它依靠不同时期所获取的遥感影像展开对比，从而找出地表发生改变的区域，进而找到新出现或者正在发展的地质灾害体。公路地质环境监测中变化检测算法应用分为两种，一种是形态变化检测，另一种是形变异常检测。

形态变化检测主要基于高分辨率光学影像，通过多种算法识别灾害。

1. 影像差值法是一种直接的方法，将前后两个时相的影像精确配准后逐像素相减，差值较大的区域就是可能发生变化的区域。此方法适合于光照、地表覆盖变化小的地方。

2. 分类后比较法，分别对两个时相的影像进行地物分类，再比较分类结果图，直接得到地物类型的转移矩阵，如林地变为裸地，则表示滑坡发生。

3. 深度学习算法，近些年来，以卷积神经网络为代表的深度学习算法在变化检测方面有着巨大的潜力。使用双分支网络架构，可以自行学习提取出影像深层、和变化有关的特征，进而提高识别复杂背景下滑坡、崩塌等灾害体的准确率，有效地减少传统算法由于光照、季节变化引起的虚警。

形变异常检测主要使用的是时序 InSAR 数据。系统把最新的形变监测数据同历史形变趋势加以对比，就能找到形变速率异常加快的地方。当某一个区域的形变速率大于预警阈值的时候，系统就会将该区域标记为高风险点，并向管理人员发出警报，实现了由被动发现到主动预警的转变。

（三）系统可视化界面设计与动态展示功能

一个高效的公路地质环境遥感动态监测系统，必须具有直观、友好、功能强大的可视化界面，它是把复杂后台数据和前端用户连接起来的桥梁。界面设计要以用户为中心，把大量的空间数据和分析结果以直观、易理解的方式展示给公路管理者和技术人员。一般系统界面都会以地理信息系统地图为依托，提供基本的地图浏览、缩放、漫游等功能。在此基础上叠加公路线路、沿线地质灾害隐患点、各类监测设备分布等矢量信息。用户可以点击交互查询任意隐患点或者监测设备的详细属性信息、历史监测数据曲线、现场照片和视频。

系统动态展示的功能才是它的主要价值所在。系统可以加载不同的遥感影像，用户可以利用时间轴控件来轻松回溯查看某一个地方的历史影像，直接比较地貌

的变化过程。对时序 InSAR 监测结果进行动态渲染,可以显示地表形变累积过程和速率变化,也可以播放形变演化动画。新的预警信息被创建之后,系统将会利用地图上闪烁或者高亮标示出相应的警告点,弹出一个具有等级、位置、当下的形变与速度等信息在内的警告信息框,从而使管理者能够第一时间得到警情,为其科学化的决策以及应急处置构筑全方位、直接的信息保障。

第四节 现场监测仪器设备

现场监测是公路地质安全预警的重要部分,仪器设备性能的好坏直接影响到数据的准确性。本节主要对各种重要的监测设备的技术原理、选择标准以及现场使用进行分析。

一、高精度传感器与自动化采集设备选型

传感器及数据采集设备为监测系统打下了基础,精度以及自动化程度的好坏直接影响到数据的质量。合理的选择是把人工巡检变为智能化监测的关键。

(一) 高精度全站仪与 GNSS 接收机选型标准

公路地质安全监测中地表位移的准确测量十分重要,高精度全站仪和全球导航卫星系统接收机是实现该目的的主要设备。全站仪凭借高精度角度、距离测量功能可以对特定监测点进行毫米级三维坐标监测。选型时应当优先选择带有自动目标识别、照准功能的机器人全站仪,这样可以大大提高监测的自动化程度和频率。主要技术指标为测角精度小于 1 秒、测距精度为 1 毫米加 1ppm,从而保证远距离观测时也能达到高精度。仪器的环境适应性,防水防尘等级、工作温度范围等,也是野外恶劣环境下长期稳定工作的保障。

GNSS 接收机适合于大范围、连续的自动化变形监测,在地质灾害滑坡、沉降等监测中使用较多。选型时需要考虑接收机的多模多频能力,即可以同时接收、处理来自北斗、GPS、格洛纳斯、伽利略等几个卫星系统的多频点信号,提高解算的可靠性、精度。静态解算精度一般为平面 5 毫米、高程 10 毫米。设备功耗也要加以考虑,低功耗设计可以延长野外供电系统的工作时间,降低运维成本。接收机还要有良好的数据通信、存储能力,支持多种网络协议,保证监测数据可以稳定、实时地传送到监控中心。

综合选型时需要根据监测区域特点以及具体的监测要求来做出选择。在通视条件好、需要高频次监测少量关键点的区域，可以选择使用全站仪；在范围大、测点分散的山区，则主要布设 GNSS 接收机。两者相结合可以形成点面结合、优势互补的立体化地表位移监测网络，给公路地质安全提供全方位、精准的数据支撑。

（二）柔性测斜仪与固定式测斜仪性能对比

柔性测斜仪和固定式测斜仪都是深部位移监测的常用设备，但是两者的结构、工作原理、适用场合有较大的差别，对它们的性能进行比较有利于做出最佳选择。它们主要性能差异见下表：

柔性测斜仪与固定式测斜仪性能对比表

特性	柔性测斜仪（阵列式位移计）	固定式测斜仪
结构	多节传感器单元柔性连接成链状	多个独立传感器固定在不同深度
工作方式	随钻孔连续弯曲变形，同步测量剖面三维位移	每个传感器独立测量所在位置的倾斜变化
监测范围	提供连续变形曲线，捕捉扭转信息	仅提供离散点倾斜变化，不捕捉扭转
自动化	自动化、高频率实时监测，无需人工	需逐点测量或集成自动化模块，不如柔性连续
适用场景	活动性滑坡、关键支护结构，需及时预警	变形缓慢、滑移面深度基本确定，预算有限
主要优点	连续三维位移、扭转信息、安装简便、可重复利用、高频实时	结构简单、技术成熟、单点稳定性好、鲁棒性佳、成本低
主要局限	成本相对较高，对钻孔质量要求较高	无法提供连续曲线、不捕捉扭转、形态捕捉能力差

从上表可知，柔性测斜仪可以实现自动化、高频次的实时监测，得到全面的变形姿态数据，适合于需要及时预警的情况；固定式测斜仪结构简单、技术成熟，单点测量稳定性好、成本低，适合于监测变形速度缓慢、滑移面深度已确定的边坡。两者各有千秋，应根据具体工程情况权衡选用。

（三）压阻式与振弦式传感器的工作原理与选型

压阻式和振弦式传感器在岩土工程监测中应用最广，工作原理不同，优劣共存，选型要根据工程环境和监测要求来定。以压阻式渗压计为例，外部水压力作用在硅膜片上，导致它产生形变，进而使贴在上面的惠斯通电桥电阻值发生变化。

测量电桥输出电压的变化,就可以换算成压力值。压阻式传感器的优点是灵敏度高、响应速度快,信号输出为标准电压或者电流等电气信号,容易和通用数据采集设备集成。其不足之处是内部电子元器件对温度敏感,长期稳定性差,容易受到电磁干扰,信号长距离传输会衰减或者失真,所以更适合于监测周期短、环境相对稳定的场合。

振弦式传感器的工作原理是,当被测物理量(压力、应变等)发生变化时,就会引起传感器内部张紧的钢弦受力状态发生改变,从而导致钢弦的自振频率发生变化。利用电磁线圈激发钢弦振动,测量其频率,再根据事先标定的频率与物理量的关系计算出被测值。振弦式传感器的最大优点就是输出信号是频率,属于数字量信号,抗干扰能力强,信号传输距离远且不衰减。其结构简单、无电子元件,有很好的长期稳定性与低温漂特性,很适合在潮湿、强电磁干扰等恶劣环境中做数年甚至数十年的长期自动化监测。但是响应速度较慢,不能进行高频动态测量,必须用振弦式读数仪来采集数据。

选择时如果项目动态响应要求较高,例如爆破振动监测,则选择压阻式传感器。公路边坡、隧道、大坝等重要工程需要进行长期、高稳定、高可靠的监测时,振弦式传感器就是最好的选择。振弦式渗压计、应变计可获得边坡深层孔隙水压力、支护结构应力更为可靠的长期监测数据。

二、深部水平位移监测技术与设备

深部水平位移可以用来评价边坡、基坑等岩土体稳定性,掌握它变化规律是灾害预警的前提。这就需要依靠高科技手段和高精度的仪器设备,对地层内部实行长时间、细致地观测。

(一) 钻孔测斜仪在深部位移监测中的应用

钻孔测斜仪是用来测量岩土体内部某深度水平位移量、方向和变化速率的重要仪器,对判定滑坡滑动面位置、评价边坡稳定性起着不可替代的作用。基本工作过程就是在待测岩土体中钻孔,埋设带有十字导槽的测斜管,保证测斜管能与岩土体同步变形。测量时将测斜探头放入管内,依靠导向轮沿导槽从孔底到孔口逐段测量,记录下每一个深度断面上测头相对于铅垂线的倾斜角度。

通过比较初始读数和后续各次读数,可以求出各个深度断面的水平位移变化量,再绘制出整个钻孔深度的累计位移剖面曲线。曲线的突变点或者最大位移梯

度所在位置，一般就是潜在的剪切滑移带。钻孔测斜仪使用需注意以下几点：

1. 测斜管安装质量非常重要，必须保证测斜管垂直，采用水泥砂浆或膨润土球回填，使测斜管与孔壁紧密结合，实现同步变形。

2. 测孔深度要达到稳定基岩或者预测滑动面以下足够深度，使孔底作为位移计算的可靠不动基准点。

3. 测量时必须严格按照操作规程，在同一个导槽方向上测量，并用正反两次测量取平均值的方法来消除系统零点误差，保证数据的准确性。

现代钻孔测斜技术正向着自动化、实时化方向发展，固定式或者柔性测斜仪可以实现无人值守的连续监测，给滑坡等灾害的临滑预警提供更及时可靠的依据。

（二）多点位移计的安装埋设与读数方法

多点位移计也叫多点变位计或深层位移计，可以精确测量岩土体内部不同深度测点相对于孔口的位移，常用于隧道收敛、坝体变形、边坡深层滑移等监测。它由基座、测杆、锚头、位移传感器（振弦式或差阻式）等组成。其工作原理是利用测杆两端锚固在不同的钻孔深度处，当岩土体发生变形的时候，锚头带动测杆移动。通过测量各测杆相对于固定在孔口基座上的相对位移变化，可以得到各个锚固点的位移情况。

多点位移计的安装埋设过程十分细致而且非常重要。应当按设计要求钻到指定的深度，孔径应符合仪器安装和注浆的要求。随后将组装好的测杆束（不同长度测杆、锚头、保护管）整体或者分段放入孔中。之后进行注浆锚固，一般只对锚头部位注浆，使锚头与岩土体紧密结合，而保护管内测杆能自由伸缩。孔口处安装基座和位移传感器，传感器连接在相应的测杆端头上。整个安装过程中，测杆不能有扭曲或者初始拉压，否则会影响初始读数的准确性。

多点位移计的读数方法取决于所配传感器的种类。振弦式多点位移计读数时，用振弦式读数仪将仪器电缆依次连接到各个测点的接线端子上，分别激振并读取每个测点的振动频率和温度值。把测得的频率值代入该传感器的率定公式中，就可以得到相对于初始读数的位移变化量。温度读数用来对位移数据做必要的温度修正，以消除温度变化给测杆和传感器自身热胀冷缩带来的影响，提高监测精度。自动化监测系统可以设置固定的间隔时间，定时对所有的测点进行读数并传输数据。

（三）深部变形数据的自动采集与传输

公路地质灾害监测，特别是深部变形监测，具有很强的时效性。深部变形数据自动采集、可靠传输，是实现由被动应对转向主动预警的关键技术。将现场的传感器、数据采集设备直接与远程监控中心连起来，形成一条全天候的“数字防线”。自动采集的核心就是数据采集仪，也叫数据记录器或者遥测终端单元。它按照设定的时间间隔，自动对连接的固定式测斜仪、多点位移计、渗压计等深部监测传感器发出指令，从中获取数据。现代数据采集仪有多个通道、多种协议可以同时接两种传感器，做原始数据的初步处理和存储，保证网络中断时的数据补发。

数据自动传输是现场设备和云端平台之间连接的桥梁。根据现场网络覆盖、功耗、数据传输量选择无线通信技术。在有公网覆盖的地区一般会选择 GPRS、4G 或 5G 移动通信网络，其特点是传输速率高、覆盖面广、安装方便。对于偏远山区、公网信号较差的地方可以采用北斗卫星通信或者窄带物联网技术。数据传输之前一般会对数据进行加密，以保证传输过程中的安全，防止数据被非法窃取或篡改。可以大大提高传感器数据到云端的自动化监测频率和响应速度，管理人员随时可以掌握深部岩土体的变化情况，给科学决策和应急处理争取宝贵的时间。

三、岩土应力与孔隙水压力监测设备

岩土体内部应力状态、孔隙水压力是影响其稳定性的两个主要内在因素。对这些参数的变化进行精准监测，对认识灾害机理、评价工程安全和检验设计参数都具有十分重要的意义。

（一）土压力盒的埋设技术与温度修正

土压力盒是用来测量土体内部或者土体和结构物接触面应力的传感器，其监测数据的准确性在很大程度上取决于埋设技术是否得当。理想的埋设状态应使土压力盒存在时，对原来的应力场的影响尽可能小。埋设时应在设计位置挖出与土压力盒大小相适应的小坑槽，坑底必须平整，坑底铺设一层细砂。将压力盒轻放入位后，其受力面应和主应力方向垂直。回填时应采用与原状土性质相近的土料，分层夯实，保证回填土密实度与周围土体一致，防止出现硬点、软点影响测量精度。引出电缆应预先开挖沟槽，用软管保护，防止回填、压实时损坏。

土压力盒的测量值受温度变化的影响较大,主要是传感器自身材料热胀冷缩和敏感元件的温度漂移。因此,温度修正的准确性就显得尤为重要。大多数现代土压力盒内部都有温度传感器,可以同时测量仪器所处环境的温度。温度修正一般有两种方法,一是根据厂家提供的温度修正系数,根据实测温度变化量对压力读数进行补偿计算;二是在实验室中对土压力盒在各种温度、压力组合下进行标定试验,得到更准确的温度、压力和输出三者关系模型。实际工作中可以利用现场同步采集的温度数据,根据该模型对原始压力数据进行修正,从而更好地消除温度变化引起的虚假应力波动,还原真实的土体应力状态。

若没有有效的温度修正,就会对土体应力季节性变化等规律做出错误的判断,在长期监测中更为明显。路基或者挡土墙背后由于日照、气温周期性变化,使得土压力读数出现规律性的波动,如果不加以修正,很容易造成对结构受力状态真实变化的误判,从而影响对结构稳定性的正确评价。

(二) 渗压计在地下水位监测中的精度控制

渗压计是测量岩土体孔隙水压力的主要仪器,其测量的结果经常用来推算地下水位高程。因此渗压计的精度控制水平直接决定边坡稳定性分析、基坑降水效果评价等工作是否准确。精度控制要从选型阶段开始,根据待测最大水头高度和精度要求选择合适的量程。量程过大容易造成分辨率降低,量程过小容易造成超载损坏。由于振弦式渗压计长期稳定性好,抗干扰能力强,所以它常作为长期监测的主要工具。

安装埋设属于精度控制的重要环节。渗压计的透水板部分要进行饱和排气处理,一般浸泡在清水中 24 小时以上,使压力可以无延迟地传到感应膜上。埋设时应在钻孔底部或者侧面设置砂滤层包裹渗压计,防止细小土颗粒堵塞透水板影响压力传递。回填时在渗压计上方用膨润土封孔,目的是保证测得的孔隙水压力为该层,防止上部或者其他层位的水通过钻孔渗入而造成干扰。大气压力的变化也会在非密封条件下水位测量产生影响,因此高精度监测时,应使用带有通气导管的渗压计电缆或者设置大气压力计进行同步观测,从总压力读数中减去大气压的影响,得到真实的水位压力。

(三) 锚索测力计的长期稳定性测试

锚索是边坡、隧道等工程中重要的加固、支护构件,锚索张拉锁定后轴力的变化,直接体现支护系统的工作状态和岩土体稳定状况。锚索测力计是用来监测

该关键力值的一个专用传感器。由于它一般安装在不容易更换的位置上，并且要为整个工程全生命周期服务，因此它的长期稳定性十分重要。长期稳定性试验是保证测力计在数年甚至数十年的服役期间，测量性能稳定可靠、漂移量在允许范围内的一种重要方法。

稳定性测试一般包括传感器核心部件（振弦式测力计中的钢弦等）的材料应力松弛度要很低，这是保证零点长期稳定、测量重复性物理基础。整个测力计的结构设计要能够抵抗环境的侵蚀，尤其是防水密封性能。长期稳定性测试会模拟现场可能出现的恶劣环境，做严苛试验，

1. 恒温恒湿老化试验，将测力计置于高温高湿环境（60℃，95%RH）下做数十至数千小时试验，观察零点漂移和灵敏度变化情况，检验测力计抗湿热老化能力。

2. 温度循环测试，在设定的高低温限值（-30℃~+70℃）之间做反复的温度循环，检测传感器在剧烈的温度变化下所具有的适应性、输出的一致性以及结构的密封性。

3.3）对测力计进行过载疲劳试验，即给测力计加上超过其额定量程的短时过载，观察测力计过载后性能的恢复能力。进行数万次甚至更多的循环加载试验来模拟长期受力波动，评价其抗疲劳性能。

经过上述严格长期稳定性试验，可以筛选出性能稳定、耐久性好的锚索测力计产品，在公路工程长久使用过程中，能够持续给出准确可靠的锚索预应力数据，给结构安全评价、维护决策提供有力支撑。

四、现场数据无线传输与远程控制终端

由于监测点越来越分散、偏远，对数据实时性的要求也越来越高，因此建立稳定的、高效的现场数据无线传输网络以及功能强大的远程控制终端，已经成为现代公路地质安全监测系统标准配置。

（一）GPRS/4G/5G 无线数据传输模块配置

公路地质安全监测系统中的无线数据传输模块，就是连接现场数据采集端和远程监控中心的神经网络。通用分组无线服务、第四代和第五代移动通信技术是目前应用最广的公网无线传输方式。GPRS 是较早的技术，功耗低、覆盖广，适合于数据量小、实时性要求不高，如每天定时上报数据的雨量站或者地下水位计。

配置 GPRS 模块时主要是设置 APN、服务器 IP 地址、端口号等来建立数据连接。

由于监测数据的维度增大（图像、视频监控），预警时效性要求也越来越高，目前主流模块选择为 4G。4G 移动通信系统可以提供比 GPRS 更快的带宽和极低的网络延迟，可以满足大部分地质监测场景下各种传感器数据、低分辨率图片等实时传输需求。4G 模块配置一般即插即用，通过简单的网页界面或者 AT 指令就可以完成网络参数的设置。功耗比 GPRS 高，在太阳能供电系统设计时需要考虑。

5G 技术因为拥有高带宽、低延迟和海量连接等特点，给地质安全监测带来新的可能。它适合于高清视频流、三维激光点云等大量的数据传输，也适合于对控制指令响应时间有极高要求的实时预警和联动控制系统。利用 5G 网络可以实现无人机或者机器人的远程操控，进而进行应急查勘。5G 模块配置和 4G 基本相同，但功耗、成本较高，主要应用在对性能要求极高的监测区。模块选择要考虑监测需求、现场网络条件、功耗预算、建设成本等各方面因素。

（二）低功耗广域网 在传感器组网中的应用

在地形复杂、监测点密集但是公网信号覆盖不好的地方，低功耗广域网技术起着特殊的作用。LoRa 是基于扩频技术的远距离、低功耗、低速率无线通信技术。它不需要移动网络覆盖就可以构建自给自足的物联网，非常适合在公路沿线山区做传感器组网。它的最大优点是超低功耗，一个普通电池可以为传感器节点提供数年的供电，对于采用电池或者小型太阳能板供电的分散监测点来说尤其重要。同时 LoRa 具有很强的穿透性，数公里远的传输距离可以很好地克服山体、林木等对信号的阻挡。

公路地质监测中的 LoRa 应用模式一般用星型网络。即监测区域内的众多传感器节点（裂缝计、倾角计、雨量计等）通过内嵌的 LoRa 模块，把采集到的少量数据无线传输给一个或几个 LoRa 网关。洛拉网关充当桥梁的角色，把所有传感节点的数据汇集之后，再通过 4G、光纤或者卫星等高速网络上传到云端服务器。有效地解决了最后一公里的通信问题，大大降低了在偏远地区给每个传感器配一个公网模块的成本和功耗。合理的网关布置可以实现对整个滑坡体或长大隧道群的全方位、无死角的覆盖。

（三）基于云平台的远程数据接收与控制终端

云平台是现代公路地质安全监测系统的“大脑”和“指挥中心”。它在云服

务器上运行,接收各现场监测点通过无线网络传送过来的海量数据。该平台不但是数据仓库,而且是集数据处理、分析、可视化、预警、控制为一体的综合管理系统。用户不需要安装很繁琐的本地软件,只要通过任何一台可以连上网络的电脑或手机就可以登录到云平台,随时操作和访问整个监测网络。

一个功能完备的云平台一般具有如下主要功能:数据接收存储,可以对不同厂家、不同类型的监测设备和数据协议进行统一接入和结构化存储;数据可视化展示,即平台通过地图、曲线图、剖面图、三维模型等形式直观呈现监测数据的时空变化趋势,使管理人员可以宏观把握全局态势,微观洞察局部异常;强大的分析预警引擎,用户可以根据规范或者专家经验为不同的测点设置多级预警阈值,平台会实时分析数据,发现异常或者超限时立即通过短信、电话、微信、邮件等方式向相关负责人发送预警信息。

云平台还具有远程控制终端的功能。管理人员可通过平台界面给现场数据采集设备下达指令,实现远程更改采集频率、校准传感器、重启设备、固件升级等功能,极大地提高了系统的运维效率,也大大降低了现场维护的频率和成本。以云平台为依托的集中管控模式,是达到监测系统智能化、无人化管理的一种方式,也是提高公路地质灾害防治能力的一种技术手段。

第四章 路基稳定性检测与评价

路基作为公路工程的基础，它的稳定关系到公路的寿命长短和行车安全。路基的稳定状况属于地质安全保障体系的关键部分，也是开展科学检测和评价的重要环节。本章主要对路基沉降这一重要的指标进行监测技术、自动化系统应用、变形预测分析方法的详细阐述，以期给公路建设、养护提供有力的理论支持和技术保障。

第一节 路基沉降监测技术

路基沉降监测是判定路基稳定情况、预估路基长期变形趋势的手段。在路基表面和内部设置各种监测元件，可以得到路基在荷载和环境影响下变形的数据。本节将对路基表面、内部分层等各个方面的沉降监测方法进行详细的论述，并对各项技术实施要点及适用条件进行分析，从而建立起一套完整的路基沉降监测技术体系。

一、路基表面沉降观测方法与实施

路基表面沉降是路基整体变形最直接的反映，对它进行准确的观测，可以掌握路基工后沉降规律，评价路基的稳定性。表面沉降观测技术经过长期的发展，已经形成了以传统精密高程测量为基础、辅以现代空间信息技术的方法体系，可以满足各种复杂的工程条件下进行监测的需求。

（一）水准测量法在路基沉降观测中的布点原则

水准测量法是获取路基表面高程变化最经典、最可靠的方法之一，具有精度高、操作简便的特点。为了保证观测数据的准确性及代表性，测点布置要符合科学合理的原则。观测断面要覆盖所有有沉降的路段，在填挖交界处、桥涵构造物连接处、软土地基路段、高填方路堤等关键部位要适当增加观测断面。

每个监测断面内，测点一般按照“三点一线”原则布置，即在路中心线、左

侧路肩、右侧路肩边缘各设一个沉降观测桩。该布置方式既可以反映路基整体平均沉降，又可以比较路肩和中心点的沉降，分析路基横向不均匀沉降。测点间距要视地质条件、路堤高度灵活而定，一般路段为 20m 到 50m，地质条件复杂或结构变化剧烈地段适当缩短间距。

（二）高精度 GNSS 技术在路基表面监测中的应用

随着卫星导航技术的发展，GNSS 实时动态差分技术在公路路基表面沉降监测方面起到了非常独特的作用。可以克服传统水准测量对通视条件要求高、作业效率低的缺点，实现三维坐标的快速、高精度采集，为大范围、长距离线路沉降监测提供高效解决方案。GNSS 监测技术对于地形复杂、通视条件差的山区公路尤为适用，也可以用来做长时间的自动化监测。

应用时一般设置一个或者多个稳定的基准站，流动站沿线路对预设监测点进行周期性测量。经过差分计算，可以得到各监测点在指定的坐标系下所对应的三维位移数据，从而可以对垂直沉降和水平位移进行分析。为了提高监测精度，需要优化测点布置来保证卫星信号的质量，建立完善的数据处理流程，对原始数据进行滤波、平滑等处理，从而得到准确的沉降信息。

尽管 GNSS 技术有诸多优点，但是它的高程测量精度一般比精密水准测量要低一些。因此，在实际工程中，一般将 GNSS 技术同水准测量相结合。以水准测量建立高精度的高程控制网为基准，后续复测用 GNSS 技术，定期用水准测量校核，形成优势互补的综合监测方案，既保证精度又提高效率。

（三）沉降观测桩的埋设与保护技术措施

沉降观测桩是表面沉降观测的物理载体，沉降观测桩是否稳定、耐久决定着长期观测数据是否连续可靠。因此观测桩的埋设和保护工作十分重要，必须按照规范进行。观测桩材料一般用不易锈蚀、不易变形的直径 20mm 钢筋，长度不小于 40cm，底部可做成弯钩形，以增大其与混凝土的锚固力。

埋设一般在路基填筑至路床表层顶面后进行。方坑边长 15cm，深度 30cm 的方坑，观测桩垂直地埋设于坑口中心，顶部高出路面设计高程 5-8cm，不被碾压设备碾压。然后用不低于 C20 标号的混凝土浇筑固定，使观测桩与路基结构形成一个整体。浇筑完成后，在观测桩周围做好醒目标记，并记录有关信息，建立监测档案。整个观测期间必须对观测桩进行保护，严禁车辆碾压、外力撞击或人为破坏。对暂时不进行观测的桩，应加装保护盖，定期巡查，发现损坏或者位

移的,应及时修复或者重建,并做好数据衔接工作。

二、路基内部分层沉降监测技术

路基内部分层沉降监测属于认识路基深层变形机理的关键技术手段,可以对路基不同深度的土体在荷载作用下的压缩变形进行量化,从而给评价路基压实质量、评判地基处理效果、改进设计参数赋予直接依据。在路基中埋设专门的传感器,可以精确地测量地基到路基顶面各层的变形情况,诊断沉降产生的原因。

(一) 分层沉降管与磁环的安装埋设工艺

分层沉降监测一般采用钻孔内分层沉降管和磁环(或者磁性锚块)来完成。该系统可以测量垂直剖面上多个预定深度处的沉降量。安装埋设工艺直接决定监测精度以及系统的成活率,施工时要精心组织。

1. 钻孔和清孔,根据设计监测点位,用钻机钻孔至设计深度,孔径应大于沉降管外径,便于安装。成孔后必须清除孔内泥浆、杂物,保证孔壁稳定、干净。

2. 安装工艺,将带有底座或者锚头的首节沉降管放入孔底,使其稳定地落在孔底稳定地层上。随后在管外壁预定高程处装设磁环。磁环分为簧片式锚块和平板式磁环两种,簧片式锚块可使用专用工具使弹簧片贴紧孔壁,平板式磁环随填筑分层放置。逐节连接沉降管并同步安装磁环,直到达到设计顶高程为止。

3. 回填保护,钻孔安装后一般用水泥或者膨润土砂浆回填,使磁环与周围土体协调变形。在安装回填过程中必须保护好沉降管,不能破损或堵塞。安装完毕后管口应加装保护盖并设置警告标志,防止施工活动对它造成影响。

(二) 电磁式沉降仪的测试原理与读数方法

电磁式沉降仪是测量分层沉降管内各磁环位置的便携式仪器。基本工作原理是电磁感应。仪器主要由带刻度电缆卷盘、装有磁簧开关或者霍尔元件的探头以及声光指示电路组成。当探头在沉降管内向下移动时,经过事先埋设好的磁环,磁场会激活内部传感器,电路被接通。

此时卷盘上蜂鸣器发出声音,同时指示灯亮。测量人员要缓慢移动电缆,找到声光信号最强的地方就是磁环的中心。然后直接从电缆的刻度尺上读出该点的深度值。通过本次读数与初始读数的对比,就可以得到该磁环所在土层的沉降量。为了保证数据的准确性,每一个测点都需要进行两次测量,两次测量结果之差不能超过2毫米。对所有的磁环进行测量,就可以得到一条完整的沿深度分布的沉

降曲线。

（三）分层沉降数据的整理与压缩模量反算

分层沉降监测获得的原位变形数据，经过系统的整理和深入的分析之后，才能起到工程指导的作用。数据整理的第一步就是计算各个分层土体的沉降量。某土层沉降量，即该土层顶部磁环和底部磁环相对于初始高程的沉降差值。累加计算可以得到路基总沉降中各个土层的压缩变形所占比例，从而准确地判断出主要沉降层位。

根据分层沉降数据可以反算出土体的压缩模量。根据土力学固结理论，土的压缩模量 E_s 可以由分层应力增量 $\Delta \sigma$ 和分层应变 ε 计算得到，即 $E_s = \Delta \sigma / \varepsilon$ 。分层应变可以直接用分层沉降量除以该土层厚度来计算。分层应力增量需要按照路堤荷载和土层位置来计算，用弹性理论（比如 Boussinesq 解）来求解。反算出的压缩模量更能真实地反映土体在原位应力条件下的变形情况，也能更真实地反映实际荷载作用下的变形情况，其代表性优于室内试验结果，可用来验证设计参数的合理性，也可以作为后期工程沉降预测的可靠依据。

三、新型沉降自动化监测系统应用

随着传感器技术、物联网和云计算迅猛发展，推动公路地质安全监测向自动化、智能化、实时化方向迈进。新型沉降自动化监测系统可以做到对路基沉降的连续、无人值守的观测，并且有实时数据传输、预警的功能，大大提高检测效率和风险防范能力，更适合于运营期的公路长期健康监测。

（一）静力水准仪系统的连通管原理与精度

静力水准仪系统属于高精度自动化沉降监测的一种代表技术。基本原理是连通管效应，即在重力作用下，互相连通的容器内静止的同种液体液面总是保持在同一水平面上。该系统由一系列通液管连接起来的传感器单元和一个基准储液罐组成，传感器单元安装在各个监测点上。

当某处发生沉降时，该处的传感器就会下降，从而引起传感器内部液位相对于壳体的变化。传感器内部高精度液位计（磁致伸缩式或者压差式）能准确测量出相对变化量，然后通过数据采集系统转换成沉降值。连通管式静力水准仪精度高，测量精度一般可以达到亚毫米级，所以特别适合对沉降敏感的构筑物进行监测。因为不需要通视条件，在桥梁、隧道、高填方路基等工程中的差异沉降监测

中应用较多。

（二）基于液体压力差的沉降自动化监测技术

基于液体压力差的沉降自动化监测技术，一般称为压差式静力水准系统，是该技术的一种实现形式。该技术用监测点和基准点之间液柱高度差产生的静压差来测沉降量，不同于传统的连通管式浮子位移测量。每个监测单元内装有高灵敏度的压力传感器，测量底部所受的液体压力。

根据流体静力学公式（ $\Delta P = \rho g \Delta h$ ），压力差 ΔP 和液位高度差 Δh 成正比， ρ 是液体密度， g 是重力加速度。当监测点出现沉降的时候，监测点和基准点之间的液位高差随之改变，压力传感器测得的压力值也会随之变化。数据采集系统可以对压力变化量进行实时记录，并且可以自动计算出沉降量。该技术最大的优势就是测量量程大，对监测点初始高程差要求不高，安装灵活，适用于有较大高差或者纵坡的线路沉降监测。

（三）自动化监测数据的实时采集与报警功能

自动化监测系统的核心优势在于其强大的数据实时处理与智能预警能力。

1. 数据实时采集，系统使用数据采集仪，对静力水准仪、GNSS 接收机等各种传感器的数据进行自动、连续的采集。采集频率可以按照工程要求进行设置，可设为数分钟或者数小时。采集到的数据经由 5G、GPRS 或者光纤等无线或者有线网络，实时上传到远程云服务器。

2. 数据处理是云平台软件对大量数据进行接收、自动化清洗、计算、存储的过程。管理人员可以随时通过网页或者手机应用程序查询监测数据，用直观的曲线图、数据报表等形式查看路基各个监测点的实时沉降状况和历史变化趋势。

3. 智能报警功能即系统内可以设置三级报警阈值，即预警值、报警值和危警值。任何一个监测点的沉降量或者沉降速率超出设定阈值的时候，系统就会自动发出警报。报警信息可以采用短信、电子邮件、微信推送、声光报警等多种形式，第一时间通知有关管理人员和技术人员，争取应急措施、有效防范灾害的时间。

四、路基沉降变形预测模型与趋势分析

路基沉降预测属于路基设计、施工以及运营期养护决策的重要环节。建立数学模型，用前期实测沉降数据推算未来沉降的发展趋势和最终沉降量，可以科学评估路基长期稳定性，合理确定路面铺装最佳施工时间。目前基于实测数据的经

验推算法因为简便实用被广泛使用。

路基沉降预测模型与趋势分析中，常用的预测模型及其特性可见下表：

路基沉降预测模型对比表

模型名称	核心原理	适用阶段	优点	缺点
GM(1,1) 模型	灰色理论，小样本外推	早期沉降	对数据量要求低，短期预测效果好，适应非线性时变系统	长期预测精度可能下降，模型参数物理意义不明确
双曲线法	沉降过程服从双曲线规律	中后期沉降	物理意义明确，计算简便，中后期预测精度高	对早期沉降预测不佳，参数选择影响大

从上表可以看出，不同的沉降预测模型各有侧重，适用于不同的沉降阶段和数据条件。

（一）基于灰色理论的沉降预测模型构建

灰色系统理论是用来解决小样本、贫信息的不确定性问题的一种有效的方法，它利用已有的部分信息来发现系统的演变规律。GM(1, 1) 模型是灰色理论中应用最广的预测模型，对数据序列较短的早期沉降预测效果最好。在构建模型的时候，把不等时间间隔的原始沉降数据序列做一次累加来降低随机性，使其趋近于指数增长规律。

根据生成的序列建立一阶微分方程，求解后得到预测模型。最后用累减还原得到原始沉降序列的预测值。GM(1, 1) 模型对数据量的要求不高，只需要少量的近期观测数据就可以进行预测，能够对沉降的短期发展趋势作出快速判断。该方法对于非线性、时变的系统有很好的适应性，可以给公路路基施工期动态沉降控制提供强有力的工具。

（二）双曲线法在路基沉降推算中的应用

双曲线法是依据大量的工程实践经验总结出来的经典沉降预测方法，它假定沉降过程可以用一条双曲线来描述。此方法认为时间 t 和时间沉降量 St 之比 t/St 同时间 t 成线性关系。根据该假设，把一系列实测的沉降数据点 (t, St) 画在 $t/St - t$ 坐标系上，这些点大体呈线性分布。

通过线性回归分析可以得到直线的斜率和截距，从而求出双曲线方程的两个主要参数。由此得到的方程可以预测任意时刻的沉降量，也可以推算出路基的最终沉降量。双曲线法物理意义明确、计算简便，在中后期沉降预测中精度较高，因此在工程界被广泛使用，是沉降预测方法中最常用的一种。用于计算的数据点

选择对预测结果影响很大，一般选取沉降趋于稳定的后期数据进行拟合，可以提高预测的准确性。

（三）工后沉降量的预测与评估方法

工后沉降是指路基在铺设完毕后发生的沉降，它对公路的长期平顺性及使用性能影响很大。准确预测和评价工后沉降量，是确定路面加铺时间的科学依据，也是判断是否进行养护的重要标准。工后沉降的预测一般在路基基本完成压实、沉降速率明显减缓的时候进行。可利用前文所述的灰色模型或者双曲线法等模型，根据路基交工前一段时间内测得的实测数据，外推计算路基最终总沉降量。

再将预测的最终总沉降量减去路面铺装时已经发生的沉降量，即可得到预估的工后沉降量。在评价的时候，应当把预测的工后沉降量以及可能产生的不均匀沉降值同《公路路基设计规范》所规定的允许值加以比较。

如果预测值在允许范围内，则路基的稳定性已经满足要求，可以进行路面结构层施工。如果预测值大于规范值，则说明路基还没有完全稳定，这时应该继续延长预压时间、堆载卸荷或者对地基进行补充加固。待沉降速率满足要求后，才能进行下一道工序。

第二节 边坡稳定性分析

边坡稳定是公路岩土工程中重要的问题，边坡的状态是由地质情况、水文状况以及外界动力荷载共同决定的。本章分析了边坡失稳的内在机理和外在表现，对主流的稳定性计算方法、现代数值模拟技术进行了介绍，用现场监测数据来动态准确地评价边坡稳定性。

一、公路边坡失稳模式与破坏机理分析

全面认识边坡的各种失稳模式以及相应的破坏机理，是进行有效的稳定性评价和灾害预警的前提。这就需要我们不单要找到各种失稳现象的宏观特征，还要探究失稳现象背后的物理力学过程，即降雨、地震等主要诱发因素的作用机制，为后面的定量分析打下坚实的基础。

（一）滑坡、崩塌与错落等失稳模式特征

公路边坡失稳的形式有滑坡、崩塌、错落等。滑坡是边坡岩土体沿一个或者

几个连续的剪切破坏面整体下滑的现象，滑动面一般是圆弧形或者折线形，滑动过程比较缓慢，有明显的滑动阶段性，在坡体后缘出现拉张裂缝，在坡体前缘出现隆起。崩塌指高陡边坡上岩土体受重力作用突然发生的快速滚落、倾倒或坠落，其破坏范围小，但突发性强，运动速度快，破坏力大。

错落介于滑坡和崩塌之间，多出现在土质边坡或者强风化岩质边坡，表现为坡体局部发生不连续、阶梯式的下挫。失稳模式的识别要结合现场宏观地质调查，仔细观察边坡的几何形态、裂缝发育状况、坡脚堆积物特点、植被生长情况等，综合判断潜在的破坏类型，为后面选择合适的分析模型和计算方法提供依据。

（二）降雨入渗诱发边坡失稳的物理力学机制

降雨是引起公路边坡失稳最常见的、最活跃的因素之一。作用机理主要是雨水入渗使坡体内土体的物理力学性质发生变化，使土体的抗剪强度变小。一方面雨水入渗使土体含水率增大，土体比重增大，使坡体的下滑力增大。更严重的是，入渗的雨水使土体孔隙被填满，使孔隙水压力突然增大。根据有效应力原理，土体的抗剪强度是由有效应力决定的，孔隙水压力增大，会直接使土体颗粒间的有效正应力减小，使土体的内聚力、内摩擦角明显降低，即抗剪强度明显降低。

非饱和土边坡在降雨初期基质吸力会逐渐减小直至消失。基质吸力是抗剪强度的重要组成部分，一旦消失就会使边坡的稳定性急剧下降。降雨入渗的过程不是均匀一致的，雨水会优先通过裂隙、植物根系孔洞等优势通道渗入，在坡体内部形成瞬态饱和区、复杂的渗流场，造成坡脚或者软弱夹层等关键部位先达到饱和软化，进而引发局部破坏，最终演变成整体失稳。因此，对于降雨强度、降雨历时和土体渗透性之间的关系有深刻的认识，对预测降雨型滑坡来说是十分重要的。

（三）地震动力作用下的边坡累积损伤效应

地震属于强瞬时动力荷载，对边坡的稳定性有很大影响。地震波到达边坡岩土体时，会对边坡岩土体造成一种复杂的循环剪切作用，不单是瞬时的动力反应，而且对岩土材料产生积累性损伤。在地震动反复荷载作用下，岩土体内部微裂隙不断产生、发展、贯通，材料强度和刚度逐渐劣化，这个过程称为累积损伤效应。累积损伤会使边坡的承载能力不断降低，单次地震强度不大，高频次的微小地震也会对边坡造成严重的内伤。

对于饱和土质边坡或者含有饱和软弱夹层的边坡，地震循环荷载还会引起孔

隙水压力的累积增长，也就是液化。孔隙水压力不断增大，会使土体的有效应力急剧减小，当有效应力减小到零时，边坡就会完全失去抗剪强度，造成边坡的流动破坏。地震作用下边坡动力响应存在高程效应和趋表效应，即地震动加速度在坡顶和坡面处放大效应更明显，这些地方往往是地震损伤最严重的部位，也是崩塌、滑坡最先开始的地方。

二、基于极限平衡理论的边坡稳定性计算

极限平衡法是边坡稳定性分析里历史最悠久、应用最广的一种经典理论。采用滑动体静力平衡分析，求出抗滑力（或力矩）和滑动力（或力矩）之比，即安全系数，从而对边坡稳定性做定量评价。其核心就是滑动面的假定和条块间力的简化。

（一）Bishop 法与 Janbu 法的适用条件对比

在众多条分法极限平衡分析方法中，Bishop 法、Janbu 法由于理论严谨、适用范围广，因此被广泛使用。这两种方法都是对瑞典条分法进行改进，更加合理的考虑了块体间的力作用，但是它们的核心假定以及适用范围各不相同。以下表为这两种方法对比：

Bishop 法与 Janbu 法对比表

特性 / 方法	Bishop 法	Janbu 法
适用滑动面	圆弧形滑动面	圆弧形及任意非圆弧形滑动面
适用边坡类型	土质边坡（均质土坡）	土质边坡，岩质边坡（含软弱夹层或复杂地质条件）
条块间力假定	竖向剪切力为零，仅考虑水平推力	考虑水平推力，引入条间力作用点假定
平衡方程	主要满足力矩平衡（迭代计算）	简化法满足力平衡，严密法同时满足力与力矩平衡
精度 / 收敛性	相对稳定，结果可靠，精度较高	严密法收敛性有时存在问题，简化法需经验校正
灵活性	较低	较高

由上表可知，当边坡破坏模式确定为圆弧滑动的时候，Bishop 法更可靠、更高效；而当滑动面可能沿软弱结构面发展成非圆弧时，Janbu 法则更具有灵活性。

（二）最危险滑动面的搜索策略与优化

极限平衡法计算出的安全系数是针对某一个假定滑动面的，而边坡的真实稳

定性取决于那个最容易失稳的滑动面，即具有最小安全系数的“最危险滑动面”。因此正确找到最危险的滑动面位置和形状，就是极限平衡分析的关键。传统的搜索方法依靠工程师的经验来手动指定滑动面的圆心、半径范围或出露点，效率低，而且容易遗漏最危险的滑动面。

现代边坡稳定性分析软件一般都包含自动搜索算法。圆弧滑动一般用网格搜索法，在预设的网格中逐点尝试做圆心进行计算，最后得到全局最小的安全系数。非圆弧滑动搜索更加复杂，因为滑动面的形状是任意的。此时一般用优化理论的搜索方法，如遗传算法、模拟退火算法、粒子群优化算法等。

将滑动面的几何参数作为优化变量，以安全系数为目标函数，采用模拟自然选择或者物理退火等方法，在庞大的解空间中寻找全局最优解，即最小安全系数和对应的最危险滑动面。可以很好地处理复杂的地质情况，自动识别由于地层构造或者软弱夹层引起的复杂的破坏模式，大大提高了分析的准确性、可靠性。

（三）边坡安全系数计算结果的判定标准

安全系数是评价边坡稳定状况的定量指标，安全系数就是边坡能承受的最大抗滑力和实际下滑力的比值。当安全系数大于 1.0 时，边坡是稳定的；等于 1.0 时，是临界状态；小于 1.0 时，是不稳定的。实际工程设计和评价过程中，考虑到计算模型的不确定性、岩土参数的变异性、破坏后果的严重性等，必须用一个大于 1.0 的储备安全系数值来作为评判的标准。

该判定标准即允许的最小安全系数，一般由有关技术规范或者指南根据边坡工程等级、使用年限、破坏可能造成的生命财产损失等因素综合确定。一级永久性公路边坡在正常工况下的安全系数为 1.25 到 1.35，在暴雨、地震等不利工况下要求会降低，但是不能小于 1.10。稳定性评价时，用计算出的最小安全系数与规范规定的标准值进行比较。计算值大于标准值时判定边坡安全，计算值小于标准值时判定边坡稳定性不足，需要采取支挡、加固或者削坡减载等工程措施。

三、边坡稳定性数值模拟分析与评价

随着计算机技术的发展，有限元法、有限差分法等数值模拟方法在边坡稳定性分析中所起的作用越来越大。与极限平衡法不同的是，数值模拟不需要事先假定滑动面的位置和形状，可以模拟边坡从弹性变形到塑性破坏的全过程，给出应力、应变、位移等信息。

（一）有限元强度折减法的基本原理

有限元强度折减法是目前使用最广的边坡稳定性数值分析方法。其主要思想就是把极限平衡理论中的安全系数和有限元计算结合起来。该方法通过逐步减小岩土材料的抗剪强度参数，即黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 来模拟边坡承载能力下降的过程。

具体操作时，设折减系数 F ，将材料原始的黏聚力 c 、内摩擦角的正切值 $\tan(\phi)$ 同时除以 F ，得到一组新的强度参数 c' 和 ϕ' ，代入有限元模型计算。然后逐渐增大折减系数 F ，重复上述计算，直到有限元计算结果出现不收敛为止。数值计算不收敛一般说明模型内部出现了贯通的塑性区，结构不能继续承载而发生失稳。此时使边坡达到极限平衡状态的折减系数 F 就定义为该边坡的稳定安全系数。该方法可以自动搜索出最危险的滑动区，并且可以自然地处理复杂的几何形状、荷载条件、材料非线性问题。

（二）边坡应力场与位移场的分布特征分析

数值模拟能直观反映边坡自重及外荷载作用下内部应力场、位移场的分布，对认识边坡变形破坏机理有重要的作用。应力云图可以清楚地显示出应力集中区。一般坡脚、坡顶处存在拉应力或者剪应力集中区，该区域就是裂缝产生、开裂开始的起点。应力分布能体现软弱夹层或者结构面对边坡内部力学状态的影响。

位移场分析可以更直接地体现边坡的变形趋势和破坏形式。通过位移矢量图来确定边坡潜在的滑动方向和滑动体的范围。当边坡接近失稳的时候，在位移场上会出现一个明显的位移突变带，位移突变带内位移急剧增大，位移突变带的位置和形状就对应着潜在的滑动面。分析坡顶竖向位移、坡脚水平位移可以判断边坡沉降量和挤出变形量。这些应力、位移分布特点就是判定边坡稳定性，失稳形式的重要根据。

（三）塑性区贯通与失稳判据的确定

在弹塑性数值模拟中，如何正确判断边坡已经出现极限失稳状况，这是十分重要的。除了前面提到的数值计算不收敛作为首要的判据外，塑性区的贯通也是另一个非常直观并且应用广泛的物理判据。强度折减系数越大，塑性区就越早出现在应力集中处，然后不断地扩展。

当塑性区从坡脚开始，沿着某个潜在的破坏路径向上发展，最后延伸到坡顶或者坡体后缘，形成一个连续的、贯通的塑性带时，就说明一条完整的剪切破坏

通道已经形成，边坡整体失稳。此时对应的强度折减系数就是安全系数。通过后处理中的剪应变或者塑性应变云图可以清楚地看到贯通带。另外一些辅助判据，例如边坡某位置（坡顶）的位移出现拐点，位移值突然增大等，也常被用来辅助判断边坡的临界失稳状态。利用这些判据可以明显提高数值模拟结果的准确性。

四、基于监测数据的边坡稳定性动态评估

理论计算与数值模拟可以对边坡的稳定性进行静态评价，而长期现场监测则可以记录下边坡在真实环境条件下所发生的变化。采用位移、应力、水文实时监测数据，可以对边坡进行动态评价、临滑预警。防灾减灾工作因此不能缺少这一环节。

（一）位移 - 时间曲线的蠕变阶段识别

大量的边坡失稳案例表明，大部分滑坡在发生剧烈滑动之前都会有一个长期缓慢的变形过程，这个过程叫做蠕变。通过在边坡关键部位布置位移监测点，并得到位移随时间变化的曲线，就可以清楚地识别出边坡所处的蠕变阶段。典型的蠕变曲线一般分为三个阶段，即初始蠕变阶段、变形速率逐渐减小；稳定蠕变阶段、变形速率保持在较低的稳定值；加速蠕变阶段、变形速率急剧增大，最后失稳。

这三个阶段在位移 - 时间曲线上分别对应下凹的曲线段、近似线性的直线段和上凸的曲线段。稳定蠕变期可长达几个月甚至几年，是边坡的“潜伏期”。当监测曲线进入加速蠕变阶段，也就是边坡内部结构损伤加剧到一定程度的时候，就预示着边坡非常危险的临滑阶段，这时必须立即启动应急预案。所以准确识别位移时间曲线上的蠕变阶段，即从稳定蠕变到加速蠕变的转折点，就成为滑坡动态评价与预警的关键。

（二）基于位移速率的边坡临滑预警判据

位移速率和它的变化趋势比累计位移量更能反映边坡的稳定性状况。边坡失稳的加速蠕变阶段中，位移速率就会出现非线性急剧增长。因此，以位移速率为基础建立预警判据，可以实现滑坡临滑预报。

1. 速率阈值法，通过对历史滑坡案例进行统计分析或者根据地区经验，可以为不同类型的边坡设定出相应的位移速率预警阈值。当年平均位移速率大于某个值时进入注意级别，当日位移速率大于更高阈值时进入警报级别。

2. 改进切线角法，为了消除位移 - 时间曲线由于坐标尺度不同而出现的形态

差异,学者提出了改进切线角的方法。将该方法归一化处理后,得到切线角度,当切线角由稳定蠕变阶段约 45 度突然增加到 80 度以上时,就说明边坡进入加速变形阶段;当切线角接近 90 度时,就说明失稳迫在眉睫。

根据位移速率或者其衍生参数的判据,可以更早、更准确地发现边坡失稳的信号,给防灾减灾争取宝贵的时间。实际中会根据各种判据综合判定,提高预警的准确性。

(三) 多源监测数据融合的边坡稳定性综合评价

单一的监测手段只能反映边坡状态的一个侧面,容易造成信息片面或者数据异常。为了对边坡稳定性有一个全面、准确、可靠的评价,必须使用多源监测数据融合技术。即把不同种类传感器的数据综合起来分析,例如把地表位移、内部位移、应力应变和降雨量、地下水位等诱发因素的监测数据有机地结合起来。

数据融合在不同的层次上可以有不同的实现。数据层可以通过加权平均或者滤波的方式提高数据的质量。特征层可以提取各个监测序列的特征,即位移速率、孔压响应系数等来实现关联。在决策层可以采用模糊数学、神经网络或者专家系统等方式来建立综合评价模型,输入各项监测指标,输出边坡的综合稳定状态评价等级或者失稳概率。多源信息融合可以达到信息互补、剔除异常干扰的目的,从而大大提高稳定性评价的精度和预警预报的可靠性,给现代公路地质安全保障提供最坚实的技术支撑。

第三节 地基承载力测试

一、平板载荷试验与数据处理

平板载荷试验是最直接、最可靠的地基承载力原位测试方法,可以较好地模拟基础荷载作用下地基土的应力、变形特性。通过严格控制试验过程、科学处理试验数据可以得出地基承载力特征值、变形模量等重要参数,为路基及构筑物基础设计提供重要的依据。由于准确性高,该方法常被用作其他间接测试方法的基准。

(一) 平板载荷试验的加载方式与终止条件

平板载荷试验的效果很大程度上取决于加载方式和终止条件是否合理。加载

方式一般为分级维持荷载沉降相对稳定法,即把总荷载分等级逐步加进来。荷载每级加完后观测沉降,达到相对稳定后才能加次级荷载。加荷等级不应少于8级,10~12级最好,这样P-S曲线能更好地反映土体的变形规律。每级荷载增量应取预估极限承载力的十分之一左右。每级加载后,应按照一定的时间间隔测量沉降量,在加载后5分钟、10分钟、15分钟、30分钟、45分钟、60分钟分别观测一次,之后每隔30分钟测一次,直到连续两小时内每小时的沉降量均小于0.1mm为止,这时可以认为沉降已达到稳定标准。

试验的终止条件是保证试验达到预期目的、取得有效数据的重要环节。当实验过程中出现明显破坏现象时应当停止加荷。具体的终止条件有以下几种情形:

1. 承压板周边土体出现明显的侧向挤出、隆起或开裂现象。
2. 某一级荷载下产生的沉降量比前一级荷载沉降量大5倍以上,这表明土体结构已发生屈服。
3. 荷载沉降曲线上出现陡降段,直接说明地基承载力已经丧失。
4. 在某一荷载作用下,24小时之内沉降量不能达到稳定标准。
5. 当沉降量与承压板宽度或直径的比值大于或等于0.06时,也可停止试验。

前三类荷载出现的时候,一般把前一个级别当作极限荷载。当持力层为坚硬土层,沉降量很小,没有明显的破坏迹象时,最大加载量已经不小于设计要求的两倍时,也可以停止试验。

试验准备阶段的场地处理也不能忽略。试验坑宽度应不小于承压板直径或宽度的三倍,消除边界效应。试验前应保持土层的原状结构及天然含水率,不得扰动。为了保证荷载均匀传递,在承压板下面设置厚度不大于20毫米的砂垫层进行找平。反力装置的承载能力要大于试验最大荷载的1.5~2.0倍,保证试验操作的安全。

(二) P-S曲线的特征分析与承载力特征值确定

P-S曲线,也就是荷载沉降曲线,是平板载荷试验成果的主要表现形式。对P-S曲线形态进行形态分析,可以直观反映地基土在荷载作用下变形及破坏的过程。典型的P-S曲线一般分为三个阶段,即初始的线弹性或者近似线弹性阶段、弹塑性变形阶段、塑性流动或者破坏阶段。在线弹性阶段沉降随荷载增大呈线性增长,在弹塑性阶段沉降速率变大,曲线开始弯曲,在破坏阶段沉降急剧增大,曲线呈陡降趋势。P-S曲线的陡缓程度可以反映地基土的软硬程度和压缩性,曲线越平

缓说明地基土越坚硬，压缩性越低。

承载力特征值的确定是 P-S 曲线分析的目的，其取值方法需根据曲线的具体形态来确定。

1. 当 P-S 曲线上有明显的线性变形阶段和塑性变形阶段的转折点（即比例界限）时，应取该比例界限所对应的荷载值作为地基承载力特征值。

2. 若曲线没有明显的比例界限，但可以确定极限荷载，就应当根据以下判断：如果极限荷载小于比例界限所对应的荷载的 2 倍，则取极限荷载的一半为承载力特征值。

3. 在某些情况下，曲线没有明显的比例界限，也不能确定一个明确的极限荷载，这时可以用相对沉降量来确定承载力。对面积为 0.25 至 0.5 平方米的承压板，可以取相对沉降量（沉降 S 和承压板宽度 B 的比值）在 0.01 到 0.015 之间时所对应的荷载值，但该值不能大于最大加载量的一半。

为了保证结果的可靠性，同一个土层的试验点不应少于 3 个。当各测点结果的极差不超过平均值的 30% 时，取其平均值作为该土层的地基承载力特征值。

（三）深层平板载荷试验的技术要点

深层平板载荷试验是用来测定深部地基土层，特别是大直径桩桩端持力层的承载力。其技术要点与浅层试验存在较大差别，因为试验是在钻孔或试井内部进行的，环境约束大，操作要求高。

该试验的技术要求之一就是保证承压板和孔壁的匹配关系。一般用直径 0.8m 的刚性承压板，且承压板周边土层高度不小于 80cm 来模拟桩端土体的侧限约束效应。这和浅层试验要求试坑宽度为承压板三倍的做法正好相反。桩基工程中，为了模拟桩端受力，钻孔直径应和承压板直径相等，这样才能考虑侧向土体对桩端承载力的增加作用。试验加荷等级分得更细，可以按预估极限承载力的十分之一到十五分之一的分级加载，从而更准确地获得深部土层的变形特性。

沉降观测和稳定标准的判定要严格按照规程进行。每级加载后，第一个小时内的沉降观测频率要高一些，之后可以逐步增加间隔，直到连续两小时内每小时沉降量小于 0.1mm 时，才能认为是稳定。终止加载条件更加具体，当沉降量大于承压板直径的 4%（即 0.04 倍承压板直径），曲线出现陡降就可以停止。若持力层异常坚硬，不能达到设计要求的破坏状态，则最大加载压力不得小于设计要求的两倍。

深层平板载荷试验数据处理和承载力确定方法同浅层试验一样,都是根据P-S曲线特征来判断的。但由于成本高、周期长,试验前的准备工作就显得十分重要。孔底处理要平整、清洁,不能有虚土或者扰动,这是保证试验数据质量的前提。由于深层试验操作难度大,因此自动化监测设备的作用越来越突出。采用压力传感器、位移传感器自动采集数据,可以大大提高测量精度和试验效率。尽管深层平板载荷试验比较复杂,但是它能给深基础设计提供最直接可靠的参数,对保证高层建筑或者重型构筑物的地基安全起着不可替代的作用。

二、标准贯入试验与动力触探试验应用

标准贯入试验、动力触探试验属于公路勘察里常用的原位测试方法。它们用锤击能量将一定规格的贯入器打入土里,通过贯入一定深度所需的锤击次数来评价土的物理力学性质。这两种方法设备简单、操作方便、适用范围广,特别适合于砂土、粉土等不易取样的土层,可以对地基土的密实度、均匀性、承载力进行快速初步评价。

公路地质勘察中,由于动力触探试验操作简便,适用面广而深受人们的喜爱。下表为动力触探试验常见参数及特点对比表

常用动力触探试验参数对比表

试验类型	锤重 (kg)	落距 (cm)	记录方式	主要适用土层	推荐最大贯入深度 (m)
标准贯入试验	63.5	76	贯入 30cm 所需锤击数 (N 值)	砂土、粉土、一般黏性土	视钻探深度
重型动力触探	63.5	76	贯入 10cm 所需锤击数	中密砂、碎石土、较硬黏性土、软岩	15
超重型动力触探	120 (或更大)	100 (或更大)	贯入 10cm 所需锤击数	密实砂、碎石土、坚硬黏性土、岩土	20

(一) 标准贯入试验锤击数的修正方法

标准贯入试验使用 63.5kg 锤, 76cm 落差自由下落, 将标准贯入器打入土中, 记录贯入 30cm 的锤击数 N。原始测得的 N 值受钻杆长度、地下水位、钻孔直径、锤击能量效率等许多因素的影响, 必须经过修正才能反映土体的真实情况。

1. 杆长修正, 钻杆越长, 锤击能量在传递过程中损失就越大, 实测击数就越

低。所以需要乘以一个大于 1 的杆长修正系数。不同的钻杆长度对应不同的修正系数，这是最基本的修正项目。

2. 对于地下水位以下的粉细砂、饱和粉土，由于锤击振动会产生超孔隙水压力，使有效应力减小，造成测得的 N 值偏低，必须进行修正。

3. 能量修正，不同的设备、不同的操作方法下锤击能量的传递效率是不一样的。理论上的标准锤击能量效率为 60%。当实际能量效率偏离这个标准时，就要做能量修正，把实测的击数换算成标准能量效率下的击数。

（二）重型 / 超重型动力触探试验的操作要点

重型、超重型动力触探试验是对标准贯入试验的补充，主要用来测试中密砂以上砂土、碎石类土或软岩等标准贯入试验无法测量的坚硬地层。重型动力触探用的是 63.5 千克锤，76 厘米落距；超重型动力触探用的是质量更大的锤（例如 120 千克）和更大的落距（例如 100 厘米）。有关这些试验类型的参数详细比较请见上文的“常用动力触探试验参数对比表”。

试验操作时必须保证探杆垂直，探杆与竖直线的偏斜不能大于 2%，防止能量损失和探杆弯曲。锤击应自由下落，锤击速度一般每分钟 15 次到 30 次为好，尽量连续贯入。任何超过 5 分钟的间断都要记录下来。数据记录要准确及时，一般记录每贯入 10cm 的锤击数。为了减小侧壁摩阻力的影响，在贯入时可以适当转动探杆。当遇到很硬的土层，如重型触探时连续三次锤击数超过 50 击或者累计击数过多，可以停止试验或者改用能量更高的超重型动力触探。试验贯入深度也有一定的限制，重型触探不宜大于 15 米，超重型不宜大于 20 米，因为过深时杆侧摩阻力的影响会非常明显，造成数据失真。

（三）基于标贯击数的地基土承载力估算

标准贯入试验击数（ N 值）与多种土性参数之间存在较好的相关关系，因此被广泛用作地基承载力的估测。该估算方法一般是以大量的试验数据和地区工程经验为基础，用经验公式或者图表来表示。修正后的标贯击数可以迅速地评定地基土的承载能力，给初步设计和方案比较提供依据。

用标贯击数来推算承载力时，必须区分不同的土种。砂土、粉土的 N 值直接反映砂土、粉土的密实度，与承载力呈正相关关系。对于黏性土， N 值主要反映的是其稠度状态，也可以用来估计承载力。一些规范、手册会给出根据 N 值和土类来确定地基承载力特征值的表格。还可以用 N 值来估算土的内摩擦角等

强度指标,然后用承载力理论公式进行计算。由于经验关系具有地域性,在使用时应当先参考本地区的经验值,再结合静载荷试验等方法加以验证,保证估算结果的准确性、安全性。

三、地基承载力特征值的确定与修正

地基承载力特征值是地基基础设计的主要参数,它把地基土的强度和变形特性综合起来。通过原位试验或者室内试验得到的承载力值,需要根据基础的实际尺寸、埋深等来修正,才能更准确的用于工程设计。它对保证设计经济合理,具有足够的安全储备起着连接岩土勘察成果和结构设计的作用。

(一)地基承载力埋深与宽度修正系数的取值依据

载荷试验等方法得到的承载力特征值一般是在一定尺寸的承压板、较浅的埋深下测得的,实际基础的宽度和埋置深度远远大于试验条件。基础宽度增大、埋深增大时地基承载力一般也会相应增大。因此规范中加入了深度修正系数和宽度修正系数,对承载力特征值进行修正。

修正系数的取值与基底下土的类别有关。淤泥、淤泥质土等软弱土层的承载力增长潜力小,宽度修正系数一般取 0。密实的砂土、碎石土等,承载力随基础宽度和埋深增大而增大,修正系数也大。黏性土的修正系数介于两者之间,和自身的物理状态(即含水比、孔隙比)有关。

具体取值要严格按照有关的设计规范来执行。建筑地基基础设计规范中规定基础宽度小于 3m 的取 3m,基础宽度大于 6m 的取 6m,体现的是修正效应的限制。基础埋置深度的计算起点要明确,比如填方地区填土在上部结构施工之后完成,则应该从天然地面标高开始算起。这些规定意在保证修正后承载力能体现尺寸效应带来的积极作用,同时又防止无限外推造成安全风险。地下水位存在时会减小土的有效重度,影响深度修正的效果,计算时应采用浮重度,这一点需要注意。

(二)根据土的抗剪强度指标确定承载力

在缺少载荷试验条件或者需要进行理论校核时,可以依据土的抗剪强度指标,即黏聚力和内摩擦角,用地基承载力理论公式来计算承载力。该方法是以土体塑性破坏理论为依据的,其中最典型的就是太沙基承载力公式。

该方法的核心步骤如下:

1. 得到抗剪强度指标:用室内三轴剪切试验或原位十字板剪切试验等手段,

测定地基土的黏聚力、内摩擦角标准值。

2. 选择承载力公式，可以选用普朗特、雷斯纳、太沙基或者汉森等提出的极限承载力理论公式。这些公式一般把极限承载力表示成与黏聚力、上覆荷载（与埋深有关）和基础宽度有关的三项之和，每一项都包含一个只与内摩擦角有关的承载力系数。

3. 确定容许承载力，理论公式计算得到的地基极限承载力要乘以安全系数（一般取 2.0 到 3.0）才能得到容许承载力。同时还要检验该容许承载力下基础沉降是否满足建筑物变形要求。

该方法的关键就是抗剪强度指标选择是否合适。室内试验土样会受到扰动，不能完全模拟现场复杂的应力状态，计算结果存在一定的不确定性。因此设计时要根据工程经验综合判断，可以和其他原位测试结果对比分析来提高最终承载力取值的可靠性。

（三）复合地基承载力的计算与验证方法

复合地基就是在天然地基中设置增强体（桩、墩等），由增强体和桩间土共同承担荷载的一种人工地基。其承载力的确定比天然地基要复杂得多，它与桩体、土体的强度有关，也与两者之间的相互作用（即桩土应力比）有关。

复合地基承载力计算一般采用面积加权法，即将桩体所承担的承载力和桩间土所承担的承载力，按各自的面积分担率相加。核心在于确定单桩承载力、桩间土的承载力和两者荷载的分担比例。单桩承载力发挥系数、桩间土承载力发挥系数为重要参数，这些系数的取值与桩的种类、桩间距、褥垫层厚度、上部荷载等有关。褥垫层可以有效调节桩土应力比，褥垫层越厚，桩土应力比越小，荷载传递也越均匀。桩土应力比具有时效性，随着固结时间的增长，桩所承担的荷载比例也会增大。

由于理论计算的复杂性以及不确定性，现场荷载试验是验证复合地基承载力最可靠的方法。在复合地基上做大型平板载荷试验，可以直接得到综合承载能力及变形特性，反算出实际桩土应力比等参数，检验、修正设计计算。试验所用的承压板尺寸要足够大，覆盖多根桩体以及影响范围，体现整体工作性能。采用理论计算与现场试验相结合的方法来评价复合地基承载力，可以更好地保证公路工程地基处理的安全性和经济性。

第四节 检测数据处理方法

一、监测数据的预处理与误差分析

数据预处理和误差分析属于数据处理的第一个环节，主要目的就是清洗原始数据，为后面准确的分析打下良好的基础。剔除由于非正常因素造成的粗大误差，区分不同的误差，检验数据的基本统计特性，保证数据的有效性、一致性。

（一）监测数据的粗差剔除与异常值识别

公路地质安全监测数据在采集、传输过程中由于仪器故障、环境突变、人为失误等原因，会出现明显偏离正常波动范围的粗大误差，即异常值。异常值的存在会严重歪曲数据真实分布，给后面变形分析、预警模型建立造成严重误导，所以在数据预处理阶段必须识别并剔除。

识别异常值的方法很多，经典的统计学方法 3σ 准则（帕塔准则）简单有效。该方法假定数据服从正态分布，把超出均值加减三倍标准差范围（ $\mu \pm 3\sigma$ ）的数据点当作异常值。格拉布斯检验、狄克逊检验等也属于基于假设检验的异常值判断方法，可以给出更严格的统计学判断依据。

伴随着数据挖掘技术的发展，一些更加稳健、智能的识别方法也被使用。以箱线图为基础的异常值检测，用四分位距确定异常边界，对数据分布没有严格要求，抗干扰能力强。孤立森林算法用随机方式来建立超平面来切割数据空间，异常点由于稀疏并且远离高密度区域而更容易被孤立。这些现代算法可以很好地处理高维复杂数据集中出现的异常情况，大大提高数据预处理自动化程度和准确性。粗差剔除之后，数据质量得到了初步的保证，为后面误差分析以及信号提取打下了基础。

（二）系统误差与偶然误差的分离方法

公路地质监测数据中的误差一般分为系统误差和偶然误差两类，正确区分这两类误差对于认识数据本质、评价监测系统性能有重要意义。系统误差是由固定或者按某种规律变化的因素引起的，具有累积性和可预测性，传感器零点漂移、季节性温度变化对仪器的周期性影响等都属于系统误差。偶然误差是由许多微小的、不可控的随机因素共同作用产生的，大小和符号都是随机的、无规律的，但总体上服从某种统计分布，如正态分布。

分离这两种误差的方法论核心就是识别和建模系统误差的趋势。常用的有差分法、滑动平均法。差分法通过计算相邻数据点之间的差值，可以较好地消除数据序列中的线性或者多项式趋势，使系统误差恒定或者被消除，剩下的波动部分主要是偶然误差。滑动平均法就是计算窗口内数据的平均值来平滑数据，可以有效地滤除高频偶然误差成分，突出低频变化的系统误差趋势。在更复杂的分析中可以采用回归分析的方法，用线性函数、多项式函数、周期函数等来拟合数据中的系统性趋势项，拟合后的残差就相当于偶然误差序列。正确分离两类误差一方面可以修正测量结果提高数据准确性，另一方面也可以用来评估监测仪器长期稳定性，分析外界环境对监测系统的影响。

（三）监测数据的平稳性与趋势性检验

在开始做时序分析之前，需要先对监测数据的平稳性、趋势性进行检验，因为很多经典的时间序列模型（ARIMA 模型等）都要求输入数据要具有平稳性。平稳性指数据序列的统计特性（均值、方差、自协方差等）不随时间变化而改变。非平稳数据一般存在趋势性或者季节性，直接进行分析容易造成虚假回归和错误结论。

趋势性检验是发现数据中是否存在长期的、单向或者多项的变化趋势。直观的方法是画出时间序列图进行目测，但更客观的方法就是用统计检验。移动平均法可以平滑短期波动，使长期趋势更清楚地表现出来。Mann-Kendall 检验属于非参数统计方法，不需要对数据分布做出任何假设，可以有效地检测序列是否存在单调上升或者下降的趋势，被广泛地应用于水文、气象等领域的时序分析当中。

平稳性检验就是判断数据序列是否满足平稳条件。图检法，即观察自相关函数、偏自相关函数等图来初步判断。平稳序列的自相关系数很快会衰减到 0；非平稳序列的自相关系数衰减非常慢。更为精确的单位根检验中使用最广泛的是扩展迪基 - 福勒检验。检验原假设，序列存在单位根，是非平稳序列。当检验结果的 P 值小于显著性水平（比如 0.05）的时候，就可以拒绝原假设，认为序列是平稳的。若数据不是平稳的，一般需要使用差分、对数变换等方法将它转成平稳序列之后才能建模和预测分析。

二、路基变形数据的统计分析与滤波

经过预处理的路基变形数据进行统计分析、滤波，是发现路基变形数据内在

规律、提取真实变形信号的重要步骤。本过程的主要目的就是用时域统计来描述数据的宏观特征，用先进的滤波算法去除噪声干扰，从而准确地追踪变形状态动态变化的过程，给公路稳定性评价和早期预警提供高质量的数据基础。

（一）监测数据的时域特征统计分析

时域特征统计分析就是对路基变形监测数据在时间维度上的分布情况、离散程度和变化规律进行量化描述，用一系列统计指标来完成。该方法直观易行、计算简单，能快速得到对变形过程稳定性宏观认识的结论，是数据探索性分析的重要部分。

通过对监测数据集的统计计算，可获得多个关键的时域特征指标，具体指标及其意义可见下表：

时域特征统计指标及其意义表

指标	描述	意义
均值	数据在观测周期内的平均水平	反映变形总体位置的 中心趋势 ；受异常值影响较大。
中位数	数据集中间的数值	反映变形总体位置的 中心趋势 ；对异常值不敏感。
方差	数据点相对于均值的离散程度	量化数据波动性；方差较大可能表明路基不稳定。
标准差	方差的平方根	与方差类似，更直观地表示数据的波动幅度。
偏度	数据分布的对称性	正偏态表示右侧有长尾，存在较多大变形值；负偏态则相反。
峰度	数据分布的尖锐程度及尾部厚薄	高峰度表示数据更集中于均值，尾部更重，极端变形值可能性增大。

结合分析这些统计量就可以多方面掌握路基变形的情况，对路基稳定状态进行判断，评价变化的波及范围是否在可以接受的限度内，并识别有无向某一方向加速变形的趋势。为后面复杂模型的分析打下了基础。

（二）卡尔曼滤波算法在变形监测中的应用

卡尔曼滤波是一种高效的递归估计算法，可以在含有噪声的测量数据中给出动态系统状态的最佳估计，因此被广泛地应用在公路路基变形监测上。核心思想就是利用系统动态模型来预测下个时刻的状态，再用当前的测量值对预测进行修正，得到更接近真实值的系统状态估计。因此它非常适合于处理实时连续的变形监测数据。

该算法的执行过程主要有两步：预测和更新。预测阶段用上一步的状态估计和系统动力学方程来预测当前状态。动态模型一般根据研究对象的物理运动规律或者时间序列模型来建立。算法还会预测当前状态的不确定性，也就是误差协方差。

更新步骤中当新的测量数据到达的时候，算法就计算预测值和测量值之间的残差。之后用卡尔曼增益这个权值因子修正预测状态。卡尔曼增益的确定是该算法的关键，它把预测误差和测量误差的不确定性综合起来，给更可信的信息更大的权重。测量噪声小、测量值可信度高时，更新后的状态更接近于测量值；测量噪声大、测量值不可信时，更新后的状态更接近于预测值。

经过这种预测、更新的循环，卡尔曼滤波就能很好地剔除测量噪声，实时掌握路基细微的变形走向，给予状态估计的置信区间。即使在数据缺失或者测量精度不高的时候，它也能产生比较平滑、可靠的变形序列，给公路边坡、路基沉降等变形过程的动态分析和早期预警提供强有力的技术支持。

（三）小波分析在去噪与信号提取中的作用

小波分析属于一种先进的信号处理方法，它具备良好的时频局部化特性，因此，在处理非平稳的公路地质监测信号时具有明显的优势。小波变换不同于傅里叶变换，不仅可以对信号进行时频分析，在时域、频域上揭示信号特征，而且可以利用尺度缩放和平移变换来对信号做多分辨率分析，就如同用数学显微镜放大或者缩小信号细节一样。因此它非常适合用来分离变形数据中的噪声和真实的变形信号。

小波去噪的基本原理就是，信号的有效信息大多包含在少数几个幅值大的小波系数里，噪声能量则散落在许多幅值小的小波系数里。去噪一般包括三步：选择合适的小波基函数（Daubechies 小波、Morlet 小波等），确定分解层数，对含噪信号做小波分解，从而得到不同尺度的小波系数。将分解出的高频系数做阈值处理。根据预设的阈值，把小于该阈值的小波系数当作噪声，置为 0，同时保留或者收缩大于该阈值的小波系数。阈值处理有硬阈值、软阈值两种方式，合适的阈值函数和阈值对去噪效果起到决定性的作用。利用经过阈值处理的小波系数做小波逆变换，就可以得到去噪后的信号。小波分析通过这样的方式，既可以很好地去除随机噪声，又可以最大程度上保留信号中的突变点和趋势项，给提取路基真实变形规律提供可靠的技术手段。

三、检测结果的可靠性验证与反演分析

数据处理与滤波之后，必须对检测结果的可靠性做严格的检验，用高质量的数据进行深层次的反演分析。本阶段的主要任务为：用多源数据对比提高结果可信度；利用反演技术推测介质的物理力学参数；对整个检测与预警结论的置信度做定量评价，最终形成完整的、闭环的数据分析和决策流程。

（一）多源检测数据的一致性检验方法

现代公路地质安全监测一般会布置 GPS、测斜仪、应变计、光纤光栅等多种类型的传感器对同一个监测对象进行同步观测，从而形成多源信息格局。多源检测数据一致性检验，就是对比分析这些来自不同渠道的数据，判断其是否协调一致，有无矛盾之处，从而提高监测结果整体可靠性，及时发现个别传感器故障或者异常。

一致性检验中最基本的方法就是相关性分析，用相关系数来判断不同的监测序列变化趋势是否一致。路基沉降数据和深层土体竖向位移数据理论上应该有较强的正相关性。相关性较低说明某个传感器出现故障，或者该监测点的地质反应有特殊之处。

假设检验的方法更加严格。利用 t 检验或者 F 检验来判断两组或多组监测数据之间是否存在统计学上的显著性差异。当不同传感器测量同一个物理量的时候，在扣除各自系统误差之后，理论上不应该存在显著的差别。交叉验证技术也被广泛应用，即用一种数据源的预测模型去拟合另一种数据源的数据，再用拟合残差来衡量两个数据源的符合程度。利用多源数据融合分析，采用加权平均法、卡尔曼滤波融合等办法可以有效提高最终的估计精度；融合过程中产生的不一致性指标可以作为评价数据质量的重要依据。

（二）基于检测数据的岩土参数反演分析

岩土参数反演分析把现场获取的高质量监测数据（位移、应变等）与不能直接测量的岩土体物理力学参数联系起来，成为连接两者之间的桥梁。这些参数是进行公路地质结构稳定性分析、数值模拟、灾害预测的基础。反演得到的参数比单纯依靠室内试验或者经验取值更接近工程实际，更能真实地反映岩土体的原位特性。

反演分析本质上是一个优化问题，它的目标是找到一组岩土参数，使得用这组参数计算出来的理论变形值和现场监测值之间的误差最小。一般要用数值计算

模型和智能优化算法相结合的方式。

1. 正演模型的建立，首先要建立一个能描述岩土体变形行为的力学模型，常用的方法有有限元法和有限差分法。此模型可以依据岩土体自身的弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角等参数，在给定的荷载和边界条件下，对监测点的变形响应进行模拟。

2. 由于岩土参数和变形之间存在着复杂的非线性关系，所以必须使用高效的全局优化算法来找到最优的参数组合。遗传算法、粒子群优化、模拟退火等智能算法由于具有很强的全局搜索能力，并且不容易陷入局部最优，因此在参数反演中得到了广泛的应用。算法经过多次迭代运算后，就可以得到一组新的参数，然后用数值模拟的方法模拟出相应的变形响应。直到数值模拟的结果和实际监测数据相吻合为止。

通过岩土参数反演一方面可以加深对场地地质力学特性的认识，另一方面也能给公路工程的设计优化、施工控制和长期稳定性评价提供更加准确可靠的计算依据。

（三）检测结果的置信度评估

检测结果的置信度评价，是对公路地质安全状态分析、预警结论可靠性的一种量化度量，也是整个监测预警流程中不可缺少的最后一步。它回答结论的可信度问题，给决策者在面对预警和工程干预时提供科学的风险参考。置信度评价不是单一的数值，是包含数据采集、处理、模型预测全过程的一个综合评价体系。

评估的第一个基础就是数据不确定性分析。数据预处理、滤波阶段各种误差（系统误差、偶然误差）的量化结果直接影响最终结果的精度。卡尔曼滤波里，输出的状态误差协方差矩阵直接给出了估计状态的置信区间。参数反演时，不仅可以得到参数的最佳解，还可以得到参数估计值的置信区间，即数据噪声和模型不确定性引起的参数识别精度变化。

预警模型中的置信度评估就是对预测结果概率的表述。预警系统不应该只给出会滑坡的结论，而应该给出概率性的预测，比如在未来 24 小时内，滑坡发生的概率为 75%。评估可以采用贝叶斯理论、蒙特卡洛模拟等方法。通过抽样岩土参数、水文条件等输入参数的不确定性分布，并进行大量的模型计算，最终得到预测结果（失稳概率、变形量）的概率分布，从而确定预警结论的置信度。此种概率分析方式可令公路管理部门依据不同的风险等级、置信程度来制订出更加合理且经济有效的方法方案和整治措施。

第五章 隧道地质安全检测技术

隧道工程作为现代公路交通网的重要组成，它的地质安全是工程的生命线。本章对隧道施工及运营中的地质安全检测技术进行了详细的讨论，对围岩质量评价、灾害预警等主要方法作了系统的阐述。这些技术的使用目的就是准确掌握隧道所处地质环境的复杂性、不确定性，为设计优化、施工安全、长期稳定运营提供科学依据，是保证生命财产安全、工程可持续性的重要技术支撑。

第一节 隧道围岩质量评价

准确评价隧道围岩质量是隧道工程地质工作的主要内容，在勘察、设计、施工、维护等各个阶段都会用到。围岩质量直接关系到隧道稳定、施工方法选择、支护结构设计，是保证工程安全、控制建造成本的前提。本节主要介绍了围岩物理力学参数的获取方法、用波速评价完整性的方法和工程中常采用分级标准。

一、围岩物理力学参数原位测试技术

原位测试技术就是指在岩体天然存在的情况下，直接或者间接测量其物理力学性质的方法。该技术可以最大程度地反映岩体在原始应力场、结构面和地下水环境下的真实工程特性，给围岩质量评价提供最直接、最可靠的基础数据，有效地弥补了室内试验不能完全模拟现场复杂条件的不足。

（一）钻孔岩芯 RQD 值统计与描述

岩石质量指标是评价岩体质量的一个重要的定量指标。该指标是由迪尔于 1964 年提出的，至今仍在全世界范围内被广泛使用。RQD 的基本思想就是用钻探获得的岩芯完整度来间接反映岩体的破碎程度，即钻孔中长度大于等于 10cm 的完整岩芯段累计长度占总钻进长度的百分比。它用百分数形式简要地表现出了节理、裂隙的发育状况以及岩石的完整性。

现场操作中，RQD 值统计必须严格按照规定进行。岩芯取出后要仔细清洗

整理,按原来的顺序装入岩芯箱。接着测量每段岩芯的长度。统计时只计算长度大于 10 厘米的天然、完整的岩芯段,由于钻探技术或者操作不当造成的人为断裂不计算在内。将所有符合条件的岩芯段长度相加,再除以该钻进回次的长度,就得到该区段的 RQD 值。在 3 米长的钻进回次中,如果得到的长度大于 10 厘米的岩芯累计长度为 2.1 米,则该段的 RQD 值为 70%。

RQD 值可以用来对岩体质量做初步的量化分级。一般认为 RQD 值大于 90% 的岩体质量最好、完整性最高;75% 到 90% 之间为好;50% 到 75% 之间为一般;25% 到 50% 之间为差;小于 25% 的为极差的破碎岩体。尽管此指标简单明了,但是它对于裂隙的方位、开合度和填充物不敏感,在 RQD 值较低的地方,微小的变化不容易引起指标数值的显著变化。因此,在实际工程评价中,RQD 值一般要与地质参数、测试方法结合起来使用才能获得更全面的认识。

(二) 岩体点荷载强度试验与换算

岩体点荷载强度试验是岩石强度快速、简单、经济的现场检测方法。对不规则的岩块或者岩芯施加集中点荷载,直到劈裂破坏为止,来测定岩石的点荷载强度指数,进而间接估算岩石的单轴抗压强度。由于试验设备轻便、操作简便、对试件形状无要求,故而成为隧道施工现场快速判断岩石强度的有效工具。

试验的关键之处在于计算点荷载强度指数 I_s ,该指数是经过尺寸修正后的标准值,目的是消除试件尺寸效应对测试结果的影响。将岩块或岩芯试件夹在仪器的上下两个锥形压头之间,以一定的速率均匀施加荷载,直到试件破坏为止,记录下破坏时的荷载值 P 。用公式 $I_s = P / D_e^2$ 来求未校正的点荷载指数, D_e 为等效直径。用尺寸修正图或者公式把其转换成直径为 50mm 的标准试件对应的点荷载强度指数 I_s 。标准化的过程保证不同尺寸、形状的试件测试结果具有可比性。通过大量的试验数据对比可以得到点荷载强度指数 I_s 与岩石单轴抗压强度的经验关系式,即 $UCS = K \times I_s$ 。换算系数 K 不是固定不变的,它和岩石种类、风化程度等有关,一般取值范围为 20 ~ 25。点荷载试验属于间接测试法,其结果存在一定的散度,但是由于其高效便捷,在隧道勘察及施工阶段为快速判断岩石强度、初步划分围岩等级提供了重要的参考依据。

(三) 岩体弹性波波速测试方法

岩体弹性波波速测试是地球物理勘探技术的一种,用弹性波(主要是纵波 P 波和横波 S 波)在岩体介质中的传播速度来评价岩体的完整性、均匀性、风化程

度，并估算岩体的力学参数。弹性波在结构完整、质地密实的岩体中传播速度快，如果岩体中含有大量裂隙、破碎带或软弱夹层，它就会变慢。

在隧道工程中，常用的弹性波测试方法主要包括以下几种：

1. 单孔法声波测井，即在同一个钻孔内移动声波发射探头和接收探头，连续测量钻孔周围岩体的波速。可以给出钻孔深度上的连续波速剖面，准确找到软弱夹层、断裂带、岩性变化界面的位置。

2. 跨孔法声波 CT：在隧道开挖轮廓线附近或前方布置两个或更多的钻孔，一个孔中激发弹性波，其他孔中接收。对大量波传播路径、时间数据进行处理，就可以像医学 CT 扫描那样，重构出两孔之间岩体的波速分布图像，直接反映围岩内地质构造的形态、规模。

3. 隧道地震超前预报：在隧道掌子面附近布置检波器，人工激发，用反射波法探测开挖面前方一定范围内的地质异常体。可以提前发现断层、溶洞、含水带等不良地质体，给施工决策提供预警信息。

这些测试方法得到的波速数据可以用来评价围岩的动态特性。利用波速和岩体完整性指数、动弹性模量等参数之间的经验关系，可以对围岩质量做定量评价并做动态监测。波速测试具有探测范围广、信息量大、无损检测等优点，已经成为现代隧道地质安全检测体系中不可缺少的技术手段。

二、基于波速测试的围岩完整性评价

弹性波波速可以反映岩体的物理性质，也和岩体完整性有内在联系。用这个关系可以对围岩整体质量做宏观评价。克服了单点、单线等局限性，可以得到区域性的、更加全面的围岩结构信息，对围岩分级和支护设计有重要的实践意义。

（一）围岩弹性波速与岩体完整性的关系

围岩的弹性波波速同完整性之间存在直接的、明确的关系。从理论上讲，弹性波在介质中传播的速度是由介质的弹性性质和密度决定的。对于岩石来说，在完全完整、没有裂隙的情况下，其波速（即岩块波速 V_{pr} ）就是该岩石材料所能达到的最大波速。但是天然岩体中普遍存在各种尺度的不连续面，即节理、裂隙、层面、断层等。结构面作为物理断开，使岩体整体结构发生明显变化。

当弹性波在岩体中传播时，遇到不连续面就会发生绕射、反射、透射现象，使传播路径变长、能量衰减，因此在岩体中测得的波速（即岩体波速 V_{pm} ）明

显小于相同岩性的完整岩块波速。岩体中裂隙越发育、越密集，开度越大，填充物越软弱，岩体的波速降低得也就越大。所以岩体波速与岩块波速之比或者岩体波速的绝对值，都是评价岩体完整性的极好指标。这是利用地球物理方法评价围岩质量的理论基础，使我们用非接触、无损的方式快速透视围岩内部结构状态。

（二）波速测试在围岩分级中的应用

因为波速试验能客观、定量地反映围岩的完整性，在现代隧道工程中围岩分级越来越依靠波速试验。传统的围岩分级大多依靠地质人员现场观察和经验判断，直观但主观性很强。波速测试给围岩分级提供了一个可以重复、可以量化的数据支持，使得围岩分级更科学、更准确。

现场试验或者查阅相关资料确定主要岩性的完整岩块波速 V_{pr} 作为参考基准。然后用单孔、跨孔或地震映像等方式，对隧道影响范围内的岩体波速 V_{pm} 进行大范围测量。根据得到的 V_{pm} 数据可以绘制出隧道轴线或某个断面上的波速分布图。这些图件可以清楚地表现出围岩内部结构的变化，准确地圈定出低速异常区，低速异常区一般对应断层破碎带、节理密集区或者强风化带等不稳定地段。工程实践中通常直接把波速值范围和围岩等级相对应。根据波速的不同可以将围岩分成 II、III、IV、V 等不同的等级。此法适合地质勘察阶段初步划分，也可以在施工阶段进行动态检验，可以较快、宏观地把握围岩质量的总体分布规律，为设计方案的制定和修改提供及时可靠的依据，从而实现支护参数的动态优化。

（三）岩体完整性指数的计算与评价

为了定量地来评价岩体的完整程度，工程界提出了一个岩体完整性指数 K_v 。它是岩体纵波速度 V_{pm} 与相同岩性完整岩块纵波速度 V_{pr} 的比值的平方，即 $K_v = (V_{pm}/V_{pr})^2$ 。该指数把现场测得的岩体波速同理想状态下岩块波速相比较，消除了岩性本身对波速的影响，能较好地反映由于结构面存在而引起的岩体质量劣化程度。

计算 K_v 值的关键就是准确得到 V_{pm} 、 V_{pr} 这两个参数。 V_{pm} 是隧道现场用各种原位声波或者地震波测试得到的，代表岩体的宏观波速。 V_{pr} 一般用现场钻孔取得的完整、新鲜岩芯在室内进行超声波试验来确定，代表岩石材料本身的波速。将这两个值代入公式，就可以得到该位置的岩体完整性指数 K_v 。 K_v 值介于 0 到 1 之间， K_v 越接近于 1 说明岩体越完整、裂隙越不发育； K_v 越接近于 0 说明岩体越破碎、结构完整性越差。根据工程岩体分级标准（GB/T50218），按照

K_v 值把岩体完整程度分为 5 级，如下表所示。

岩体完整性指数 K_v 分级表

K _v 值范围	完整程度描述
$K_v > 0.75$	完整
$0.55 < K_v \leq 0.75$	较完整
$0.35 < K_v \leq 0.55$	较破碎
$0.15 < K_v \leq 0.35$	破碎
$K_v \leq 0.15$	极破碎

从上表可以看出，量化指标已经成为中国现行公路隧道围岩分级标准(BQ法)中的一个主要参数，给工程设计提供了重要的定量输入。

三、围岩分级标准与现场快速判定方法

在隧道工程实践中，建立一套科学合理、操作性强的围岩分级标准及判定方法，就是将地质认识与工程设计连接起来的桥梁。该体系既要依靠严密的定量计算来支撑，又要结合现场地质人员快速准确的定性判断能力，来适应隧道施工动态多变的特点，保证支护措施的针对性和时效性。

(一) 公路隧道围岩分级标准计算公式

中国现行的公路隧道设计规范使用的是以围岩基本质量指标为基础的围岩分级法。BQ法是考虑岩石坚硬程度和岩体完整程度的定量分级体系，主要是根据BQ值的大小。该方法利用经验公式把两个能代表围岩工程性质的重要参数，即岩石饱和单轴抗压强度R和岩体完整性指数K_v，结合起来。

BQ值的标准计算公式为 $BQ=100+3R+250K_v$ 。R是岩石强度，单位兆帕，表示组成岩体的岩块本身的坚硬程度；K_v就是前面所提到的岩体完整性指数，反映了岩体中结构面的发育情况，即岩体骨架的完整程度。公式中系数(3, 250)是根据大量的工程实践、统计分析得到的权重，说明岩石强度、岩体完整性对围岩总体质量影响程度的不同。

根据计算出的BQ值来判定围岩的级别。规范把围岩分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ级，由优到劣。当BQ值大于550时，为Ⅱ级围岩；介于450和550之间的为Ⅲ级；300到450之间的为Ⅳ级；小于300的为Ⅴ级或者更差的围岩。BQ法把复杂的地质问题转化为可以计算的工程指标，为隧道支护设计提供标准的定量依

据。减少评价过程中主观随意性,提高不同工程围岩分级结果的可比性,是现代隧道设计中不可缺少的基础环节。

(二) 现场地质调查与定性分级方法

尽管定量分级方法(BQ法等)提供了科学的框架,但是在瞬息万变的隧道施工现场,依靠经验丰富的工程地质人员进行快速的定性或者半定量分级,依然具有不可替代的作用。该方法就是对隧道开挖过程中暴露出的地质现象进行系统的、细致的观察、描述、综合分析,从而对围岩稳定状态做出即时的判断。

现场地质调查的重点内容涵盖多个方面:

1. 岩性及风化,判别岩石种类、矿物成分、结构构造及风化程度。新鲜坚硬的岩石和强风化成土状的岩体,稳定性相差很大。

2. 结构面特征:这是定性分级的主要内容。对节理、裂隙、断层等结构面的产状(走向、倾向、倾角)、间距、延伸长度、开合度、粗糙度、有无填充物及填充物性质进行详细的描述。多组优势结构面组合切割时,围岩出现失稳模式的可能性就会增大。

3. 地下水状况,观察并记录围岩含水情况,干燥、潮湿、有滴水、淋水或涌水。地下水会明显降低岩体的强度,增大围岩压力。

4. 岩体结构:根据结构面的切割组合来判断岩体是整体块状、层状、碎裂还是散体结构。

根据上述观察信息,结合敲击掌子面的声音(坚硬岩体声脆,破碎岩体声沉)、钻孔难易程度、掉块等辅助手段,地质工程师可以参照工程岩体分级标准中的定性描述表,或者根据自己的经验快速地将掌子面围岩划分到大致的级别里。快速判定法是施工地质工作的核心,为及时改变开挖工法及初期支护参数提供了一手资料,对保证施工安全具有重要的作用。

(三) 施工阶段围岩亚级分级细化技术

即使同一条隧道中的主级别围岩地质情况,也会存在较大的局部变化。为了使支护设计更加精细,防止“一刀切”造成的浪费或者安全隐患,在施工阶段采用围岩亚级分级技术。该技术的核心思想是在公路隧道设计规范规定的主级别(Ⅳ级、Ⅴ级)的基础上,根据围岩条件的好坏再进行细分,将Ⅳ级围岩细分为Ⅳa、Ⅳb或者Ⅳ₁、Ⅳ₂等。

亚级分级更具体、更动态,它同施工现场实时信息反馈联系在一起。分级过

程将超前地质预报(TSP、地质雷达)、监控量测数据(围岩收敛、拱顶下沉速率)、掌子面更详细的地质编录综合起来。同样的Ⅳ级围岩,如果监控量测发现变形速率较快,掌子面节理密集,有滴水现象,则可以将该围岩划分为Ⅳb级(较差的Ⅳ级),这时就需要加强初期支护,加密钢拱架,加大喷射混凝土厚度。相反,如果围岩稳定、变形收敛快,则可定为Ⅳa级(较好的Ⅳ级),支护参数可以放宽。用现场反馈为基础的动态分级、设计调整机制,实现了信息化施工的理念,使支护措施最大限度地适应实际地质条件,极大提高了施工的安全性,也带来了可观的经济效益,是现代隧道施工管理精细化的体现。

第二节 支护结构监测技术

公路地质安全预警体系当中,对于隧道等地下工程的支护结构实施实时监测属于关键部分。这项工作对支护构件受力、变形数据进行系统的测量和分析,可以直观地反映围岩与支护体系的相互作用情况,给施工安全、结构长期稳定提供科学依据。

一、锚杆轴力与喷射混凝土应力监测

锚杆和喷射混凝土一起构成初期支护。对它们进行实时监测,可以了解围岩压力分布规律和支护体系实际承载情况,对施工指导、支护设计参数优化、预防失稳破坏起着非常重要的作用。

(一) 锚杆测力计的安装与轴力计算

锚杆是把不稳定岩体和深部稳定岩体紧密连接起来的重要构件,锚杆轴力大小直接反映锚杆承载情况和围岩变形趋势。锚杆测力计是用来测量该关键参数的专用传感器,常见的有振弦式、电阻应变式等。安装过程必须严格按照规范进行,保证数据的准确性、可靠性。安装时一般将标定校准过的测力计套在需要测量轴力的锚杆部位,多位于杆体外露端,放置于垫板和螺母之间。通过施加预紧力或者围岩变形带动,测力计将受压工作。若要了解杆体内轴力的分布情况,就需要用特殊测力锚杆,在杆体内串联安装若干个微型测力计。

安装锚杆测力计时,必须保证锚杆垫板平整,否则安装面不平会造成测力计局部受力不均而损坏或者产生测量误差。安装时,应使测力计中心与锚杆轴线重

合，均匀拧紧张拉螺母，使测力计受力均匀。连接测力计的电缆要妥善保护，施工中不得被机械损伤、受潮，所有的接头均需做防水绝缘处理。在整个监测周期内要定期检查测力计的工作状态，保证测力计的持续有效。

锚杆轴力的计算，是以测力计输出的物理量（频率、电阻等）以及事先标定的力学转换关系为基础。振弦式测力计的轴力计算公式一般可写成 $P=k(f_i^2-f_0^2)+b(T_i-T_0)$ ，式中 P 为锚杆轴力， k 为标定系数， f_i 为实时测量频率， f_0 为初始频率， b 为温度修正系数， T_i 和 T_0 分别为实时温度和初始温度。根据该公式可以将现场测量得到的频率、温度等数据转换成锚杆所受的拉力大小，从而达到对锚杆工作状况的在线跟踪与评价的目的。

（二）喷射混凝土应变计的埋设工艺

监测喷射混凝土内部应力状况，对支护结构整体安全性的评价起着非常重要的作用。混凝土应变计（或称钢筋计）属于此类监测的主要传感器，一般采用振弦式或者光纤光栅式，可以长期稳定地测量混凝土内部的应变。其埋设工艺好坏直接影响监测数据质量。埋设前需要按照设计要求在拱顶、拱肩、边墙等关键位置准确地定位测点。

应变计的埋设一般和钢筋网布设同时进行。将应变计牢固地绑扎在钢筋上，测量轴线与主要受力方向一致或符合设计要求。绑扎时一定要保护好应变计本体及其引出电缆，切勿损坏。为保证应变计能真实地反映混凝土的应变，应变计周围应有足够的混凝土包围，不能直接接触钢筋网的交叉点或者大骨料，以免应力集中现象影响测量结果。埋设时详细记录每一个应变计的编号、准确位置、埋设姿态和初始读数，绘制详细的测点布置图，作为后期数据分析的依据。电缆线沿结构表面或预埋管道引出，做好保护，防止喷射混凝土作业时被冲断或损坏。

（三）支护结构受力随开挖步的变化规律

隧道开挖打乱了岩体原有的三向应力平衡，导致围岩应力重新分布，这就是支护结构产生内力的根本原因。支护结构的受力状态不是固定不变的，它会随着开挖工序的进行发生阶段性的动态变化。从开挖、初期支护到二次衬砌，整个过程就是一种力学响应的过程。

掌子面开挖以后，围岩应力会迅速释放，径向位移急剧增大。这时初期支护开始承受并逐渐增大荷载。随着掌子面不断推进，测点后方围岩变形持续增大，但是其速率逐渐减小，同时支护结构承受的压力也越来越大。该阶段就是支护结

构受力的增长期。当围岩变形基本稳定以后，初期支护的受力也会趋于一个相对稳定的状态，表明围岩与支护结构之间已经形成一个新的力学平衡。若之后再施作二次衬砌，初期支护的部分荷载就会转移到二次衬砌结构上，其应力可能会下降或者保持不变。变化过程清楚地表现出应力释放、荷载传递、最终平衡这样一个完整的链条。对这一规律的监测，一方面可以判断围岩的稳定性，另一方面也可以确定合理的支护施作时机和二衬跟进距离。

二、钢拱架受力量测与围岩压力分析

钢拱架是初期支护的骨架，其受力情况决定着支护体系的承载能力及稳定状况。精确测量钢拱架应力，结合围岩压力数据，可以全面认识围岩与支护相互作用机理，有效评价支护设计的合理性、安全性。

（一）钢架表面应变计焊接与读数

测量钢拱架受力状况最直接有效的方法，就是在钢拱架表面沿内外弧焊接应变计，测量钢材的应变来推算内力。常用的应变计有振弦式点焊应变计、电阻式应变片。焊接工艺对于测量精度来说十分重要，必须严格控制。焊接前，需要将钢拱架表面的锈迹、油污、氧化层彻底清除干净，露出金属光泽，为应变计提供平整、清洁的安装基座。

焊接时应使用专用点焊设备，将应变计两个基座快速、牢固地焊接在指定位置。焊接能量、时间的控制十分重要，既要保证焊接强度，又不能因为热量过大而损坏传感器或者改变钢材的物理性质。焊接完成后对应变计进行防水、防潮、防机械损伤保护，一般用环氧树脂或专用防护罩进行覆盖。读数是由数据采集仪自动完成的。采集仪可以自动采集频率、电阻等原始数据，根据内置的计算公式实时显示应变或者应力值。

（二）围岩与初期支护接触压力盒的布设

围岩压力就是支护结构设计的最根本的荷载。直接测量围岩与初期支护接触压力，是判断设计是否合理、分析围岩与支护相互作用机理的重要方法。这项工作通过在两者之间埋设专门设计的土压力盒或接触式压力传感器来完成。压力盒的布设位置和数量要根据地质条件、开挖断面形状、受力情况等综合确定。具体的布设原则，见围岩与初期支护接触压力盒布设原则表。

围岩与初期支护接触压力盒布设原则表

原则	描述
代表性位置	测点应设在最能反映围岩压力特征的部位（拱顶、拱肩、边墙、仰拱等），在地质变化剧烈或存在偏压的地方应适当加密。
法向安装	压力盒受力面需与接触面的切线方向垂直，即沿径向安装，以测量法向接触压力。在喷射混凝土初凝前，压力盒须紧贴开挖岩面并保持稳定。
群组布设	为保证压力分布完整性，通常采用断面形式进行群组布设，即一个断面上沿轮廓线布置多个压力盒，形成完整的压力监测环。为研究压力纵向变化，在隧道沿线设若干监测断面。

埋设好压力盒后，其引出的电缆应做好保护工作并接入数据采集系统。经过长时间观测，可以得到接触压力随时间、空间变化的全部数据，为分析围岩松动范围、压力分布形态、随时间发展规律等提供第一手资料。

（三）钢拱架受力安全系数评估

对钢拱架受力状态实施安全评定，属于判定支护结构安全储备的重要环节。评估的核心就是计算钢拱架在实测荷载下的安全系数。需要通过表面应变计测得的数据来计算出钢拱架关键截面实际应力。截面应力由内外弧应变值及钢材弹性模量计算得出，从而求出截面上最大拉应力和最大压应力。

安全系数一般用强度理论来评定。将钢材的屈服强度或者抗拉、抗压强度设计值作为其极限承载能力，然后除以通过监测数据计算出的最大工作应力，所得比值即为安全系数。受压为主的拱架安全系数 $K = \sigma_y / \sigma_{\max}$ ，式中 σ_y 为钢材的屈服强度， $\sigma_{\max}$ 为实测的最大压应力。规范一般都会根据不同的工况规定最低安全系数，要求施工期间安全系数不小于某个数值。将计算出的安全系数同规范值相比较，即可判断钢拱架受力状态是否处于安全范围内，是否存在超载风险，从而给是否需要加强支护或者调整施工方案提供决策依据。

三、支护结构变形监控量测技术

支护结构变形是围岩和支护共同作用下最直接的外部表现。对其变形量、变形速率及发展变化趋势做系统的监测，是评价围岩稳定、预测塌方等灾害、指导后续工序施工的关键技术手段。

（一）周边收敛位移的测量方法与频率

周边收敛位移是隧道开挖后，洞壁上相对的两个或者多个测点之间距离的变

化量。这是监控测量中最基本、最重要的项目之一。测量方法有传统的收敛计、钢尺测量,也有现代的全站仪、三维激光扫描技术,精度和效率越来越高。传统方法是在隧道断面两侧边墙、拱肩等位置预埋测钉,用收敛计或者精密钢尺测量测点间距离的变化。此法虽然简便,但是精度受人为因素影响较大,在洞内作业存在一定的安全隐患。

现代一般采用高精度全站仪配用反射片做非接触测量。在隧道内设置稳定的观测站,用坐标法精确测量各收敛测点的三维坐标,从而得出测线长度变化。特点是精度高、速度快,不会对洞内施工造成影响。测量频率属于变形监控的重要一环。在开挖面附近,围岩变形剧烈,要进行高频率观测,一般为每天1~2次。随着测点到开挖面的距离变大,变形的速度就会逐渐减慢,这时观测频率可以适当降低,每隔两天观测一次,一周观测一次,直到变形基本稳定为止。当监测数据中变形速率突然增大或者出现异常波动的时候,应该立刻增加观测频率,分析原因,并及时发出预警。

（二）拱顶下沉观测的基准点设置

拱顶下沉是反映隧道垂直方向变形的指标。观测精度很大程度上受基准点的稳定性所影响。基准点是高程测量体系中所有测量的起点,其绝对稳定性是保证拱顶下沉监测数据准确可靠的前提。因此,基准点的设置必须非常慎重,并要符合严格的技术要求。基准点应设在隧道开挖影响范围之外的稳定区域,远离施工振动源、交通干道、地质不稳定地段。

基准点分为洞外基准点和洞内基准点。洞外基准点至少应设两个,埋深要达到稳定的基岩或不受季节性冻融、干湿循环影响的土层。并用混凝土等材料制作永久标石进行保护,形成可靠的基准网。洞内基准点(又称工作基点),即直接用于日常观测的传递点,应设置在隧道内结构稳定、施工干扰小的侧墙上或地面上。所有的基准点都必须进行联测,并且要定期复核它的稳定性。发现某个基准点有位移时,必须立即停止使用,查明原因,必要时重建,保证整个监测高程系统的一致性、准确性。

（三）变形速率与变形管理等级的判定

变形速率指的是单位时间内变形的增量,是判定围岩以及支护结构稳定状况的重要动态指标,其重要性比变形累计值还要高。变形管理是在综合分析变形速率、累计变形量的基础上,根据隧道稳定状况将隧道的稳定状况分为不同的管理

等级，对不同的管理等级采取相应的施工措施，实现信息化施工、动态管理。不同的管理等级以及应对措施，见下表。

变形管理等级划分表

等级	描述	变形速率 示例	累计变形量 示例	应对措施
I 级 (正常状态)	实测变形速率和累计变形量远小于控制基准值，围岩与支护结构稳定。	< 每日 1-2 毫米	远小于控制基准值	施工按原计划进行。
II 级 (注意状态)	变形速率持续增大，或累计变形量达到控制基准值 1/3-2/3。	持续增大	1/3-2/3 控制基准值	增加观测频率，加强巡视，分析原因，做好加强支护准备。
III 级 (警戒状态)	变形速率迅速增大，或累计变形量达到或接近控制基准值。	> 每日 5 毫米	达到或接近控制基准值	立即停止掌子面开挖，分析原因，迅速采取加强支护、改变施工方法等措施。
IV 级 (危险状态)	变形加速，支护结构出现开裂、掉块等破坏征兆。	持续加速	持续增大	立即撤离人员设备，封禁危险区，组织专家研讨抢险救援方案。

这套分级管理体系把复杂的变形数据转化成可以直接指导施工的指令，大大提高了公路地质灾害预警的科学性、及时性。

第三节 地下水渗漏检测

一、隧道涌水量观测与水质分析方法

对隧道涌水量、水质的长期观测和分析，是评价隧道排水系统工作状况、预测围岩稳定性变化、评价结构耐久性的基础。掌握涌水的来源、路径、成分，有利于从根源上设计科学的防排水和结构维护方案，从而保证公路隧道的安全稳定长久运行。

(一) 隧道涌水点的流量观测技术

隧道涌水点流量观测是掌握隧道整体及局部渗漏情况最直接的方法，核心是准确、连续地获得各个出水点的水量数据。常用的流量观测技术，根据测量原理、应用场合的不同可以分为许多种。

容积法属于传统方法，使用标准量具（量杯、水桶等）在出水点直接承接一段时间内的水量，然后换算成单位时间内的流量。此方法操作简便、设备成本低，适合于小流量、出水点分散的初期排查和定期复核，但是精度受人为操作影响大，不能实现连续自动监测。

堰槽法则是一种适合于大流量、集中出水的精度较高的测量技术。该方法在排水沟渠或者某处设置标准几何形状的堰口（三角堰、矩形堰等），测量堰上水头高度，用流体力学公式计算出相应的流量。堰槽法测量精度高，可适应较宽的流量变化范围，配合压力式或者超声波式水位计可以实现自动化、无人值守的连续监测，给分析涌水量与降雨、季节等外部因素的关系提供坚实的数据基础。对管道内涌水，还可以用流速仪法、电磁流量计等先进技术，通过测量水流速度或者利用电磁感应原理来确定流量。这些方法精度高、自动化程度高，是创建现代化隧道健康监测系统的重要组成。

各类涌水流量观测方法的特点，详见隧道涌水流量观测方法对比表。

隧道涌水流量观测方法对比表

方法	测量原理	适用流量	精度	自动化能力
容积法	直接承接与计时	小流量、分散出水点	受人为影响大，中等	低
堰槽法	堰上水头与流量关系	大流量、集中出水点	较高	可实现
流速仪法	测量水流速度	管道内涌水	高	较高
电磁流量计法	电磁感应	管道内涌水	很高	高

从上表可以看出，各种方法各有利弊。容积法虽然简便，但是只能做初步排查、小流量点的检测；堰槽法可以满足大流量的监测需求，并且易于实现自动化；而流速仪和电磁流量计属于高精度、高自动化的先进技术方向，是现代化隧道健康监测系统的重要组成部分。

（二）地下水水质分析与腐蚀性评价

地下水水质分析和腐蚀性评价属于隧道结构耐久性评价的重要组成。其主要目的就是研究地下水的化学组成、物理性质以及它对混凝土、钢筋等结构材料的腐蚀作用。水质分析一般是在选定的涌水点定期取水样，送到专业的实验室检测。检测项目主要有 pH 值、总硬度、溶解性总固体、氯离子、硫酸根离子、铵根离子、硝酸盐、亚硝酸盐等。这些指标可以反映地下水的酸碱度、盐分含量、侵蚀性离

子浓度。

水质分析结果是做腐蚀性评价的基础。腐蚀性评价按照铁路工程结构混凝土强度检测规程、地下水质量标准等有关行业标准,对各项水质指标进行综合评定。评价过程一般是把水样中离子的浓度与标准限值进行比较,以判定它对混凝土结构和钢筋的腐蚀等级。高浓度的硫酸根离子会和混凝土中水泥水化产物反应生成膨胀性物质,使混凝土开裂、剥落;氯离子会破坏钢筋表面的钝化膜,造成钢筋锈蚀,降低结构的承载力。

经过长时间的水质监测及腐蚀性评价,便可以掌握隧道所处水环境的侵蚀性动态变化,找到腐蚀风险比较高的地方。这既可给新隧道设计时选取材料、防护措施给予参照,又可指引旧隧道维修加固工作,比如采取耐腐蚀混凝土、加大保护层厚度、加涂防腐涂层等手段来减缓结构的劣化速度,保证隧道长久安全稳定。

(三) 涌水量随时间的变化趋势预测

预测隧道涌水量随时间变化的趋势,对评价隧道未来运营风险、优化排水系统设计、制定应急预案都十分重要。一般把地下水系统看成是复杂的动态系统,并用数学模型来揭示其内在规律。常用的预测方法有,时间序列分析法、回归分析法、人工智能非线性理论分析法等。

时间序列分析法属于常用的预测技术之一,它把历史涌水量观测数据当作一个随时间变化的序列,通过对序列本身的变化规律(趋势性、周期性、随机性)的分析来推断未来涌水量。灰色预测模型和自回归移动平均模型为使用最广泛的时间序列模型。该方法不需要对涌水产生复杂机理做深入的研究,只要利用历史数据就可以进行预测,具有建模简单、计算方便的优点。经过实例检验可知,该时间序列模型的预测精度较好。

回归分析法主要是建立涌水量和降雨量、水库水位、季节变化等一个或几个相关影响因素之间的定量关系。通过长期收集涌水量及有关因素的数据,用统计方法建立回归方程,从而达到外部条件变化时对涌水量的预测。BP神经网络模型等人工智能方法也被应用到涌水量预测当中,该类方法可以模拟复杂的非线性关系,处理多因素影响下的涌水预测问题,特别适合于水文地质条件复杂的岩溶隧道。综合使用各种预测方法并结合工程地质勘察资料进行互证,可以大大提高预测结果的准确性、可靠性。

二、衬砌背后空洞与富水区地质雷达检测

地质雷达属于一种高效、无损的地球物理探测手段，在公路隧道地质安全检测方面起着十分重要的作用。它依靠高频电磁波的发射与接收，可以快速、直观地表现出衬砌结构内部以及衬砌同围岩接触面的状态，给正确判定衬砌背后是否存在空洞、不密实区、富水异常区提供重要的依据。

（一）地质雷达在隧道衬砌检测中的测线布置

地质雷达检测效果和测线布置方式有关。科学合理的测线布置是获得隧道衬砌内部结构信息的先决条件。测线布置方案要按照检测目的、隧道断面形状、结构尺寸、预期病害种类等综合来确定。隧道衬砌质量普查时，一般采用纵向布线为主、环向布线为辅的方式。

纵向测线按隧道轴向布置，可以连续反映衬砌厚度、钢筋分布、背后接触面的变化。根据隧道断面尺寸，在拱顶、左右拱腰、左右边墙等重要部位分别设一条纵向测线。大跨度或者三车道的隧道，在拱顶处适当增加测线数量来提高覆盖率。网格化布置就是对隧道断面进行系统的扫描，保证不遗漏任何一个可能的缺陷区域。

纵向检测中发现疑似异常或者在重点关注区域（地质变化段、施工接缝处等）时要布置环向测线加密探测。环向测线垂直于隧道轴线布置，可以更详细地表现异常体的横向分布范围和几何形状。环向测线间距根据异常复杂程度来定，一般为5米到10米。野外时应记好测线位置、里程、天线频率和采样参数等数据，注意渗水点、电缆等电磁干扰源，保证数据的采集质量，为后期解译提供准确的数据。

（二）衬砌背后脱空区的雷达图像识别

衬砌背后脱空是隧道常见的工程缺陷，削弱了衬砌与围岩共同受力的作用，容易造成结构应力集中、渗漏水等现象，严重时危及隧道整体稳定性。地质雷达属于探测此类缺陷的有效无损检测方法，图像特征明显，给准确识别脱空区提供可靠的依据。脱空就是衬砌结构与初期支护或者围岩之间存在空气间隙，因为空气的介电常数远远小于混凝土、岩体，所以电磁波在混凝土-空气界面上会发生强烈的反射。

在处理后的地质雷达时间剖面图上，衬砌背后脱空区通常表现为以下典型

特征:

1. 强振幅反射弧: 脱空区顶界面上会形成振幅大、相位清楚的弧形或者双曲线绕射状反射同相轴, 清楚地勾勒出脱空区的顶面。

2. 多次波反射, 由于电磁波能量在脱空腔体内衰减很小, 会在顶、底两个界面之间发生往复反射, 形成一系列等时距或者近似等时距的多次反射波, 这是判断脱空存在的一个重要标志。

3. 空白显示区, 在强烈的顶界面反射之下, 大部分能量已经被反射, 穿透到脱空区下面的能量变得很弱, 因此多次波之间可能出现信号空白或者能量微弱的区域, 与周围密实区域的杂乱波形成对比。

通过分析这些雷达图像特征, 结合设计资料中给出的衬砌厚度数据, 检测人员就可以较准确地判断出衬砌后面有无脱空, 并大致估计出脱空的位置、大小和形状。对于疑似的大范围脱空区还需要用钻孔取芯等方式加以验证, 保证评价的准确性。

(三) 富水异常区的雷达波形特征

公路隧道穿越富水区属于工程建设和运营过程中的一个风险源, 准确地探测出富水异常区的位置及范围对于预防突水、涌泥等地质灾害意义重大。地质雷达探测技术依靠含水介质和干燥介质之间电性参数的明显差别, 能够较好地找到富水异常区。水的相对介电常数远大于大多数岩土介质, 当岩体或者衬砌背后有富水区时, 雷达波形就会出现特殊的响应。

富水异常区雷达波形特征上表现出电磁波传播速度、振幅衰减、波形形态发生变化。由于水的介电常数大, 电磁波在富水介质中传播速度变慢, 在雷达剖面图上表现为同相轴旅行时间变长、出现时间延迟、同相轴下凹。水的导电性使电磁波在传播过程中被迅速吸收和衰减, 所以来自富水区域界面或者其下方反射信号的振幅急剧下降甚至消失, 造成能量吸收的盲区。

富水破碎带或者充水裂隙的雷达图像一般会呈现出一组杂乱、不连续的反射波组合, 反射波能量大, 但是相位关系混乱, 不能追踪连续的同相轴。这是由于水体、破碎岩石是不均匀介质, 电磁波在其中多次散射、绕射所造成的。根据雷达波速度变化、振幅衰减、波形紊乱等特征, 结合工程地质资料, 可以对掌子面前方或者衬砌背后富水异常区做出有效的预报和圈定。

三、红外探测与渗漏水点定位技术

红外探测技术属于先进的无损检测手段，近些年在公路隧道渗漏水隐患排查及精确定位方面表现出特别的优势。检测隧道结构表面的微小温度差可以对隧道的渗漏区域进行快速、大范围的检测，给后续的维修整治提供直观、准确的指引，大大提高隧道养护工作的效率和准确性。

（一）红外热像仪探测渗漏水的物理基础

红外热像仪探测隧道渗漏水的物理基础，就是物体热辐射特性和水分蒸发致冷效应相结合。自然界中任何温度大于绝对零度的物体都会不断地向外辐射红外线，其辐射能的大小与物体表面温度成正比。红外热像仪用高灵敏度的探测器接收看不见的红外辐射，把红外辐射转换成用不同颜色或者灰度来表示温度高低的热图像。

隧道衬砌结构出现渗漏水现象时，渗漏区域表面温度一般会比周围干燥地方低。这是由于地下渗漏出来的水体温度一般比较稳定，且常低于隧道内受环境影响的衬砌表面温度；渗出到表面的水分会蒸发，蒸发过程是一个吸热的过程，会带走衬砌表面的热量，使局部温度降低。由于水分所引起的冷斑效应，渗漏区与干燥区之间就形成可以被红外热像仪捕捉到的温度差。即使渗漏水量很小，表面只是潮湿的状态，温差仍然存在，红外技术可以实现非接触、远距离、大范围的渗漏隐患探测，这是基于物理学原理的。

（二）红外热图在渗漏隐患筛查中的应用

红外热图对于隧道渗漏隐患的排查来说，具有快速、高效、非接触的优点，可以改变传统的依靠人工目测、敲击检查的低效方式。检测人员可以手持红外热像仪或者将它安装在检测车上，在隧道内以一定速度行驶，对隧道拱顶、边墙连续扫描。热像仪可以实时产生、记录视野范围内的热图像，低温异常区（一般显示为蓝色或者暗色）就是渗漏水或者潮湿隐患点。

使用红外热像仪对整个隧道进行快速扫描，可以很快地对渗漏隐患进行初步的筛查、普查。适合大面积渗漏检查，可以迅速找到所有有温度异常的地方，生成一份直观的“问题地图”。红外筛查速度快，可以发现肉眼难以发现的早期、轻微渗漏或者只表现为结构内部潮湿的隐患。

获得的红外热图数据，之后可以使用专业的软件进行处理和分析。利用图像增强、伪彩色渲染等方法可以使温差边界更加清晰，方便准确地勾画出渗漏范围。

根据热图数据可以定量分析渗漏区域的面积和温差大小，从而对渗漏严重程度做出初步的判断。该种高效技术可以保证养护部门集中人力物力，对已经发现的重点隐患区域进行详细的勘察、精确定点，大大提高了隧道养护工作的针对性和经济效益。

（三）渗漏水点的精准定位与标记方法

在红外热图筛查出渗漏区域之后，下一步就是对渗漏水点进行精确定位并做好标记，为之后的修复工作指明方向。精准定位一般会多技术融合的过程，并不是只依靠红外图像。用高分辨率红外热像仪对初步筛查出的异常区域进行细致扫描，找到温度最低的核心区，一般对应渗漏的源头或者水分最集中的地方。

为了得到精确的空间物理坐标，红外探测一般会与可见光图像、三维激光扫描结合起来。通过同步采集红外热图、高清可见光照片、隧道结构的点云数据，可以得到一个包含温度信息、纹理信息、三维几何信息的综合模型。通过红外热图低温区映射到隧道三维点云模型或者高清影像上，就可以得到渗漏点的准确里程、环号、隧道断面上的具体位置。

精确定位之后，就需对渗漏点做出清楚、持久的现场标记。传统的方法是现场直接用油漆或者记号笔进行标注。随着数字化技术的发展，更先进的方法就是用数字化标记。检测人员可以实时把定位信息（图像、坐标、病害描述等）录入到移动终端或者隧道健康监测系统中。系统可以自动生成包含渗漏点位置、渗漏范围、渗漏严重程度等信息的病害报告，并在电子地图或者三维模型上对病害进行可视化标注。该种数字化标记方法有利于信息的保存、查找和追踪，也为隧道养护管理的智能化、信息化打下了基础。

第四节 超前地质预报系统

地质条件复杂多变、不确定性大，这是现代公路隧道施工安全和进度的主要影响因素。为有效防止塌方、突水、岩爆等地质灾害的发生，超前地质预报成了隧道施工不可缺少的步骤。该系统将多种地球物理探测和直接钻探技术融合在一起，目的在于开挖前对掌子面前方的地质构造、岩体情况和水文状况做出准确的预估，进而给动态设计和信息化施工赋予科学的依据。

从下表可以看出，超前地质预报技术各有侧重，其应用需结合具体工程地质

条件和预报目标。

超前地质预报主要技术对比表

技术名称	探测原理	探测距离	典型分辨率	主要优势	主要局限
TSP 地震波超前预报	地震反射波原理	长距离（百米级）	低	探测距离远，无损高效，穿透性强	分辨率相对较低，对复杂构造解译难度大
地质雷达	高频电磁波反射原理	短距离（数十米级）	高（厘米级）	分辨率高，对近距离构造刻画细致	探测深度受限（尤其导电介质），存在盲区
超前水平钻探	直接取样与参数记录	中 / 长距离（数十米至百米以上）	极高（直接观察）	结果直观可靠，提供直接地质信息	效率低，对施工有干扰，成本相对高

一、TSP 隧道地震探测技术与解译方法

TSP 技术是一种隧道地震波超前预报的方法，专用于隧道工程的设计，按照地震反射波的原理。它以隧道侧壁为地震波的激发点，在探测前方存在的不连续地质界面（断层、破碎带等）反射信号的同时，能对百米范围内的地质体进行探测与评价。该技术具有探测距离远、无损高效的特点，在复杂地质隧道施工中起着非常重要的作用。

（一）TSP 系统数据采集的观测系统设计

TSP 系统的数据采集要符合地震勘探的基本原则，观测系统布置的好坏直接影响到预报结果的准确性。标准观测方式是在隧道一侧或两侧边墙上，沿隧道轴线方向布设一条由 24 个以上炮孔组成的直线激发阵列，在另一侧或者同侧相对位置安装高灵敏度三分量地震检波器接收信号。多点激发、单点或多点接收的布置方式，目的是形成一个覆盖掌子面前方空间的地震波场。

激发震源一般用小剂量炸药，以产生足够能量、合适频率的地震波。地震波以球面波的形式向前传播，一部分能量直接通过隧道围岩传到检波器上，成为直达波；另一部分遇到前面波阻抗不同的界面时反射回来，成为反射波。观测系统的设计要考虑炮孔间距、激发阵列总长度、检波器布置位置，保证可以有效接收到隧道轮廓线前方主要地质异常体的反射信号。合理的系统设计可以提高有效信号的信噪比，在一定程度上抑制隧道内各种施工活动所造成的随机干扰，给后续数据处理提供高质量的原始记录。

（二）波场分离与反射波提取处理

从含有直达波、反射波、散射波、各种干扰噪声的原始地震记录中,把有效的反射波准确地分离、提取出来,是TSP数据处理的关键步骤。由于隧道空间有限,所接收到的波场比较复杂,除了前方的回波之外,还会有很多来自隧道侧壁、顶部、底部的反射干扰。因此波场分离为之后的解译和成像打下了基础。处理流程一般是先进行方向滤波,目的是抑制来自隧道轴线以外方向的侧向回波和隧道表面传播的面波,只保留掌子面前方的有效回波信号。

初步滤波之后需要对纵波和横波进行分离。纵波和横波对于不同的地质性质的反应不一样,横波对于岩体是否含有流体更为敏感。正确分离出纵波和横波,可以得到更多的岩体力学信息。分离出来的数据需要进行速度分析,即准确地确定地震波在掌子面前方围岩中的传播速度,这是进行偏移成像、地质体精确定位的前提。用偏移成像技术把时间域反射信号转到空间域,得到直观的空间深度偏移图像,可以清楚地看到反射界面的空间位置、产状、规模。

现代处理方法,高分辨率的Radon变换可以更好的将反射和绕射能量集中,使绕射波更容易被分离出来,这对于发现小的溶洞或者断裂点来说十分重要。整个过程很大程度上要依靠专业的软件系统及处理人员的经验,经过复杂的数学运算、信号处理步骤,把原来波形数据转变成能够反映前方地质构造的可靠图像。

（三）TSP 成果解译与不良地质体定位

TSP 成果解译为综合性分析过程,要将偏移成像图、波速分析结果、反射层参数表、岩体力学参数等各种信息结合起来,并与已知地质资料互相印证。解译的关键就是根据反射波的特征来识别不良地质体的类型、位置、性质。基本判别准则为,其基本判别准则如下。

1. 反射振幅和相位一般与波阻抗有较大的差异有关。正反射振幅一般代表前面遇到坚硬岩层,负反射振幅一般代表软弱岩层、破碎带或者空洞。

2. 波形连续性:连续、稳定的反射同相轴一般表示平整、连续的地质界面,同相轴错断、扭曲或者消失,就可能指示断层、褶皱或者岩性变化带。

3. 纵横波特征对比:横波反射强度比纵波异常增强,是岩体含水的明显标志。同时计算纵波速度和横波速度之比或者泊松比,可以评价岩体裂隙发育程度和含水情况;该比值突然增大,一般与流体存在有关。

4. 波速变化:纵波速度的明显降低,通常表明岩体破碎、孔隙度增大或已

进入风化带。

利用二维或者三维成果图进行综合判读,解译人员可以定位掌子面前方一定里程范围内的断层破碎带、软弱夹层、溶洞、富水区等不良地质体,并对其规模和大致范围做出评价。断层破碎带在图像上一般表现为能量较强、同相轴杂乱、连续性差的反射组合。富水区除了有强反射的特征,同时伴随着波速减小和能量衰减的现象。解译结果给开挖方案的调整、支护设计的优化、防灾预案的制定提供非常重要的决策依据。

二、地质雷达超前预报短距离探测技术

地质雷达是隧道短距离超前预报中不可缺少的、高分辨率的地球物理探测技术。它依靠高频电磁波在地下介质中传播时发生反射的原理,通过对反射波的走时、振幅、波形进行分析,推测前方地质体的分布情况。地质雷达探测距离短(一般在30米以内),但是分辨率高,可以更细致地刻画掌子面前方近距离的地质结构。

(一) 地质雷达在掌子面探测的测线布置

地质雷达探测效果很大程度上取决于测线布置的科学性、合理性。隧道掌子面超前预报时测线布置要根据隧道断面尺寸、预想地质构造产状、具体探测目标灵活设计。常见的布置方式有直线式、交叉式。直线式测线一般是沿掌子面的水平或垂直方向布置,适合探测产状比较规律的水平或垂直地质构造。

地质条件复杂或者目标体形态未知时,一般采用交叉式或者网格状的测线布置。在掌子面上布置多条平行的水平测线,辅以几条垂直测线,形成探测网,有利于从不同的方位对前方地质体进行扫描,获取三维空间信息,提高解译的准确性。实际操作中为了保证探测深度和分辨率,选择合适的天线中心频率是很重要的。探测较深的目标要使用频率较低的天线,获得高分辨率浅层图像则需要高频天线。

(二) 短距离超前预报的分辨率与盲区分析

地质雷达的分辨率是它在短距离预报上的主要优势,但是它也受到很多因素的限制。其垂向分辨率与电磁波中心频率、介质的波速有关,频率越大,波长越小,能分辨的最薄层厚也越小。水平分辨率和天线性能、菲涅尔带半径、测线间距有关。理想状态下,地质雷达可以达到厘米级的分辨率,可以很清楚的观察到比较薄的软弱夹层或者裂缝。

地质雷达探测也存在着一些固有的局限性。首先是探测深度受限,电磁波在导电性好的地层中衰减很快,有效探测距离迅速减小。盲区问题是因为发射天线与接收天线之间有距离,发射脉冲有一定的宽度,在接近地表的极浅处,有效反射信号会被直达波或强烈地表反射所掩盖,造成探测盲区。盲区深度一般和天线频率、现场环境有关。隧道掌子面探测时紧贴掌子面的几米范围容易成为盲区,必须特别注意。

(三) 前方含水断层破碎带的雷达响应特征

含水断层破碎带是隧道施工中危险性大的不良地质体,地质雷达对它的响应特征比较典型。当电磁波从相对完整的围岩传入含水断层破碎带时,就会遇到两个明显的电性差异界面,即完整围岩与破碎带的前界面,以及破碎带与另一侧完整围岩的后界面。这两个界面一般会在雷达剖面图上产生很强的反射信号。

响应特征主要表现为剖面图上出现一组或多组振幅大、连续性差的反射同相轴,波形杂乱无章,这是破碎带内部结构非均质性的反映。由于水的介电常数远远大于岩石,电磁波在含水介质中传播的时候能量衰减很大,在图像上表现为破碎带后方的反射信号和更深处的信号变弱甚至消失。含水介质会使得电磁波的主频率下降。强反射、能量快速衰减、波形杂乱是含水断层破碎带在雷达图像上表现出的特征,使施工人员可以提前采取降排水或者加强支护的措施。

三、超前水平钻探与直接取样技术

超前水平钻探属于直接可靠的超前地质预报手段。它在掌子面前方钻进,直接取得前方的岩芯或者岩屑等地质样品,并记录钻进时的各种参数,从而直接判断岩性、岩体完整性、裂隙发育和含水情况。虽然相对于地球物理探测法来说效率低、施工有干扰,但是它的结果直观、确定,是其他间接探测方法无法比拟的,常常被用作地球物理探测异常的最终验证手段。

(一) 超前水平钻探的孔位设计与深度控制

超前水平钻孔孔位布置和深度设计的好坏,直接关系到探测覆盖范围和有效性。钻孔数量、角度、间距要根据隧道断面大小、已知地质条件和预报目的综合来确定。孔位一般布置在隧道轮廓线内,扇形或者多孔平行布置来覆盖掌子面前方可能遇到的主要地质构造。地质条件复杂的地方可采用6孔布置方案,地质条件简单的地段可以减少钻孔数量。

钻孔深度要兼顾预报的前瞻性,施工的效率。一般以中距离探测为主,保证与下一个循环钻孔之间有5米左右的搭接长度,保证预报的连续性。对重大地球物理探测异常、疑似大型溶洞等地段,可钻设60米以上先导钻孔以获得远距离地质信息,为后面加密钻探方案提供依据。深度控制除达到设计进尺外,遇有溶洞或破碎带时一定要钻穿异常体,进入稳定的基岩至少五米以上才能了解其厚度和影响范围。

（二）钻进速度与钻屑记录的地质编录

随钻地质编录是超前钻探获取信息的重要环节,用钻进过程中出现的各种现象和参数间接推断地质情况。钻进速度是一项很重要的指标,在硬度高、整体性好的岩体中钻进速度慢且比较均匀,在进入软弱夹层、风化带或者破碎带的时候,钻速会突然加快,当遇到坚硬的岩脉或者结核的时候,钻速则会急剧下降。因此连续记录钻时曲线可以清楚地反映出地层岩性的软硬变化。

对钻孔返出的岩屑或者冲洗液进行观察、编录也是非常重要的。根据岩屑的颜色、粒度、形状、矿物成分、软硬程度来判断掌子面前方的岩性。灰岩地层岩屑为灰色粉末状,砂岩岩屑颗粒感比较强。冲洗液颜色变色、混浊度变浊、水量变少都能反映出前方岩体是否破碎、含水。水量突然增大或者减小、水色变浑,一般预示着即将进入富水断层或者岩溶管道。将这些随钻信息和钻时记录综合编录,就可以得到一份随深度变化的地质剖面图。

（三）钻孔摄像技术对孔壁地质结构观察

为弥补只用岩屑、钻时等数据推测地质信息的不足,越来越多的超前水平钻探已经使用了钻孔摄像技术。用带有高清摄像头的微型探头在钻孔完成后伸入孔内,对孔壁实际地质情况做360度全景视频录制。回放录像时技术人员可以直接观察孔壁岩石的颜色、结构构造、节理裂隙产状、宽度、张开度、有无渗水或涌水点。

钻孔摄像得到的图像信息非常宝贵,可以清楚地表现地球物理探测方法和常规钻探编录很难发现的细节。可测量裂隙的倾向、倾角,判断裂隙是张性裂隙还是压性裂隙;还可以观察溶洞的形状、大小及内部有无填充物。将这些高清孔壁图像同钻进记录加以对比分析,可明显提升地质解译的准确性、可靠性,进而达成对掌子面前方不良地质体的精准定位、定量评判,为制订最合适的开挖、支护方案赋予最直接的视觉支撑。

第六章 桥梁地质安全检测方法

桥梁属于公路交通网络的关键节点，它的地质安全同整个交通系统的稳定、畅通密切相关。本章对桥梁地质安全检测的各种方法进行了系统的阐述，包括桥基岩土工程勘察、不良地质体影响分析等整个技术过程，目的是给桥梁结构长期的安全稳定提供坚实的基础和技术支持。

第一节 桥基岩土工程勘察

桥基岩土工程勘察为桥梁设计、建设打下基础。其主要任务就是查明桥位区的工程地质条件、水文地质条件，为桥梁基础选型、设计计算、施工提供可靠的依据。勘察工作越深入、勘察工作越细致，桥梁工程的安全性、经济性和耐久性就越高。

一、复杂地质条件下桥位工程地质勘察

在复杂的地质环境里做桥梁勘察工作，常常会碰到很多技术上的难题。地形险峻、水文条件多变、地质构造复杂等，都会给常规的勘察工作带来困难。因此必须采用创新的技术方法组合来保证勘察成果的准确性、全面性，为桥梁的安全建设打下基础。

（一）跨江跨海桥位的水上地质勘察技术

跨江跨海桥梁一般体积庞大，水文地质条件复杂多变，对勘察技术要求高。水上地质勘察的重点就是准确地获取水下地形地貌、地层岩性、覆盖层厚度、基岩性质、不良地质现象等重要信息。传统的钻探取样方法，在深水、急流、厚覆盖层等情况下，成本很高、周期很长，而且存在较大的安全隐患。因此现代水上勘察大多采用综合勘察模式，即地球物理勘探和工程地质钻探相结合。

水上勘察工作一般是先利用多波束测深系统、旁侧声呐等设备对水下地形进行高精度扫测。可以快速获得桥轴线及其周围大范围的三维地形数据和地貌影像，

给钻孔布设以及后续勘探提供宏观依据。在此基础上,利用浅地层剖面仪、多道地震等声学勘探手段,对水下松散沉积物分层结构、基岩面起伏形态、断层和破碎带等进行连续探测,使对地下结构的认识由点到线,再扩展到面。

对重点勘察区或者物探异常区,则用水上钻探平台钻孔验证。为了适应不同的水深和海况,发展出了浮式平台钻探、坐底式平台钻探以及先进的钻探船技术。钻孔可取得原位岩土样品,做标准贯入试验、静力触探等原位测试,做抽水试验评价岩土体的渗透性。将钻探得到的精确的“点”信息和物探得到的连续的“面”信息结合起来,可以建立可靠的三维地质模型,为桥梁基础设计提供全面的、准确的数据。

(二) 陡峭峡谷岸坡的工程地质测绘方法

陡峭峡谷区是大型桥梁的常用建设环境。此类岸坡一般存在巨大高差、接近直立的坡角以及复杂的岩体结构,而且人员无法到达,因而常规的工程地质测绘手段受到很大限制。为了克服上述的困难,现代测绘技术采取了遥感和近景摄影测量相结合的非接触式调查方式。用无人机搭载高清相机或者激光雷达扫描仪,可以快速、安全地获得岸坡的高精度三维点云数据和高清正射影像。

经过三维点云数据的精细处理和解译之后,可以获得岸坡宏观地貌特征,即坡度、坡向、冲沟发育情况等。更重要的是可以得到岩体结构面信息,即节理、裂隙、层面、断层等的产状、间距、延展长度、组合关系。这些结构面是岸坡稳定的主要控制因素,了解这些结构面的信息对于分析崩塌、滑坡、落石等灾害来说十分重要。同时高清影像还可以识别出岩体风化程度、植被覆盖情况以及危岩体分布范围。

在宏观调查的基础上,对重点部位或者关键结构面使用地面三维激光扫描、伸缩臂架等设备进行近距离细致测量,可以得到更详细准确的岩体力学参数信息。将多源、多尺度的测绘数据融合起来,创建精细化的岸坡三维地质模型,可以清楚地表现出岸坡内部结构特点以及潜在失稳模式,为之后的边坡稳定性评价和支护设计提供了直观且量化的依据,大大提高了在艰险山区开展工程地质测绘的效率和科学性。

(三) 桥位区隐伏构造的地球物理勘探

隐伏构造就是指那些没有出露地表的断层、褶皱、软弱夹层等,是造成桥梁地基不稳定的主要原因。这些构造会造成地基不均匀沉降、承载力下降,严重

时还会造成地质灾害。因此，在桥梁勘察阶段，对隐伏构造的位置、产状、性质做准确的探测就显得十分重要。地球物理勘探技术由于可以无损、快速地探测地下一定深度内地质体的空间分布和物理性质差异，已经成为探测隐伏构造的主要方法。

根据不同的地质条件和勘探目的，可以采用多种物探方法组合使用，达到相互补充的效果。下表给出常用地球物理勘探的方法及各方法的特点。

常用地球物理勘探方法及其应用特点表

方法名称	原理概述	主要探测目标	特点 / 局限
高密度电阻率法	在地表布置密集电极，测量地下介质电阻率分布	岩性差异，断层破碎带和富水区，洞穴及软弱夹层	可直观反映地下结构；易受地下水影响
浅层地震勘探	通过人工激发的地震波在地下的传播规律反演地质结构	地层划分，基岩面深度，断层构造及其断距	精度高，适合区域性构造普查；需较大场地
地质雷达	发射高频电磁波并接收其反射信号来探测浅层地下目标	浅层病害体，如空洞、松散区等	分辨率高，对浅层病害有效；勘探深度受地层电导率影响大
微振动勘探	接收天然或人为产生的微弱振动信号，分析其频谱特征	覆盖层厚度，场地类别，剪切波速度结构	无源，成本较低；对深部结构分辨力相对有限

实际使用时一般先做区域普查，用地震勘探或者广域电磁法大致确定隐伏构造的位置、走向。然后在重点区段使用高密度电法、地质雷达等方法对隐伏构造进行加密探测，以达到精确定位和刻画的目的。所有的物探成果最后都要用钻探、探井等直接的方法来验证，保证解释的准确性。

二、持力层岩土特性与地基稳定性评价

桥梁桩基的承载能力及稳定性同桩端持力层、桩周岩土体的工程性质有关。因此准确评价持力层岩土力学参数、精确计算地基沉降变形、综合分析地基和边坡的相互作用，是保证桥梁基础安全的重要环节。

（一）桩端持力层的岩土力学参数确定

桩端持力层是桩基最终荷载的承担者，桩端持力层的岩土力学参数准确与否，直接关系到单桩承载力计算结果是否正确，也关系到桩基础设计成败。主要参数为岩土体的强度指标，即粘聚力、内摩擦角，变形参数，即压缩模量、弹性模量，物理性质指标。这些参数的确定要综合使用室内试验、原位测试、经验分析等多种方法。

室内土工试验是获得岩土力学参数的主要方法。通过在钻孔中取得的原状土样或者岩样做三轴剪切试验、直剪试验、无侧限抗压强度试验、固结试验等，可以测定其抗剪强度、变形模量、压缩系数等。该方法的优点是试验条件可控，可以研究岩土的本构关系；但是缺点是取样时会扰动样品，影响参数的代表性。

原位测试弥补了室内试验的不足，可以直接在施工现场对岩土体进行测试，更能反映岩土体在天然状态下的力学特性。常用的原位测试方法有：标准贯入试验，用锤击贯入杆的击数来评价砂土的密实度、黏性土的软硬程度；静力触探试验，匀速压入探头到土中，连续测量锥尖阻力和侧壁摩阻力，划分土层、评价承载力和变形参数；旁压试验、扁铲侧胀试验可以较好地提供土体的水平应力、变形模量、不排水抗剪强度。对岩基来说，现场加载试验是判断岩基承载力、变形模量的最直接、最可靠的方法。

在工程实际中，任何一个单一的方法都有局限性。因此，桩端持力层设计参数的确定，必须把室内试验结果、多种原位测试成果和区域工程地质经验综合对比分析。建立不同的测试指标之间的统计相关关系，互相验证，再结合工程类比，最终选出一组能反映持力层真实力学响应的设计参数，为桩基承载力计算提供可靠的依据。

（二）地基土层压缩性与沉降计算

桥梁建成以后，地基在荷载的作用下会产生压缩变形，也就是沉降。过大的或者不均匀的沉降都会给桥梁上部结构的安全、正常使用造成严重的后果。因此准确计算地基最终沉降量和固结过程，对桥基设计来说十分重要。地基沉降计算的主要任务就是正确评价土层的压缩性。

土的压缩性一般用室内固结试验测定，得到土的压缩曲线（ $e-p$ 曲线）或者压缩模量。压缩系数 a_v 和压缩指数 C_c 是用来表征土的压缩性好坏的重要指标。目前应用最广泛计算总沉降的方法是分层总和法。该方法的基本思想是把基础底面以下的地基压缩层分成若干个薄土层，假定每个土层内部应力分布均匀，分别求出各土层的沉降量，再将各土层的沉降量相加，即可得到地基的总沉降量。

计算步骤通常包括：

1. 确定沉降计算深度，根据附加应力在地基中扩散的规律确定一个计算深度，一般取附加应力与自重应力之比小于某规定值（如 0.1 或 0.2）的地方作为沉降计算的下限。

2. 地基中自重应力、附加应力的计算, 自重应力是土体自身重量产生的应力, 随深度线性增加。附加应力就是桥梁基础传给地基的荷载所引起的应力增量, 可以用弹性理论中的角点法或者平均应力法计算。

3. 划分土层并计算各层的压缩量: 在地基剖面图上根据土层性质、地下水位等将压缩层分成若干计算单元层, 计算每个单元层中心点的自重应力和附加应力, 用土的压缩性指标计算该层压缩量。

4. 累加总沉降量, 即把所有计算单元层的压缩量相加, 就得到基础中心点或者特征点的最终沉降量。

对于饱和软土地基, 还要考虑沉降随时间发展固结的过程。太沙基一维固结理论是分析该问题的经典方法, 求解固结微分方程, 可以得到地基在任意时刻的固结度以及相应的沉降量, 为施工期荷载控制和工后沉降预测提供理论依据。

(三) 地基基础与边坡相互作用的稳定性分析

当桥梁墩台建在岸坡或斜坡地段时, 基础和边坡不是两个独立的系统, 而是相互影响、共同作用的复杂岩土工程体系。桥梁荷载会改变坡体的应力状态, 有可能诱发或者加剧边坡的不稳定; 反之, 边坡的变形或者失稳也会给桥梁基础造成很大的推力, 甚至导致其承载力丧失。因此需要对桩坡体系做整体稳定性的分析。

相互作用机理比较复杂, 一方面桥墩传递的竖向荷载、水平荷载增大了边坡的下滑力, 在地震或者车辆制动力的作用下, 水平荷载对边坡稳定性的不利影响更加明显。荷载还会使坡体内的孔隙水压力增大, 从而使土体的抗剪强度降低。另一方面, 如果边坡本身处于欠稳定状态, 则边坡的潜在滑动趋势就会对桩基产生侧向推力, 使桩基成为被动荷载的承受者, 该推力甚至会大于设计时所考虑的主动荷载。尽管桩基在一定程度上起到了锚固边坡的作用, 对防止浅层滑动有贡献, 但是影响范围较小。

桩坡体系的稳定性分析一般用有限元法或者有限差分法进行数值模拟。通过创建可以真实反映地形、地质情况、桩基布置、荷载条件的二维或者三维数值模型, 可以对桩 - 坡体系在各种工况下应力分布、变形规律、塑性区发展过程进行详细的模拟。用强度折减技术可以求得体系整体的安全系数, 找出最危险的潜在滑动面。利用该方法分析可以清楚地看到桩身内力(弯矩、剪力)分布情况, 也可以看到边坡变形对桩基的影响, 从而为桩基设计优化以及边坡加固措施的制定

提供科学依据。

三、不良地质体对桥基影响的探测与分析

在桥梁建设区域里，滑坡、岩溶、采空区等不良地质体就像潜伏的地质病害一样，对桥梁地基安全造成严重威胁。准确探测不良地质体的空间分布和发育程度，科学分析它对桥基稳定性的潜在影响，是地质安全保障工作中的重中之重。

（一）桥位区滑坡体对墩台的推力分析

当桥梁墩台不得不设置在滑坡体上或者其影响范围内时，滑坡体一旦发生蠕动或者滑动，就会给墩台基础带来巨大的侧向推力，严重威胁桥梁的安全。因此准确计算出滑坡推力的大小、分布形态、作用点位置对抗滑桩基的设计和桥位的安全评价十分重要。滑坡推力的计算方法主要有极限平衡法、数值模拟法、经验法等。

传统的极限平衡分析法，即传递系数法，是工程中应用最广泛的一种方法。该方法将滑体沿滑动方向分为若干条块，从滑坡后缘开始逐个条块计算其剩余下滑力，用一个传递系数把该力传递给前一个条块，最后汇集到支挡结构（桥墩基础）上，得到总的滑坡推力。此方法概念清楚、计算简便，但是传递系数的取值依靠经验，不能很好地考虑滑体内部的应力状态和变形协调，因此计算结果有时会比较保守。

伴随着计算机技术的发展，数值模拟方法（有限元法、离散元法）在滑坡推力分析中越来越普遍。建立滑坡与桩基相互作用的精细模型，模拟滑坡在自重、地震、降雨等作用下的变形和滑动过程，可以直接得到桩身所受的土压力分布。该方法可以考虑土体的非线性、桩土接触面的复杂性、滑动过程中渐进破坏，因此得到的推力分布形态更接近实际情况。数值分析结果表明，滑坡推力在桩前常呈抛物线或三角形分布，其大小与滑坡自身规模、稳定性有关，也与桩的刚度、位置、群桩效应等因素有关。

对已经建好的桥梁，还可以用长期观测桩身内力、坡体位移来反分析滑坡推力的大小和变化规律。无论采用何种方法进行推力计算，在计算之前都必须先做详尽的地质勘察，掌握滑坡的形状、大小、滑面位置和岩土性质等，这是所有分析工作的基础。

（二）岩溶地基稳定性评价与处理范围

岩溶地貌区以地下洞穴、暗河、溶沟、溶槽等发育为特点，地质条件非常复杂，给桥梁地基的稳定性带来了特殊的严峻考验。岩溶地基的主要问题有，溶洞顶板稳定性差，在荷载作用下可能发生垮塌；桩基穿过溶洞时侧向约束消失，造成桩身稳定性和承载力急剧下降；岩体不均匀性造成地基承载力差异很大，容易引起不均匀沉降。因此，对岩溶地基的稳定性做出准确的评价，确定合理的处理范围就显得十分必要。

岩溶地基的稳定性评价属于综合性工作。需采用物探（高密度电法、地质雷达）和钻探相结合的方法，查明桥基影响范围内岩溶的发育形态、规模、空间分布、充填情况、地下水活动规律。对已探明的有溶洞的地点，应对其顶板厚度、岩体完整情况、跨度等进行详细的调查。评价内容主要包含：

1. 溶洞顶板稳定性评价：根据顶板岩性、厚度、跨度、上覆荷载，用理论公式或者数值模拟方法校核顶板抗弯、抗剪能力，判断顶板在桥梁荷载作用下是否安全。

2. 桩基穿越溶洞的稳定性评价：桩基需要穿越溶洞时，将它当作压杆稳定问题来处理。应计算桩在洞内的自由长度，根据桩端约束条件和桩身刚度校核桩压杆稳定性，防止桩身在轴压下发生失稳破坏。

3. 场地区整体稳定性评价，综合评价整个桥位区岩溶发育程度、地表塌陷历史及趋势，判断场地是否适合修建大型桥梁。

根据稳定性评价结果确定岩溶地基处理范围和方法。处理范围一般应大于基础压应力扩散角或者主要受力区。处理措施有浅层小型溶洞采用清方、回填、灌浆等方法，深部大型溶洞桩基设计尽量避开，不能避开的可采用跨越、穿洞或人工加固洞顶的方法，桩长范围内存在土洞、溶蚀破碎带的，可采用高压旋喷或注浆加固，提高地基整体性和承载力。

（三）采空区对桥梁地基变形的影响评估

在矿产资源丰富的地区，公路桥梁建设不可避免地会遇到由于地下采矿活动造成的采空区。采空区上覆岩层移动、变形的时间很长。桥梁基础如果处在采空区上覆岩层的影响范围之内，就会引发地基大面积、不均匀的沉降、倾斜或者地裂缝，从而给桥梁结构安全造成致命的危害。因此对采空区地基变形做出正确的评价是桥梁设计的前提。

评估工作首先要对采空区资料进行详细的收集,即采矿历史、开采煤层、开采方法、采空区平面位置、范围、埋深和采厚等。通过对资料的分析以及现场的调查来判断采空区所处的状态是稳定、亚稳定还是不稳定。已稳定的老采空区,残余变形量一般较小;新近形成的采空区,地表移动变形将经历一个活跃、衰减、稳定的过程。

采空区地基变形的预测为评估工作的主要内容。目前常用的预测方法有经验法和理论计算法。经验法,即概率积分法,是以大量的矿区实测资料为基础建立起来的预测模型。该方法可依据采空区的参数来预测地表任意点上的下沉、水平移动、倾斜、曲率、水平变形等变形分量,也可以画出地表移动盆地的形状。此法在我国应用广泛,技术成熟,可较好的预测缓倾斜煤层的开采影响。

得到地表变形预测值之后,还要对其对桥梁基础的影响进行评价。主要分析采空区变形引起的差异沉降、墩台的水平位移和倾斜,校核是否超过桥梁结构的允许值。地表移动盆地边缘处的水平拉伸变形,容易造成地基土开裂,进而对桩基的承载能力产生严重影响。根据评价结果,当发生大变形时采取桥位避让、注浆加固的方法或者在设计中增设滑动支座,改变上部结构体系等方法来适应。

第二节 桩基完整性检测

公路建设中桩基是保证上部结构稳定的地基构件。桩基好坏直接关系到整个公路结构安全。因此科学准确地开展桩基完整性检测,及时发现并处理桩身缺陷,对公路长期安全运营有着十分重要的意义。本节会系统地介绍各种主要的桩基完整性检测技术,并提出其应用要点。

一、低应变反射波法检测基桩完整性

低应变反射波法由于设备轻便、检测速度快、成本低等优点,被广泛地用在桩基施工质量普查上。该方法根据一维波动理论,分析应力波在桩身内传播和反射的情况来判断桩身的好坏,给公路桩基的质量管理提供重要的依据。

(一) 低应变法的激振方式与传感器安装

低应变法现场数据采集质量受激振方式、传感器安装细节的影响。激振是利用人工锤产生瞬时的冲击扰动在桩顶产生应力波的一种做法。激振点的选择十分

重要，实心桩的激振点一般选在桩中心位置，使应力波均匀地沿桩身轴线向下传递。空心桩上激振点和传感器的安装位置应该在同一水平面上，与桩的中心连线垂直，且安装在桩壁厚度的一半处，从而获得较好的信号。锤击时要保证方向沿桩的轴线，不能产生弯曲波等干扰信号。锤重和锤垫的选择也很重要：一般较重的锤和软垫会产生宽脉冲，能量大、衰减慢，适合探测桩身下部或桩底信息；而轻锤硬垫会形成窄脉冲、频率高、分辨力好，更适合于识别桩身上部浅层缺陷。

传感器安装也是得到高质量信号的又一关键。安装前必须对桩顶进行处理，凿除浮浆、松散混凝土，用砂轮机打磨平整，使测点坚实、干净。传感器应与打磨平整的桩顶测点用耦合剂（黄油、凡士林或者专用耦合剂）紧密贴合，以达到良好的声学耦合效果，防止由于空气间隙影响信号传输。传感器安装的位置一般在桩中心到三分之二半径处，不能安装在主筋上，以免钢筋对应力波的传播造成影响。安装时应保证传感器与桩顶面垂直，粘贴牢固，耦合剂过少或过多都会影响信号质量，造成波形失真或者能量衰减，从而影响后续的分析判读。

（二）桩身缺陷位置的波形判读与计算

低应变法检测的关键是对接收到的速度时程曲线进行正确的判读。当手锤击打桩顶的时候，就会产生一个向下的初始压缩波，传感器就记录下第一个波峰。应力波沿着桩身向下传播，当遇到桩身截面变化、混凝土材料不连续（即波阻抗发生变化）的界面时，就会产生反射。反射波再往上走，被桩顶的传感器接收。根据初始波和反射波之间时间差、反射波相位、幅值等特征，就可以判断出桩身是否完整。

桩身缺陷的位置是按照应力波的传播时间和速度来计算的。缺陷位置的深度 L_i 可由公式 $L_i = (C * \Delta t) / 2$ 求得。在该公式中， C 是桩身混凝土中应力波传播的速度，一般通过在同场地内已知长度的无缺陷试桩标定，或者参考同批次混凝土试块的测试结果来确定。 Δt 是从初始的激振信号（一般取第一个速度峰值）到收到的缺陷反射波峰值的时间差。由于应力波走了一个来回（即从桩顶到缺陷再返回桩顶），所以在计算距离时要除以 2。只有准确测得波速 C 和时间差 Δt ，才能准确地找到缺陷。实际判读时还要参考地质报告、施工记录，排除由于正常地层变化（如进入软弱夹层或者坚硬岩层）所引起的波阻抗变化，防止把地质界面误判为桩身缺陷。

（三）典型缺陷（缩径、离析、断桩）波形特征

不同的桩身缺陷，其低应变反射波形各有特点，给缺陷性质的判定提供重要的依据。掌握了这些典型的波形特征，就是正确判断桩身是否完整的前提。

1. 缩径缺陷，即桩身截面积减小，波阻抗变小。当应力波到达缩径处的时候，会产生同相位的反射波，即反射波的波峰方向和初始激振波峰方向相同。速度时程曲线中表现为桩底反射波之前出现一个向上的反射峰。缩径越严重，波阻抗变化越大，反射波的幅值也就越高。

2. 混凝土离析，混凝土离析一般表现为离析区混凝土密实度降低、强度下降，有时还会伴随粗骨料局部集中。离析也会导致波阻抗变小，波形特征与缩径类似，也会有同相位的反射波。但是离析缺陷的界面不是明显的突变面，而是渐变的过渡区，所以其反射波形一般不如缩径缺陷那样尖锐，而是表现为相对平缓的鼓包或者一系列的小波动。当离析严重时，介质不均匀性会造成应力波能量衰减很快。

3. 断桩或严重夹泥：断桩或者大量夹泥层相当于一个波阻抗极小的界面。应力波传播到此处时会发生强烈的同相反射，反射波的幅值会很大，甚至可以接近或者超过初始波的幅值。断桩位置以下的桩身信息几乎不能透射过去，在时程曲线上一概看不到桩底反射信号。波形上出现一个明显的向上波峰，接着信号很快衰减，这是断桩最典型的特征。

二、声波透射法在大直径桩检测中的应用

大直径或者超长桩用低应变法测应力波能量衰减快，很难探测到深部缺陷或者桩底信息。这时声波透射法就显示出它的优势。该方法是用超声波脉冲测头，在预先埋入桩身的声测管之间传播的声学参数，来评价桩身混凝土的质量。

（一）声测管的预埋与埋设质量控制

声波透射法能否成功，很大程度上取决于声测管的预埋质量。声测管是超声波探头进出桩身的通道，声测管的布置和安装必须符合规定。声测管数量根据桩径来确定，桩径大于 800mm 且小于等于 1600mm 时，应预埋不少于 3 根声测管，呈等边三角形布置；桩径大于 1600mm 时，应预埋 4 根或以上。材质上大都用壁厚适中、韧性好、抗压强度高的钢管，以保证浇筑混凝土时不会把钢管压扁、压弯。

声测管埋设质量控制为重中之重。声测管必须牢固地绑扎在钢筋笼内侧，保证位置准确，不发生移位。其连接方式（套筒连接或者焊接）应该保证接头处平

滑过渡，并且密封严密，防止混凝土浇筑时漏浆造成管道堵塞。下放钢筋笼时要保证声测管垂直度，不能出现过大弯曲或者扭曲，因为管道不平行会影响声波传播距离的计算，从而导致声速计算错误。埋设完毕后应立即盖上或者密封管口，防止杂物掉入。检测前必须保证所有声测管内充满清水，水是超声波传播的良好耦合介质，可以保证换能器与管壁之间有效的声能传递。

（二）声波透射法检测剖面的全覆盖技术

为了对桩身截面进行全面检测，声波透射法需要利用所有的声测管两两组合来获得多个检测剖面。预埋三根声测管的桩可形成 1-2、2-3、3-1 三个检测剖面，预埋四根管的桩可形成 1-2、2-3、3-4、4-1（周边）和 1-3、2-4（对角）共六个检测剖面。逐个剖面检测，可以实现桩身核心区域及周边区域的声学扫描，从而大大提高发现缺陷的概率。

在检测过程中，发射探头和接收探头以相同的速度、相同的间隔由声测管底部向上提升，沿桩身全长连续采集数据。现代检测设备一般使用两个独立的编码器分别记录发射、接收探头的深度，实时监视并保证两者处于同一水平高度，防止由于两个探头不同步而造成的测量误差。近年来发展起来的层析成像技术，可以利用少量的剖面检测数据，通过复杂的数学算法重建出桩身截面的二维或三维声速分布图像，将缺陷的位置、大致形状和范围可视化，实现了由线到面再到体的跨越，成为全覆盖检测的重要发展方向。

（三）声速 - 波幅 - 功率谱密度综合判据法应用

单一的声学参数很难准确判定缺陷的性质和严重程度，因此在实际工程中大多采用多参数综合判据法，其中以声速、波幅、功率谱密度综合判据法应用最广。此方法从声速、波幅、功率谱密度这三个方面来进行分析。

声速是反映混凝土密实度的主要指标。当超声波碰到孔洞、离析等缺陷时，会发生绕射传播，使传播时间变长，实测声速值也随之降低。波幅表示声波能量的衰减情况。有缺陷的混凝土对声能的吸收和散射作用较大，造成接收到的波幅减小。因此声速和波幅同时出现异常的测点，很可能预示着缺陷的存在。仅仅依靠声速和波幅来判断，可能会受到声测管不平行、混凝土不均匀等因素的影响。因此，引入了功率谱密度判据作为辅助方法。功率谱密度值是声时随深度变化率和声时差的乘积，对声时的微小变化很敏感，能很好地突出局部异常，对精确定位夹层等突变型缺陷有很高的灵敏度。通过对声速 - 深度曲线、波幅 - 深度曲线、

功率谱密度 - 深度曲线的异常进行综合分析, 结合原始波形图识别, 可以大大提高桩身完整性评价的准确性、可靠性。

三、桩底沉渣厚度检测与持力层判定

端承桩桩底沉渣厚度、桩端持力层岩土性质都会对桩基最终承载力产生影响。钻芯法是一种直接、直观的检测手段, 在这方面起着不可替代的作用。它从桩身混凝土钻取到桩底以下的持力层连续芯样, 可以直接判断桩底的情况。

(一) 钻芯法检测桩底沉渣厚度的操作要点

钻芯法是检测桩底沉渣厚度最直接有效的方法。其操作要点就是准确钻进到桩底, 取得包含桩底界面、沉渣层的芯样。钻机必须安装牢固、周正, 保证钻孔垂直度, 防止钻偏不能达到预定桩底位置。钻进时要随时注意钻进速度、钻压、循环液颜色等参数的变化。当钻头将要到达设计桩底标高的时候, 应该适当降低钻进速度和压力。当钻过混凝土和沉渣的界面时, 会突然感觉到钻进阻力减小、钻进速度加快, 孔中返出的循环液变得浑浊并带有泥砂。

准确记录下这些变化发生到多深, 就是判断沉渣顶面的重要依据。继续钻进, 直到钻进阻力又明显增大为止, 这时就表示钻头已经穿过了沉渣层, 进入了桩端硬持力层。此时记录的深度即为沉渣底面, 沉渣的厚度就是两个深度记录之差。取出的芯样要小心处理, 保持原来的形状。观察芯样可以直接辨别桩底混凝土、沉渣层、下卧持力层的分界, 用卡尺测量沉渣层厚度, 是最可靠的判定依据。

(二) 桩端持力层岩性的鉴别与取样

钻芯法不仅可以测量沉渣厚度, 而且可以检查桩端持力层是否达到设计要求。通过钻取桩底以下的岩土芯样可以知道持力层的岩性、完整性、风化程度以及节理发育情况。设计要求桩端嵌入中风化花岗岩时, 取出的芯样应为结构致密、岩芯呈柱状、颜色新鲜的中风化花岗岩。如果取出的芯样为强风化岩或者软弱土层, 则说明桩长不够设计长度或者地质勘探资料有误。

取出岩土芯样之后, 需要对岩土芯样进行系统的描述和编录。应该详细记录芯样的颜色、矿物组成、结构构造、风化特征、完整性(一般用岩石质量指标表示)等数据。必要时可以按规范要求代表性岩芯上截取试件, 做单轴抗压强度等室内物理力学性能试验, 将实测岩石强度同地质勘察报告、设计要求进行对比, 为桩基承载力最终评定提供定量依据。

（三）桩底注浆后的完整性复测方法

当桩底沉渣过厚或者持力层强度不够时，一般采用桩底压浆（后注浆）的方法进行加固。注浆能填充、胶结桩底沉渣、松散岩土，提高桩端持力层的强度和承载力。注浆加固完成后要进行复测和评价，以确定加固是否达到预期的效果。

复测方法一般用声波透射法和钻芯法相结合。对预埋有声测管的桩可先采用声波透射法检测。通过对比注浆前后声学参数的变化就可以定性评价注浆效果。若注浆之后，原桩底缺陷处的声速和波幅值得到明显提高，并接近或者达到正常桩身混凝土水平，则说明注浆体填充密实，与原桩身结合良好。为了定量评价加固效果，最后还需要采用钻芯法进行检验。可以在原桩位或者其附近选取新的钻孔位置，钻取经过注浆区域的混凝土、岩土芯样。通过观察芯样可以直观评价注浆水泥石质量、与桩底和持力层的胶结情况，还可以对注浆加固后桩底混合体取样检测，得到其强度参数。采用多种方法相结合的复测方式，可以对桩底注浆加固效果做全方位、可靠的评定。

公路桩基完整性检测对于结构的安全性来说是关键的一环，不同的检测方法有各自的侧重点。为了便于读者对比了解，下面给出三种方法适用范围、优缺点和主要检测对象。

桩基完整性检测主要方法对比表

检测方法	适用范围	优点	缺点	主要检测对象
低应变反射波法	普查桩基施工质量，中小型桩，一般深度桩	设备轻便，检测速度快，成本低	对大直径桩或超长桩探测深度有限，难区分缺陷性质	桩身缺陷（缩径、离析、断桩），桩身完整性
声波透射法	大直径桩、超长桩的完整性检测	探测深度大，对缺陷定位和性质判断更准确	需预埋声测管，成本较高，仅限于声测管间区域	桩身混凝土密实度，离析、夹泥等缺陷
钻芯法	端承桩桩底检测，持力层验证	直观可靠，可取样进行物性测试	损伤性检测，成本高，效率低	桩底沉渣厚度，桩端持力层岩性与强度

第三节 地基变形监测

地基是公路结构体系中主要的承重部分，地基的稳定与否直接影响到路面、桥梁、附属构筑物的长久安全及正常使用。由于地质条件、环境变化、运营荷载等各方面的因素，地基不可避免地会发生变形。对这些变形的准确监测是及时发现隐患，判定结构健康状况并采取预防性养护措施的重要一环，对于现代公路交通的顺畅与安全有着极其重要的意义。

一、桥梁基础沉降与差异变形观测

桥梁基础沉降、差异变形属于影响桥梁结构安全的主要因素。在复杂的地质条件下或者长时间荷载的作用下，桥墩、桥台的基础会发生不均匀的竖向位移。因此必须采用科学的观测方法准确捕捉到这些位移，对结构的安全性做出准确的判断，从而给结构维护提供可靠的依据，防止由于位移过大造成结构的损坏。

（一）桥墩墩身沉降观测点的埋设

桥墩墩身沉降观测点的科学埋设是获得准确沉降数据的基础。观测点的设置要全面、有代表性，一般选取能反映结构变形的重要部位，即桥墩承台顶面、墩身顶部或某高程处。不同高度的桥墩对于观测点规范要求不同，超过一定高度以上的桥墩在不同的位置上需要设置多个观测点，以便全面掌握可能会出现偏心沉降。观测点材料一般选用耐腐蚀、不易变形的金属材料，如不锈钢或者特定型号钢筋等，保证观测周期内稳定。埋设工艺也很重要，观测点要和墩身结构紧密结合，固定牢固，防止施工扰动、环境侵蚀或者人为因素造成的松动或者损坏。埋设时，观测点标志要清晰，做好必要保护工作，如加装防护罩等，方便立尺测量，防止混凝土养护期间被破坏。整个埋设过程必须严格按照有关技术规范执行，保证每一个观测点都能够真实的反映桥墩的沉降情况，为之后长期监测打下良好的基础。

为了保证沉降观测数据的长期有效性和可比性，观测点的布置应该具有前瞻性。设计阶段根据桥梁结构形式、地质水文条件、周边环境等来确定观测点的布置方案。框架结构的观测点一般设在柱基上，高层建筑或者高耸构筑物则需要沿周边对称布置，数量不少于四个。选点要避免施工干扰大、环境变化剧烈的地方，保证视线通畅，不能有遮挡。埋设深度要符合规范要求，钢筋埋入深度一般不小

于 12 厘米, 保证钢筋与主体结构牢固连接。观测点的长期维护要定时检查, 发现损坏、松动或者丢失时, 应立即按照原始位置和工艺要求进行修复或者补设, 并做好记录, 保证整个监测网络数据的连续性、一致性, 防止由于单个测点失效而影响对结构整体变形趋势的正确判断。

(二) 基准网的建立与周期性观测频率

基准网是进行沉降观测的基准和起点, 它的稳定直接影响到整个观测系统精度和可靠性。基准网一般是由等级分明、稳定性好、精度高的基准点和工作基点组成的。基准点的设置十分严格, 必须设在远离桥梁结构影响范围、地质条件稳定、不受外界干扰的地方, 通过独立的精密水准测量形成一个网, 一般不少于三个, 相互检核, 保证自身稳定性。工作基点是为了方便日常观测, 在基准点和观测对象之间加密布置的过渡性水准点, 其布置要兼顾通视条件和观测效率。整个基准网的建立要符合国家相应的等级水准测量规范, 通过形成闭合或者附合水准路线来保证测量结果的准确性和可靠性。

观测频率的确定要根据桥梁所处不同阶段、重要性以及外部环境的变化做科学的调整。施工过程中, 地基应力的改变, 结构的负荷增大最剧烈, 沉降最明显的时候, 所以观测的频率最高, 为每周一次。对于使用预应力技术的梁体, 徐变变形的监测应从张拉开始一直持续到上部结构施工完毕为止。进入运营期以后, 沉降速率趋于平缓, 观测频率可以适当降低, 对重要的交通干线桥梁每年至少观测一次, 一般路段则可以两年一次。汛期前后由于地下水位的变化可能会造成地基发生变形, 所以需要加大观测的频率。监测数据一旦出现异常, 沉降速率突然增大或者不均匀沉降加剧, 就要加密观测, 及时报告分析结果, 给预警和决策提供依据。动态调整可以保证观测工作的经济性、高效性, 同时也可以及时获取关键的变形信息。

(三) 差异沉降对桥梁结构受力的影响分析

差异沉降, 即相邻桥墩或者同一基础不同位置之间不均匀的竖向位移, 是造成桥梁结构内产生附加应力的主要原因, 对桥梁长期的安全健康造成严重影响。桥梁属于超静定结构, 一般设计时假定各支点在同一水平面上。当出现差异沉降的时候, 理想的状态就被打破了, 就会造成上部结构(主梁或者主拱)发生强迫位移和转动。非预期的变形会重新排列梁体内原来存在的应力, 引起额外的弯矩、剪力、轴力。附加内力如果超过结构构件的承载能力或者抗裂性能, 就会引起一

系列的病害。

差异沉降带来的具体影响是多方面的，主要体现在以下几个方面：

1. 结构开裂：附加弯矩在梁体跨中、支点附近产生，引起受拉区混凝土开裂或者原有裂缝继续扩大，减少结构有效截面，加快钢筋锈蚀，削弱结构耐久性。

2. 支座反力重新分配，部分支座反力过大，超过原来的设计值，引起支座受压破坏，另一部分支座反力过小，出现脱空现象，梁体失去支撑，改变了整个结构的传力路线。

3. 影响行车安全和舒适性：桥面由于下部结构的差异沉降而变得不平整，产生纵向凹凸不平，对行车的舒适性、安全性造成影响。即使在高速公路上，很小的差异沉降都会造成车辆行驶时出现颠簸。

4. 附属结构损坏，差异沉降还会对桥梁的附属设施，即伸缩缝、排水系统、人行道板等造成挤压或者拉伸破坏，影响其正常使用功能。

因此，对差异沉降的监测和分析，是评价桥梁健康状况、预测其服役寿命、制定科学养护方案不可缺少的一环。

二、桥台台背土压力与变形监测技术

桥台是桥梁和路堤之间的重要结构，其背后填土（即台背填土）在自重、车辆荷载的作用下力学行为、变形特点，对桥头区域平顺性及桥台本身稳定性有重要影响。采用现代监测技术对台背土压力分布、变形进行实时、准确的测量，可以发现桥头病害的内在机理，给优化设计、科学防治提供重要的依据。

（一）土压力盒在台背填土中的布设

土压力盒是岩土工程监测的重要仪器，在桥台台背填土中科学布置土压力盒，是获取填土对台身结构侧向压力分布规律的重要技术手段之一。监测主要是掌握实时土压力大小、分布形态及随时间、深度、环境因素（降雨、温度）和交通荷载的变化规律，检验设计理论，评价桥台稳定性，研究土与结构相互作用。土压力盒的布置是一项细致、系统性很强的工作，必须做好详细的规划，并严格控制施工过程。

布设方案要根据桥台结构形式、填料性质、填筑高度、预期应力状况来设计。一般情况下，土压力盒在桥台高度方向上分层布置，在不同的深度处形成垂直监测剖面，来反映土压力随深度的非线性变化。水平方向上也会在代表性断面的不

同位置布置，断面中心及靠近翼墙处，研究土压力的三维空间分布。传感器的安装方向十分重要，受力面要和待测压力作用面平行，在测量竖向土压力时要水平放置，测量水平土压力时要垂直放置。

土压力盒周围土体精细处理才能保证数据真实性。为防止应力集中或者应力减小，在安装区局部换填，用与周围填料性质相近的细砂或过筛土包裹，并保证压实度与主体填土一致。电缆线的保护也十分重要，所有的线缆都需要穿入保护管内，并且 S 形预留一定的长度，来适应填土沉降引起的拉伸变形，避免传感器因为线缆拉断而失效。布设工作完成后，对每个传感器的初始读数、安装位置、高程、编号做详细的记录，形成完整的档案，为之后的数据采集和分析打下基础。

（二）桥台跳车现象与台背变形的关系

桥头跳车是公路常见的病害，车辆由路堤驶上桥面时会出现明显的颠簸、冲击。这会严重影响行车的舒适性、安全性，增大桥梁结构、路面面层承受的冲击荷载，缩短其使用寿命。桥头跳车问题的产生，是由于桥梁结构与路堤填土之间存在明显的刚度及沉降差异所造成的。桥台基础一般采用桩基等高强度结构，沉降量小且稳定，桥台背后路堤填土是用土石材料压实的柔性体，在自重和长期车辆荷载作用下会发生持续的压实和固结沉降。

不均匀差异沉降是造成“跳车”的直接物理原因。台背填土下沉会使紧邻桥台的搭板或者路面下沉，与刚性固定的桥面之间形成台阶或者凹陷的过渡区。车辆高速经过凹陷处的时候，悬挂系统就会出现快速压缩和回弹，从而引发剧烈的垂直运动，也就是“跳车”。台背填土变形不只是竖向沉降，也会产生侧向挤出变形。车辆荷载的反复作用会使台背上部填料向两侧及上部隆起，使桥头路面更加不平整。因此对台背填土的竖向和水平变形进行长期监测，可以测出沉降的大小和速率，了解桥头区域的变形发展规律，评价目前所采用的处理措施的效果，为开发更有效的防治技术（如改良填料、改善压实工艺、设置过渡段等）提供必要的数据支持。

（三）水平位移监测网的布设与观测

为了准确测量桥台在台背土压力及其他侧向力作用下产生的水平位移和转角变形，必须建立一个专用的水平位移观测网。监测网由稳定的基准点和桥台结构上布设的若干个监测点组成。基准点选址的原则同沉降基准点，要远离变形影响区，设于稳定的基岩或者地层里，保证基准点在监测期内位置不变。监测点应设

在最能反映桥台整体移动、变形特征的部位，即桥台两侧顶端、翼墙端点、台身中部等，这些点可以控制桥台平面姿态的几何构型。

水平位移观测一般用高精度测量仪器和方法，全站仪极坐标法是应用最广泛的一种技术。观测时，全站仪架设在已知坐标的基准点上，对中、整平后照准另一个基准点作为后视方向，建立一个局部坐标系。仪器依次对准事先布置在桥墩或者桥台上的监测棱镜，自动或者手动测量并记录每一个监测点的水平角、垂直角和斜距。

利用观测值进行三角计算，就可以得到各个监测点在指定坐标系下的三维坐标。通过比较不同观测周期得到的数据可以得到每个监测点在平面上（一般指北、东两个坐标方向）的位移变化量和位移矢量。全站仪极坐标法精度高、操作灵活、适应性强，能满足大部分桥梁毫米级位移监测的要求。现代高精度机器人全站仪可以自动对所有的监测点进行观测，并且可以定时自动进行测量，大大提高了测量效率和数据时效性，为及时分析墩台水平移动趋势、评定其稳定性提供可靠的技术手段。

三、墩台倾斜与水平位移监测方法

桥梁墩台的倾斜、水平位移是反映其基础稳定性的直接指标，一般是由地基不均匀沉降、侧向土压力、水流冲刷、地震或者车辆制动力等因素造成的。对这些微小的角度、线性变化进行准确及时的监测，是实现桥梁结构安全预警、防止灾难性事故发生的技术保障。选择何种监测方法要根据桥梁等级、规模、监测精度要求进行综合判断。

各种墩台变形监测方法的特点和适用场景可见下表。

桥梁墩台变形监测方法对比表

监测方法	主要测量对象	典型精度	适用场景	主要特点
倾斜仪	墩台倾斜角	亚毫米级角度	墩身细微倾斜监测	自动化、连续、高灵敏度，实时预警
全站仪极坐标法	墩台水平位移	毫米级	中小型桥梁，周期性监测	灵活、适应性强、成本相对较低，高效率
全球导航卫星系统	墩台三维位移	毫米级	大型、特大型桥梁，动态监测	实时、连续、高精度、全天候，抗干扰

（一）倾斜仪在墩身倾斜监测中的应用

倾斜仪是一种高精度的角度测量传感器，在桥墩倾斜监测中担当起“健康体检师”的角色，可以对墩身由于基础不均匀沉降、侧向荷载或者结构自身变化而产生的微小倾斜进行及时发现。在桥墩关键位置，比如墩顶或墩身某一段高度上设一个倾斜仪，可以测出该点切平面与水平基线间角的变化，从而获得桥墩垂直度变化情况。现代倾斜仪大多采用先进的 MEMS 技术或者液体静力平衡原理，具有分辨率高、稳定性好、抗干扰能力强等优点，可以达到亚毫米级的监测精度。

倾斜仪的安装方式有多种，根据监测要求和现场情况可以采用表面粘贴式或预埋式安装。安装时要保证传感器与墩身结构刚性连接，测量轴线与桥梁的纵、横向准确对齐，以便区分不同的方向倾斜分量。在单个桥墩的不同高度或者不同桥墩上布置多个倾斜仪，就可以形成一个倾斜监测网络，从而可以对整个桥梁下部结构的倾斜变形场进行全面监测。利用自动化数据采集系统，倾斜仪可以实现无人值守、全天候连续监测，当监测到的倾斜角度或者倾斜速率超过预设的报警阈值时，系统就会立即发出报警信号，给桥梁管理部门采取应急措施争取宝贵的时间，避免由于墩身倾斜过大而引起的结构失稳风险。

（二）全站仪极坐标法监测水平位移

全站仪极坐标法是大地测量学中一种经典而高效的坐标测量方法，在桥梁墩台水平位移监测中被广泛使用。其原理就是利用已知控制点的坐标，测量角度、距离来确定待测点的空间位置。实际监测时，首先要建立一个由两个以上稳定的基准点组成的控制网，范围应大于桥梁的影响范围。把全站仪安设到基准点上，对中、整平后，照准另一个基准点作为后视方向，建立起局部坐标系。仪器依次对准桥墩或桥台上事先布置好的监测棱镜，自动或者手动测量并记录每一个监测点的水平角、垂直角、斜距。

利用观测值进行三角计算，就可以求出各个监测点在指定坐标系下的三维坐标。用不同观测周期得到的坐标数据进行对比，可以得到每个监测点在平面上（一般指北、东两个坐标方向）的位移变化量和位移矢量。全站仪极坐标法具有精度高、操作灵活、适应性强等特点，可以满足大部分桥梁毫米级位移监测要求。现代高精度机器人全站仪可以自动完成所有监测点的观测，也能定时自动测量，大大提高了测量效率和数据时效性，给及时分析墩台水平移动趋势、评定其稳定性提供了可靠的技术手段。

（三）全球导航卫星系统自动化监测在大型桥梁基础中的应用

由于全球导航卫星系统技术的迅猛发展,尤其是实时动态差分技术日趋成熟,因此,以全球导航卫星系统为基础的自动化监测系统已经成为大型、特大型桥梁(尤其是跨江、跨海、跨峡谷桥梁)基础变形监测的主要技术手段。一般在索塔顶部、主墩承台、大跨径梁体关键截面处安装 GNSS 接收机,在远离桥梁的稳定区域设置一个或者多个 GNSS 基准站作为参照,构成一个协同工作的监测系统。监测站的接收机可以全天候、不间断地接收多颗导航卫星的信号,用基准站的数据进行差分解算,实时得到监测点的毫米级三维坐标。

全球导航卫星系统自动化监测最大的优点就是可以实现高频率、高精度、三维、连续的实时监测,不需要人工干预,克服了传统测量方法受通视条件、天气状况、作业时间限制的缺点。大型桥梁的变形是缓慢的,受风荷载、车流、地震等因素影响会存在瞬时的动态变化,全球导航卫星系统高采样特性能较好地反映出动态的过程。监测数据经由无线网络传送到数据处理中心,用专业的软件进行解算和分析,可以清楚地显示桥梁基础各个监测点的水平、垂直方向位移时程曲线、变形速率、累积变形量。当桥梁位移或变形速度超过安全阈值的时候,系统就可以立即发出报警,给桥梁的运营安全管理提供最及时的决策依据,是国家重要交通基础设施生命线工程安全的重要技术之一。

第四节 检测标准与规范

公路地质安全检测工作的科学性、权威性基础就是一套完整的、严谨的公路地质安全检测标准规范体系。本节主要整理现有的标准目录,分析不同的地质条件下适用的地质勘察方法,明确质量验收和安全评价的相关要求,从而给现代公路建设提供有力的技术支撑和制度保障。

一、现行公路桥梁地基基础检测标准体系

建立科学完善公路桥梁地基基础检测标准体系,是保证工程质量、保证安全运行的根本。该体系包含从国家到行业各个层次,规定了各种检测技术的应用范围,并考虑到了新旧标准的平稳过渡,给地质安全检测工作全过程提供清晰的指导和依据。

（一）国家及行业现行检测标准目录

我国公路桥梁地基基础检测标准体系层次分明，主要是由国家标准 GB、行业标准 JTG、地方标准 DB 等组成，共同构成了公路工程质量技术法规体系。在国家层面，具有纲领性、通用性的文件有岩土工程勘察规范、建筑地基基础设计规范，对各种工程的岩土问题提出宏观要求。交通行业标准体系更加具体、专业。核心标准为公路工程地质勘察规范、公路桥涵地基与基础设计规范，两部规范对公路工程勘察、设计、检测全过程的技术要求做出详细规定。

根据具体的检测技术、检测对象，行业标准也做了进一步的细化。公路工程基桩检测技术规程是桩基检测领域的重要文件，它把原来的基桩动测技术规程整合并取代了，包含静载荷试验、高应变法、低应变法、声波透射法等众多检测方法，是目前桩基质量评定的主要依据。同时公路工程地质原位测试规程对标准贯入试验、静力触探、旁压试验等原位测试技术的操作以及数据解释做了详细的说明。除了上述几项标准，还有《公路路基路面现场测试规程》等相关标准一起组成一个内容全面、相辅相成的标准体系，为地基基础安全状况的评价提供有章可循的依据，为统一检测标准的形成奠定基础。

（二）不同检测方法的适用范围与限制条件

公路地质安全检测选择合适的检测方法十分重要，因为每种方法都有其特有的适用范围以及固有的局限性。

常见地基基础检测方法对比

检测方法	适用范围	优点	局限性
静载荷试验	地基或单桩承载力	结果直观准确，作为最终验收依据	周期长、成本高、场地要求高，检测数量有限
高应变法	桩身完整性、单桩承压能力	效率高、经济，适合预制桩和灌注桩快速普查	结果判读依赖经验和土性参数，复杂地质条件判断不确定
低应变法	桩身完整性(断裂、缩径)	快速判断桩身缺陷，定位准确	不提供承载力信息，对桩底沉渣和微小缺陷识别能力差
声波透射法	灌注桩混凝土均匀性、密实度	有效评价混凝土质量	需预埋测管，仅反映测管间区域，对管外区域无法评价
探地雷达、面波法	大范围地质结构，不良地质体(溶洞、软弱夹层)	宏观探测，辅助勘察	分辨率、探测深度有限

静载荷试验是检验地基或单桩承载力最可靠的方法，上表结果直观、准确，一般作为最终验收或仲裁的依据。但它的缺点也很明显，试验周期长、成本高、场地要求高，只能检测少量桩，不能对工程桩进行全覆盖检测，主要适用于关键部位或者作为代表性试验。

动力测试法如高应变动力测试和低应变反射波法，比静载荷试验更高效、经济，可以实现高密度检测。高应变法可以模拟冲击荷载，对桩身完整性评价较好，还可以估算单桩竖向抗压承载力，特别适合预制桩和灌注桩的快速普查。它的不足之处在于结果的解读要依靠经验和土性参数的准确性，对于复杂的地质条件下的承载力判断存在一定的不确定性。低应变法主要是用来判断桩身是否完整，即有无断断、缩径等缺陷，对桩长及缺陷位置判断比较准确，但是不能提供承载力信息，对桩底沉渣和桩身微小缺陷的识别能力差。

声波透射法也是灌注桩完整性检测的一种常用方法，它利用超声波在桩身混凝土中传播速度、能量衰减来判断混凝土的均匀性、密实度。该方法对预埋测管要求较高，只能反映测管之间的混凝土质量，不能评价测管范围外的区域。探地雷达、面波法等地球物理勘探方法，一般用来查明场地内是否存在溶洞、软弱夹层等不良地质体，对大范围地质结构进行宏观探测，但是其分辨率和探测深度有限，多用作勘察阶段的辅助手段，为详细勘察和钻孔布置提供指导。实际工程中经常需要综合使用多种方法，取长补短，形成一个由宏观到微观、定性定量相结合的全面地质体安全状况综合检测方案。

（三）新旧标准在工程应用中的衔接问题

标准更新换代是技术进步以及工程经验的积累所必然导致的结果。但是新旧标准交替时，工程实践中会出现很多衔接问题。项目设计阶段使用旧的标准，施工、检测阶段使用新发布的标准。此时新标准会增加更严格的技术指标、新的计算方法或者强制性的条款，造成原来的设计方案或者施工工艺不能完全符合新的要求。新的规范对于桩基承载力安全系数将会提出更高的要求，也可能对某些检测方法的适用条件做出更加严格的要求。

为了保证工程质量以及标准的顺利过渡，必须要建立一个衔接机制。行业主管部门发布新标准的时候，一般会设置过渡期，发布实施指南或者解释文件，来确定新标准对不同类型、不同阶段项目的适用原则。设计阶段的项目一般要求强制采用新标准；已经完成施工图设计审查的项目，视具体情况决定是否按照

新标准进行复核或者修改。检测单位要组织技术人员及时学习新的标准，更新知识体系，对检测设备和软件进行相应的升级或者校准，保证检测活动完全符合新的规范要求。出具检测报告时应注明所依据的标准版本，当新旧标准存在差异时，应进行对比分析，并向委托方、设计方、监理方清楚地说明差异对评价结论的影响。妥善解决这些问题，既牵涉到单个工程的合规性、安全性，又牵涉到整个行业的技术水平同步提高。

二、不同地质条件下检测方法的适用性规范

不同的地质条件对检测方法的选择有不同的要求。对软土、岩溶、高烈度地震区等特殊地质环境要专门制定相应的规范，保证检测结果具有针对性、可靠性，保证公路基础设施在各种不利条件下安全稳定运行。

（一）软土地区地基检测的特殊要求

软土地区一般指淤泥、淤泥质土、冲填土等，天然含水量高、孔隙比大、强度低、压缩性大，是公路工程中常见的不良地质。软土地区地基基础检测时，必须充分考虑软土特有的工程性质，使地基基础检测工作更加严格细致。公路软土地基路堤设计施工技术规范等规范对这些问题有详细规定。软土地区地基稳定性、沉降变形为主要研究内容。因此，检测工作不能只评价承载力，还要对变形进行长期、系统的监测。原位试验在软土地区有着不可替代的作用，因为软土取样难度大，试样在运输、制备过程中极易受到扰动，造成室内试验结果失真。

1. 强调原位测试与室内土工试验的结合，用静力触探试验或者孔压静力触探试验连续、快速地划分土层，评价土的强度和变形参数。

2. 对孔隙水压力、侧向变形做长期观测。在路堤填筑或者地基处理时，埋设孔隙水压力计、侧向位移管，实时观测地基的固结情况和侧向挤出变形，以控制施工速率，防止失稳破坏。

3. 利用十字板剪切试验等有针对性的原位测试手段，直接测定软土的不排水抗剪强度，给地基稳定分析提供重要参数。

4. 对经过处理的复合地基（水泥搅拌桩、塑料排水板等）要进行复合地基载荷试验，检验其综合承载力和变形模量，采用取芯、开挖等方式检查加固体质量及均匀性。

（二）岩溶地区桩基检测的补充规定

岩溶地质由于高度的非均质性、不确定性给桩基工程带来很大的挑战和风险。岩溶地区普遍存在溶洞、溶沟、溶隙、地下暗河等构造，桩基持力层岩面高低起伏大，而且岩体中存在软弱夹层或破碎带。岩溶地区常规桩基检测方法无法使用，需要按照 JTG3363-2019 标准中对桩基的补充规定，用更为谨慎的方法对桩基进行检查。

在成桩前的勘察阶段要高度重视，提倡“一桩一孔”或者加密钻探的方式来准确查明每一根桩下及桩侧的岩溶发育情况。施工时钻孔或者冲孔过程中钻进速度、压力、漏浆量等参数是判断是否存在溶洞的重要信息，应该详细记录并加以分析。仅依靠低应变法检测桩身完整性是不行的，因为该方法不能很好地识别桩底有没有小型溶洞或者软弱下卧层。

岩溶地区的嵌岩桩，桩端持力层是否可靠是最重要的。声波透射法可以有效地评价桩身混凝土的密实性，但是更重要的是要对桩底岩层进行检验。条件允许时，应以钻孔取芯法为主，直接钻取桩底岩芯，直观判断岩石的完整性、强度、有无空洞或软弱夹层。当取芯困难或者成本较高时，可以采用孔底摄像技术，把高清摄像头放入桩底，直观观察桩底沉渣厚度、岩面特征。单桩静载试验在岩溶地区更为重要，它是检测桩基在复杂地质条件下的综合性能的最直接手段，对于设计等级高的重要桥梁，应该保证有足够的试验桩。

（三）高烈度地震区桥梁基础抗震检测标准

高烈度地震区（抗震设防烈度 8 度及以上地区）桥梁基础检测标准已超出常规承载力、沉降的要求，主要看桥梁基础在强震作用下的抗震性能和延性。检测重点要保证基础、桥墩、支座等组成的抗震体系能承受地震作用，保证结构安全。按照公路桥梁抗震设计细则等标准，抗震检测不能只看承载能力，还要看耗能和变形能力。

检测的主要内容为检查基础的延性构造是否满足设计要求。桩基础的桩顶塑性铰区钢筋配置要校验，箍筋直径、间距、锚固长度等都要考虑，在桩基础受高应力时能承受相应的约束力，在大变形时也不会发生脆性破坏。对于扩大基础，应检查地基的抗液化能力；在有液化的砂土或粉土地基中，应该用标准贯入试验等方法判定液化势，检验地基加固措施的有效性。此时检测的评价标准不再只是单一的承载力数值，而是结构的延性、耗能能力和循环荷载作用下的性能。对采

用减隔震设计的桥梁，应对减隔震支座的力学性能进行专项检测，检验其水平刚度、阻尼比等主要参数是否符合设计值，保证减隔震系统在地震发生时能按预期工作，减小地震对主体结构的破坏。

三、检测质量验收与安全评价标准

检测工作最后一个环节就是质量验收、安全评价，关键在于形成客观的判定标准、规范的报告制度和高效的异常处理机制，从而形成一个完整的闭环，保证公路建设全生命周期的地质安全，给后续运营维护提供可靠依据。

（一）检测数据的合格判定标准

检测数据合格判定标准，就是按照国家和行业规范，并结合具体工程设计要求所进行的多维、系统的评价过程。判定标准不能简单地把检测值和某个规定值做比较，而应该考虑数据的统计特征、离散程度、结构的重要性。

地基承载力一般用载荷试验来评定。按照《建筑地基基础设计规范》等标准，合格判定不仅要试验确定的单点承载力特征值不小于设计要求值，还要考虑加载过程中变形的表现，即压力 - 沉降曲线在线性变形段内性状是否稳定，有无陡降或突变现象。

桩基质量验收判定标准比较复杂，一般分承载力和完整性两类。承载力合格以静载荷试验为准，在最大加载量下桩顶沉降应符合规范规定的相对稳定标准。采用高应变动力测试法进行承载力估算时，由于其间接性，规范一般要求结果要结合静载试验进行标定，评判时会考虑一定的折减系数或者更高的安全系数。

桩身完整性属于另一个主要的判定指标。根据《公路工程基桩检测技术规程》的规定，用低应变法检测桩身完整性时分为Ⅰ类（完好）、Ⅱ类（轻微损坏）、Ⅲ类（明显损坏）、Ⅳ类（严重损坏）四类。评判为Ⅰ类桩或Ⅱ类桩一般视为合格，Ⅲ类桩需要结合其在结构中所处的位置和受力情况分析，可以补救处理或者进行静载试验验证；Ⅳ类桩判定为不合格，必须进行处理。声波透射法则利用声速、波幅等指标来判断混凝土的质量，规范中给出了不同强度等级混凝土合格声速的标准值，并对异常点数量及分布做了明确规定。最终合格判定是个系统的工程，检测人员应按照规范要求结合工程实际情况做出科学、慎重的判断。

（二）地质安全检测报告的编制要求

地质安全检测报告是地质安全检测工作成果的集中体现，是判断工程质量好

坏、进行竣工验收、指导后期维护的重要技术资料。其编制要遵循系统性、科学性、规范性、公正性这四个原则。一份合格的检测报告除了得出最终结果以外，还应该清楚、完整地再现整个检测过程，保证可追溯性、可复核性。按照岩土工程地质勘察报告编制规范等有关文件的规定，检测报告的编制应包含如下主要要素

报告正文部分要逻辑清楚，内容丰富。首先要对工程背景、检测目的、检测范围、所依据的标准以及设计文件等做出简要说明。接着要详细说明场地的工程地质和水文地质条件，这是所有分析评价的基础。报告的主要内容就是对检测方法、仪器设备、试验过程和数据成果的详细记录。对所用的每一种检测方法都应说明原理、设备型号、校准情况、实施步骤、数据记录。原始数据、图表（载荷-沉降曲线、动测波形图、声速剖面图等）是报告的主体，应该完整、清楚地展示出来。

1. 详细记述工程概况、地质背景与检测目的。
2. 清晰呈现所采用的检测方法、设备型号及校准情况。
3. 完整附上原始数据记录、分析图表及计算过程。

4. 根据数据分析结果，按照有关规范条文的要求，对检测对象的各项指标（承载力、完整性、密实度等）一一做出评价，并给出“合格”、“不合格”或者具体的类别等级等结论性意见。结论要明确无歧义，不合格或有异常的结果要提出处理意见，静载试验检验、补强措施、补充勘察等。报告必须有检测人员、审核人、批准人的签字，并加盖检测单位公章和相应的资质印章，以保证其法律效力和技术权威性。

（三）检测异常结果的上报与处置流程

当公路地质安全检测出现桩身严重缺陷、地基承载力达不到设计要求等异常结果时，应该立即启动上报及处置的程序来避免质量隐患流入下一道工序，确保工程根本安全。该流程有及时性、协同性、闭环管理的特点。检测人员在现场或者数据统计分析中发现异常情况或者不合格结果时，应当立即停止该部位后续工序的工作，并以书面形式向监理单位和建设单位（业主）报告。初步报告中应对异常现象做简要说明，初步判断及可能造成的影响，为各方采取应急措施争取时间。

正式上报和处置需要经过更严格的程序。检测单位完成数据复核、内部会审后，出具专项检测报告或者在常规报告中对异常情况进行重点标注、分析，并正

式上报给建设单位、监理单位、设计单位、施工单位。收到报告之后，建设单位应当立刻召集有关责任方召开专题会议，就异常结果进行商讨。处理流程一般分为原因分析、施工质量缺陷排查、勘察设计问题排查、检测手段缺陷排查、检测操作错误排查。第二步根据原因分析的结果，可以采用更高的精度检测方法（如对动测异常桩做静载试验）或者进行补充勘察钻探来进一步诊断。在问题性质、严重程度确定之后，由原设计单位或者有资质的单位提出科学合理的处理方案，方案可以是缺陷桩高压注浆加固、不合格地基上增加抗滑桩、甚至废弃重做等。处置措施完成后必须重新检测验收，直到合格为止。上报、分析、处置、再验证的全过程是一个闭环，所有相关的文书和记录都要归档，保证质量责任可追溯。

第七章 地质灾害监测预警系统

第一节 滑坡监测预警技术

滑坡属于公路交通中危害较大的一种地质灾害，因此滑坡的监测预警技术的发展也变得十分重要。本节主要从地表到深部、从单点到区域、从位移到应力的多维度、多参数综合监测技术体系着手，进而介绍基于监测数据的临滑预警模型，为建立灵敏可靠的公路滑坡“千里眼”和“顺风耳”打下坚实的理论与技术基础。

一、滑坡地表位移与深部位移监测

对滑坡体地表和内部位移进行动态跟踪，是认识其变形演化规律、判断稳定状态的前提。综合利用各种监测手段，可以创建起一个多层次、全方位的动态变形监测网，对滑坡从蠕变、加速到最后的失稳破坏全过程有准确的掌握。这些位移监测技术各有特色，主要特点及应用场景见下表。

滑坡位移监测技术对比表

监测技术	监测对象	核心优势	应用场景
GNSS 地表位移监测	地表三维位移	高精度、全天候、自动化、毫米级	区域滑坡整体变形、主滑方向判别
深部测斜仪监测	内部剪切变形、滑动面	确定滑动面位置、深度、厚度	揭示滑坡内部机制、深层滑动
裂缝计 / 拉线式位移计	表面裂缝开合、错动	简单有效、实时、量化监测	裂缝动态追踪、快速识别局部变形
合成孔径雷达 InSAR 大范围形变监测	区域地表微小形变	范围广、精度高、全天时、毫米级	早期隐患识别、大范围普查、蠕变监测

（一）GNSS 地表自动化位移监测技术

全球导航卫星系统技术由于具备高精度、全天候、自动化等特性，在公路滑坡地表位移监测中起着不可替代的作用。通过在滑坡体关键部位以及周边稳定区域布置监测站和基准站，采用差分定位的方式对监测点的三维坐标进行毫米级的实时解算，可以准确地获得滑坡体的水平及垂直位移。该类自动化监测系统可以

连续采集数据，用无线通信模块实时传送到监控中心。

GNSS 监测系统可以反映出滑坡变形的直观情况。汛期或者强降雨之后，根据位移速率、加速度的变化来识别滑坡的加速变形阶段，给预警决策提供重要的依据。现代 GNSS 监测系统已经趋向轻量化、智能化，集成了高精度接收机、无线通信、太阳能供电等模块，极大降低了野外布设难度和成本，能与雨量计、裂缝计等其他传感器协同工作，组成多参数综合监测网络，给公路边坡安全提供更全面的数据支持。

GNSS 技术的优势是可以给出绝对坐标系下高精度的位移量，给滑坡整体运动学特征分析提供可靠保证。在滑坡体上设置多个观测点，可以分析差异运动特征，确定主滑方向，划分变形区，估算滑坡体积。这对于认识滑坡机理、判断其可能影响范围有十分重要的意义。系统自动化程度高，大大减少人工现场测量的风险和劳动量，保证数据连续性、时效性，是公路滑坡长期自动化监测的主要技术。

（二）深部测斜仪监测滑动面位置

深部位移监测是了解滑坡内部变形机理、找到潜在滑动面的主要方法。在各种深部监测技术当中，测斜仪由于可以准确测量钻孔在各个深度处的水平位移剖面，因此被广泛使用。测斜管预先埋设于穿越潜在滑坡体的钻孔中，定期或者连续观测测斜管的倾斜度变化，可以准确得到坡体内部剪切变形带（即滑动面）的位置、深度和厚度。

测斜仪分为移动式、固定式。移动式测斜仪需要人工逐段测量钻孔内导槽的探头，成本低，但是不能实现自动化和高频次监测。固定式测斜仪是由多个倾角传感器节点串联起来的，永久性地安装在测斜管中，可以实现深部位移的实时、连续自动化监测。该自动化系统可以探测到滑坡深部微小的变形加速过程，对于研究降雨、库水位变化等外部因素怎样引发深部滑动有重要的意义，给临滑预警提供更直接、可靠的内部变形证据。

通过对测斜数据进行分析，可以得到钻孔累计位移随深度变化的曲线。曲线上位移变化率最大的地方一般就是主滑动带的位置。多次测量结果的比较，既可以反映滑动面的发展变化过程，又可以求出深部滑体的位移速率和方向。将多个钻孔的测斜数据联合起来分析，可以得到整个滑坡体三维滑动面的形态，为之后的稳定性计算和治理工程设计提供准确的地质力学参数，在滑坡监测体系中起着不可替代的作用。

（三）裂缝计与拉线式位移计的应用

滑坡体表面出现的拉张、剪切裂缝是滑坡体变形的直接的外在表现，也是预警工作的重要部分。裂缝计、拉线式位移计属于简单有效的监测手段，被普遍地应用到裂缝开合、错动等动态变化的实时追踪当中。可以将微小机械位移变成电信号来记录裂缝宽度和剪切位移。

拉线式位移计用一根高强度钢丝绳把裂缝两侧的固定点连接起来，把位移的变化传递给传感器。当裂缝张开或者闭合的时候，钢丝绳被拉出或者收回，传感器内部的精密构件把裂缝位移量转换成电信号输出，实现对裂缝一维变化的精确测量。该类仪器量程大、安装方便，可用于监测滑坡后缘主拉裂缝、侧缘剪切裂缝、不均匀变形产生的次级裂缝。

裂缝计种类繁多，除了拉线式外，还有振弦式、电感式等传感器，它们的共同特点就是能提供高精度、高稳定的监测数据。布设传感器之后再连接数据采集和传输系统，就能形成一个自动化的裂缝监测网络。通过裂缝位移的时间序列数据进行分析，特别是对裂缝位移变化速率进行分析，能较好地确定滑坡的变形阶段。一般而言，当滑坡进入加速变形或者临滑阶段的时候，滑坡表面裂缝的扩展速度会明显加快，这时就可以发出预警信号。

二、滑坡推力与地下水位动态监测

滑坡失稳是由内外动力因素综合作用而产生的结果，滑体内部应力状态（主要是推力）和地下水动态变化是两个主要的内因。对实时、同步监测这两个参数进行分析，探究它们之间的耦合关系，对于认识滑坡致灾机理、实现精准预警具有十分重要的意义。

（一）土压力盒监测滑坡推力分布

滑坡推力是造成前缘建筑结构破坏、推动滑坡结构破坏的主要荷载，直接体现出了滑体内应力状态以及传递方式。土压力盒是测量土体内部应力的一种传感器，将其埋设在滑坡体的滑床、主滑带、抗滑桩等支挡结构受力面上，可以实现推力的长期动态监测。

土压力盒的工作原理一般是应变或振弦技术。当它受到外部土体挤压的时候，内部的感应元件会形变或者频率改变，通过事先标定好的关系，把这种变化转换成压力值。在滑坡体的后缘、中部、前缘等不同位置、不同深度处布置土压力盒，

可以得到滑坡推力在空间上的分布规律和传递特性,在强降雨、地震等外部干扰下,滑坡后缘推力是如何产生、增大并传递到下滑体的。

从监测数据可以看出,滑坡推力变化同滑坡变形阶段有密切联系。滑坡稳定或者蠕变阶段推力值一般比较稳定或者缓慢增长。当滑坡进入加速变形阶段之后,土压力监测值一般会有一个明显的突增现象,可以作为滑坡失稳的重要前兆信息。将土压力监测和位移监测结合起来,可以更全面地评价滑坡的危险性,也可以为抗滑桩、挡土墙等加固工程的设计和安全性评价提供实测荷载数据。

(二) 孔隙水压力监测与降雨关系分析

孔隙水压力是决定岩土体抗剪强度的参数。孔隙水压力增大,直接降低滑带土的有效应力,减小滑坡稳定性,是降雨型滑坡失稳的主要原因。通过在滑坡体内布置孔隙水压力计(也称作渗压计)来监测地下饱和区和非饱和区的水压力动态,并与降雨量观测相结合来建立二者间的关系。

孔隙水压力计可以实时检测所在位置的水压力变化。降雨时雨水通过坡体表面裂隙或者孔隙入渗,使地下水位上升或者局部形成暂态饱和区,孔隙水压力随之增大。从监测数据的分析中可以得出,孔隙水压力响应滞后于降雨事件,响应快慢、峰值大小与降雨强度、降雨历时、坡体自身渗透性等有关。短时强降雨会突然增大坡体的浅层孔隙水压力,长时间降雨会使地下水位普遍上升。

利用长期观测数据建立的降雨与孔隙水压力响应模型,可以预测在一定的重现期大雨作用下,滑坡体内孔隙水压力所能达到的水平。这就为基于物理机制的滑坡稳定性动态评价、预警阈值确定提供重要的输入参数。了解该关系,可以解释某些降雨过程能诱发滑坡,某些不能,从而大大提高了预警的科学性和准确性。

(三) 滑坡地下水动态变化对稳定性的影响

地下水活动是影响滑坡稳定性的最活跃、最重要的因素之一。地下水的变化会造成孔隙水压力的变化,进而影响岩土体的抗剪强度,同时动水压力、浮托力、软化作用等都会对滑坡稳定性造成影响。地下水位周期性升降或者趋势性上升,是滑坡发生变形甚至失稳的直接原因。因此,对滑坡地下水位做长时间的动态监测,是滑坡研究和防治中不可缺少的一环。

地下水位升高会使地基软化,地下水渗流加剧。直接导致滑带土饱和度增大、孔隙水压力增大,根据有效应力原理,使土体抗剪强度大幅降低,这是最主要的影响机制。地下水位上升会使滑体浮托力增大,有效重量减小,减小滑面抗滑力。

地下水在坡体内流动会形成动水压力,当渗流方向和滑动方向相同时,就形成附加的下滑力。长期地下水作用还会使岩土体产生物理、化学上的软化、溶蚀效应,造成岩土体机械性质变差,抗滑能力不断降低。

在滑坡体内布置地下水位观测孔,进行地下水位长期自动观测,可以得到地下水位的空间分布情况、季节性变化规律以及受降雨、水库水位调度等外部因素影响的情况。将地下水位数据输入极限平衡法或者数值模拟的稳定性计算模型,就可以完成滑坡稳定系数的动态反演和预测,从而了解在不同的地下水位下,滑坡何时会达到失稳临界状态,为地下水相关预警阈值的确定提供科学依据。

三、滑坡临滑阶段综合判据与预警模型

当滑坡进入临滑失稳阶段的时候,其变形以及内部物理状态就会出现一些特有的前兆信息。准确捕捉、科学分析这些信息,就是成功预警、避免人员伤亡和财产损失的最后一道防线。本节主要利用监测数据来建立滑坡临滑阶段综合判据,并且开发出有效的预警预测模型。

(一) 位移加速度与切线角判据

位移是滑坡变形最直接的宏观表现,但是它的变化率(速度)和变化率的再次变化(加速度)更能灵敏地反映滑坡稳定性状态。大量的滑坡实例表明,当滑坡由稳定蠕变阶段转为加速变形阶段的时候,位移时间曲线上速度、加速度都会明显增大。因此,以位移速度、加速度为依据的判据是临滑预警中应用最广、效果最好的方法之一。

1. 位移加速度判据就是直接观察位移时间序列的二阶导数。滑坡等速变形阶段加速度接近于零,加速变形阶段加速度呈持续的、非零的正值。根据所设定的加速度阈值,分成不同的预警级别。当监测到的加速度超过经验值或者统计阈值的时候,就可以触发相应的警报。物理意义明确,计算简单,响应灵敏。

2. 切线角判据:利用位移-时间曲线或者速度-时间曲线的切线斜率来判定滑坡变形情况。位移时间曲线上切线的斜率就是瞬时速度。切线角(切线与时间轴夹角)不断变大的时候,说明滑坡在加速。在倒数速度-时间坐标系中,当滑坡接近失稳的时候,数据点一般会接近一条直线,这条直线与时间轴的交点就是预测滑坡发生的时间。切线角判据直观易懂,有经验的监测人员可以很快地通过图形做出判断。

（二）多参数耦合的滑坡预警阈值确定

单凭一个参数来确定预警阈值，很容易造成漏报、误报的情况。因为滑坡失稳一般不是单一因素造成的，而是由多种因素综合引起的。为了使预警更加准确，一般用多参数耦合法来确定预警阈值。即预警触发不再只是单靠位移速率是否超过限值来判断，而是看多个关键参数组合起来的状态是否已经进入到危险临界区。该方法考虑了滑坡内外动力因素，更符合滑坡的物理致灾机理。

确定多参数耦合阈值大致有以下步骤：选取与滑坡稳定性密切相关的监测参数，地表位移、深部位移、孔隙水压力、降雨量、土压力等。通过对历史监测数据以及滑坡发生实例进行分析，得到滑坡各个变形阶段参数的组合特征。利用统计分析可以得到引发滑坡失稳的降雨强度、降雨历时组合阈值（I-D 阈值），或者位移速率、孔隙水压力的耦合阈值。

还可以使用机器学习算法（支持向量机、决策树等），从大量的稳定和失稳状态下多参数数据中“学习”出多维预警决策边界。当新的实时监测数据组合落入决策边界所划定的危险区域时，系统就会发出警报。数据驱动的方法可以发现人类专家不能察觉的复杂的参数间的关系，从而可以设置出更加细致、动态的预警阈值，大大提高预警的准确性。

（三）滑坡临滑时间预报模型

滑坡进入明显的加速变形阶段之后，对于最终失稳时间做出准确的预报，对于应急撤离和抢险部署有非常重要的意义。滑坡临滑时间预报模型就是用加速位移阶段监测数据来数学拟合、外推。其中 Verhulst 模型由于可以较好地描述具有饱和状态的 S 形增长过程，因此被引入到滑坡位移预测中。

Verhulst 模型又叫逻辑斯蒂模型，在滑坡预测中反函数的形式用得更多。该模型认为滑坡位移速率同当前的位移和距极限位移的剩余量成正比。拟合临滑阶段的一段位移监测数据可以得到模型参数，进而外推整个位移时间曲线，预测位移达到无穷大（即失稳破坏）的理论时间。近年来由于原始的 Verhulst 模型存在初始数据点选择敏感等问题，所以研究者提出了许多改善模型的方法来提高预测精度和可靠性。

除了 Verhulst 模型之外，还有斋藤模型、黄金分割模型等多种经验或者半经验的时间预报模型。不同的模型有不同的理论基础以及适用的条件。实际应用时一般采用不同的模型对同一组数据并行计算与预测，再根据拟合情况以及以往经

验,综合考量各个模型的预测结果得出一个较为可靠的临滑时间范围,而不是具体的某一个时间点。集成预测的方法可以提高决策的容错性以及科学性。

(四) 基于深度学习的滑坡临滑智能识别模型

伴随着人工智能的迅速发展,深度学习由于具有很强的非线性特征提取能力以及模式识别能力,在滑坡临滑智能识别方面有广阔的发展前景。传统的预警模型都是依靠人的经验来完成的,不能学习滑坡失稳的复杂的前兆模式。深度学习模型可以自动对大量的高维监测数据进行学习,找到滑坡失稳的复杂前兆模式,从而实现更智能、更准确的预警。

建立深度学习滑坡识别模型的第一步就是创建大型的多源数据库。该数据库需要包含 GNSS 位移、测斜数据、孔隙水压力、雨量、遥感影像、地质参数等各方面的监测数据,并对数据进行标记,标明其对应的滑坡状态(稳定、加速、临滑)。接着选择合适的深度学习网络结构,循环神经网络或者它的变种长短期记忆网络。这类网络特别适合于处理时间序列数据,可以很好地抓住位移、水位等参数随时间变化的动态特征。

训练好的深度学习模型可以部署到实时监测系统。模型持续观测实时监测数据流,如同经验老到的专家一样,判断出滑坡目前的稳定情况。当模型检测到数据中存在临滑特征模式的时候就会发出预警。深度学习模型的优势在于可以处理多源异构数据,发现隐藏在数据背后高阶非线性耦合关系,这对理解并预测由多种因素共同作用所导致的滑坡来说尤为重要。虽然该技术尚在发展之中,但是其在提高预警自动化水平、智能化程度上所具有的巨大潜力已经得到广泛的认可。

第二节 泥石流预警方法

一、泥石流物源区动态监测技术

物源是泥石流形成的三大基本条件之一,物源区的动态监测是预警工作的基础。利用各种现代化观测技术对物源区松散堆积体的空间分布、稳定性状态、储量变化进行实时监测,可以给泥石流启动、规模预测提供最直接的依据。

(一) 遥感影像解译物源区松散堆积体变化

遥感技术由于宏观、动态、快速等特点,在泥石流物源区监测中起着举足轻

重的作用。用不同时相的高分辨率卫星影像或者无人机航拍影像进行对比分析,可以有效地识别、圈定出由崩塌、滑坡、坡面侵蚀等形成的松散堆积体的范围。用影像的光谱、纹理、形态等特征,结合地理信息系统空间分析,可以解译出堆积体分布、面积、厚度等信息,也可以动态跟踪堆积体变化。

多期影像差分解译是物源变化监测的主要方式。比较灾害前后或者不同时段影像,可以定量评价松散堆积体的剥蚀和堆积情况,分析松散堆积体空间位置移动和方量增减。这样分析的变化不但可以反映物源的活跃程度,也可以给判断未来泥石流的潜在规模提供数据支持。依据历史灾害数据、地形地貌特点可以创建物源区危险性评价模型,给公路沿线地质灾害风险区划提供科学依据。

(二) 物源区稳定性监测与启动条件分析

物源区是否稳定直接决定了泥石流是否容易发生。合成孔径雷达干涉测量技术由于具有全天候、高精度、大范围监测地表微小形变的特点,在物源区稳定性监测中得到了广泛的应用。利用长时间序列的雷达干涉测量数据可以得到物源区(如潜在滑坡体)的毫米级形变速率场,找到活动性强、稳定性差的区域,为预警提供前兆信息。利用永久散射体雷达干涉测量、短基线集技术等高级算法,消除了复杂的山区植被覆盖和大气延迟给监测带来的不利影响,提高了监测精度和可靠性。

在形变监测的基础上分析物源启动条件更为重要。一般要结合现场地质调查、岩土体物理力学参数试验、数值模拟等方法。通过建立物源区的地质力学模型,在强降雨、地震等各种激发因素作用下对堆积体进行应力应变响应过程模拟。分析其达到失稳破坏的临界条件,即临界孔隙水压力、临界降雨强度或者临界地震动参数。根据物理机制对稳定性进行分析,把宏观形变监测和内部失稳机理结合起来,把预警判断由现象描述提升到过程预测的层次。

物源区启动分析还要考虑它和降雨的耦合。在物源区布置土壤含水率、孔隙水压力传感器,可以对降雨入渗过程中土体饱和度的变化,有效应力的降低过程进行实时监测。把这些现场监测数据和雷达干涉测量获得的形变数据联系起来分析,可以更准确地反映降雨对物源稳定性影响规律,进而准确地判断出在某个降雨过程中的泥石流启动风险,为临灾预警提供更加可靠的判据。

(三) 泥石流沟谷堵塞系数监测

沟谷堵塞是泥石流流量短时间内突然增大主要原因,沟谷堵塞状况的有效监

测是判断泥石流规模和突发性的关键。堵塞系数是指由于滑坡、崩塌等原因堵塞沟道之后,溃决形成的泥石流洪峰流量与正常洪水流量之比。对其监测首先要依靠沟道内堵塞隐患点的识别。利用高分辨率遥感影像、无人机巡查,可以及时发现沟道内不稳定坡体、大体积堆积物、已有的堰塞体,并对其堵塞沟道的可能性进行评价。

找到潜在的堵塞点之后就要实施定向的动态监测。采用地面三维激光扫描或者雷达干涉测量技术,对堵塞体本身的稳定性、变形情况进行监测。在堵塞体的上下游分别布置雷达水位计或者压力式水位计,实时监测上游水位上升的速度以及蓄水量。这些数据可以用来进行堰塞湖溃决危险性的分析。当上游水位迅速上升或者堵塞体有加速变形的前兆时就可以发出预警。溃决风险分析模型可以利用水量、坝体材料、几何形态等参数来估算溃决时产生的洪峰流量,从而给下游危险区范围划定、人员疏散时间计算提供数据支持。

(四) 基于激光雷达技术的物源区体积动态计算

激光雷达,特别是机载激光雷达,因为可以穿透植被直达地表、快速获取高精度三维地形数据,已经成为动态计算物源区体积的利器。对泥石流物源区进行多期激光雷达扫描,可以得到高精度的数字高程模型。对比不同时期的数字高程模型可以直接计算出物源区由于侵蚀、崩滑等原因造成的土石方量增减,实现对物源储量的动态、三维、高精度量化。

动态体积计算对于泥石流规模预测有直接意义。通过对一次强降雨事件前后激光雷达数据的分析,可以得到这次降雨所引起的物源启动量,建立降雨和物源启动量之间的定量关系。另外把激光雷达得到的详细地形数据输入数值模型中,可以更好地模拟出各种规模的物源启动后形成的泥石流运动过程、堆积范围、致灾强度,为公路工程的设计和防灾减灾规划提供数据支持。无人机载激光雷达的应用,使它的精度高、成本低、灵活性大、巡查频密等特点被充分地表现出来,可以对重点隐患点进行频繁的检查 and 更新。

二、降雨型泥石流临界雨量阈值研究

降雨是山区泥石流的主要原因,找到准确的临界雨量阈值,才能做好预警。通过对历史灾害数据、降雨数据的分析,找到泥石流启动与降雨特征之间存在的内在联系,建立可靠的预警模型,给雨量监测实时预警系统决策提供依据。

（一）前期降雨量与当日激发雨量关系

泥石流的发生不是由短时强降雨决定的，前期降雨的累积作用也起着非常重要的作用。前期降雨使土体含水量增大，孔隙水压力增大，抗剪强度降低，为之后短时强降雨（激发雨量）引发泥石流创造了条件。因此研究前期降雨量和当日激发雨量的关系，是建立科学预警阈值的前提。一般前期累积降雨量越大，引起泥石流所需的当日激发雨量（或者小时雨强）就越小。

这种关系可以用大量的泥石流事件以及对应的降雨过程数据来确定。常用的有强度历时模型、雨量雨强模型等。强度历时模型表明降雨强度与持续时间成反比关系，雨量雨强模型表示初期累计有效降雨量和泥石流临界小时雨量的关系。

实际运用时需要创建某一区域的强度历时或者雨量雨强阈值曲线，需要获取长时间的降雨数据以及准确的泥石流发生时刻记载。在坐标系中绘制大量的成灾点和未成灾点，找到可以将两类点有效区分开来的边界线，这条线就是该地区的临界雨量阈值。这条阈值线给预警系统提供了一个直观的判据，当实时监测到的降雨过程数据达到或者超过这条阈值线的时候，系统就会自动发出警报。

（二）不同区域泥石流激发雨量的统计分析

由于地质构造、地形地貌、植被覆盖和土体性质等不同，各个区域的泥石流激发雨量有较大的差别。因此必须做分区统计分析，建立地域针对性预警阈值，盲目套用其他地区的标准会导致预警失效或者误报。

1. 首先要收集大量的包含泥石流出现时刻、出现地点以及降雨过程详细数据的资料。根据流域的地质环境、物源特征、沟谷形态等因素把研究区划分成若干个具有相似致灾背景的子区域。

2. 用统计分析的方法对每个子区域的泥石流样本进行激发雨量的统计，即对1小时最大雨强、24小时累计雨量等进行统计。使用概率统计方法求出不同重现期的临界雨量值，或者用逻辑回归等机器学习的方法建立多种因素的概率性预警模型。

3. 根据统计结果给每一个子区域设置预警阈值。一般会设立注意级、警戒级、危险级等不同的降雨强度以及概率阈值。最后用独立的历史灾害数据来检验所建立的区域性阈值，评价预报准确率、漏报率、虚警率，根据结果来优化阈值，提高其可靠度。

（三）基于雨量监测的泥石流实时预警模型

以雨量监测为基础的实时预警模型，是目前应用最广的泥石流预警方式。此模型主要功能就是实时采集雨量数据，再与事先设定好的临界雨量阈值进行比较来实现自动预警。完整的预警模型一般是由数据采集、数据传输、模型计算、预警发布这四个部分组成的。

模型构建时要先在泥石流高发区的重要位置布设自动雨量计网络，对降雨过程进行连续、高时空分辨率的监测。雨量计通过 GPRS 或者北斗卫星把数据实时传输到监控中心。监控中心服务器上运行着预警模型算法，该算法不仅要实时接收的分钟级或者小时级雨量数据进行处理，还要能够实时计算前期有效降雨量。

当模型计算出的实时降雨指标（当前小时雨强、滑动累计雨量等）在雨量雨强坐标系中达到或者穿越预警阈值线的时候，系统就会自动发出相应等级的警报。警报信息可以通过短信、电话、警报器、广播等方式及时通知受威胁区域的管理人员及公众，为应急避险措施的采取争取时间。现代预警模型利用地理信息系统技术，用地图上动态区域的方式来表示预警等级、泥石流危险性区划，使预警信息更直观、准确。

三、泥石流爆发时间与规模预测方法

在判断泥石流有可能发生的基础上，再对泥石流爆发的时间、规模、强度做出准确的预测，就是更高层次上的精准预警、高效防灾。这就需要用地声、次声、流速监测等直接观测手段，加上先进的数值模型来对泥石流的动态过程和灾害后果做出综合判断。

（一）泥石流地声监测与预警技术

泥石流在运动的时候，大量的固体物质与沟床、两岸发生剧烈的摩擦、碰撞，会产生强烈的地面振动，这就是地声信号。信号频率范围广、传播速度快，在泥石流到达下游之前就能被沟道沿线地声传感器捕捉到。地声监测技术就是根据泥石流临近预警的地声信号特有的频谱、强度特征来实现的。

典型的地声监测系统是由地声传感器、数据采集器、预警终端组成。传感器一般安装在泥石流经过的沟道旁，当检测到的信号超过背景噪声的阈值，且信号的特征符合泥石流特征时，系统就会发出警报。根据信号的强弱、持续时间等可以对泥石流的规模进行初步判断。次声监测也是一种有效的手段，泥石流运动时

产生的低于 20 赫兹的低频次声波具有传播距离远、衰减小、穿透力强的特点，可以作为地声监测的一种辅助方式，实现远距离提前预警。使用地声、次声联合监测网络可以更准确地获取泥石流启动、运动的信号，可以减少由于单一传感器故障或者环境干扰而造成的漏报、误报。

（二）泥石流断面流速监测与流量估算

实时获取泥石流的流速、流量是评价泥石流规模、致灾能力最直接的方式。在公路沿线泥石流沟口、桥涵处装设非接触式雷达测速仪。该设备可以向流体表面发射雷达波，利用多普勒效应来分析回波信号，准确地测量出泥石流的表面流速，而不会担心雷达传感器被泥石流冲毁的风险。

得到断面流速之后，结合泥石流泥位的监测就可以求出断面的实时流量。泥位监测可以采用雷达液位计、超声波液位计或者压力传感器等。流量计算公式为 $Q=A \times V$ ，其中 V 是雷达测量的平均流速， A 是泥石流过水断面面积，可以由实时监测的泥位和事先测量的沟道断面几何形状计算得出。对流量过程线积分可以求出一次泥石流事件的总冲出方量。实时获取的流速、流量、总量数据不但是检验预警模型、评价灾害规模的重要参数，也是指导应急抢险、灾后评估的重要依据。

（三）基于洪水演进模型的成灾范围预测

利用预测出的泥石流发生时间、流量，通过数值模拟洪水演进的方法来科学地确定泥石流的运动轨迹、演进过程、堆积范围和淹没深度，为受灾区的空间分布、人员撤离提供决策支持。FLO-2D 是泥石流模拟中常用的二维洪水演进模型软件。

该模型需要高精度的数字地形数据（由激光雷达获得），泥石流流量过程线（上游监测估计或者水文法计算），泥石流流体的物理参数（容重、黏滞系数、屈服应力等）。FLO-2D 是通过求解流体运动控制方程来模拟泥石流在复杂地形中流动、堆积的过程，用地图上不同时刻的流速、泥深分布和最终的成灾范围来直观地展示出来。采用物理过程模拟的方法，可以克服传统经验公式法在复杂地形下适用性差的缺点，预测结果更准确。模拟百年一遇、五十年一遇等各种降雨频率条件下泥石流的发生情况，得到不同危险等级的风险区划图，为公路选线、防护工程布置、应急预案制定提供依据。

（四）泥石流冲击力监测与致灾强度评估

泥石流的破坏力主要是巨大的冲击力，直接监测和评价冲击力大小，是评定泥石流对公路桥墩、挡土墙等防护工程造成危害程度的重要依据。在重要的防护

构筑物前设置专门设计的冲击力传感器或者压力盒,实时记录泥石流龙头和后续流体对结构动态压力的过程。

冲击力数据可以用来验证和修正泥石流冲击力的理论计算公式,提高工程设计精度。灾害发生时,对冲击力大小进行实时监测可以直接判定工程结构的安全状态,当冲击力大于设计荷载时就发出结构损毁的预警。灾后用完整的冲击力时程数据来分析工程的实际承载能力,为后续加固或者新标准的制定提供宝贵的实测依据。根据数值模拟得到的流速、泥深,评价和分级受冲击区的致灾强度,将受冲击区分为高冲击力区、中冲击力区、低冲击力区,为灾后救援力量精确定位以及恢复重建先后次序提供依据。

第三节 地面沉降监测网络

健全的地面沉降监测网是保证公路地质安全的基础。该网络把宏观遥感技术同定点精测手段有机地融合起来,其目的就是实现从区域到局部、多尺度、高精度的灾害预警。

一、区域地面沉降 InSAR 监测技术

合成孔径雷达干涉测量技术由于具有覆盖范围广、全天候、非接触等明显的优势,已经成为区域地面沉降监测领域的一场革命,给公路沿线形变场的宏观探测带来了新的视角。

(一) 大范围地面沉降 InSAR 数据源选择

大范围地面沉降监测当中,InSAR 数据源的选择同监测精度、范围以及时效性存在直接联系。目前国际上已经有多颗装有合成孔径雷达的卫星在轨道上运行,可供使用的数据资源十分丰富。就欧洲空间局 Sentinel 1 卫星而言,其 C 波段数据可以免费获取,重访周期短、覆盖范围广,比较适合做区域普查和长时间段的动态观测。精度要求高、城市区域及重要基础设施监测用德国 TerraSAR-X 卫星提供的 X 波段高分辨率数据更合适,可展示更多的细节。

数据源选择要考虑监测目标区地理环境以及具体的监测要求。L 波段雷达(日本 ALOS-2 卫星)由于波长较长,穿透性好,对植被覆盖度高的地方可以有效减弱失相干效应,获得更加可靠的形变信息,适合于穿越林地、农田的公路线路。

C 波段的数据在分辨率和穿透性之间取得很好的平衡,使用最广泛。因此根据不同的地表覆盖类型选择不同的波段数据源进行综合分析,是实现全面有效监测的重要方法。

(二) PS-InSAR 技术沉降时序分析

永久散射体雷达干涉测量技术是做高精度、长时序地面沉降分析的主要方法。该技术利用长时间序列的 SAR 影像,在较长的时间里识别出相干性比较高的地面目标,比如建筑物、桥梁、裸露岩石等,这些目标称为永久散射体。这些稳定的测量基准点可以有效地克服传统 InSAR 技术由于时间、空间失相干、大气延迟等因素所造成的误差。

PS-InSAR 技术的关键就是建立整个监测时段的形变时间序列。用筛选出的永久散射体点做差分干涉处理和相位解缠,可以得到每个点从开始观测时刻到现在累积的沉降量。由此得到的毫米级精度沉降速率、时间序列,不仅可以反映公路沿线重要设施的稳定情况,还可以对沉降过程的非线性动态特点以及未来走向做出预测。

(三) 沉降漏斗区的识别与演化趋势

沉降漏斗区是指由于局部地下水过度开采或者其它原因,在空间上呈碗状或者漏斗状的集中沉降区域,是地面沉降灾害的主要表现形式。用 InSAR 技术得到的高密度监测点云,可以直观有效地识别出沉降漏斗的范围、形态、沉降中心。利用空间插值的方法,可以将离散的 PS 点或者 DS 点数据转换成连续的沉降速率场图,从而清楚地画出漏斗的边界。

分析沉降漏斗的演变趋势对公路灾害预警有重要的意义。利用长时间序列的 InSAR 观测结果,可以跟踪沉降中心位置是否移动、沉降速率是加快还是减缓、漏斗影响范围是否扩大或者缩小。对比不同年度的年平均沉降速率图,可以找出沉降失控发展的地区。

对演化趋势的分析可具体归纳为以下几个方面:

1. 空间展布演化:分析沉降漏斗影响范围的变化,判断其是否向重要公路线路或桥梁区域扩展。
2. 强度变化分析:研究沉降中心最大沉降速率随时间的变化,评估沉降活动的剧烈程度。
3. 形态变化分析,看漏斗形态是否发生了改变,比如由单个中心变为多个中

心,或者多个小漏斗合并成一个大漏斗。这些信息对于预测公路以后会遇到什么样的差异沉降风险有参考价值。

(四) SBAS-InSAR 技术在大范围沉降监测中的应用

短基线集干涉测量技术是对 PS-InSAR 技术的一种有效的补充,在非城市区地面沉降监测上具有很大的应用潜力。与 PS-InSAR 需要少数高相干性的点目标不同,SBAS-InSAR 技术利用时空基线较短的干涉对,降低了对目标点相干性的要求,可以在植被、农田等分布式散射体区域中得到更多的有效测量点,大大提高了监测点的空间密度。

该技术核心思想就是建立多个小基线集,在每个集合内进行相位解缠,再用奇异值分解等方法把各个集合的形变结果关联起来,最后得到整个监测区域的沉降时间序列。对于横贯广袤乡村、自然地貌的公路线,SBAS-InSAR 能够给出更加连续完整的沉降剖面,避免 PS 点稀疏造成的信息空白。这就使技术人员能够对公路沿线整体沉降状况有更全面的认识,及时发现发育在非硬化地表的潜在差异沉降区段。

二、分层沉降监测标组的建设与观测

仅凭地表沉降数据很难全面反映沉降机理,分层沉降监测是了解地下各土层压缩变形情况的重要方法,也是从深度上认识地面沉降成因、指导精准防治的关键手段。

(一) 分层沉降标的钻孔设计与标组结构

分层沉降标的建设始于精细的钻孔设计,其目的就是创建一个可以长久、稳定、精确测量地层压缩的垂直通道。钻孔深度一般要求穿透所有主要压缩土层,尽量将基准点设在稳定的基岩或者深部密实土层中,保证观测数据的绝对可靠。钻孔孔径要根据所选监测仪器来确定,既要保证仪器的顺利安装,又不能对周围土体造成过大扰动。钻孔时详细记录岩土层的岩性、厚度、物理力学性质,为后面的数据解译提供地质依据。

典型的分层沉降标组有基准标、分层标、保护设施三部分组成。其核心结构一般为同轴套管,最外层为护孔管,起到保护整个监测系统的作用,内层为测量管,是测量探头上下移动的通道。在测量管外部,于不同的深度处安装有固定在土体上的测量锚(或磁环),这些锚点会随着所在土层的沉降而移动。通过测量

各个锚点相对于孔口或者孔底基准点的深度变化，就可以得到各个分层土层的压缩量。

（二）不同土层压缩量的观测方法

观测不同土层的压缩量，主要是准确测定安装在不同深度的测量锚点位置的变化。最经典的方法就是用机械式或者电子式探头，沿预设的测量管道进行测量。用磁环式分层沉降仪为例，观测人员将装有磁簧开关的探头放到测量管里。当探头经过磁环的时候，磁场触发开关，地面接收设备发出声光信号，观测人员马上记录测绳上对应的深度读数。

在不同的时间点测量各个磁环的深度，就能得到它们随时间变化的情况。某一土层的压缩量，就是该土层顶部和底部两个相邻磁环之间相对距离的变化量。如果在 t_1 时刻测量得到 1 号磁环深度为 $D_1(t_1)$ ，2 号磁环深度为 $D_2(t_1)$ ，那么 t_2 时刻该土层的压缩量为 $[D_2(t_2) - D_1(t_2)] - [D_2(t_1) - D_1(t_1)]$ 。

将所有的被监测土层压缩量相加，就能得出从地表到基准标所在深度处的总压缩量。直接的、物理的观测方法数据直观可靠，不受电磁信号的干扰，可以为准确区分主次压缩层、分析不同土层对总沉降的贡献率提供最有力的依据，同时也是验证和标定其他间接监测方法的重要基准。

常见地面沉降监测技术特点对比

特点 / 方法	InSAR 技术	PS-InSAR 技术	SBAS-InSAR 技术	分层沉降监测
监测范围	广域	广域	广域	单点 / 局部
空间密度	高	中等（稀疏）	高	单点 / 局部
监测精度	毫米级	毫米级	毫米级	毫米级
探测维度	表面形变	表面形变	表面形变	垂直分层变形
适用环境	地表类型多样	城市、裸露地表	植被、农田等	任意（需钻孔）
主要优势	全天候、非接触	克服失相干、长时序	提高空间密度、适用广	揭示沉降机理、精准防治
局限性	受失相干影响	需高相干目标	计算复杂	成本高、单点

从上述地面沉降监测技术特点对比可见，各种技术各有侧重，应根据实际需求组合应用。

（三）分层沉降数据与地面沉降的相关性

分层沉降数据与地表总沉降量之间存在着直接的内在联系，对二者做相关性

分析是建立完整沉降模型的前提。理论上,在某一垂直剖面上,分层沉降监测仪测得的地表到稳定基岩之间所有土层的压缩量之和,应该等于该点地表总沉降量。地表总沉降量可以用高精度水准测量、GNSS 连续运行站或者 InSAR 技术在同一位置进行测量。

通过比较分析两种独立来源的数据,可以实现不同的目的。一方面可以相互校验,检验监测数据的准确性。两者吻合好就可以证明监测系统(分层标、地表监测设备)的可靠性。另外当出现差异时,可以分析原因,如地面堆载引起的压实是否被监测到了,或者基岩深部也有一定沉降。最重要的是,相关性分析可以体现地面沉降的内部机理,找出起决定作用的地层,为地下水回灌和地基处理方案的设计提供科学的依据。

三、地面沉降对公路线路平纵断面的影响评估

地面沉降并不是均匀发生的,它所造成的不均匀性直接作用在公路线上,使公路线原有的几何形状发生改变。评价影响的程度和范围,是防止由于沉降造成的公路功能性损坏及结构风险的前提。

(一) 沉降引起的公路纵坡变形分析

公路的纵断面设计要确定一系列的纵坡和竖曲线参数,以保证行车的安全、舒适、排水畅通。地面沉降,尤其是不均匀沉降,对纵断面线形的破坏非常大。当公路线路经过沉降漏斗的时候,路面就会下沉产生凹陷,进而使原设计坡度发生改变。沉降区与稳定区交界处会形成异常陡坡,会影响车辆的动力性及制动性能,增大行车危险。

分析纵坡变形一般要结合设计资料以及多期次的实测高程数据。对公路中线定期进行精密水准测量,可以获得沿线各桩号的高程变化,绘制出不同时期的实际纵断面图。将实测纵断面图和原始设计图叠加,可以得到路段的纵坡变化率、竖曲线半径变化量、最大沉降量等。

分析结果可以用来评价公路的使用性能。原来设计成有利于排水的缓坡路段,因为沉降变成了反坡或者平坡,导致路面积水,冬天结冰,严重影响交通安全。通过纵坡变形分析,可以找到危险路段,为之后路面翻新、路基注浆抬升等养护维修决策提供准确的位置和工程量依据。

（二）差异沉降对路面结构平整度的影响

路面平整度是衡量公路服务水平、行驶舒适性的主要指标，差异沉降是造成路面平整度下降的主要地质因素。路基下土体发生不均匀压缩变形的时候，变形会直接传递给路面结构，造成局部隆起和凹陷。即使沉降量不大，在很短的距离内发生较大的变化，也会给高速行驶的车辆造成强烈的颠簸感，降低驾乘舒适度，甚至造成车辆失控引发交通事故。

差异沉降给路面结构造成的破坏是全方位的。沉降差大的地方，路面结构层（特别是刚性或者半刚性基层）内会形成很大的附加拉应力。当应力超过材料的抗拉强度时，就会造成路面开裂，产生横向、纵向裂缝。裂缝出现之后，又为地表水下渗打开了通道，使路基土进一步软化，不均匀沉降发展更快，形成恶性循环。因此，用车载激光平整度仪等设备定期检测路面的国际糙度指数，再将 IRI 与 InSAR 观测到的差异沉降图谱联系起来，就可以找到病害路段并探究其内在机理。

（三）沉降区域公路路基辅助措施效果评价

为解决地面沉降对公路的威胁，工程界开发出各种路基辅助处理措施，以减小工后沉降或者抵消不均匀沉降。常用的方法有，用粉煤灰、发泡聚苯乙烯等轻质填料来减小路堤荷载，减小对下卧软土的附加应力；采用桩承式路堤，将上部荷载直接传递到深部稳定土层；或者在修建前对软弱地基进行预压固结，提前释放大部分沉降。

辅助措施效果评价对于优化设计、积累经验都有很重要的作用。评价工作要依靠长期的、系统的监测数据。对采取辅助措施的路段和未处理的参照路段都设置相同的监测系统（如水准点、分层沉降标、沉降板等），并结合区域 InSAR 沉降观测来定量分析比较不同的方案。评价内容有措施实施后总沉降量控制效果、差异沉降改善程度、工后沉降速率是否符合设计要求等。根据监测数据进行反馈和评价可以验证设计理论的有效性，也可以为以后类似工程选择最经济、最合理的处理方案提供参考。

（四）桥梁墩台不均匀沉降对结构安全的影响

桥梁是公路线路上的重要节点，结构安全对不均匀沉降很敏感。桥梁属于超静定结构，桥墩或者桥台之间微小的高差变化（即不均匀沉降）都会在上部结构中产生很大的附加内力，严重时甚至会危及桥梁的整体安全。相邻墩台出现差异沉降

时,主梁就会产生转动和挠曲,从而造成支座受力不均,出现脱空或者损坏。

附加内力会使主梁关键截面的应力超过设计允许值,在连续梁或刚构桥中,梁的负弯矩区很容易开裂。长期不均匀沉降会造成桥面铺装破坏、伸缩缝被挤压或者过分拉开,从而影响行车的平顺性以及安全性。斜拉桥、悬索桥等大型桥梁的不均匀沉降还会引起索力的重新分布,使整个结构的受力状态发生改变,其后果是无法想象的。

因此桥梁墩台沉降监测及影响评价成为公路地质安全监测的重点。评估过程一般包括,用精密水准测量或者静力水准系统准确得到各个墩台的沉降量,将这些实测沉降值作为荷载输入到桥梁的有限元计算模型中,分析计算不均匀沉降引起的附加应力、变形、支座反力的变化情况,根据相关规范判断桥梁结构是否仍处于安全状态。当评定结果判定为高危的时候,就需要立即采取结构顶升、更换支座或者加固基础等措施来进行处理。

第四节 预警信息发布机制

公路地质灾害预警的最终目的就是将风险信息准确、及时地传递给受其影响的公路使用者和管理者。高效可靠的预警信息发布机制是整个预警系统发挥作用的关键部分,也是防灾减灾措施是否成功的决定性因素。

一、多级预警信息的生成与审核流程

预警信息的准确性是它的生命线,要建立从数据到信息、从自动生成到人工审核的一套严格的流程来保证预警信息的权威性、有效性。此流程包含等级标准、智能生成算法、充分听取专家意见这三个环节。

(一) 蓝、黄、橙、红四级预警标准定义

现代公路地质安全预警体系的关键就是建立科学、明确的四级预警标准,它和自然灾害潜在影响程度、发生概率以及紧迫性有直接的关系。表中列出了各级预警的特点以及应对措施:

公路地质灾害预警等级标准

预警等级	级别	发生可能性	紧迫性	触发条件示例	应对措施
蓝色预警	最低	有风险，短时可能性小	较低	长期地质环境变化、季节性降雨预测、历史数据分析	加强日常巡查监测，提醒有关部门关注，为风险升级做准备
黄色预警	III 级	可能性较大	中等	长时间中到大雨、监测指标明显异常但未临界	向驾驶人员发出警告，提示小心驾驶或绕行；公路部门启动初步应急响应，增加巡查频次，对重点隐患点专人盯控，预置应急力量
橙色预警	II 级	可能性非常大，紧急	高	区域性强降雨、关键监测指标（位移速率、孔隙水压力等）加速变化并接近失稳阈值	采取果断干预措施，如对受威胁路段实行临时交通管制或间歇性封闭；通过各种渠道向社会公众广泛发布信息，强制引导车辆和人员疏散
红色预警	I 级	即将发生或已发生，严重威胁	极高	监测数据显示岩土体已进入临滑状态或失稳破坏已发生	立即采取最严格手段，对危险路段实行全线封锁，禁止一切车辆和人员前往；全力组织人员撤离和紧急救援工作

从上表中可看出这四个预警标准组成一个递进式的、动态的风险管理框架，它的目的就是要根据风险等级采取相应的预防和应对措施。

（二）自动化预警信息的生成逻辑

自动化预警信息的产生属于提高预警时效性的主要技术。基本逻辑就是大量前端监测数据和先进的算法模型的深度融合。系统通过安装于公路沿线地表位移计、雨量计、深部位移监测仪、视频监控等各种传感器来获得多源异构数据。原始数据经过数据清洗、格式转换、时空对齐等预处理之后，去除非正常的的数据，保证数据质量。

经过预处理的数据被输入到预先设定好的地质灾害分析模型当中。这些模型使用了统计学、机理分析、支持向量机、神经网络等各方面的算法。系统用时间序列分析预测滑坡体位移的趋势，用降雨阈值模型判断泥石流发生的可能性，用机器学习算法建立复杂的灾害判别函数。当模型计算结果达到事先设定的各级预警阈值的时候，自动化系统就会产生一条初步的预警信息。

初步生成的预警信息中包含的主要要素有预警时间、预警路段的精确桩号、灾害类型、预警级别、触发预警的关键数据指标。从数据采集到信息生成理论上可以在几分钟甚至几十秒内完成，大大缩短了传统人工分析的响应时间。自动化流程使预警具有即时性，为后面的人工审核和应急响应争取了宝贵的时间，对突发性、短时临近的灾害来说，优势更加明显。

（三）人工干预与专家会商审核机制

尽管自动化生成预警信息效率高，但完全依靠机器决策存在一定的风险，地质环境复杂多变，不确定性大，因此人的智慧和经验是不可缺少的。因此，在自动化预警产生之后，必须设置人工干预和专家会商审核程序，作为发布预警信息之前最后一道“安全阀”。当系统特别是产生高级别（橙色或者红色）预警的时候，信息会立即推送给预警中心的值班人员和专家。

值班人员要对预警信息加以核实，即调取本路段实时视频监控画面、现场天气状况、历史监测数据，并与当日养护巡查报告进行对比。该步骤的主要目的就是排除由于传感器故障、数据传输错误或者外界暂时的干扰所造成的误报。如果初步核实不能排除风险或者预警级别较高就启动专家会商程序。

专家会商属于预警决策的重要部分。会商团队一般由地质工程、水文气象、交通工程等各方面的专家组成。采用远程会议系统共享所有的监测数据、模型分析结果、现场影像资料，进行分析研判。专家依靠自身丰富的经验和专业知识，对灾害发生概率、影响范围、发展趋势做出更加准确的判断，然后决定是否发布、修改或者取消预警信息，最后签发预警指令。人机结合的方式既可以保证效率也可以保证可靠性。

（四）预警误报与漏报的修正与发布机制

预警系统不可能万无一失，误报、漏报在所难免。健全的修正和发布机制是保证预警系统公信力、不断改进预警系统性能的保障。误报即发布的预警事件实际上并没有发生，一旦确认，必须立即通过所有的发布渠道撤销或者更正。在发布修正信息的时候要说明误报的原因（设备故障、数据异常），以消除公众不必要的恐慌，体现管理部门负责任的态度。同时技术团队对误报事件做复盘分析，找到造成误报的原因，模型阈值设置不合理、传感器故障或者算法缺陷，根据不同的原因采取不同的措施。

漏报的后果一般比误报更严重，即系统没有提前发现已经发生的灾害。一旦

出现漏报，应该立即开展抢险工作来保障人民生命财产安全。应急处置的同时，预警系统复盘工作也应该同步进行。分析团队要对监测网络不能获得前兆信息的原因，分析模型不能准确判断风险的原因有深入的认识。增加监测点、采用新的监测技术、修正模型参数或者改变预警算法。对漏报事件做深层次的分析，就是促使预警系统技术不断改进的重要力量，每一次漏报都成为完善预警系统、堵住漏洞的宝贵经验。

二、预警信息发布渠道与终端覆盖技术

预警信息产生之后，必须通过多样的发布渠道和先进的终端覆盖技术，使信息能广为传播、精准地到达每一个有可能受影响的人。创建起立体化、全覆盖的发布网络，才是解决预警信息到达“最后一公里”的关键。

（一）短信、微信与专用手机应用程序推送渠道整合

1. 移动通信技术普及，给公路地质灾害预警信息快速传播提供便捷高效的途径。整合短信、微信公众号、专用手机应用程序三个主要的渠道可以精准覆盖到不同的用户群体。短信是最基础的通信方式，覆盖面广、对智能手机依赖性低，可以保证在网络信号不好、山区或者面向非智能手机用户传递重要的预警信息。发布的内容一般简单明了，突出预警级别、危险路段和主要避险建议。

2. 微信公众号、专用手机应用程序为预警信息的呈现提供更丰富的形式。除了可以推送文字信息外，还可以附带灾害点的地图定位、现场图片或者短视频、推荐绕行路线图等。富媒体形式的信息更直观、更易于理解。专用手机应用程序可以给用户提供更加个性化的服务，用户可以订阅某路段的预警信息，系统也可以根据用户的实时位置，推送用户所在位置周边的地质灾害风险。

3. 三个渠道有效整合的关键就是创建起统一的信息推送平台。该平台可以根据预警信息等级、内容选择合适的途径或者多种途径同步发布。红色预警的时候，平台就会把所有渠道都设定成最高优先级的强制推送。同时平台要对用户数据库进行管理，保证信息精准投放，可以追踪、统计信息的发送情况来评价信息的到达率和发布效果。

（二）路侧可变情报板信息发布

路侧可变信息板是公路交通信息发布的关键基础设施，对于预警信息的传播起着不可替代的作用。它直接面对在道路上的司机，具有信息传递直接、醒目、

强制力强的特点。预警系统发出预警信息之后，交通控制中心就可以通过远程的方式，把预警内容及时显示在相关路段上游的可变情报板上。显示内容用高对比度颜色、简单的文字，即“前方 K10+200 山体滑坡风险为橙色预警，减速慢行”或者“XX 路段因暴雨红色预警而封闭，从 XX 出口绕行”

现代的可变信息板技术已经从简单的文字显示发展到可以显示图形、符号甚至简单的动画，从而使得信息的可读性更强、警示效果更好。发布滑坡预警时可以采用国际通用的注意落石图形符号。为了保证信息发布的准确、及时，可变情报板的管理平台要和地质灾害预警平台无缝对接。预警信息审核确认之后，按照预设的模板以及发布逻辑，自动或者半自动地推送到指定位置的情报板上，尽量减少人工操作所造成的延迟。系统应该有状态监测功能，保证情报板正常工作，把发布记录保存下来，供事后评价。

（三）广播电台与导航软件联动发布

交通广播具有很强的即时性，长途驾驶时收听交通广播已经成为许多驾驶员的习惯。同广播电台建立联动机制，可以把预警信息迅速转变为语音播报，使正在行驶的车辆驾驶员收到。预警中心可以将标准化的预警通稿实时发送给合作的交通广播电台，由电台主持人以插播或者滚动播报的方式发布。对于不能看手机或者情报板的驾驶员来说，这种方法尤其重要。

随着智能交通的发展，把预警信息整合到主流手机导航软件中，已经成了更加准确、主动的发布方式。通过与导航软件服务提供商合作，可以把地质灾害预警信息当作一个特殊的交通事件数据，实时推送到导航地图上。当用户规划的路线或者正在行驶的路线经过预警区域的时候，导航软件会立刻发出语音提示，在地图上醒目标注危险路段，并且自动规划安全绕行路线。

用位置服务实现精准推送的方式，改变了传统信息发布的广播式传播，实现了点对点的个性化预警。它不仅告诉驾驶员哪里有危险，更直接地指明了应对的方法。实现联动就要创建起标准化的数据接口以及共享协议，保证预警信息可以安全高效地在各个部门、企业之间流通。跨界合作模式既可以扩大预警信息的覆盖面，又可以加深预警信息的应用。

（四）车载智能终端预警信息接收与展示

伴随着汽车“新四化”的发展，车载智能终端也成了重要的信息交互界面。将公路地质灾害预警信息直接推送给车辆内部，是实现预警信息“入车、入脑”

的先进技术方向。这就需要车企、一级供应商和公路管理部门之间建立数据合作机制。一方面可以通过蜂窝网络把云端预警平台的信息传到车载系统；另一方面未来也可以利用路侧单元直接向车辆广播信息。

车辆接收到预警信息之后，车载系统会按照预警的严重程度以及紧急性来决定显示的方式。对于较低的蓝色或者黄色预警，系统可以在中控屏幕上标示出来或者用简短的语音提示。紧急的橙色或者红色预警，系统可以采用更加强制的提醒方式，仪表盘醒目的图标、高优先级的语音报警，在保证安全的前提下，与车辆辅助驾驶系统联动，建议驾驶员减速或者驶离主路。

该方式的优点就是及时性、集成性。信息直接出现在驾驶员的核心视野和听觉范围内，不需要驾驶员进行额外的操作（查看手机等），最大程度上减少了驾驶员分心的风险。车载终端预警信息可以为自动驾驶技术提供重要的环境感知输入，有利于自动驾驶车辆对地质灾害做出安全路径规划和驾驶决策，是公路安全预警未来的发展方向。

三、预警响应联动与信息反馈机制

预警信息发布不是结束，而是在开始应急响应和联动处置。只有建立了完善的响应联动机制与闭环反馈机制之后，预警所体现出的作用才会真正地被用在公路的安全保障上，从而让预警系统得以持续优化。

（一）预警发布后的交通管制联动措施

预警信息发布之后，立即采取有效的交通管制措施是防止灾害损失扩大的第一道防线。管制措施强度要和预警级别严格对应。蓝色或者黄色预警时，管制措施以提醒、疏导为主。用可变交通信息板和路侧广播发布限速指令，使驾驶员注意观察，谨慎驾驶；在进入危险路段前设警告标志，并安排好预置的交通管理人员做好临时控制的准备。

当预警级别为橙色的时候，交通管制措施要升级。此时就需要对受威胁路段进行间歇性放行或者禁止重型货车、危化品运输车等车辆通行。公路交通指挥中心要同一线执勤交警或者路政人员密切配合，根据现场雨量大小、路面状况等实际情况来调整管制措施。同时开启远端交通信息诱导，利用上游多级情报板、导航软件提前引导车流选择其它路线绕行，减少管制路段的交通压力。

红色预警表示必须立即实行最严厉的强制性管控措施。指挥中心要立即发出

指令，封闭危险路段所有入口，禁止一切车辆和人员通行。一线人员需设置封闭点硬隔离设施，标示绕行路线，对滞留危险区的车辆、人员进行紧急疏散。整个交通管制联动过程要做到指令传递迅速准确、部门之间配合顺畅高效，在灾害发生之前形成有效的物理隔离，最大程度地保障人民生命财产安全。

（二）应急队伍调度与物资准备响应

应急队伍、物资的响应调度同交通管制联动同步，是将预警转化为实际备灾、救灾能力的关键环节。不同的预警级别所对应的应急准备状态是不一样的。低等级预警发布以后，有关公路养护单位、应急抢险队伍应进入待命状态。保证负责人及关键岗位人员通讯畅通，对挖掘机、装载机、抽水泵等应急机械进行检查维护，清点补充应急物资（沙袋、篷布、照明设备等），在发生险情时达到可以及时出动的目的。

预警级别达到橙色或红色的时候，应急响应要前置部署。应急抢险队伍、大型机械要按照预案提前赶到潜在灾害点最近处。采用备勤前置的方法，可以大大缩短灾害发生后出动的时间。物资调度除了常规物资外，还要根据预判的灾害类型准备专用物资，大规模塌方时准备支护材料，泥石流时准备清淤设备。指挥中心必须掌握应急队伍位置、人员、装备等各方面的情况，才能统一高效地调度指挥。

（三）预警解除后的信息反馈与总结评估

一次完整的预警事件管理，不单单包含预警的发布和响应，而且必须要有预警解除之后的信息反馈、总结评估的闭环环节。当监测数据显示地质灾害风险已经消除或者降低到安全水平以下时，经专家会商确认之后，应及时发布预警解除信息。解除信息要通过发布时相同的渠道广泛公布，保证交通秩序正常，避免不必要的社会资源浪费。

预警事件结束以后应该组织有关技术人员和管理人员进行全面的复盘、评价。评价的内容要包含预警发布的及时性、准确性和覆盖面等各个方面。预警信息的覆盖面以及触达率是否符合预期？交通管制和应急处置措施是否合理、有效？是否存在协调不畅或者决策失误的情况？

评价要形成正式的总结报告，报告不能只肯定成功经验，还要分析存在问题及不足。根据发现的问题提出具体的改进措施，比如改进预警模型参数、拓宽信息发布渠道、完善应急联动预案、调整物资储备策略等。持续不断的复盘、改善机制就是预警系统自我学习、自我完善、持续改进并提高实战能力的核心动力，

保证每一次预警处置都成为下一次成功应对的基础。

（四）跨部门（气象、自然资源、交通）信息共享机制

公路地质灾害发生一般是多种因素共同作用的结果，牵涉到气象、水文、地质等许多方面。因此单个部门的信息孤岛不能形成准确可靠的预警体系。建立高效的、畅通的跨部门信息共享机制，就是现代公路地质安全预警体系的根基。其目的就是打破部门壁垒，实现气象、自然资源、水利、交通运输等各个有关单位重要数据的互联互通、信息共享。

气象部门是重要的数据来源，其给出的精细化天气预报，比如短时强降雨预报、区域累积雨量预测等，都是地质灾害预警模型的重要输入变量。自然资源部门对全国地质灾害隐患点的位置、种类、规模等基本情况有较详细的掌握，并做专业的地质勘查和稳定性评价。他们的专业知识和历史数据对于判断灾害风险有很重要的作用。

交通运输部门作为公路管理者、预警信息使用者、发布者，一方面要向共享平台提供本部门的公路基础数据、实时交通流量数据、道路养护巡查信息等；另一方面还要整合气象、自然资源等部门的数据，开展针对性的公路地质灾害风险研判。水利部门给出的水库水位、河流流量等信息，对判定沿河路段边坡稳定状况和冲刷风险也有着重要的意义。

深层次的信息共享要依靠顶层设计来推动。即建立统一的数据交换标准和接口规范，构建跨部门综合信息共享平台，用法律法规或者协议形式明确各部门数据共享责任和权利。由此形成气象预警、地质灾害风险预判、交通影响评估、联合预警发布完整的链条，大大提高预警的科学性和准确性，实现由各自为战到协同作战的根本转变。

第八章 气象灾害预警技术

气象灾害属于影响公路交通安全的主要自然灾害之一，突发性强，波及范围广，后果严重。本章主要研究公路运营安全保障需求，对典型的气象灾害预警技术体系进行分析和介绍，从而提高公路交通对气象灾害的精细化、量化、智能化防御能力。

第一节 暴雨洪水预警系统

暴雨以及暴雨引发的洪水给公路基础设施和通行安全带来严重危害。建立科学、高效的暴雨洪水预警系统，对于保证生命财产安全、提高公路路网韧性有着十分重要的作用。这就需要依靠先进的监测、模拟、评价技术，对从降雨到灾害发生的全过程进行全方位的防范。

一、公路沿线小流域暴雨监测技术

公路沿线地形多样，局部小气候明显，暴雨的时空分布极不均匀，给常规气象观测网络带来很大的困难。为了能够准确的捕捉、量化分析公路沿线小流域暴雨，需要建立高时空分辨率的立体化监测系统，为后面洪水预警、风险评估打下良好的数据基础。

（一）公路沿线自动气象站布设原则

公路沿线的自动气象站属于获取一手高精度气象数据的重要设施，其分布的合理性影响监测数据的代表性、有效性。布设工作要遵照“代表性、安全性、差异化”这三大核心准则，保证监测网络可以准确体现公路廊道及其临近小流域的气象状况，给暴雨预警赋予可信的数据支撑。

布设的第一个原则就是环境代表性。站址选择要地势开阔、平坦，能反映周边较大的气象状况，严格避开陡坡、洼地、高大建筑物、工矿及其他热源和污染源。观测场四周的障碍物不应造成日照、辐射等要素观测的遮挡或者反射干扰。

另外为了防止公路交通造成的气流、震动、尾气污染,气象站与公路主线距离不小于 30 米。

应采用差别化布点方案。不同的地形地貌、不同的气象灾害特征要采取不同的站点布设方式,站点分布的密度要有所区别。地形平坦、气候相对均一的平原微丘区,可以按 20 至 40 公里的间隔设普通站。在山岭重丘等地形复杂、气象条件多变的地区,局地环流作用比较明显,暴雨落区更加随机,布设间距应加密到 10 至 30 公里,以便捕捉局地强降雨中心。对桥梁、隧道口、长坡道、地质灾害多发区等特殊路段,增设局地站重点观测。

还要考虑到设备的安全性以及后期维护的可达性等。站址要选择在地基坚实的地方,避开积水区、地质不稳定地段,采取防雷、防盗、防破坏等措施。站点尽量靠近公路服务区或者养护工区,保证通信供电条件,便于维护人员定期检修、应急处置,确保气象站长期稳定运行。

(二) 雷达定量降水估算技术应用

天气雷达属于主动式遥感探测设备,可以给予大范围、高时空分辨率的降水信息,克服了地面雨量站“点式”观测的不足,在公路沿线暴雨监测中起着不可替代的作用。雷达定量降水估算技术是通过雷达回波信号进行分析,反演得到降水量、累积量,给洪水预警模型提供实时驱动的必要信息。

主要建立雷达反射率因子和地面降水率之间的关系,即通常所说的 Z-R 关系。但是雨滴谱分布、降水粒子相态、大气环境等因素都会影响二者的关系,具有很强的时空变异性。为了提高精度,需要根据公路沿线某地区的气候、降水特点,用历史雷达数据和同步地面雨量计的数据对当地的 Z-R 关系进行校准。双偏振雷达技术应用之后,可以得到差分反射率、差分传播相移率等更多的信息,从而更好地分辨出降水粒子的形状和相态,大大提高了强降水、混合型降水的估算精度。

雷达数据质量控制是保证雷达数据产品质量的前提。原始雷达数据受到地物回波、晴空回波、异常传播、波束遮挡等非气象因素的影响,必须使用一系列的质量控制算法来识别并剔除。由于地形的遮挡,山区成了雷达低仰角探测覆盖范围的主要障碍。因此常用多仰角数据融合或者与周边雷达进行三维组网拼图的方法,生成无缝覆盖的混合扫描反射率场,为之后的降水估算提供完整的、高质量的底图。

（三）临近降水预报 精细化分析

临近降水预报技术，是对 0-6 小时特别是 0-2 小时内降水进行高时空分辨率预报，是预防突发暴雨及其次生灾害的“哨兵”。公路交通中精准的临近降水预报可以给预警发布、交通疏导、应急资源调配争取到宝贵的提前量。

传统临近预报主要依靠雷达回波外推法，即交叉相关法、光流法。此方法追踪了雷达回波图连续时刻的变化规律，对它的随时间变化的轨迹和强度的分布进行分析，并可以预测出下一秒空间中回波的分布状况。此方法对于移动、演变比较稳定的层状云降水预报效果较好。预报时效较短时可以快速生成预报产品，给公路运营管理提供即时的参考。

随着人工智能的发展，用深度学习建立临近预报模型有巨大的潜力。卷积神经网络、循环神经网络以及 ConvLSTM 等变体，可以从大量的历史雷达回波序列中学习降水系统生消、移动、增强、减弱等复杂的非线性变化规律。该类模型在处理对流性强、生消变化快的短时强降水时，预报准确性，尤其是强度、落区的掌握上，一般比传统外推法要高。

为提高预报可靠性，最新的方法是将数据驱动的深度学习与物理驱动的数值天气预报模型相结合。该混合预报技术用数值模式给出的大尺度环流背景场和物理过程约束，同时利用深度学习模型对于中小尺度系统微小变化的捕捉能力，两者相得益彰，明显提高极端强降水事件的预报水平。不同临近降水预报方法的特点及适用性如下表所示。

临近降水预报方法对比

方法类型	核心原理	主要特点 / 优势
传统雷达回波外推法	跟踪回波位置及强度变化	快速生成预报产品
深度学习模型	从历史数据学习非线性演变规律	擅长捕捉对流性强、变化快的降水；强度和落区预报更准
混合预报技术	结合数值模式与深度学习	优势互补，显著提升极端强降水预报能力

精细化的临近降水预报产品一般以分钟级更新、公里级分辨率的网格化降水预报形式给出，可以给公路沿线任意点未来降水过程提供定量、动态的预测。

二、暴雨洪淹没范围数值模拟与风险评估

获取准确的降雨监测与预报信息之后，下一步就要对暴雨造成的洪水影响进

行科学评价。利用已经建立起来的水文水动力学模型,对不同强度的暴雨情景进行模拟洪水演进过程,可以定量预测出公路沿线淹没范围、水深和流速,找出容易受冲刷影响的脆弱路基、桥涵等重要的基础设施,从而实现由雨情到灾情的准确判断。

(一) 公路沿线水文水动力模型构建

建立反映公路沿线汇水特征和河道水力特性的数值模型,是洪水模拟的前提。此过程一般要用水文模型和水动力模型进行耦合。根据高精度数字高程模型和土地利用数据,用 GIS 技术准确划分公路沿线小流域边界,提取河网水系,计算各个汇水单元的产汇流参数,坡度、糙率、不透水层比例等。

水文模型如 HEC-HMS 等,可以计算出在一定的降雨过程中,各个小流域产生的径流量和洪水过程线。此段过程线是水动力学模型上游的边界条件。水动力模型 HEC-RAS、MIKE、FloodArea 等可以模拟洪水在河道内及漫溢区的运动。对于线性公路工程一般用一维、二维耦合的水动力模型。其中一维模型为河道干流洪水演算模型,二维模型为洪水漫溢到公路路面、周边平原等复杂地形区域后的二维流动模型。模型建立还要精确测量得到河道断面、桥涵结构尺寸、路基高程等数据来体现水流和公路结构的相互作用。

(二) 不同频率暴雨淹没范围模拟

为了对公路的防洪能力以及可能存在的风险有一个全面的认识,就必须对各种暴雨情景下可能造成的灾害等级进行模拟。一般采用设计不同的重现期暴雨。重现期即 20 年一遇、50 年一遇、100 年一遇等,表示暴雨发生的概率。根据当地的暴雨强度公式可以得出不同重现期、不同历时设计暴雨过程。

把这些设计暴雨过程输入到已经建立好的水文水动力模型中,就可以模拟出相应的洪水淹没过程。模拟结果可以用 GIS 平台直观展示,形成一系列专题图件,主要有

1. 最大淹没范围图:能清楚表示暴雨情景下哪些区域会被水淹没,是公路是否中断的直接依据。
2. 最大水深分布图用不同的颜色来区分淹没区的水深,直接反映洪水的严重程度。水深大于 30 厘米的路段,普通轿车不能通行。
3. 淹没历时图:反映各区域被洪水淹没的时间长短,对交通中断时长评价、制定恢复计划有着十分重要的意义。

比较不同的暴雨频率下的模拟结果，可以清楚地发现公路系统在遇到不同的洪水事件时的脆弱性，给制定分级预警响应预案、长期提高防洪能力提供科学依据。

（三）洪水对路基冲刷风险的热点图绘制

洪水淹没道路的同时，强大的水流冲击力还会对公路路基、桥梁墩台等结构物造成冲刷，严重的时候会造成路基垮塌、桥梁毁坏等灾难性的后果。因此，洪水模拟之后进行路基冲刷风险评价，是预警系统不能缺少的一部分。水动力模型模拟结果有淹没区域内各个计算网格的流速、水深等参数，这些参数是计算水流冲刷力的重要依据。

利用冲刷模型可以得到水流速度、水深、路基边坡材料性质（土壤类型、植被覆盖情况）、坡度等因素引起洪水对路基坡面、坡脚产生的剪切应力。当水流所产生剪切应力大于路基材料的抗冲临界剪切应力时，就会发生冲刷。计算得到的冲刷强度或者冲刷深度，用 GIS 平台进行空间可视化，就可以绘制出路基冲刷风险热点图。该图用醒目的颜色（从绿到红渐变）表示冲刷风险从小到大的路段，使公路管理部门可以很快识别出公路上最脆弱、最易受损的路段。这些冲刷风险热点区应该成为制定应急抢险预案、布置巡查防守力量、设置工程性防护措施（抛石、护坡）的重点。

三、暴雨对公路通行能力影响的预警模型

暴雨天气会造成淹没、冲刷等直接的物理破坏，还会因为能见度下降、路面状况变差等缘由，严重影响正常的交通流运转以及行车安全。建立暴雨对公路通行能力影响的预警模型，目的是衡量降雨给交通状况带来的不利影响，给科学实行交通管制措施（限速、关闭匝道等）赋予决策依据。

（一）降雨强度能见度－车速关系模型

降雨属于造成行车能见度变差的气象要素之一。雨滴对于光线的散射、吸收作用，以及雨刮器工作时在挡风玻璃上形成的水膜，都会使驾驶员的有效视距大大降低。发现能见度随着降雨强度增大呈指数下降。该关系可以由物理模型或者大量的实测数据的统计拟合来确定。

能见度变坏直接影响驾驶员安全行车的速度。高速行驶时驾驶员必须保证当前视野范围内有足够的距离，能够发现前方障碍物并在最短的距离内完全制动停

车。安全停车视距是由驾驶员反应距离和车辆制动距离两部分组成的。可以建立一个以安全停车视距为条件的能见度、车速约束模型。该模型可以给出在一定能见度下, 保证安全所需要的最高理论车速。

将降雨强度 - 能见度模型和能见度 - 车速模型结合起来, 就可以得到降雨强度 - 能见度 - 车速的链式关系模型。根据气象部门发布的实时或者预测的降雨强度, 直接得到相应的建议安全车速。该模型是制定雨天动态限速策略的理论依据, 把抽象的气象参数和具体的交通管控指令直接关联起来。

(二) 路面积水深度对行车安全的影响分析

当降雨强度超过路面排水能力的时候, 就会产生一定的积水层, 给行车安全造成严重的威胁。车辆在通过积水路段的时候, 行驶阻力会明显增大, 积水也会进入到发动机和排气系统中, 造成车辆熄火。一般认为, 积水深度超过车辆底盘或者排气管高度时, 强行通过的风险将会增大。

车速较高时, 轮胎与路面之间的积水层不能及时排出, 在轮胎前方形成水楔, 水楔的动压力足以把轮胎托离路面, 使轮胎完全或者部分脱离路面, 这就是非常危险的滑水现象。一旦发生滑水, 车辆转向和制动能力就会瞬间消失, 极易造成失控侧滑甚至翻车。产生滑水的临界车速与积水深度、轮胎花纹深度、轮胎气压、路面构造深度等有关。分析积水深度对行车安全的影响, 就是确定不同的积水深度下产生滑水现象的风险, 并分析其对车辆制动距离、操控稳定性的影响程度。

(三) 暴雨条件下公路限速标准制定依据

制定科学合理的暴雨条件下公路限速标准, 是保证雨天行车安全、提高交通效率的重要管理手段。该标准的制定应是综合考虑、动态调整的过程, 主要依据来源于前面各种影响分析模型以及相关的法律法规。

主要的制定依据包括:

1. 根据降雨强度 - 能见度 - 车速关系模型, 可以确定在不同的雨强下, 只考虑能见度因素时的安全车速上限。这就构成了限速最基本的依据。《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》对雾天等低能见度条件下分级限速的规定, 也可以作为雨天限速的参考。

2. 以路面状况为标准来设定安全阈值, 考虑路面积水、路面湿滑对行车安全造成的影响。一方面要根据滑水模型来确定不同积水深度下防止滑水的临界车速; 另一方面还要考虑湿滑路面下轮胎附着力减小, 导致制动距离加大的因素。限速

值要保证湿滑路面上车辆的制动距离仍然可以控制。

3. 利用交通流理论以及实际运行数据,可以分析出在不同的降雨条件下,驾驶员一般会采取的行驶速度(即自由流速度),以及道路实际通行能力的变化情况。制定的限速标准要符合驾驶员一般的行为习惯,不能因为限速值设得过低而造成不必要的拥堵,也不能因为设得过高而失去安全约束的作用。

根据上面的因素可以构建一个多变量输入的动态限速决策模型。该模型把实时测量的降雨强度、能见度、路面积水深度等作为输入,输出各个路段不一样的限速值,实现了暴雨条件下公路交通的精细化智能控制。

第二节 冰雪灾害监测预警

冬季公路运营所面临的严峻考验之一就是冰雪灾害,它直接危及了交通安全和运输效率。创建科学高效的冰雪灾害监测预警体系,是现代公路运营安全保障的重要组成,核心就是灾害早期识别、精准评估和快速反应。

一、路面状态监测传感器与结冰预警技术

路面状况的实时准确感知为冰雪预警打下了基础。依靠先进的传感器网络,结合数据分析算法,可以实现由“被动应对”到“主动预判”的转变,给道路养护和交通管理赢得宝贵的决策时间,从而大大降低冰雪天气下发生的安全风险。

(一) 埋入式路面冰情传感器工作原理

埋入式路面冰情传感器是直接埋入路面结构内部的智能监测设备,它最大的优点就是可以对路面内部真实物理状态进行直接、准确的感知。这些传感器一般由强度很高的合金外壳包着,里装有各种传感器元件,可以承受反复碾压的重载交通、严酷的温度考验,长时间稳定的工作。其设计寿命一般和路面结构同步,从而达到对道路状况全生命周期监测的目的。

其工作原理就是对多物理参数进行综合测量。传感器内部集成了温度探头来检测路面结构中温度的变化,电导率或介电常数探头用来判断路面是否含水。当路面温度降到零度以下,传感器检测到液态水的存在时,系统就根据电导率或者介电常数的剧烈变化来判定结冰过程的发生。一些先进的传感器可以测量冰层和传感器探头之间的电容变化,准确地测出冰层的厚度,给之后的除冰作业提供量

化的依据。所有的数据通过有线或者无线的方式传送到监控中心，给结冰预警提供最直接、最可靠的一手资料。

（二）路面温度、含水量与结冰点监测

路面温度、含水量、实际结冰点三个物理量要同步监测才能实现准确预测。只测量路面温度不能准确判断结冰风险，因为水的冰点会受到杂质，特别是融雪剂中盐分的影响，出现冰点下降的现象。因此，完善的监测系统应该对三个变量间的动态关系进行综合分析。

路面温度监测比较直接，可以采用埋入式或者非接触式传感器。含水量检测比较复杂，一般用测量水与干燥路面或其它物质导电性或介电常数的差异来判断。传感器对路表某处电阻或电容的变化进行测量，定量或者定性地判断路面干、湿、潮的状态。当路面有水膜存在时，它的电学性质就会改变，被系统所捕获。

最重要的是动态结冰点的监测。现代先进的路面传感器采用主动制冷的方式，在传感器内部一个小区域里制造低温环境，使该区域的水分结冰，准确地记录下相变温度。实测温度就是指路面水实际结冰点，已经考虑了路面上存在的盐分、灰尘等所有的因素。通过实测路面温度和动态结冰点的对比，可以非常准确地判断路面是否即将结冰，从而发出高可靠性的预警信息，避免由于误判或者漏判造成的交通安全问题。

（三）非接触式红外路面温度探测技术

非接触式红外路面温度探测技术，是用遥感的方式测量道路表面温度的先进手段。它的基本原理是所有温度大于绝对零度的物体都会向外辐射红外能量，辐射能量的大小和物体表面温度成正比。红外探测器依靠自身光学系统把路面红外辐射聚焦收集起来，再转换成电信号，经过处理和算法计算得到路面表面温度值。

该技术的主要优点是能够非接触、无损地进行测量。传感器无需开挖或者破坏路面即可安装，一般架设在高速公路龙门架、灯杆或者气象监测站立柱上，并对准需要监测的路面区域。该种安装方式极大地简化了施工及维护的过程，而且也避免了路面磨损、修复等造成的传感器损坏。非接触式传感器的响应速度很快，通常在1秒内可进行一次测温，能够对路面温度瞬时变化做出反应，适合对高速行驶的公路做动态监测。部分设备具有扫描功能，可以监测较大的路面或者安装于巡逻车上做移动式检测，给道路管理者带来极大的方便。尽管红外传感技术会受到雨雪天气、路面发射率变化的影响，但是由于其内置的温度补偿、发射率校

正算法，现代红外传感器可以在各种复杂的气象条件下进行准确的、稳定的测量。

路面状态监测传感器的主要特性对比可见下表。

路面状态监测传感器主要特性对比表

特性	埋入式路面冰情传感器	非接触式红外路面温度探测技术
安装方式	直接埋入路面结构内部	架设在龙门架、灯杆或立柱上，遥感测量
测量对象	路面内部真实物理状态（温度、含水量、结冰点）	路面表面温度
测量原理	多物理参数综合测量（温度、电导率、介电常数、主动制冷）	遥感红外辐射能量
主要优点	感知准确、深入，全生命周期监测，可测冰层厚度，动态结冰点监测	非接触、无损、安装维护简化、反应快、可移动检测、覆盖范围广
主要限制	安装需破坏路面，维护相对复杂	易受雨雪、路面发射率变化影响（但有算法补偿）
应用场景	精确结冰预警，除冰作业量化依据	动态路面温度监测，大范围 / 移动检测

二、高速公路冰雪灾害风险等级划分

科学划分高速公路冰雪灾害风险等级，可以为之后的差异化、精细化管理方式以及资源配置提供依据。创建标准化的评价体系，把抽象的灾害威胁转化为具体的危险等级，给交通管理部门制定有针对性的应急预案提供决策依据。

（一）基于气象条件的冰雪风险分级标准

根据气象条件进行冰雪风险分级，主要是依靠气象预报和实时气象监测数据，对可能出现的冰雪灾害强度做出初步的判断。该标准的主要内容就是把各种气象要素组合起来，形成一个综合性的风险指数。

通常，分级标准会综合考虑以下几个关键气象因子：

1. 预计降雪量和降水相态是最主要的指标。根据降雪强度（小雪、中雪、大雪、暴雪等）或者降水的种类（雨、雨夹雪、冻雨、雪）来大概地估计灾害的严重程度。冻雨天气由于可以迅速形成光滑冰壳，一般被定义为最高等级的风险。
2. 低温持续给路面结冰、积雪不能消融创造了条件。气温连续低于 0℃，地表温度也降到冰点以下的时候，冰雪灾害的风险就会增大。
3. 大风天气下，大风会加剧风吹雪现象，使路面积雪重新分布，形成雪堆或

者影响驾驶员视线，在路堑、垭口等路段，大风会大大提高交通风险。

4. 湿度高湿环境下即使没有降水，温度骤降也会在路面上形成霜或者薄冰，俗称黑冰，黑冰不易察觉，非常危险。

根据以上因子设置不同的阈值并赋予相应的权重，就可以得到一个量化的风险分级模型，即一般影响、较大影响、严重影响、特别严重影响。当气象预报显示某项指标组合达到相应的等级的时候，就会触发相应的预警，给后续的响应行动提供指导。

（二）路网级冰雪灾害风险评估模型

路网级冰雪灾害风险评价模型比单纯的气象条件分级要复杂、综合得多。它不但考虑致灾因子（天气）的强度，而且把孕灾环境（道路自身属性）和承灾体（交通流和社会经济影响）的特征融合起来，目的是输出一张覆盖整个路网的、精细化的动态风险图。此类模型一般是用地理信息系统平台来建立的。

该模型的数据输入是多源的，主要是高分辨率气象预报数据（精确到公里网格的温度、降水、风速等），以及详细的道路基础资料（道路等级、几何线形（坡度、曲率、海拔）、路面材料种类、桥梁隧道分布、沿线排水设施状况等）。模型还会用到实时交通流量数据（车辆流量、车辆种类构成＜大货车比例＞、平均车速等）。历史灾害数据、事故数据是训练模型、检验模型效果的标准。

利用贝叶斯网络、模糊集理论、机器学习模型等复杂的算法，对多维数据进行空间叠加分析、加权计算，模型可以给出路网中每一个细单元（比如每1公里路段）在某种冰雪天气情景下具体的危险程度。评价结果以风险地图的形式表现出来，用不同的颜色区分出高、中、低风险路段，管理者便可以一目了然地掌握全路网的风险情况，进而对重点路段进行精确控制和资源合理分配。

（三）不同路段冰雪灾害易损性分析

冰雪灾害易损性即脆弱性，就是公路系统在同等强度的冰雪灾害作用之下，其结构或者功能受损的难易程度。易损性分析属于风险评价的重要组成部分，它主要研究道路自身的特性，解释了为什么在相同的暴雪天气下有的路段安然无恙，而另一些路段却事故频发、交通中断。

易损性高的路段一般有明显的地理或者工程特征。桥梁、高架桥段属于典型的易损地段，路面悬空，上下表面和冷空气接触，散热快于一般的路基路面，因此更容易结冰。长陡坡、连续下坡，急弯路段同样危险重重，在冰雪天气中车辆

在这些路段上制动和操控性能急剧下降，容易造成失控、打滑、追尾事故。隧道进出口处由于内外温差、湿度不同，也容易产生薄冰。除上述之外，处在风口、垭口或者路堑处的路段，很容易出现积雪堆积并且视线受阻的情况。山体或高大建筑物的背阴路段日照时间短，积雪、结冰不容易融化，危险持续时间长。

易损性分析要综合评价这些因素。建立公路等级、路面技术状况、几何线形、特殊构造物分布和局部微气候环境等指标的评价体系，就可以对路网各个路段所固有的脆弱性做出量化评价。将易损性评价结果和致灾因子危险性（暴雪强度）叠加，就能更准确地预测灾害所造成的影响，从而给道路设计优化、预防性养护和应急资源预置提供科学指导。

三、冰雪天气下交通管控与除雪调度预警

有效的预警最终要落实到具体的行动上。冰雪天气交通管控、除雪调度是保证道路安全畅通的直接手段。创建预警与行动的协同机制，改进资源布局及调度算法，可以提高应急响应的速度，使冰雪灾害给交通带来的损失降至最低。

（一）除雪融冰物资的储备点优化布局

除雪融冰物资（融雪剂、防滑砂）储备及及时供应，是冰雪应急工作的物质保障。储备点优化布局属于运筹学问题，即保证所有路段应急需求被满足的同时最小化总的建设和运输成本。科学的布置方案可以大大缩短应急响应时间，防止因物资缺乏造成的交通长时间堵塞。

储备点的选址要考虑到诸多因素。需要分析路网拓扑结构并研究高风险路段分布，储备点应优先靠近桥梁、陡坡等容易结冰的路段。其次就是服务半径，每个储备点要覆盖一定范围的道路，保证物资运输车辆从储备点出发在规定时间内（30分钟以内）到达责任区内任意一点。储备库容量要按照区域内道路的里程数、风险等级、以往消耗量等科学地加以推算。选址时要考虑交通的便利性、场地的建设条件、环境影响等因素。

为了得到最佳的布局方案，决策者一般会用数学优化模型，比如设施选址模型。将路网抽象为节点和弧段，把问题转化为在满足所有需求点（即需要养护的路段）都被覆盖的约束下，选择最少的储备点位置，或者使总运输距离最短。求解出以上模型就可以得到一系列科学合理的储藏点布局方案，给战略物资储存布局给出决策建议，避免盲目建设造成资源浪费或者在发生应急时不能保障物资。

（二）除雪机械调度路径优化算法

当冰雪天气来临时，怎样才能高效、有序地调度有限的除雪机械（除雪铲、撒布车）对庞大的路网进行作业，是应急管理面临的核心操作性难题。除雪机械调度路径优化本质上属于车辆路径问题，其目标是满足所有清雪任务的前提下，最小化总作业时间、总行驶距离或者总运营成本。

创建算法模型的时候要输入大量的动、静态信息。静态信息有除雪车的基地位置、车辆种类（铲雪车、融雪剂撒布车）、工作效率、容量限制等。动态信息来自于冰雪灾害风险评估系统，主要内容有待扫路段、各路段冰雪厚度或者等级、交通拥堵程度。算法根据这些输入为每辆除雪车规划出具体的作业路径，即作业顺序和行驶路线。

由于路网的复杂性以及任务的紧急性，求解最精确的解会花费大量时间，不适合应急场景。因此一般采用启发式算法或者智能优化算法来快速得到近似最优解。遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法等都可以在大规模路网中，在较短的时间内为除雪车队规划出最优的作业路线。这些算法能很好地处理多车场、多任务类型、带时间窗等各种复杂约束，从而实现边下边清、雪停路净的目标。

（三）冰雪预警与交通限流管制协同机制

冰雪预警系统价值的最终体现就是和交通管控措施无缝对接、联动。精准的预警如果没有及时的管控措施，意义不大。建立反应灵敏、分级执行的协同机制，才算是达到从被动封路到主动疏导、精细化管理的重要途径。该机制提倡气象监测、道路养护、交通警察等各方面加强信息互通和联合行动。

协同机制一般会创建起多级应急响应体系。当收到初期预警（如预报 24 小时之后会下大雪）的时候，就启动准备工作：养护部门检查除雪设备、装填融雪物资；交通管理部门提前在媒体和路侧情报板上发布天气预警以及出行提示。当预警等级升高，即确认冻雨即将来临的时候，响应行动也会上升，养护车辆会在桥梁、坡道等重要路段上做预防性的撒布融雪剂工作，交警会提前将警力安排到重要的节点。当监测系统检测到路面开始结冰或者积雪达到一定厚度的时候，就会立刻进入最高级别的响应状态：一方面全面展开除雪作业，另一方面同步采取交通管制措施，即动态限速、压缩车道、禁止危化品车辆通行、警车带道压速通行等措施来保障行车安全。

核心就是信息流通畅、决策统一。通过建立联合指挥中心，把路面传感器信息、

气象雷达信息、交通流监控视频、除雪车辆 GPS 位置等数据集中到一个平台上,指挥人员可以获得最全面及时的信息,从而做出最合适的决策。因此,交通管制已经不再仅仅是封路,而是根据道路实际情况灵活变通的管制方式,在保障极端天气条件下公路安全通行的同时,尽量保证公路的通行能力。

第三节 大风监测与预警

公路交通系统处于自然环境中,很容易受到大风等灾害性天气的影响。强风尤其是横风,给高速行驶的车辆造成严重安全隐患,也给大跨度桥梁等公路重要构造物的结构安全造成冲击。因此,建立科学高效的公路气象灾害监测预警体系,是保证现代公路运行安全的重要环节,对防灾减灾有极其重要的现实意义。

一、强风区公路风致灾变监测系统

强风区公路风致灾变监测系统的主要任务就是实时、准确地获取风场信息,并且结合结构响应数据,给灾害预警提供科学的依据。该管理系统用各种先进的传感技术、分析方法,形成完整的环境感知、结构状态评价的监测链条,是公路主动安全的重要技术支撑。

(一) 超声波风速风向仪监测技术

超声波风速风向仪对于公路大风监测系统来说,起着非常重要的作用。它利用超声波在空气中传播时受到风速影响产生的时间差或者频率差,准确地反演风场的三维信息,进而实现风速和风向的测量。相比传统的机械式风杯、风向标来说,超声波风速风向仪没有转动部件,在恶劣天气下长时间工作也不会磨损、结冰等问题,而且反应快、精度高、维修成本低。

在强风区公路,特别是在大型桥梁、高架路段、风口区域、隧道口等重要地段沿线布设超声波风速风向仪,可以形成一个高密度的实时风场监测网络。该网络可以反映风速、风向的瞬时变化和脉动,为后继风致灾害分析打下基础。监测到的风速大于预设安全值时,系统马上发出警报,给交通管理部门采取限速、封闭道路等干预措施提供宝贵的时间,有效地预防强风造成的交通事故。

(二) 沿公路横断面的风速梯度监测

自然风在离地面上部存在明显的风速梯度效应,即离地面越高,风速就越大。

对于结构复杂、高度变化大,例如大型桥梁、高路堤等公路设施,只做单点风速监测是不够的。沿公路横断面进行风速梯度测量,在不同的高度上布置多个风速传感器,可以得到风速随高度变化的剖面数据,进而更全面、准确地掌握作用在结构上的风荷载分布规律。

多点、多高度监测的方式,对研究风对高大车辆(大型客车、厢式货车等)的侧翻力矩影响有很重要的作用。车辆作为一个有一定高度的物体,顶部和底部之间风压差会产生一个较大的倾覆力矩。利用风速梯度监测数据,可以更准确地求出该力矩,进而对车辆在特定风场下侧翻风险进行评价。

大型桥梁结构中主梁、桥塔等各个部位所受风荷载差别很大。横断面风速梯度监测可以给桥梁抗风设计验证、结构健康监测、风致振动分析提供更加精细的输入条件。数据可以体现复杂地形中局部风场的加速或者屏蔽效应,找到结构最不利的受风点,给优化预警模型、提高公路运营安全性提供有力支持。

(三) 风致桥梁振动监测与风洞试验验证

风不仅会对桥梁产生静力作用,其脉动还会引起桥梁结构的振动,严重的时候会引发桥梁的涡激振动、颤振等气动弹性失稳现象,从而对桥梁安全造成影响。风致桥梁振动监测就是在桥梁主梁跨中、四分之一跨径点、桥塔顶部等关键位置安装加速度计、位移计、应变计等传感器,来实时采集结构在风的作用下表现出的动力响应数据。可以直观地反映出桥梁振动的大小、频率,评价桥梁在目前风速条件下是否安全。

为了保证风洞试验数据正确解读、预警阈值科学确定,风洞试验是不可缺少的验证手段。桥梁设计与研究阶段会制作桥梁缩尺节段模型或者全桥气弹模型,在风洞内对不同的风速、风攻角、湍流度来流条件下的模型的各项气动参数及振动响应进行系统的测试。风洞试验结果不但可以用来改进桥梁气动外形、提高其抗风稳定性,而且可以为实际桥梁监测数据提供理论参照和验证标准。

对比分析现场实测的桥梁振动数据和风洞试验结果,可以标定、修正理论计算模型,更准确地确定桥梁的涡振锁定区间、颤振临界风速,为大风天气下桥梁通行管理措施的制定提供最终的科学依据。现场监测与风洞试验相结合的方法,一起形成了大跨度桥梁抗风安全保障闭环体系,从而保证预警系统可靠、先进。

二、风致车辆侧滑翻车风险预警阈值

建立正确的风致车辆风险预警阈值，是达到精准预警的前提。需要对不同种类车辆的抗风能力进行深入研究，同时考虑道路条件、环境因素等各方面的影响，最后将其转化为可以操作的交通管控标准。该领域是车辆动力学、空气动力学和交通工程学的交叉研究领域，研究成果好坏直接影响预警系统效能的发挥。

（一）不同车型抗风能力与临界风速研究

由于各种车辆的外观尺寸、重量、重心高度、轮胎特性不同，所以抗风能力也不同。大型客车、厢式货车、集装箱卡车等由于迎风面积大、重心高，在强横风作用下容易发生侧翻事故。临界风速是指车辆开始出现侧滑或者侧翻的最小风速，是衡量行车安全的一个指标。

临界风速研究一般采用理论计算、计算机仿真、风洞试验相结合的方法。理论模型一般根据车辆静力学或动力学平衡方程，求出在一定的横风作用下，车辆一侧轮胎即将抬起（侧翻临界状态）或者轮胎和路面之间侧向摩擦力达到最大（侧滑临界状态）时的风速。

计算机仿真可以创建包含车辆悬架系统、轮胎模型、空气动力特性等在内的复杂的、多体动力学模型，对车辆在动态风场中高速行驶时所出现的各种反应做仿真。风洞试验是用吹风的方式对车辆模型进行吹风，直接测量作用在车身上的气动力和力矩，给理论分析和仿真提供准确的气动参数。对小型客车、大型客车、货车等有代表性的车型进行研究，可以创建出包含主要车型的临界风速数据库，为分车型、分等级的精细化预警打下基础。各种车辆典型的抗风能力特征和临界风速见表。

不同车型抗风能力概览表

车型类别	典型特征	干燥路面侧翻临界风速 (m/s)	湿滑路面侧翻临界风速 (m/s)	侧翻风险等级
小型客车	迎风面积小、重心低	> 25	20 - 25	低
大型客车	迎风面积较大、重心较高	18 - 22	15 - 18	中等
厢式货车	迎风面积大、重心高	16 - 20	12 - 16	较高
空载集装箱卡车	迎风面积极大、重心极高	14 - 18	10 - 14	极高

（二）考虑路面湿滑状态的侧滑风险模型

路面状况是决定车辆侧滑危险程度的又一重要因素。在干燥的道路上，轮胎

和路面的附着力大,车辆抗侧滑的能力就好。但是当路面因为雨雪或者结冰而变得湿滑的时候,附着力系数会突然减小,有时甚至会降低到干燥路面的一半以下。这就意味着在相同的横风侧向力作用下,车辆在湿滑路面上更容易产生侧滑,侧滑临界风速也会大大降低。

因此可靠的侧滑风险模型要动态地考虑路面附着系数的变化。现代公路气象监测系统一般会配置路面状况传感器,使用遥感或者接触式测量方式,对路面的干湿、积水、结冰等情况进行连续监测,并计算出当下的附着系数。路面湿滑情况下侧滑风险模型主要体现在以下几个方面:

1. 多源数据融合就是将超声波风速仪测得的风速风向数据、路面状况传感器估计的附着系数、车辆自身类型参数(质量、尺寸等)融合起来。

2. 动态临界风速计算,根据融合后的数据,模型可以利用车辆动力学方程实时计算出在当前路面湿滑情况下,各种车型的侧滑临界风速。该种动态化、精准化的计算方式取代了以前的用固定阈值的方法。

细致化的风险模型可以大大提高预警的准确性。在相同的风速下,干燥路面上所有的车辆都可以安全通行,但是结冰路面上重心较高的货车需要发出禁行预警,从而达到更加科学、高效的交通管理目标。

(三) 大风预警对应的车辆限行标准

将复杂的模型研究结果转化为简单的、可行的车辆限行标准,就是预警信息服务于交通管理的最后一公里。限行标准要综合考虑风速等级、车辆种类、能见度、路面状况等各方面因素,采用分级控制的方式进行规定。典型的限行标准框架按照风力等级、路面状况来设置,给不同的风险组合下的交通管制措施提供清晰的指导。

具体的限行标准一般是由交通管理部门、气象部门、公路运营单位三方共同确定的。风速达到8级大风时,系统就会发出一级警报,并通过路侧可变情报板、手机APP、交通广播等多种途径向驾驶员发出降速提醒。当风速持续增大,达到10级大风并伴有雨雪导致路面湿滑时,系统会发出二级或者更高级别的预警,自动向交通管控中心提出对空载货车、大型客车等特定车型或大型桥梁路段实行禁止通行的管制建议。以实时监测和科学模型为基础的限行标准,取代了以前依靠人工经验判断的方法,大大提高了公路在大风恶劣天气下的安全保障能力以及管理效率。

三、横风对桥梁行车安全的影响预警

大跨度桥梁一般处在江面或者峡谷中，所受风力普遍大于普通路段，横风对桥梁行车安全的影响更大。风、车、桥之间存在着复杂的气动耦合效应：车辆高速通过桥梁的时候会受到风荷载的影响；车辆的存在又会影响桥梁的绕流特性；而桥梁的振动又会影响到车辆的行驶稳定性。因此必须把三者作为一个耦合系统来研究。

（一）桥面脉动风压特性监测

桥面风场不是均匀稳定的，而是存在时空变化的脉动成分，即湍流。脉动风会造成车辆、桥梁产生振动。对桥面脉动风压特性进行监测，是认识风 - 车 - 桥耦合作用机理的前提。这项工作一般用密集布置在桥面主梁上的脉动风压传感器阵列来完成。这些传感器可以以很高的精度（频率一般在 100Hz 以上）得到风压随时间变化的详细数据。

对这些数据做统计分析可以得出桥面风场的湍流强度、湍流积分尺度、功率谱密度等参数。湍流强度用来表征风速变化的剧烈程度，湍流积分尺度用来表征风中最大漩涡的平均尺寸。这些参数对于正确模拟随机风荷载，评价车辆过桥时的突风效应来说是非常重要的。

桥塔附近由于桥塔遮挡和绕流的影响，会造成风速、风压剧烈变化的非均匀区域。车辆在进出桥塔区域的时候，会遇到风荷载的突然加载或者卸载，从而导致车辆产生剧烈的横向晃动，对行车的稳定性以及舒适性造成较大影响。通过精确的脉动风压测量，可以对桥塔所引起的遮风效应做出数值上的描述，为评价它所带来的影响提供必要的的数据支持。

（二）风 - 车 - 桥耦合振动安全性分析

风车桥耦合振动安全性分析，是把自然风、行驶车辆、柔性桥梁结构作为一个整体动力系统，对它们进行整体分析的一种先进的方法。该方法充分考虑了作用在车辆和桥梁上的平均风荷载和脉动风荷载、车辆运动产生的动力效应、两者之间的气动干扰和动力作用，更真实的模拟强风下桥梁上行车的过程，系统性的评价行车安全。

分析过程一般会使用专业的计算分析软件。首先建立车辆和桥梁有限元动力学模型，根据风洞试验数据或者现场监测数据，生成符合桥位风场特性的随机风

场模型，最后模拟车辆以不同的速度通过桥梁的全过程，求解得到车辆的侧向加速度、轮重减载率、桥梁的位移、加速度等一系列动力响应指标。

采用耦合振动分析法，可以得到不同风速、车速组合下车辆的侧翻系数、侧滑系数等安全评价指标是否越限。分析结果可以找出系统中最危险的工况，即找到某种类型的车辆发生侧翻的临界风速和临界车速。定量分析结果成了制定桥梁限速、限行标准的基础，也成为了从被动响应向主动预防的安全管理模式转变的理论依据。

（三）大风天气桥梁行车安全预警系统

大风天气桥梁行车安全预警系统，是实现对大风天气桥梁行车安全进行实时监测、精准预测、科学评估、及时发布的一种综合性智能化平台。它是现代桥梁智慧运维体系的重要组成部分，其最终目的就是保证大风天气下桥梁的通行安全和运营效率。完善的预警系统一般具有如下主要功能模块

1. 数据采集与处理模块负责全桥布设的各种传感器数据的采集，即超声波风速仪获取的风场信息、结构振动监测系统获取的桥梁动力响应、路面传感器获取的路面状态、车辆检测器获取的车流量和车型信息。

2. 预测与评估模块是系统的“大脑”，该模块具有先进的风速预测模型，可以利用实时数据以及气象预报来对 10 分钟到 1 小时的短时风况进行预测。该算法将风 - 车 - 桥耦合振动分析结果、车辆风险阈值模型综合考虑，可以实时或者预测未来一段时间内的行车安全风险等级。

3. 预警发布与决策支持模块，在风险等级大于安全阈值的时候，系统就会发出预警信息，并且以不同的方式发布。对内将风险报告、交通管制建议（限速、限车型等）推送给桥梁管理中心；对外直接驱动桥头可变信息标志，向公众发出限速或者禁行警告，并通过交通广播、手机应用等方式将预警信息告知驾驶员，从而实现从风险识别到安全管控的闭环管理。

第四节 气象数据融合分析

气象条件属于引发公路地质灾害、左右路面安全的关键外部因素。本节主要说明怎样融合多源气象数据,建立精准的公路专用预报模型,深度耦合地质数据,从而实现对公路沿线潜在风险的动态、精准预警,给防灾减灾决策提供科学支撑。

一、多源气象数据的同化处理与质量控制

为了得到全面、准确、时空连续的气象信息,必须对来源不同、格式不同的各种数据进行科学的同化处理。该过程不是简单的数据叠加,而是物理定律、数学算法的指导下,对不同数据源的优势互相补充,去掉错误信息,为后面预报模型的建立打下基础。

(一) 地面观测数据与探空数据融合

地面自动气象站可以提供高时间分辨率的近地面气象要素,但是空间分布不均匀,在公路沿线复杂的区域,站点稀疏的缺点更加明显。探空数据可以提供从地面到高空的垂直大气廓线信息,可以反映大气的层结稳定性和水汽垂直分布情况,对于理解降水、大风等天气现象的形成机理起着重要的作用。融合两者的关键就是用三维变分或者最优插值等数据同化方法,将点状的地面观测数据与垂直剖面数据进行空间插值和动力协调。经过这样的融合以后,地面站的实时数据就被嵌入到由探空数据形成的三维大气背景场里,从而生成一个更加精细、物理含义更完善的 3D 气象分析场。

融合后的数据集具有地面观测的实时性以及近地层细节,也有探空数据高空大气结构探测的优势,对于公路沿线复杂地形下局地环流、温度层结、水汽分布的刻画能力得到明显提高。在山区公路上,融合数据可以更好地体现山谷风环流、迎风坡和背风坡的温湿差异,为识别小尺度灾害性天气的发生发展区域提供重要信息,很好地弥补了单一数据源的空间覆盖度和垂直探测能力的不足,为后续精细化预报打下了基础。

(二) 雷达回波数据与数值预报产品融合

天气雷达可以提供高时空分辨率的降水回波信息,可以实时跟踪暴雨、冰雹等强对流天气系统的移动和强度变化,是短临预警的利器。数值天气预报产品就是根据大气动力学和物理过程,给出未来一段时间大尺度环流背景和气象要素的

预报。二者融合即把雷达实况观测优势和数值预报的动力预测能力结合起来,明显提高局地强降水等灾害性天气预报的精度。融合技术一般采用热启动或者连续同化的方法,将雷达反演得到的降水率、风场等信息,用特定的同化算法(四维变分、集合卡尔曼滤波等)引入数值模型,修正模型的初始场。

修正过程就是把雷达观测到的真实降水系统的空间位置、强度、结构动态地放到数值模型里,使模型调整预测轨迹,使之更接近大气的实际。对于公路沿线突然出现的短时强降水,常规数值预报存在预报时间滞后、预报强度偏小、预报位置偏移等问题。将雷达数据融合进来,模型可以更早地发现对流系统初生、发展,从而大大提高未来 0 到 6 小时短临降水预报的准确率。这可以提前预警山区公路突发性山洪、泥石流、城市道路内涝积水等灾害,给应急响应争取了宝贵时间。

融合过程加深了人们对降水物理过程的认识。雷达回波数据不但可以提供降水强度,多普勒速度信息可以反演出三维风场,双偏振雷达还能提供降水粒子相态(雨、雪、冰雹)的丰富信息。把这些信息加入数值模型里,可以改善数值模型的微物理参数化方案,使数值模型更加真实的再现降水粒子增长、融化、下落的过程,提高对于混合型降水、冻雨等复杂天气现象的预报能力,为冬季公路交通安全保障提供更精细化的科技支持。

(三) 气象数据时空一致性与质量控制

多源气象数据在融合分析之前要经过严格的质量控制程序,保证数据的准确性、完整性和时空一致性。不同来源数据观测仪器不同、采样频率不同、数据格式也不同,代表的空间范围也不一样。如果直接使用会造成很大误差甚至造成预报模型失效。质量控制是数据预处理的一个环节,它的目的就是识别并处理数据中的各种错误,给后续的数据同化和模型运算提供“干净”的数据集。

质量控制的具体步骤通常包括以下几个方面,常见气象数据质量控制方法可见下表:

常见气象数据质量控制方法

方法名称	主要目的 / 特点	典型应用
极限值与内部一致性检验	检查观测值物理合理范围及要素间逻辑矛盾	避免温度低于绝对零度、湿度超过 100%；排除晴天强降水等异常
时间序列变化异常值检验	发现短时间内剧烈跳跃、远超正常变化速率的异常值	识别短时气温剧变（如一分钟内跳变 10℃）等可疑数据
空间一致性检验	比较站点观测值与周围邻近站点，发现系统性偏差	对于气温、气压等平缓要素，识别单个观测仪器的数据异常
多源数据交叉验证	对比不同来源数据，提高数据集整体可靠性	地面雨量计与雷达降水率对比；发现数据源可能存在的问题

最大限度地保证了输入模型的数据质量，使气象分析、预报结果更具科学性和可信度。

二、公路专用气象预报模型的构建

通用气象预报产品不能满足公路交通对于精细化、专业化的信息要求。公路沿线地形复杂、路面特殊，气象环境具有明显的局地性。因此，根据公路自身的特点来开发建立一系列专门的气象预报模型，为决策提供更加针对性的支持信息。

公路专用气象预报模型对比表

模型类型	关注点	核心技术	主要产出 / 效益
局地小气候预报模型	公路沿线微观气象环境	动力降尺度，高分辨率数值模拟	精细化局地风场、温湿、降水预报；识别雾区、强风口、易积水 / 结冰点
深度学习短临降水预报模型	短时强降水系统演变	卷积神经网络、循环神经网络等	0-6 小时分钟级高精度降水预报；提升暴雨、内涝、泥石流预警能力
路面温度与结冰趋势预报模型	路面能量平衡及结冰风险	物理模型，能量平衡方程	逐小时路面温度、结冰类型及风险等级预报；指导防冻防滑作业

（一）公路沿线局地小气候预报模型

公路沿线气象条件是由地形、地貌、植被、水体、路面本身等多方面因素共同造成的局地小气候。山区公路的垭口处常年风力较大，河谷路段容易出现辐射雾，长大纵坡路段南北坡由于日照不同会产生较大的温差。一般数值天气预报模型无法达到百米或十米级的精细空间格点分辨率，不能很好地反映出微观气象的

特点。建立公路沿线局地小气候预报模型,目的是使用高分辨率的数值模拟技术,把局地环境对气象要素的影响具体地表现出来。

一般使用动力降尺度技术,在大尺度天气背景场驱动下,用类似 WRF 的中尺度模型,对公路沿线区域进行多层嵌套,把模式水平分辨率逐步提高到公里级或者百米级。最高分辨率的模拟区域要加入更精细的下垫面数据,即高精度地形数据、土地利用类型数据、植被覆盖率数据、道路、桥梁、隧道等人造构造物的空间分布和物理属性数据。

通过该方法可以模拟出地形抬升或者阻挡造成的局部降水增加区、雨影区;可以刻画山谷风、湖陆风等局部环流对风场、污染物扩散的影响;可以计算出不同路段由于遮挡、朝向不同而造成的辐射收支差异,进而预测温度的变化。精细化的预报信息对于识别公路沿线雾区、强风口、易积水点、易结冰路段有着极其重要的意义,也是公路交通主动安全管理和精细化养护作业的基础。

(二) 深度学习短临降水预报模型

对于滑坡、泥石流、城市内涝等由短时强降水直接引发的灾害,提前 0 到 2 小时的精确预报,即短临预报,显得尤为重要。传统的数值预报方法对突发性强、局地性明显的天气系统存在计算耗时长、预报更新慢的缺点。近些年来,以深度学习为代表的人工智能技术,给解决这个难题赋予了新途径。以卷积神经网络、循环神经网络以及 U-Net、ConvLSTM 等变体为代表的深度学习短临降水预报模型有极大的潜力。

该类模型的基本思想就是将雷达回波图序列看作时空视频数据,用编码器-解码器结构来学习并预测回波图像的变化规律。编码器部分用多层卷积、池化操作,从历史雷达回波序列里提取降水系统多尺度的空间特征以及运动特征。解码器部分用循环神经网络结构,对特征在时间维度上的变化进行建模,逐层上采样,最后得到未来一段时间的高分辨率雷达回波预测图像。这就是数据驱动的模式识别,模型用大量的历史雷达资料学习各种降水云团产生、消散、移动、合并、分裂等各种复杂变化。相比于传统的基于光流法的外推方法,深度学习模型可以预测回波的移动,也可以在一定程度上预测回波强度的变化,从而得到更好的预报结果。可以实现分钟级的快速滚动更新,给公路管理部门发布临近暴雨预警、指导危险路段临时交通管制提供强有力的技术支持。

（三）路面温度与结冰趋势预报模型

路面结冰是冬季公路行车的隐形杀手，准确预报路面温度和结冰风险对保证冬季行车安全有非常重要的作用。路面温度的变化除了受气温影响外，还与太阳短波辐射、地表长波辐射、感热、潜热通量、路基传热等因素有关，其变化比气温剧烈得多。路面温度及结冰趋势预报模型，即把上述所有的能量交换过程都综合到一起的物理模型，它的核心就是建立路面的能量平衡方程。

此类模型的输入参数较多，除了标准气象预报数据（气温、湿度、风速、云量）以外，还包括与路面本身有关的物理参数（路面材料的反照率、比热容、热导率），地理信息（路段经纬度、坡度、朝向）。用单位时间内路面获得和失去的各种能量来预测路面温度的变化趋势。晴朗的白天地表吸收太阳短波辐射温度升高，晴朗的夜晚地表通过长波辐射快速散热，地温会降到气温以下，出现辐射降温现象，即使气温高于零度路面也会结冰。利用能量平衡的动态计算，可以得到未来几小时到几天每小时的路面温度预报。在此基础上结合降水相态（雨、雪、冻雨）预报模型还可以判断路面结冰的类型（霜、暗冰、压实雪）及其风险等级，给道路养护部门提供科学的撒盐或者除冰作业依据，避免盲目作业造成资源浪费和环境污染。

三、气象与地质数据的耦合分析应用

公路地质灾害是内因（地质条件）和外因（气象因素）共同造成的一种灾害。将气象数据同地质环境数据实施耦合分析，可以从中机理层面剖析灾害的孕育与触发过程，这是达成从现象监测到机理预警转变的重要环节。耦合分析比单纯的降雨阈值法更进一步，朝动态化、物理化方向发展。

（一）前期降雨量与滑坡稳定性耦合关系

降雨是引发浅层滑坡的主要原因，但是滑坡的发生并不是与当次降雨强度直接相关的，而是前期降雨在坡体内累积的结果。前期降雨入渗使坡体土体的含水率增大，基质吸力减小，土体自重大大增加，在坡体内形成暂态饱和区，孔隙水压力急剧上升，使土体抗剪强度大幅下降，边坡处于欠稳定状态。即使一场小雨也可能成为引发滑坡的最后一根稻草。

因此建立前期降雨量和滑坡稳定性的耦合关系模型就显得十分必要。此类模型首先要用连续的、长时序的降雨监测数据（地面雨量站或者雷达反演），计算

出反映前期降雨效应的指标,例如前期有效降雨量或者土壤湿度指数。然后将该指标作为动态输入,和边坡地质特征的静态参数(坡度、坡高、土体物理力学参数、植被覆盖等)一起代入边坡稳定性分析模型(无限边坡模型、极限平衡法模型)中进行计算。由此得到边坡安全系数随降雨过程实时变化的动态模拟结果。当安全系数降到临界值(一般为1)以下的时候,系统就发出预警。耦合分析方法把气象水文过程同岩土力学过程紧密联系起来,滑坡预警不再只依靠雨量阈值来判定,而是依据失稳物理过程的动态模拟,因此大大提高了滑坡预警的科学性、可靠性。

(二)暴雨型泥石流气象水文耦合预警模型

暴雨型泥石流突发性强、破坏力大,形成需要充足降雨,也需要流域内有大量的松散固体物质,还必须有有利于径流汇集的地形条件。传统泥石流预警多采用临界雨量法,即当监测到的降雨强度或者累计雨量超过某一经验阈值时就发出预警。此方法虽然简单易行,但是没有考虑流域下垫面条件和水文过程的复杂性,容易造成漏报和误报。

建立气象与水文结合的泥石流预警模型可以提高泥石流预警精度。该模型体系首先要有一个准确的短临降水预报模型,为流域上游未来数小时内的降雨量及空间分布提供预报信息。第二,建立分布式水文模型,将整个预警流域分成不同的计算网格,每个网格有自己相应的地形、土壤、植被等数据。气象模型预报的降雨输入到水文模型中,模型就按照每一个网格的下渗能力来计算产生的地表径流量。

之后就是利用数字河网进行径流的汇流演算,模拟洪水过程。当模拟的流量或者流速在某一关键沟口断面达到足以冲刷、搬运沟道中松散堆积物的临界值时,模型就判定泥石流有启动的可能性,并立即发出预警。耦合模型把雨量大小问题深化成水量大小、流速快慢问题,更接近泥石流启动的物理机理。它考虑了降雨、产流、汇流、沟道侵蚀动力等各方面因素,根据不同的流域、不同的降雨过程给出动态、量化的预警结果,为人员疏散、交通管制提供更加准确的决策依据。

(三)气温变化引起的路基冻融指数计算

在季节性冻土和多年冻土地区,路基冻融循环是造成路面结构破坏、翻浆、沉陷等的主要原因。气温的周期性变化(包括季节性变化和昼夜变化)造成路基土体中水发生相变,即融化和冻结。为了对冻融作用下路基稳定性的变化进行定

量评价，就要引入冻融指数。冻融指数是用来表征地区气候寒冷程度和冻融作用强度的参数，分为年冻结指数和年融化指数。

冻结指数是将一年内日平均气温低于 0°C 的度日数 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$) 累计值，是反映冬季寒冷气候持续时间和强度的指标，决定路基最大冻结深度。融化指数就是年里日平均气温大于 0°C 的度日数之和，是温暖季节热量输入的标志，与路基融化深度和融化速度相关。这两个指数的计算完全依靠长期连续的气温观测数据。通过对公路沿线气象站点历史气温资料的统计分析，可以得到该地区多年平均冻融指数，进而对路基设计的冻融稳定性进行评价和分区。利用数值天气预报得到的未来气温变化趋势，可以对某个冬季或者春季的冻融指数进行预测，动态评价路基在异常气候年型（暖冬或者严冬）下稳定性风险，给公路养护部门提前采取防冻胀、防融沉等预防性措施提供科学依据，从而有效地延长道路使用寿命，保证行车安全。

第九章 应急响应与处置技术

第一节 应急预案制定

应急预案是公路地质灾害应急管理工作的行动指南,是应对灾害的行动方案。它事先对从灾害预警、响应、处置、救援到恢复的全过程活动做了详细的规划。科学合理的应急预案,使政府部门在突发事件发生的时候,能够各司其职、协同合作、有条不紊地调配资源,从而最大限度地减少人员伤亡和财产损失,尽快恢复公路交通的正常运行。

一、公路地质灾害应急预案编制原则

科学有效的应急预案的编制要遵循一定的基本原则。这些原则是保证应急预案实用性、权威性、可操作性的根本保障,其目的就是把公路交通系统应对突发事件的被动模式转变为事前预防、事中高效控制、事后快速恢复的主动管理模式,从而全面提高公路交通系统的抗灾韧性。

(一) 预防为主与避险为要的原则

公路地质灾害应急预案的编制要从风险的预先防范和主动规避入手,而不能仅仅依靠灾后救援。此原则就是把灾害管理的重心提前,通过地质灾害风险普查、隐患点识别、动态监测等方式,对公路沿线的潜在风险源做出准确的评价。在此基础上,结合气象、水文等其他信息来创建科学的预警模型,在灾害发生之前就发出预警信号,争取时间来预防并组织人员撤离。

避险为要,就是指预警信息发布之后应急行动的方向。预案中应规定出各个预警等级下的人员疏散、交通管制、危险区域封闭等具体的避险措施。要求预案要详细规划安全高效的疏散路线和避难场所,并建立一套行之有效的组织动员机制,保证受威胁民众、施工人员、司乘人员可以迅速、有条不紊地转移到安全地带。把预防和避险放在最核心的地位上,从根本上减少灾害发生时的人员伤亡,充分体现出以人为本、生命至上的现代应急管理理念。

（二）统一领导与分级负责的机制

公路地质灾害应急处置工作涉及面广，专业性强，时效性要求高，所以必须建立权威高效的指挥体系。统一领导原则可以保证应急响应开始以后，迅速形成集中的决策中心。一般由政府牵头成立应急指挥部，整合交通、自然资源、应急管理、公安、卫健等部门力量，统一发布指令、统一行动，避免多头指挥、政出多门造成的效率低下、资源浪费。集中统一的领导力，在应对重大复杂的灾害的时候起着重要的保障作用。

分级负责原则是在统一领导下的具体责任划分。根据灾害的严重程度、影响范围以及应急处置要求把应急响应分为不同的等级。每一个响应等级都有自己的启动条件以及负责主体。一般性灾害由县级交通或者应急管理部门处理；当灾害扩大或者升级时，逐级上报到市级、省级甚至国家层面，启动更高级别的响应，由相应级别的政府和指挥机构承担主要领导责任。该机制把属地管理责任落到实处，使大部分事件能在基层得到快速、有效的初步处置，也为应对特别重大的灾害预留出更高层级的指挥和资源调配通道，使整个应急体系既能灵活应对局部突发状况，又能集中力量应对重大挑战。

（三）资源整合与信息共享的要求

现代公路地质灾害应急处置的复杂性、紧迫性决定了不能打破部门壁垒，对各种应急资源进行整合和利用。资源整合不是简单的物资、设备的汇总，而是一种系统化的协调能力。因此预案要明确的规定有

1. 创建跨部门、跨区域的应急资源数据库。数据库应该包含应急救援队伍、专家人才、大型抢险机械、医疗救护设备、救灾物资储备等各类重要信息，并且要保持实时更新。通过统一平台，指挥中心可以获取需要的资源种类、数量、位置、状态等所有信息，给快速决策提供有力支撑。

2. 形成协同调用机制，按照预案中各资源所有者、管理者、调用者等的权利和义务以及统一的申请、审批、调配程序来规定。应急状态下指挥部有权按照预案统一调度指挥体系内所有的资源，保证抢险救灾第一时间得到最充分的保障。

信息共享就是资源整合和协同作战的“神经网络”。预案要创建起一个信息互通、实时共享的平台。该平台要整合气象预警、地质监测、实时路况、灾情报告、救援进展等各种信息，向所有的应急处置单位和人员开放相应的权限。利用标准化的数据接口、通信协议，保证信息在各个系统、各个部门之间可以无障碍

地传递。不仅可以使指挥中心全面、准确地掌握灾情态势，做出科学决策，也可以使一线救援队伍及时得到指令和现场信息，提高行动的精准性和安全性，最终形成上下联动、左右协同的高效应急格局。

二、不同灾害等级的应急响应流程设计

公路地质灾害按照它对社会公众危害程度、影响范围和发展趋势的不同，分为不同的等级，然后根据这些等级采取有针对性的应急处理措施。具体划分标准以及响应职责见下表。流程设计是应急预案最直接的体现，给每一个响应等级都制定了行动路线图，使信息报告到响应终止的每一个步骤都有章可循，保证忙而不乱。

公路地质灾害应急响应等级划分与职责表

级别	灾害名称	启动条件 (主要参考)	响应主导机构
I 级	特别重大灾害	造成 30 人以上死亡，或直接经济损失超 1 亿元	国务院
II 级	重大灾害	造成 10-29 人死亡，或造成重大经济损失	省级人民政府
III 级	较大灾害	造成 3-9 人死亡，或造成一定经济损失	地市级人民政府
IV 级	一般灾害	造成 3 人以下死亡，或造成较小经济损失	县级人民政府

(一) 特别重大灾害应急响应流程

特别重大地质灾害一般指造成 30 人以上死亡或者直接经济损失超过一亿元的危害。其影响面广、破坏性大、处置困难。对这样的灾害要开启最紧急的应急响应模式，且应急响应程序设计必须体现出国家的统一指挥和资源统筹。一旦发现或者接到可能会造成特别重大灾害的报告，省级交通运输主管部门、应急管理部门应当立即向国务院及相关部门报告，并率先启动省级最高级别的应急响应。

国务院接到报告之后，会立即成立国家应急指挥部，由国家领导人担任总指挥长，统一指挥全国应急救援工作。指挥部立即调集国家级专业救援力量，即国家综合性消防救援队伍、相关行业的国家级应急救援队伍、军队和武警部队等，携带重型装备赶赴灾区。同时国家启动跨区域物资调度机制，从国家应急物资储备库和周边省份紧急调运抢险设备、生命支持系统、医疗药品、生活物资，保证灾区急需。

一级响应程序要设立前方指挥部，由国家相关部门领导和灾区省级领导共同组成，负责现场的具体指挥协调工作。前方指挥部主要任务有五项，第一，第一

时间进行生命搜救，最大限度地抢救被困人员；第二，科学评价次生灾害风险，划定警戒区，将所有受威胁的人全部疏散；第三，组建顶级专家队伍到现场勘察、分析研判灾害发展态势，为救援方案制定提供科学决策依据；第四，保证生命通道、救援通道畅通；第五，由宣传部门统一发布权威信息，及时、准确地向社会通报灾情、救援进展，回应社会关切，稳定社会情绪。待险情彻底清除，受灾人员得到妥善安置、社会秩序基本恢复之后，由国家应急指挥部宣布响应结束。

（二）重大灾害应急响应流程

重大地质灾害，指造成 10 人以上、29 人以下死亡或者造成重大经济损失的地质灾害。应急响应以省级人民政府为主导，是省域内发生严重灾害时的主要应急机制。在得到重大灾害的报告，经过核实之后，省级应急指挥机构会马上启动相应的应急响应。指挥部总指挥一般为省级政府分管领导，相关厅局的主要负责人也进入指挥体系，在省级应急指挥中心集中办公。

该响应流程的核心就是调动省级核心应急资源，指导和支持灾害发生地市级政府开展工作。省指挥部会立刻组建工作组、专家组赶赴灾区开展现场指挥、救援工作，了解灾情发展情况。同时根据灾情需要调集省级专业救援队伍和应急物资，加强市级救援力量。响应期间，省级指挥部应同国家相关部门保持信息沟通畅通，在必要的时候请求国家支援。灾情信息每天报告，由省级政府新闻办统一组织协调，根据需要召开新闻发布会发布权威信息。灾害现场得到有效控制，次生灾害隐患基本消除后，由省级指挥部决定降低响应级别或者终止响应。

（三）较大及一般灾害响应流程

较大地质灾害和一般地质灾害属于常见的灾害类型。较大地质灾害一般是指造成 3 到 9 人死亡，或者造成一定的经济损失；一般地质灾害是指造成 3 人以下死亡，或者造成较小经济损失的事件。这两大类灾害的应急响应程序，很好地体现了属地管理为主的原则，突出了基层政府的先期处置能力以及快速反应能力。

市级响应（原三级响应）是由地市级人民政府来启动和指挥的。灾情上报后，市指挥部要立即启动预案，分管副市长任指挥长，组织交通、应急、自然资源、公安等相关部门马上开展应急处置工作。响应流程指的是市级救援力量在规定的时间内到达现场，进行人员搜救、交通疏导、伤员救治等工作。市级指挥部要统筹调度全市的应急资源，指导县（区）政府做好现场的具体工作。同时要将灾情及处置情况及时上报给省级政府。当灾情超过本市处置能力的时候，应立即向省

级政府请求支援。

县级响应（原四级响应）由县级人民政府承担。它的响应过程最为简明高效，突出一个“快”字。乡镇政府或者公路管养单位作为第一发现者，在向县级政府报告的同时，必须立即开展群众疏散、现场警戒等先期处置工作。县级指挥部启动响应之后，就会马上调集本级救援队伍和物资到现场，全面接手指挥权。县级响应的关键在于依靠基层组织距离灾害最近的优势，把险情扼杀在萌芽中，防止事态蔓延升级。两级响应的终止分别由市、县级指挥机构根据现场情况作出决定。

三、应急救援资源配置与调度优化

应急救援是否成功很大程度上取决于应急资源的保障能力。科学的资源调配、高效的调度是应急管理体系的物质基础，也是应急管理体系运转效能的直接反映。因此物资储备库合理布置、救援队伍专业化建设以及调度决策科学化同等重要。这三者就形成了强有力的应急保障。

（一）应急物资储备库的选址与布局

应急物资储备库是公路地质灾害抢险救援的“弹药库”，其选址和布局的好坏直接决定着应急响应的速度和效率。选址的第一条原则就是安全可靠，交通便利。储备库应选址在地质条件好、地势高、不容易受到洪水、滑坡等灾害直接影响的区域。还应紧邻交通干线，具有公路、铁路或者水运条件，在交通网络局部中断时，物资仍可以快速运输出去。

布局优化要考虑地区灾害风险分布，路网结构，人口密度，防护目标的重要程度。在国家和省一级要设立若干大型区域中心储备库。规模大、品种全，可以覆盖大面积地区，主要是应对重大级别以上的灾害。市、县一级应建立本辖区内的前置式或者分布式储备库（点）。这些库点虽然规模较小，但是位置更接近于风险点，在灾害发生初期可以为应急物资的投放提供第一道防线。多层次的“中心库+前置库”布局体系，把集中储备的规模效益同分散储备的快速响应融合起来，从而形成远近结合、点面协同的物资保障网，保证在任何情况下都能够实现物资的就近、快速调拨。还可以与大型物流公司、生产企业签订协议，把对方的仓储设施作为协议储备库来使用，从而有效地提高保障网络的韧性和覆盖面。

（二）应急救援队伍的专业化配置

公路地质灾害具有复杂性，因此组建专业的应急救援队伍是开展高效科学救

援的前提。专业化配置是人员、装备的专业化,更是队伍结构系统的优化。首先要依靠公路管理、养护单位,组建以工程抢险抢通为主要任务的基础应急队伍。这些队伍对于道路情况比较熟悉,掌握了常规的道路、桥梁、隧道抢修技术,成为道路抢修的主力军。

在此基础上,还要进一步配置具有特殊技能的专业救援队伍。例如可以组建针对大规模崩塌、滑坡的重型装备操作队;针对复杂地质条件救援的工程地质、岩土工程专家小组;针对隧道内救援的通风、防爆、有毒气体侦测专业分队;以及负责伤员搜救与医疗后送的紧急医学救援队。这些专业队伍可以与大型建筑企业、专业工程公司、医疗机构等签订合作协议的方式共建,从而达到平战结合的目的。还要成立以顶尖专家为主的应急技术指导组,给重大、复杂的灾害处置提供高水平的决策咨询和技术支持。多层多专业队伍相互配合形成功能互相补充、互相配合的综合救援体系,可以应对各种类型的公路地质灾害,也可以应对不同规模的公路地质灾害。

(三) 多目标应急资源调度优化模型

在重大公路地质灾害发生之后,往往会出现多个受灾点急需救援,而且各种应急资源(人员、设备、物资)严重缺乏的复杂局面。传统的经验调度方法很难在短时间内做出最优的决策。建立多目标应急资源调度优化模型,用现代计算技术辅助决策,是提高调度效率、救援效果的重要手段。模型的主要目的在于对冲突的目标进行权衡,常出现的目标是救援时间最短、运行费用最少和满意率最高三个。

模型建立首先需要把各项参数量化,即把不同灾点的灾情严重程度、不同资源需求的紧急度、各储备库的资源存量、不同道路的通行能力及预计运输时间等。目标函数一般设置成最小化总救援时间(资源集结、运输、现场作业时间),最大化各个灾点资源需求满足率。约束条件有资源总量限制、运输车辆载重限制,救援队伍专业能力匹配等等。对于这类多目标优化问题,一般会使用遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等智能优化算法来求解。这些算法可以快速搜索庞大的决策空间,在短时间内得到一组 Pareto 最优解集,也就是在不降低某个目标的情况下,无法使另一个目标得到改善的“非劣”调度方案。依据实际需要及个人偏好,从中选出最合适的应急资源调度实施办法,从而达到应急资源调度的科学化、动态化、智能化,最大程度地发挥有限救援资源的最佳作用。

第二节 现场应急处置

公路地质灾害发生之后,现场应急处置是挽救生命、控制灾情蔓延、尽快恢复交通的重要环节。这既是对现代公路防灾减灾综合能力的考验,也是对面对灾害时快速反应、科学决策、得当措施的检验。

一、灾害现场快速勘察与风险研判技术

灾害发生之后,首先要查明现场灾情,科学研判风险。利用现代技术手段开展快速的勘察工作,能给抢险救援决策提供及时、准确的依据,最大程度上减少次生灾害发生的可能性,保证救援人员和被困人员的生命安全。

(一) 无人机快速航拍与三维建模

无人机技术由于机动灵活、高效安全等特点,在公路灾害应急勘察中起着“空中侦察兵”的作用。灾害发生之后,在道路中断、人员无法进入的地方,无人机可以携带高清摄像机、倾斜摄影相机或者激光雷达等设备,快速飞到灾害现场上空,从各个角度获取高分辨率的影像和点云数据。

利用这些多源数据,借助专业的实时建模软件,可以很快地生成灾区的正射影像图、数字表面模型和高精度实景三维模型。直观地体现了滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害体的范围、形状、体积及对公路的影响程度,进而做精确的灾情影响计算。

应急指挥人员利用三维可视化成果,既可以对灾区整体有宏观的认识,又可以对关键细节做微观的分析,给制定抢险方案、规划救援路线、评估次生灾害风险提供强有力的空间信息支持。这从根本上改变以往人工勘察效率低、风险大的局面,大大提高应急响应的速度及科学性。

(二) 灾害体稳定性快速评估方法

查明灾害体的基本情况以后,对它的稳定性作出迅速的判断十分重要,它关系到是否会发生二次或者多次垮塌,进而危及现场人员的安全。传统的稳定性分析方法依靠详尽的勘察资料以及繁杂的计算,不能满足应急抢险的时效性要求。因此一套快速评价的方法应运而生。

其中极限平衡法比较简便,它通过对滑坡体进行条分,根据静力平衡条件求得稳定系数。虽然计算方便,但是也存在一定的局限性。另一种是基于现场调查

的定性、半定量评价方法，通过对坡面形态、裂缝特征、岩土结构、变形迹象、人类活动等多方面指标进行分析，对这些指标进行量化赋权后得到一个综合性的不稳定指数，用此来快速判断灾害体的稳定状况。有限元强度折减法可以直接体现滑坡的变形破坏过程，也逐渐应用于应急评价。快速评价法精度不如详细勘察后计算，但是在黄金救援时间内可以给现场决策提供重要的参考，有效指导抢险工作安全开展。

（三）次生灾害风险区的快速圈定

公路地质灾害发生之后，原有的地质平衡被打破，在降雨、余震等诱发因素的作用下，很容易产生新的灾害链，比如滑坡堵江形成堰塞湖、崩塌体失稳转化为碎屑流等。准确快速圈定出潜在的次生灾害风险区，是保证救援安全、防止灾情扩散的前提。

风险区圈定工作首先要依靠对灾害现场及其周边环境的快速解译。根据无人机获取的高精度地形数据以及影像资料，可以分析灾害体上游是否存在汇水区，下游是否存在居民点或者重要设施。

要对各种致灾因素进行综合评价。对滑坡或崩塌形成的松散堆积体，主要考虑强降雨条件下是否会渗透饱和、失稳；对拦截河道的堵塞体，要快速计算上游蓄水速度和堰塞湖库容，评价其溃决风险。

根据分析结果，在三维地理信息系统或者现场图纸上标注出高、中、低不同等级的次生灾害风险区，根据这些区域设置警戒线、安全作业区、疏散通道。具体步骤可以总结为以下几点：

次生灾害风险区快速圈定步骤

步骤	具体内容
1. 信息获取与识别	利用遥感和无人机数据，快速识别灾害周边潜在的不稳定斜坡、沟谷及河道堵塞点。
2. 模拟与评估	根据气象预报、水文资料及简化模型，模拟强降雨或余震等条件触发下次生灾害的影响范围及演进路径。
3. 可视化与警示	在地图上进行可视化标示，确定各个区域的风险等级，通知所有现场人员，设置明显的警示标志，确保所有活动都在安全区域内进行。

由次生灾害风险区快速圈定流程可知，以系统化、可视化的方式可以有效地引导现场人员避开危险、保证救援行动的顺利开展。

二、紧急交通管制与临时便道抢修技术

当地质灾害造成公路中断的时候，高效的交通组织和快速的道路抢通能力就成为应急处置的关键。它不但是救援力量能否到达的关键所在，也是区域社会经济稳定和灾区民众生命线能否得到保障的先决条件。

（一）灾害路段的紧急封闭与分流方案

灾害发生后必须对受损路段和受影响的区域进行紧急交通封闭。封闭的主要目的就是防止后面的车辆、行人误入危险区域，给抢险救援提供一个安全、有序的作业环境，同时可以避免由于交通堵塞而造成救援延误。封闭区域的划定要科学，在覆盖直接受影响地段的同时还要考虑次生灾害可能波及的其他区域。

封闭的同时必须立即启动交通分流方案。交通管理部门要同公路运营单位密切配合，通过沿线情报板、广播、导航软件等方式公布路况信息以及绕行建议。分流方案设计要考虑周边路网通行能力、路况等级、重要城镇、救援集结点等连通性，选择最佳的替代路线保证车辆有序疏散，避免在分流路上造成新的交通拥堵。在区域路网不发达的地方可以启用备用通道或者分时段、分批次的管制。

（二）战备钢桥架设技术与临时便道修建

当桥梁被破坏或者路基大面积塌陷的时候，恢复通行能力一般要依靠特种应急装备和技术。战备钢桥也叫贝雷桥，由于它模块化设计、构件轻便、架设迅速的特点，成为公路应急抢通的利器。该钢桥由标准桁架单元、销子、支撑架等构件组成，安装方便、能适应不同的跨距、荷载要求。桥梁基础还存在或者可以快速加固时，救援队伍可以在短时间内完成钢桥的推送或者吊装架设，迅速打通断点。

对大范围的路基损毁路段要迅速修建临时便道。便道选线要尽量避开地质不稳定的地方，利用原有旧路或较平缓的地形。施工时大量采用挖填结合、就地取材的原则，用推土机、挖掘机等工程机械快速平整路基，铺设碎石、钢板或使用路基箱等材料加固路面，满足应急车辆通行要求。在紧急情况下，甚至会直接在滑坡体上开辟临时通道，但前提是要进行稳定性评价，并且设置连续监测。

临时便道的修建，既是技术能力的展示，又是组织协调能力的检验。它需要物资调配、机械进场、施工组织等环节高效衔接。战备钢桥和临时便道相结合，可以迅速形成一条可靠的“生命线”，给后续大规模救援和灾后重建争取到宝贵

的时间。

（三）应急通道的开辟与保通措施

应急通道是抢险救援的生命线，开辟和保证畅通为现场处置的优先任务。灾害发生后，首先要使用推土机、挖掘机、装载机等重型机械清除路面上的塌方体、落石、障碍物，打通一条单向通行的救援车辆作业通道。通道宽度和承载能力要达到大型救援设备、运输车辆的基本标准。

应急通道的保通工作是持久的。因为灾区地质条件不稳定，已经抢通的道路随时会被新的塌方或者落石阻断。因此必须建立常态化的巡查制度，派专人对通道沿线的边坡、危石进行不间断的观察。在关键节点处设观察哨，出现险情及时预警，并调集人力物力进行处理。对特别危险路段设置临时防护棚或者柔性防护网，防止落石影响通行。在通道沿线储备一定数量的抢险机械、物料，以便新出现的阻断发生时可以迅速响应，保证应急通道一直畅通无阻，给救援工作提供不间断的交通保障。

三、受困人员救援与生命通道疏通方法

在公路交通被阻断的灾害现场，车辆被埋、人员被困的情况时有发生。此刻每一秒都关乎生命。所以采用科学的探测技术、高效的破拆设备、合理的疏散方式，尽快找到、救出并疏散被困人员是应急救援工作的重中之重。

（一）生命探测仪在废墟搜救中的应用

在被掩埋的车辆或者坍塌的建筑物废墟里寻找幸存者，生命探测仪是不可缺少的重要设备，它可以穿透障碍物探测到非常微弱的生命信号。目前常用的探测仪有多种类型，常见的有地震波式、声音式、红外线式等。

声波生命探测仪利用高灵敏的传感器，可以采集到被困人员的呼救声、喘息声、敲击声、呼吸声或者是其他一切发出振动的声音和振动波，从而使救援人员找到生命体的位置。红外生命探测仪依靠探测到人体发出的红外辐射来发现目标，即使幸存者失去意识，只要体温还存，就可以被发现。

雷达生命探测仪使用的是超宽带雷达技术，通过发射电磁波并接收回波的方式来探测生命体征。可以探测到由呼吸、心跳引起的胸腔微小位移，精度非常高，并且可以穿透较厚的障碍物，在土耳其地震救援等多次重大救援行动中都发挥了决定性的作用。高科技神器综合应用使搜救效率、成功率大幅提高，给废墟下生

存的人带去希望。

（二）大型破拆装备与救援通道开挖

确定了受困人员的位置之后，应立即用大型破拆设备快速开辟一条安全的救援通道。已经被扭曲变形的车辆、坚固的混凝土结构、巨大的岩石等，人单凭力气是无法搬动的。

针对不同的障碍物，需要选用合适的破拆装备：

1. 金属结构破拆，对变形的车辆或者金属结构一般使用液压剪扩钳、无齿锯等工具进行剪切、扩张、分离，以最短的时间打开救援空间。
2. 混凝土、砖石破拆使用液压破碎锤、金刚石链锯等重型设备。
3. 大面积清理和通道开挖，在需要移除巨大障碍物或者开挖救援通道的时候，挖掘机、起重机等大型工程机械就成为主力，可以迅速清理废墟，为救援人员创造作业面。

使用这些大型设备时必须十分小心，防止对被困者造成二次伤害，还要随时注意作业区域的稳定性，防止破拆时发生新的坍塌。救援通道开挖属于和时间赛跑的精细活，必须掌握力量和技巧的结合，目的是尽快建立一条通往生命的稳固通道。

（三）受困人员疏散路径规划与引导

成功救出被困人员之后，怎样才能安全、迅速地把他们转移到安全地带，同样也是一个严峻的考验。疏散路径规划要以对现场风险的全面评估为依据，避开次生灾害威胁区，绕开结构不稳定的地方。理想的疏散路径应该具有路程短、安全、容易辨认的特点。

规划路径时，依靠无人机侦察、现场勘测等途径得到的即时信息来对路线实施动态评价，并及时作出调整。若某条原定疏散路线由于新的裂缝或者小坍塌而变得不再安全，此时就必须立即规划出新的替代路线。规划完后要利用标识、救援人员引导、扩音设备、无人机喊话等方式，向被疏散人员指明前进方向。尤其是夜间或者能见度不好时，发光指示牌、手电筒光束等就会成为主要的引导工具。合理的路径规划加上有效的现场引导可以防止疏散过程中出现混乱、恐慌的局面，保证所有的获救人员和救援人员安全、有条不紊地撤离到危险区域之外。

第三节 抢险救援技术

一、边坡滑塌应急加固与清理技术

边坡滑塌属于公路交通中经常发生的地质灾害,抢险工作对时间要求高,作业风险大。应急处置的主要任务就是快速控制边坡变形,消除二次灾害隐患,安全、高效地清理塌方体,尽快恢复道路的基本通行,保证救援生命线的畅通。

(一) 坡脚反压与临时支护快速施工

边坡滑塌以后,坡体常常处在极限平衡或者欠稳定状况,任何轻微的扰动都有可能引发再次失稳。坡脚反压属于快速有效的应急稳定方法。基本原理就是迅速将重物填压到滑坡体前缘坡脚,形成反压荷载,直接增大坡体的下滑抗力,使坡体稳定系数暂时提高,为后续抢险清理、永久加固争取时间。反压体的材料应就地取材,使用现场易得的材料,用大型机械快速填筑压实,在最短的时间内形成支撑力。

除反压边坡脚外,对于局部不稳定或者有继续塌落的可能的地方则要实施临时支护。这些措施重视快速施工以及可拆卸性。采用大直径钢管或者 H 型钢打设排桩形成临时抗滑桩墙,也可采用预制钢筋混凝土框架或者模块化构件快速拼装形成临时挡墙。该类支护结构在设计上注重模块化、标准化,便于运输、现场快速吊装组合,可以大大减少现场湿作业、高空作业,保证施工人员安全,缩短支护体形成周期,为清理作业提供安全屏障。

(二) 破碎体清除与大块石解爆技术

塌方体清理是直接恢复交通的步骤,一定要按科学的程序来进行。清理工作一般按由上到下、分层剥离的原则进行,防止底部掏挖引起上部塌方体失稳。作业时要安排专人对坡体连续观测,发现变形、异响时立即停止作业并撤出人员。对常规土石方主要采用挖掘机、装载机、自卸汽车等常规设备配合使用,改进机械站位及运输路线,提高清理效率。狭窄路段使用长臂挖掘机或者接力方式清理。

塌方体中常常有大量的岩石,超出了常规机械的破碎、运输能力,成了抢通工程的障碍。传统爆破方法虽然效率高,但是对不稳定边坡的震动较大,容易使灾情扩大,因此需要采用更加精细、安全的解爆技术。静态破碎剂是一种理想的材料,把药剂注入岩石钻孔后,水化反应产生巨大膨胀力作用于岩石,造成内部

出现裂缝，整个过程安静、无震动。液压劈裂机是另一种有效的物理方法，用楔形劈裂头产生的强大分裂力，可以将巨石迅速解体。必须爆破时应采用毫秒延时爆破或者预裂爆破等精细的爆破方式，严格控制炸药用量和起爆网络，尽量减少震动、冲击波的影响。

（三）主动防护网的紧急安装与加固

主动防护网系统不但是灾害预防的重要手段，在灾后应急抢险中也起着重要的作用。边坡局部发生滑塌之后，上部坡体上仍然存在大量危岩、浮石，对下方的抢险作业人员及设备造成极大的危险。此时紧急安装主动防护网，将这些潜在的危险源约束在原地，防止它们继续剥落、滚落，形成相对安全的作业空间。

应急安装主动防护网，其工艺流程和技术要求与常规施工存在差异，核心在于“快速”与“简化”。

1. 锚固系统简化：用快速钻进设备打设比常规设计更短、直径更小的应急砂浆锚杆或者自进式锚杆，缩短锚固系统的施工与养护时间，尽快形成初始锚固力。

2. 网片快速铺设：把提前在场外拼接好的钢丝绳网片，用吊车、挖掘机长臂或者直升机整体吊装覆盖大面积危岩区，由专业人员来完成边线绳索的固定和缝合。

应急性安装强度、耐久性不如永久性防护工程，但是它的核心价值就是用最短的时间换取作业的安全。灾害当中对局部受损的已用防护网也要立即加固。检查并拧紧所有松动的锚杆螺母，增加临时卸荷钢丝绳，或在破损处加设新网片来恢复或者提高其防护能力，保证抢险工作顺利进行。

二、路基冲毁应急抢修与回填技术

洪水、暴雨、泥石流等涉水灾害是造成公路路基破坏的主要因素。水毁路基常伴有基础淘空、路堤塌陷等问题，其应急抢修技术要解决水下作业、地基处理、快速填筑等诸多难题。抢修的目标就是保证结构安全，尽快恢复路基的承载能力，疏通交通动脉。

（一）抛石挤淤与路基快速回填技术

被洪水冲毁，基础被淤泥、软土占据的路段，传统清淤换填费时费力，不能满足抢险时效性的要求。抛石挤淤技术给这个问题提供了一个有效的解决办法。该技术直接将大块、坚硬的石料抛入水毁形成的水坑或者软弱地基中，依靠石料

自重和冲击力将水下或者表层低强度淤泥、软土向两侧挤压排开，石料之间相互嵌锁，形成具有一定承载力的抛石基础。此法适合水流速度有一定范围时使用，水流可以带走被挤出的细颗粒物质。抛石基础给后续的路基填筑提供了一个稳定的作业平台。

抛石基础建成以后路基的快速回填就是抢通的关键。为了加快施工进度，首先要选用透水性良好、强度大、压实容易的材料，比如级配良好的碎石、砾石或者开山石渣。回填时可采用分层填筑、分层压实的方法，也可采用土工合成材料加筋处理。用土工格栅提高路基整体稳定性和承载能力，在填层之间设置高强度土工格栅，利用土工格栅的抗拉作用约束填层侧向变形。加筋技术可使抢修时边坡坡率更陡峭，减小填方量，缩短施工时间，对路基形态快速恢复有重大意义。

（二）透水性材料在水毁路基修复中的应用

水是路基病害的根源，对水毁路基修复，处理水的问题尤为重要。透水性材料的应用就是以“疏导为主，变堵为疏”的治水理念。传统修复常用的黏性土等密实性填料，虽然自身强度较高，但是透水性较差，在动水压力和孔隙水压力的作用下，路基内部容易出现饱水现象，再次失稳。透水性修复技术主要内容就是建立内部排水通道畅通结构，使地表水和地下水可以迅速排出，防止在路基内积存。

大孔隙开级配碎石、砾石属于透水性填筑材料。它们可以作为路基地部的排水层，也可以作为路堤填料。紧急工程中甚至会用石笼做路基主体，即用镀锌或涂塑钢丝网箱装填块石，逐层堆砌成路堤。石笼结构整体性好、适应地基变形，最大的优点是整个结构都是透水的，可以完全消除孔隙水压力的影响。多孔混凝土等新型材料在应急抢修中也有运用，既能够达到所需承载力又具有良好的透水性，很适合路面以及路肩的快速修复。

（三）临河路基护岸的应急加固措施

临河路段路基受到河水的冲刷，水灾最为严重。洪水期间流速增大、水位升高，对路基坡脚的冲刷作用大，很容易造成护岸失效、路基坍塌。应急加固要迅速有效，能抵抗强大的水流动力。最常用、最有效的应急措施之一就是抛填大块石或者混凝土块进行压脚。此法简单易行，可以很快形成防护层来抵御水流直接冲击和冲刷。

在块石抛填的基础上，为了增加整体防护和稳定防护的效果，一般采用铅丝

石笼或格宾网垫做应急防护。石笼是将块石装入预制金属网箱，再将整个石笼整体吊放或沉放到冲刷部位。该结构具有较好的柔性，能适应河床变形而不易破坏，网箱将松散块石联结成整体，抗冲刷能力比单个块石强很多。水流湍急、冲刷严重的地方，可以采用沉排法应急处理。即在岸上预先制作大面积的柴排或梢排，上面压载石块，用船只或缆索将其整体沉放到水下冲刷部位，迅速覆盖河床，阻止冲刷继续发展。

用高强度土工布制成的土工袋装填砂土或者素土，也是一种应急的护岸方法。土工袋重量适中，人工或者小型机械搬运堆码都很方便，在水边可快速搭建临时防汛堤或护坡。在某些情况下也可以采用组合的方式，先抛石护脚，然后在坡面上铺设土工布，用石笼压盖，形成复合防护结构，提高护岸防护能力及稳定性，为以后永久修复打下基础。

三、应急救援工程机械的集成与应用

现代公路地质灾害抢险救援工作已经不仅仅只是人力、机械的简单叠加，正在向系统化、智能化、集成化方向发展。应急救援工程机械的合理配置、功能集成、协同作业是提高抢险效率、降低救援风险、保证人员安全的根本，也是现代抢险技术的发展趋势。

（一）多功能应急救援装备车的配置

传统的应急抢险模式要调度各种不同的车辆，发电车、照明车、指挥车、设备运输车等，车辆种类繁多，占用宝贵的道路资源，也加大了现场调度的复杂性。多功能应急救援装备车的设计理念就是解决这个问题。它把多种应急功能集中到重型卡车底盘上，形成一个移动的、自给自足的应急保障平台，到达现场后可以立即开始作业。

这种集成装备车通常具备如下核心模块：

1. 能源供给模块：使用大功率静音发电机组和液压动力站，给现场用电设备和液压工具提供稳定的、连续的能源。
2. 照明通信模块，配有可升降全方位高亮度 LED 照明灯塔，解决夜间照明问题，集成卫星电话、短波电台、无人机图传系统、无线网络基站，形成现场通信指挥中枢。
3. 破拆救生模块，车载空间内一般会配备液压剪扩器、金刚石链锯、岩石分

裂机、生命探测仪等小型专业破拆、救生工具，随时取用。

一车多能的装备大大提高了应急响应速度和自身保障能力，非常适合第一梯队，在灾害初期快速赶到现场并投入工作。

（二）遥控操作机器人在危险区域的应用

公路地质灾害抢险现场，特别是大型滑坡、崩塌现场，环境风险高，危岩滚落、坡体二次失稳、有毒气体等对现场作业人员的生命安全直接构成威胁。使用遥控操作的机器人是采用人机分离安全作业思想的主要技术手段。操作人员处于安全地带（指挥车内或者几百米之外），使用控制器、高清视频回传系统对危险区域机器人进行精确操作，完成各种高风险工作。

抢险中使用的机器人形态多样，功能各异，其具体类型及应用场景可见下表。

遥控机器人类型与应用场景

机器人类型	主要功能	典型应用场景
遥控挖掘机 / 装载机	土石方清理、搬运	不稳定边坡、悬崖边塌方清理
侦察机器人	环境探测、数据采集	倒塌隧道、密闭空间、有毒环境
钻孔 / 锚固机器人	钻孔、锚固作业	陡峭危岩边坡加固
消防水炮机器人	灭火、洗消	车辆起火、化学品泄漏现场

如上表所示，遥控挖掘机、遥控装载机是最常用的两种，可以在不稳定的边坡下或者悬崖边清理、转运塌方体，避免驾驶员的风险。履带式多功能机器人平台更灵活，体积小、通过性好，可以搭载不同的作业模块，载有视觉、气体传感器等设备的侦察机器人可以进入倒塌隧道、密闭空间探测环境，载有钻孔、锚固设备的机器人可以在人无法到达的陡峭岩壁上开展危岩加固作业，装备消防水炮的机器人可以进入车辆起火、化学品泄漏等危险现场进行灭火和洗消。智能装备的应用大大提高了人类在极端环境下的工作效率，也是保证抢险人员零伤亡的重要技术发展方向。

（三）工程机械协同作业的指挥调度系统

大型地质灾害抢险现场一般会聚集数十台甚至上百台工程机械，包括挖掘机、推土机、装载机、自卸车等。怎样科学、高效、安全地组织这些机械协同作业，是十分复杂的调度问题。传统的依靠对讲机、现场指挥员口头调度的模式，信息传递效率低、易出现指令不清、作业面冲突、安全隐患等问题，已经不能满足现代化抢险的需求。

现代化的工程机械协同作业指挥调度系统,是用物联网、卫星定位、大数据技术构建起来的智慧工地管理平台。对每台工程机械以及每一个重要的作业人员进行北斗或者 GPS 定位终端的配置,从而对现场所有的物体进行实时的位置监控。这些位置信息和无人机航拍的三维实景地图结合以后,在指挥中心的电子屏幕上就会呈现出一个动态的可视化的“数字孪生”抢险现场。指挥员可以一目了然地知道所有的机械的位置、状态和作业轨迹。

在此基础上系统可以对任务进行数字化下达和管理。指挥员在电子地图上划定作业区域,设定作业任务后,一键发送给指定的机械驾驶室终端。机械作业量、油耗、工作轨迹等数据可以实时上传给指挥员,给指挥员决策提供数据支持。最重要的是系统可以设置电子围栏和防撞预警。当两台机械距离过近或者有车辆误入危险区域的时候,系统会对相关的驾驶员以及指挥中心发出声光报警,以此来防止发生碰撞事故或者误操作,从而大幅度提高大规模机械化抢险作业的效率 and 安全性。

第四节 灾后评估方法

自然灾害给公路系统带来的冲击是巨大的、深远的,所以灾后科学严谨的评估工作是进行应急抢险和恢复重建的前提。灾后评估的核心目的就是尽快、准确地了解公路基础设施的损毁情况和功能运行状况,对灾害造成的各种经济损失进行系统的量化。不但可以给制定出科学合理的恢复重建方案提供强有力的技术支持,也能保证决策的明智性和资源投入的有效性。

一、公路工程受损程度快速评估技术

灾后对公路工程受损情况进行快速、准确的判断,是进行应急决策、保障抢通保通工作的重要前提。该项工作要依靠高效的技术手段,尽快取得路基、路面、桥梁、隧道等主要设施的物理损伤信息。同时结合交通流中断的数据来给相应的应急响应提供及时支持。

(一) 路基路面损坏状况的快速分级

公路的路基、路面是公路不可缺少的部分,其好坏直接影响到公路的基本通行能力。路基路面的损坏程度分级是决定道路是否可以通行的第一步。评价工作

一般会使用无人机航拍、卫星遥感等现代技术对受灾路段进行大范围、高效率的初步勘察，从而迅速发现路基沉陷、边坡垮塌、路面开裂、掩埋或者水毁等常见的病害。

现场调查时根据预设标准，可以按损坏状况分为轻微损坏、中等损坏和严重损坏三类。

轻微损坏表现为路面出现少量裂缝或局部沉降，通常不影响车辆以慢速通行；

中等损坏则指路基出现明显沉陷或边坡局部滑塌，可能导致单车道中断或通行能力显著下降；

严重损坏则是路基大面积坍塌、路面被完全掩埋或冲毁，造成交通彻底中断。

这种快速分级的方法，能帮助决策者迅速锁定重点抢修路段，并合理调配抢险资源。

（二）桥梁隧道结构损伤的应急检测评估

桥梁、隧道属于公路网上的重要节点，灾后评估中具有最高的优先级。应急检测评估是为了快速判断结构是否出现了影响承载能力的损伤，从而确定结构的通行状况，给是否限制交通或者立即封闭提供决策依据。地震多发区一般规定，当震级达到某个数值时，就要对桥梁影响范围内的结构进行特别检测。此过程对于时效性以及准确性都有很高的要求。

应急检测通常分三步进行：

1. 依靠有经验的工程师用肉眼观察桥梁的墩台、主梁、支座、伸缩缝和隧道的衬砌、洞口等重要部位，发现有无明显的损伤。发现疑似严重损伤点以后，就会使用更为先进的检测手段对它做进一步的调查。

2. 无损检测技术，回弹仪、超声波检测、雷达探测等，这些技术可以在不破坏结构的前提下，快速对混凝土强度、内部缺陷、钢筋分布情况进行评价。

3. 动态特性分析，在结构上安装传感器，对结构在环境振动或者人为激励下产生的响应进行分析，根据频率、振型等参数的变化来判断结构整体刚度是否下降，从而推断损伤的程度。

4. 关键截面应变数据分析：分析结构关键截面的应变数据，可以判断荷载作用下结构的受力状态，对结构承载能力是否降低起到至关重要的作用。

利用这些应急检测手段，可以对桥梁或者隧道的安全状况做出初步的、可靠的判断，即确定为可通行、限制通行（限速、限重）或者禁止通行并立即抢修。

（三）交通中断程度与直接经济损失统计

交通中断属于公路灾害的直接结果。对中断情况进行准确的评价，快速统计出直接经济损失，对判断灾害影响、制定救援方案、申请重建资金等都有重要的意义。交通中断程度的判定不能简单的判定道路是通还是断，要根据所处路段的位置、长度、公路等级、预计中断时长、对区域路网连通性的影响等几个方面来考虑，判断有无关键通道被中断或者产生“孤岛”区域。这些信息主要是利用交通监测数据、遥感影像以及现场勘查三者相结合的方式获得的。

同时对直接经济损失也要做初步的统计工作。这部分损失主要是公路基础设施实体自身受到的破坏。常用的方法就是宏观损失估算法，依据历史灾害数据以及经验模型，用受灾区域的公路资产数据（不同等级公路单位造价、桥梁隧道重置成本等）快速估算。具体计算时，可简化为不同类型、不同等级公路设施损毁数量（如损毁里程、倒塌桥梁座数等）乘以该类设施对应的修复或重置单价。尽管在灾害初期缺乏数据时，此方法带有一定不确定性，但是它能够快速为应急响应、初期修复工作提供经济损失的概念，并为进一步的精细化评估奠定基础。

二、灾害经济损失统计与评估模型

公路地质灾害造成的经济损失并不只是设备的损坏，它还会引起一系列复杂的连锁反应。因此建立科学的统计和评估模型，对灾害的经济影响做全方面、系统化的量化，是灾后恢复和长期防灾规划中不可缺少的一环。除了要算直接损失之外，还要度量由于运输受阻、地区经济活动受阻，生态系统遭到破坏所带来的损耗。

（一）直接经济损失计算方法

直接经济损失是指由于灾害造成公路基础设施及附属设施实物毁损，所产生的价值损失。其计算的关键就是确定受损资产的价值以及损毁的程度。目前常用的计算方法是重置成本法，即以当前市场价格或者工程造价标准，重新修建或者建造一个与被毁设施功能相同的工程所需要的全部费用。此方法可以客观反映恢复到灾前正常状态所要投入的经济量。

在实际操作中计算过程要分类进行。公路设施的损坏情况要详细列举出来，路基、路面、桥梁、隧道、挡土墙、排水系统、交通安全设施等等。对每项设施根据现场勘查和技术鉴定结果来确定它的损毁率（即损坏程度占总体的百分比）。

用各类设施数量、单位重置成本、损毁率三者相乘再相加来得出总体直接经济损失数额。对一些不能用市场价值来衡量的特殊资产，如古桥等，一般只说明损坏情况，不直接折算成经济损失。

为了提高评估效率与精确度，在现代的评估工作中越来越普遍地用到了数据库和信息技术。以包含公路资产信息的地理信息系统 GIS 为依托，结合遥感影像、无人机侦测数据，可以快速找到受损点，自动提取损毁参数，与预先设定的造价数据库关联，实现直接经济损失的半自动化、快速化计算。

（二）间接经济损失（如运输延误）评估

间接经济损失是指由于灾害破坏公路交通功能，给社会经济系统运行造成的损失，其范围和程度一般比直接损失更大。其中由于交通受阻或者通行能力降低所造成的运输延误损失，在间接损失当中属于最重要、最容易被察觉的部分。评价此类损失，对认识灾害的社会经济影响、论证恢复重建的紧迫性都有重大意义。

运输延误损失评价模型大都遵循有无对比原则，即把灾害发生前后的运输活动所需要的时间和成本的变化作比较。计算时一般用到受影响的交通流量（客运和货运）、平均延误时间、单位时间价值等参数。评估时首先要用历史数据和交通模型来预测，在没有灾害的情况下，受影响路段的正常交通流量。根据实际观测或模拟的结果确定出灾后由于绕行、拥堵等原因造成的平均延误时间。将总延误时间乘以相应的时值系数（乘客的时间价值、货物由于延误造成的资金占用成本或者损失），得到总的延误费用。这是一个比较复杂的过程，因为交通流量和延误时间是动态变化的，不同种类的货物和乘客的时间价值也大相径庭。除了运输延误之外，间接损失还有企业停产、商业活动减少、旅游收入下降等等，间接损失的评估要采用更为复杂、范围更大的经济模型和社会经济数据。

（三）生态环境破坏损失评估

公路地质灾害会造成工程设施的破坏，还会对沿线生态系统造成巨大的冲击，比如引起水土流失、植被破坏、动物栖息地割裂、水源污染等。对这些生态破坏造成的损失进行评价是践行“绿色发展”、“生态文明”的理念的需要，同时也是全面衡量灾害影响、指导生态恢复工作的重要环节。

生态环境破坏损失的评价难度较大，因为生态系统服务功能一般没有市场价格，不能直接量化其价值。评估方法大体上可以分为两类

1. 修复成本法计算的是被破坏的生态要恢复到灾前状态所付出的费用，包括

植被恢复、水土保持、污染清理等工程的费用。该法直观易操作，但是会低估那些无法完全恢复或者恢复成本很高的生态功能损失。

2. 生态系统服务价值损失法，即衡量灾害造成的生态系统服务功能损失的价值，生态系统服务功能有水源涵养、土壤保持、空气净化、生物多样性维持等。采用生态经济学模型，参照已有的研究成果中单位面积生态系统服务价值量，结合遥感影像等技术确定的生态破坏面积、程度来估算总的价值损失。这样能更好地反映生态损失，但是结果的准确性严重地依赖于基础数据以及价值评价参数是否科学。

生态环境破坏损失评估方法对比

评估方法	核心思路	优点	局限性
修复成本法	恢复到灾前状态所需费用	直观、易操作，与工程实践结合紧密	可能低估不可恢复或高成本的生态功能损失
生态系统服务价值损失法	衡量生态系统功能损失的价值	全面反映生态损失，符合生态文明理念	结果准确性依赖于数据和价值评价参数的科学性

从上表可知两种生态破坏损失评价方法各有侧重，同时又有其局限，一般要两者配合使用以达到更好的评价。

三、灾后恢复重建方案的技术可行性分析

灾后恢复重建不能只是对受损公路进行简单的修补，而应该把灾害作为深刻的教训，全面提升公路系统的安全韧性。技术可行性分析是保证重建方案科学、安全、经济、高效的重要环节，它要求从地质安全、线形优化、技术创新等各个方面，对不同的重建方案进行全方位、审慎的论证和比较。

（一）灾后重建选址的地质安全性评价

灾后重建的首要原则就是安全。对因滑坡、泥石流、崩塌等严重地质灾害而毁坏的公路，重建选址必须做严格的地质安全性评价。如果在原址上重复建设而不解决造成灾害的根本地质问题，重建工程也会存在同样的或者更高的风险。因此地质安全性评价是决定是否采用原址修复或者另选新线的标准。

评价工作一般由地质、勘察、设计等专业人员组成，采用现场调查、地质测绘、物探、钻探等多种勘察手段来查明原址和备选新址地区地形地貌、岩土体结构、地质构造、水文地质条件以及不良地质现象的发育分布规律。评价的重点是

找出可能的地质灾害风险,即是否有潜在的滑坡、泥石流物源是否仍然活跃、场地地震效应是否会增大等。根据评价结果,对不同的选址方案的长期地质稳定性做出量化的或者定性的结论,并提出相应的工程防治措施建议。只有经过评价为地质安全或经工程措施可以保证安全的场址,才能进入方案比选范围。

(二) 原有公路线形恢复与改线方案比选

当地质安全性评价显示原址风险高或者恢复技术难度大、成本高时,改线方案就成为了一种必然的选择。此时需要对原有公路线形恢复方案和改线方案进行系统、全面的技术经济比选,以找到最优解。该比选过程属于多目标、多准则的复杂决策过程,目的在于达成安全、经济、功能、环境影响等各方面综合平衡。

比选通常围绕以下几个核心方面展开:

1. 工程地质及安全性:比较不同方案穿越区域地质条件、潜在灾害风险和为保证安全所采取的工程措施费用。改线方案主要的好处就是可以避开重大地质灾害隐患点。

2. 技术标准及功能性,评价各个方案能否达到或者提高公路设计速度、平纵曲线指标、通行能力和服务水平。改线可以给原有的低标准线形带来改善的机会。

3. 工程规模和投资估算:根据各方案的路基土石方量、桥隧比例、特殊结构物数量等来编制投资估算,并进行全生命周期经济成本比较。

4. 环境与社会影响分析,分析各方案对土地占用、生态环境、沿线社区分割、文物古迹等各方面的影响,这些也是方案可行性的限制因素。

建立多层次评价指标体系,用层次分析法、模糊综合评价等决策分析方法对各个方案进行量化打分、综合排序,最后选出技术上可行、经济上合理、综合效益最好的重建方案。

(三) 修复工程的新技术应用与实施计划

无论选择原址修复还是改线重建,在灾后工程中都应当积极运用新工艺、新材料、新技术来改善工程质量、加快工程进度和提高结构的耐久性、抗灾能力。技术创新被融合进修复工程里,已经成为公路交通基础设施转型升级的重要途径。用深层泄水孔技术解决内部水分问题引起的边坡不稳定,用高性能改性沥青材料改善路面的抗滑性能和使用寿命。

公路工程修复,BIM 技术有明显应用。通过创建地质、地形、旧路、新设计的三维信息模型,可以实现设计精细化、多方案可视化比选、施工冲突提前预

判、工程量精确计算,大大提高设计质量和效率。施工阶段,用 BIM 模型和施工计划相融合形成的 4D 模拟,可以清楚的展现出施工进度情况,优化资源调配、交通组织方案。在生态修复方面,土壤改良、耐逆植被培育技术等创新的应用,既可以达到恢复交通功能的目的,又可以促进沿线生态系统恢复,达到工程与自然和谐共生的目的。制定实施计划时要确定各项新技术应用节点、施工组织方案、质量控制标准、预期效益,使创新理念真正转化为高质量的工程实体,最终形成更加有韧性的现代公路系统。

第十章 新技术与发展趋势

伴随着信息技术的迅速发展,公路地质安全领域正在发生着深刻的技术变革。传统的依靠人力和经验来进行检测、预警的方式,正在被以数据为核心、以智能为方向的新技术所取代。本章主要研究智能检测技术在公路地质安全方面的新应用、新趋势,分析前沿科技怎样改变灾害感知、风险评价、应急处置的全过程。

第一节 智能检测技术应用

智能检测技术把先进的传感器、数据处理算法和通信网络融合在一起,可以对公路地质环境进行高效、精确、自动化的监测。集成技术大幅度地提高了地质病害的早期发现能力、灾害预警的时效性,为公路运行安全保驾护航提供了前所未有的技术支撑,使公路地质安全运行的各个阶段进入了智能化时代。

一、无人机在公路地质巡检中的应用

无人机技术由于机动性高、效率高、风险小等特点,已经成了公路地质巡查的得力助手。可以搭载多种传感器,从不同的角度快速获取公路沿线地质环境的高精度数据,有效地克服了传统人工巡检在复杂地形、危险区域中遇到的诸多限制,为大范围、常态化的地质安全监控提供了新思路。

(一) 无人机激光雷达地形扫描

无人机激光雷达技术主动发射激光束,接收反射信号,可以穿透部分植被冠层,直接得到地表真实的三维坐标数据。该技术最大的优点就是可以产生高精度的数字表面模型和数字高程模型,给公路沿线地形地貌分析提供厘米级的数据基础。利用不同时段的点云数据对比可以精确定量出边坡侵蚀、沉降或者隆起等微小地形变化,进而为滑坡、崩塌等地质灾害的早期发现及形变趋势进行分析提供可靠的量化依据。

该技术得到的三维坐标点除了记录空间位置信息外,还可以得到激光脉冲的

反射强度,从而区分岩石、土壤、植被等各种地表覆盖物。利用点云数据对点云数据进行滤波和分类处理,可以去除地表植被、建筑物等干扰,揭示裸露地表的真实形态,对隐蔽性地质构造的解译以及潜在失稳区域的识别都具有重要意义。无人机激光雷达扫描比传统测量方式大大缩短了野外数据采集时间,在山区高速公路等地形复杂、交通不便的地方,它的数据获取能力就更加明显。

高精度地形数据是进行边坡稳定性分析、洪水淹没模拟、土方量计算等工程应用的前提。设计人员可以依据无人机的激光雷达数据来绘制公路纵断面图、横断面图,从而优化线路方案,规避不利的地质地段。为灾后应急勘察、灾情评价提供第一手的资料,给抢险救灾决策提供科学依据。

(二) 高分辨率摄影测量生成正射影像

无人机高分辨率摄影测量是使用搭载高清数码相机的无人机,按照预设航线进行高重叠率拍摄大量的地表照片,再通过运动恢复结构算法等进行处理,从而生成高精度的三维模型和正射影像图。产生的正射影像比例尺统一、地理坐标精确,可以很好地反映出地物平面位置、形状、纹理等信息,是公路地质病害宏观识别、判读的重要依据。

无人机摄影测量比激光雷达成本低,数据采集和处理过程也较短。通过正射影像的目视解译或者计算机自动分析,可以直接观察到边坡的拉张裂缝、小型崩塌、危岩体分布、地表水系冲刷痕迹等病害特征。通过比较不同时间段获得的正射影像来观察病险发展情况、裂缝扩大、塌陷面积增大等。本技术适合大面积、多时段、高精度公路沿线普查、复查工作,对发现潜在地质隐患起着重要的作用。

(三) 无人机多光谱影像在病害识别中的应用

无人机多光谱影像技术利用带有多光谱波段信息的传感器,获取地物的光谱反射特征数据,给公路地质病害早期预警提供新的视角。这项技术克服了传统的用眼睛看地面的缺点,采用植被、土壤的光谱反应来间接地反映地质异常。

公路边坡稳定性监测中植被生长状况属于一个重要的间接指标。当边坡内部发生蠕变或者含水量异常的时候,会引起地表植被根系受到损害或者生长环境发生改变,从而出现长势衰弱的现象。变化人眼很难发现,但是用多光谱影像计算出归一化植被指数等指标,能敏感地发现植被健康状况的变化。当局部区域的植被指数突然下降的时候,就预示着该区域下面存在着滑坡或者沉降的危险。多光谱数据还可以用来分析土壤湿度,含水量异常的地方也是边坡失稳的重点观察对

象。光谱分析的病害识别方法具有非接触、大范围、高效率的特点，可以给地质灾害提供有价值的预警信息。

二、机器视觉在表面病害识别中的技术

机器视觉技术就是用摄像头采集图像，然后通过计算机算法模拟人的视觉功能，对目标对象进行识别、测量、分析。公路地质安全领域中，此技术给路面、边坡、隧道等结构物的表面病害自动智能检测带来了高效方案，大幅度提高了检测的准确度以及速度，减轻了人工检测的主观性与劳动强度。

（一）基于深度学习的路面裂缝识别算法

路面裂缝是公路最常见的早期病害，及时发现并修补对延长公路使用寿命意义重大。使用以 CNN 为代表的深度学习裂缝识别算法改变了传统的裂缝检测方式。相比于传统的依靠人工设计特征提取算子的方法对于光照变化、路面污渍等干扰比较敏感，深度学习算法能够从大量的裂缝图像数据中学习出裂缝在不同的尺度、形态下本质的特征。

这些算法一般把裂缝检测当作图像分割或者目标检测问题。图像分割模型（U-Net 等）可以实现像素级别的裂缝识别，勾勒出裂缝的轮廓，为裂缝长度、宽度、面积等参数的量化计算打下基础。目标检测模型（YOLO 系列）可以快速的找到图像上的裂缝区域，从而可以实现高效地实时检测。

深度学习模型最突出的优点就是具有很强的泛化能力。经过充分训练的模型可以识别各种背景下的裂缝，不管是横向裂缝、纵向裂缝、网状裂缝还是微小裂缝，对于阴影、水渍、轮胎痕迹等噪声有很强的鲁棒性。这大大提高了自动化路面巡检结果的可靠性、一致性，有效地避免了人工检测由于疲劳或者主观判断造成的误差。

随着算法的发展、算力的提升，深度学习模型可以部署在边缘计算设备或移动终端上，实现对路面图像的实时分析。

（二）边坡表面位移的机器视觉测量

边坡表面位移可以反映边坡稳定状况。机器视觉测量技术特别是数字图像相关法可以为边坡位移的非接触、高精度监测提供可能。该技术以边坡表面的设置或利用其自然纹理作为测量靶标，用固定安装的高分辨率相机定时拍摄图像，再对比分析不同时刻图像中靶标位置的像素坐标的变化，从而得出边坡表面位移场

和应变场。

与传统的接触式监测(布置位移计)和点式监测相比,机器视觉测量可以得到整个区域的连续的变形数据,能更好的反映边坡变形的全貌,包括推移面位置、变形梯度分布、剪切带的发展等等。不受恶劣天气、地形条件影响,可以实现全天候自动化观测,非接触性使安装、维护更加安全便捷。将高精度图像识别技术同远程视频监控融合起来,既可以对位移数据实施量化分析,又可以给出现场实景图像,给工程师远程诊断边坡状况赋予了直观参照。

(三) 隧道衬砌表观病害图像自动拼接

隧道衬砌的好坏直接影响到隧道的安全运行。传统的隧道检测需要人近距离观察和记录,效率低、存在安全隐患。采用搭载高清相机的巡检机器人或车辆进行隧道衬砌连续图像采集,但是怎样把独立的、带几何畸变的图像合并成一个完整的、可量测的隧道内壁展开图,是实现自动检测的关键。

图像自动拼接技术通过寻找相邻图像之间的共同特征点(SIFT、ORB等算法),计算图像间几何变换关系,然后将它们准确地对齐、融合,最终得到一幅完整的隧道衬砌全景图像。该技术很好地解决了隧道中弧形表面像差、光照不均和衬砌表面纹理重复的问题。

生成的高分辨率全景展开图就是把隧道内壁“铺平”在计算机屏幕上,检测人员可以方便地对全局进行浏览、局部放大查看,清晰地观察到裂缝、渗漏水、剥落掉块等各种病害。在此基础上,用机器视觉识别算法可以对隧道病害进行自动标注、量度、面积,创建隧道病害数据库,为隧道长期健康监测和维修决策提供数字化支持。

三、物联网感知技术在地质监测中的集成

物联网技术把分散的传感器通过网络连接起来,实现了对物理世界全方位、全时序的感知和监测。物联网技术在公路地质监测中的集成应用构建了端、边、云组成的智能监测系统,使地质灾害预警由被动应对转变为主动预测,监测系统智能化和可靠性得到明显提升。

(一) 低功耗广域网传感器组网

公路沿线地质监测点一般都设置在偏远山区,供电不方便、蜂窝网络信号弱。低功耗广域网技术因为具有低功耗、广覆盖、大连接、低成本等特点,正好符合

地质监测的要求。采用 NB-IoT 技术的传感器（倾角计、位移计、雨量计、孔隙水压计等）可以依靠电池供电连续工作数年。

NB-IoT 具有广覆盖性，可以穿透障碍物，在深山峡谷、隧道等信号弱的地方提供稳定的网络连接，保证监测数据的传送。通过 NB-IoT 网络可以组成由成千上万个传感器构成的大规模的监测网，实现对地质体内外状态参数的实时采集。周期性的数据传输到云端平台，形成地质体变化的连续时间序列数据，给灾害早期预警、趋势预测提供大量的数据基础。大大降低了传统有线监测系统建设、维护成本，使得公路沿线大范围、高密度地质监测成为可能。

低功耗广域网特性与优势

特性	描述
低功耗	电池寿命长达数年，适合野外部署
广覆盖	信号穿透力强，覆盖偏远及室内区域
大连接	支持海量设备接入，构建密集传感器网络
低成本	模组和通信费用较低，降低部署门槛
安全性	提供数据加密与认证机制，保障数据安全

如上表所示，低功耗广域网的诸多特性使其成为野外地质监测场景的理想选择。

（二）边缘计算技术在数据预处理中的应用

由于传感器数量的增加，地质监测系统产生的数据量急剧增大。将所有的原始数据不加处理地传送到云端，会占用大量的网络带宽，增加云平台的工作负荷，造成响应延迟。边缘计算技术把数据处理的计算能力下沉到数据源（传感器端）附近，对数据做本地预处理。

- 1. 数据清洗与滤波，边缘计算单元可以对传感器采集到的原始数据进行实时清洗，去除由于传感器故障或者环境干扰而产生的异常值、噪声，并且平滑信号来提高数据质量。
- 2. 本地分析预警，即在边缘端就可以进行位移速率、加速度等主要特征值的计算。当监测值超过设定的阈值或者出现异常变化趋势的时候，边缘节点可以立即做出判断，直接触发本地声光报警，优先上传高等级预警信息，大大缩短了预警响应时间。
- 3. 降低功耗和带宽，边缘端对数据进行聚合和压缩，只将有意义的结果或者

事件信息上传到云端，大大减少了数据传输量，从而降低了无线通信的功耗和网络带宽成本。对依靠电池供电的野外监测点来说更是如此。

（三）无线传感器网络的自组织与自愈合

在地质条件复杂多变的环境下，监测网自身稳定性、可靠性的重要性就更加明显了。无线传感器网络的自组织性是指网络节点在部署之后，可以自动发现周围节点，然后利用 Ad hoc 等路由协议快速建立多跳通信网络，不需要人工进行网络配置。即设即用的能力极大地简化了监测系统现场布置的工作。

更重要的是网络的自愈合能力，即当某个传感器节点由于电量耗尽、物理损坏（被落石砸坏）或者信号干扰而失效的时候，周围的节点可以智能地感知到网络拓扑的变化，然后自动重新计算、建立新的数据传输路径，绕过故障节点，保证数据流的连续性、完整性。该动态路由恢复机制在局部出现故障的时候依然可以保持正常运行，具有较强的抗毁性，决定着地质灾害监测系统可以在恶劣、灾难性的环境里长时间工作。

第二节 大数据分析平台

由于现代公路建设的不断延伸，交通量的不断增大，公路沿线地质环境的安全问题也越来越严峻。大数据分析平台的创建，核心就是对大量的、异构多源的地质安全数据进行高效的整合和深度的挖掘，目的是使公路安全管理由被动应对转为主动预警，为公路安全运营提供强有力的支持。

一、公路地质安全海量数据的存储管理

公路地质安全监测所产生出来的数据涉及地质、水文、气象、工程结构等诸多方面的海量数据，科学有效地存储和管理这些数据，是进行大数据分析与应用的前提。这就需要创建起一个兼容并蓄、稳定可靠的数据库体系，从而应对数据爆炸式增长所造成的难题。

（一）多源异构数据的标准化存储架构

公路地质安全监测数据来源多样，主要有传感器监测数据（位移、应力、渗压）、遥感影像数据、钻孔勘探数据、巡检记录文本、视频监控资料等。这些数据在格式、结构、精度、时空基准上存在着较大的差别，属于典型的多源异构数

据集。为了实现统一管理、高效利用,就必须设计并实施标准的存储架构。本架构的主要任务就是创建统一的数据模型与接口标准,把数据清洗、转换等环节整合到一起以消除信息孤岛。

具体操作时,首先要对数据源进行梳理、分类,确定各种数据的元数据标准,即数据来源、采集时间、空间坐标、传感器类型、计量单位等。之后使用 ETL 工具对原始数据进行预处理,把不同的地理空间数据统一到同一个坐标参考系下,用自然语言处理技术从巡检报告中提取关键信息并结构化,用重采样或者插值的方法使不同的监测数据的时序一致。将所有的标准化后的数据导入到统一的数据仓库或者数据湖中,建立一个逻辑集中、物理分散的中心数据库,为之后的数据分析和挖掘打下规范一致的数据基础。

(二) 分布式数据库的应用

面对公路地质安全监测数据 PB 级的海量规模以及高并发读写需求,传统的以关系型数据库为代表的存储方式已经不能满足当前的要求。以 Hadoop 和 Spark 为代表的分布式计算框架,给解决这个难题提供了一个可靠的方案。它把大量的数据以及复杂的计算任务拆解成很多小任务,然后由成千上万的普通计算机组成的集群并行处理,以此来实现计算能力水平的扩展。

Hadoop 的分布式文件系统可以给海量地质数据提供高容错、高吞吐量的存储能力,它将大文件分成块后存放在集群各个节点上,用多副本的方式保证数据的可靠性。MapReduce 或者更先进的 Spark 计算引擎在 HDFS 上进行并行计算。利用 Spark 的内存计算能力,可以对全国公路网遥感影像数据进行快速批处理,发现潜在滑坡隐患;也可以利用 Spark SQL 对数十年积累的降雨量和滑坡历史数据做交互式查询分析,满足研究人员探索性分析的需求。

实际应用中一般会建立混合架构,用 Hadoop 存储全部的原始和处理过的数据,用 Spark 做复杂的批量计算和机器学习建模,用 NoSQL 数据库(如 HBase)满足对某些监测点高频数据实时随机访问的需求。该组合既可以解决大量的数据存储和计算问题,又可以满足不同应用场合下对数据访问效率的要求,从而给地质灾害的关联性、模式识别提供强有力的计算能力。

(三) 数据备份与容灾恢复机制

公路地质安全数据是公路灾害评估与预警的基础,公路地质安全数据的安全、完整对公路灾害评估与预警来说十分重要。任何数据的丢失或者损坏都会导致预

警系统失效，造成无法估量的损失。因此建立完善的数据备份和容灾恢复机制，成了大数据平台建设中不可缺少的一环。其目的就是采取多层次的冗余措施，保证在硬件出现故障、软件出现错误、网络遭受攻击、自然灾害等情况发生的时候，数据仍然可以得到保存，并且可以迅速地恢复。

数据备份策略一般会用全量、增量、差异备份结合的方式。定期（每周）做一次全量备份作为恢复基线；每日做增量或者差异备份，只保存从上次备份开始之后发生改变的数据，节省存储空间和备份时间。所有的备份文件都应当加密、压缩后存放在物理上和主数据中心相隔离的存储介质中，比如磁带库或者云存储。

更重要的是创建异地容灾中心。实时或者准实时将数据复制到地理距离较远的备份数据中心，可以有效地避免由于区域性的自然灾害（地震、火灾等）所造成的毁灭性的影响。异地容灾方案要确定恢复时间目标和恢复点目标这两个主要指标。恢复时间目标即灾难发生之后系统恢复正常工作的最长时间，恢复点目标即允许丢失的最新数据量。根据业务的重要程度选择成本、复杂度不同的同步或者异步复制技术，实现从秒级到小时级的 RTO、RPO。定期进行容灾演练是检验容灾系统是否有效的途径之一，模拟灾难场景来测试切换和恢复的过程，可以保证在真实灾难发生时，恢复流程可以顺利地进行，从而给公路地质安全提供最后一道数据防线。

二、基于大数据的地质灾害关联性挖掘

公路沿线地质灾害的发生不是孤立的，是多种因素相互作用、长期演变的结果。使用大数据技术可以发现大量的历史数据中各个因素之间复杂的联系，发现灾害内部的规律和演变趋势，把预警工作由经验判断转变为以数据驱动为基础的科学方法。

（一）降雨、地震与地质灾害的关联规则挖掘

降雨、地震造成公路滑坡和泥石流等地质灾害为主要的因素。采用关联规则挖掘技术，可以对诱发因素和灾害发生之间具体的关系进行定量分析。关联规则挖掘就是寻找数据集中项与项之间有趣的相关关系，经典的 Apriori、FP-Growth 等算法可以从大量的历史灾害事件记录中找出形如 $\{ \text{连续强降雨, 高陡边坡} \} \rightarrow \{ \text{滑坡} \}$ 这样的规则。

在具体实施中首先要将历史数据离散化处理。将连续的降雨量数据分成无雨、

小雨、中雨、大雨、暴雨等不同的等级，将地震烈度分为不同等级，将边坡坡度、坡高等地理信息进行分类。然后将每一次地质灾害事件以及发生前的雨量、地震活动、地理地质背景等信息作为一条事务，建立挖掘的事务数据库。使用关联规则算法可以挖掘出很多的关联规则以及支持度、置信度。

1. 支持度：表示规则在总数据集中出现的频率，用于筛选出具有普遍性的规律。

2. 置信度即在规则前项发生的情况下，后项也发生的概率，它度量的是诱发因素和灾害之间触发强度。

用从高置信度规则中得到的信息来建立准确的预警阈值模型。地质构造活跃地区，只有在累计降雨量达到一定数值、前期有效降雨量也达到一定水平时，滑坡的发生概率才会突然增大。这些具体化的规则为分区域、分时段、分等级的动态预警策略制定提供了直接科学依据。

（二）地质参数与工程病害的相关性分析

公路工程病害如路基沉降、路面开裂、挡土墙变形等，一般与当地地质参数有关。对大量的工程病害案例数据以及对应的地质勘察数据进行相关性分析，可以发现不同的地质条件对公路结构稳定的影响机理，在勘察设计阶段就能预见到潜在风险并采取相应的防治措施。探地雷达技术可以检测路面内部结构情况和隐藏的病害，给分析提供数据支持。

相关性分析可以使用各种统计学方法。简单线性回归可以研究单个地质参数（土壤含水率）和一个工程病害指标（路基沉降速率）之间的关系。对于多因素影响的复杂病害要使用多元回归分析、主成分分析或者灰色关联度分析等方法。通过对数据进行分析可以找出引起某一工程病害的主要地质参数组合。分析得出，软土路基上当土体的压缩模量小于某一特定值，地下水水位较高时，路基发生不均匀沉降的风险增大。

公路工程病害参数与相关分析方法表

分析对象	常见地质参数	典型工程病害	常用分析方法
路基稳定性	土体抗剪强度、压缩模量、地下水位	沉降、滑塌、隆起	多元回归、灰色关联度分析、有限元仿真
边坡稳定性	岩体结构、坡度、裂隙发育	滑坡、崩塌、泥石流	相关性分析、极限平衡法、数值模拟
路面结构	地基承载力、含水率、冻融敏感性	开裂、车辙、板底脱空	统计学分析、主成分分析
隧道围岩	岩石强度、完整性、地应力	衬砌开裂、围岩变形	灰色关联、多元回归

从上表可以看出，不同的公路工程病害同各种地质参数之间存在着复杂的关系，并且需要采用不同的分析方法。分析结果可以给新建公路选线、设计提供指导，也可以给已建成公路养护工作提供依据。通过沿线地段地质参数普查建档、利用相关性分析模型将工程病害风险区分为不同的等级，对高风险路段加强监测并采取预防性养护措施，从而实现公路资产从被动修补到主动预防的转变，极大提高公路资产的管理效率和使用寿命。

（三）基于大数据的灾害演化模式识别

地质灾害的发生过程是动态的，从隐患产生、发展到最后失稳破坏，一般要经过一个较长的演化过程。利用大数据技术，结合时间序列分析以及机器学习算法，就可以对长时间段、多种监测数据做出综合的分析，从而发现一般性的灾害发展规律并对以后的发展趋势进行预测。

分析滑坡体多个位移、深部应力和地下水温度等时间序列数据可以得到不同的发展阶段特点。初期蠕滑阶段位移速率是缓慢的线性增长，进入加速变形阶段以后就变为指数级增长。聚类算法可以将变形行为相似的监测曲线归为一类，从中总结出几种典型的演化模式，如阶跃式变形、加速稳定再加速变形等。

LSTM 等深度学习模型很适合于做时间序列的预测。利用大量的历史监测数据对 LSTM 模型进行训练，使它学会并且掌握在不同的演化模式下，各种变量之间复杂非线性关系。在预警时将最新的监测数据输入训练好的模型，模型便可以预测一段时间内的变形趋势，再和已知的失稳模式比较。当预测变形轨迹与某一失稳模式相符，且预测位移即将达到临界阈值的时候，系统就会自动发出高级别的警报。以演化模式识别为基础的预警方法比单一阈值预警更加可靠，预警提前量也更长，是地质灾害预警的发展方向。

三、云端数据共享与可视化分析平台

为了使大数据分析的结果可以直观、方便地为各级公路管理、应急决策部门所用,需要建立一个集数据共享、可视化分析、业务应用为一体的云端平台。该平台是以云计算技术为基础,采用 B/S 架构,用户无需安装专门的软件,可以在任何地方、任何时间对大量的公路地质安全信息进行分析。

(一) 基于 WebGIS 的地质信息云端发布

地理信息系统是用来管理和分析空间数据的工具。WebGIS 技术把地理信息系统的功能扩展到互联网上,以地图服务的方式在云端发布和共享地理空间信息。公路地质安全平台基于 WebGIS 可以将大量基础地理数据、地质图、遥感影像、灾害隐患点分布、实时监测数据等信息整合成一系列的在线地图服务。

在电子地图上可以清楚地看到公路沿线的地形地貌、地层岩性、断裂构造等背景资料。实时监测数据(边坡位移、桥梁振动等)能在地图上以动态的方式呈现出来,并用不同的颜色或者标记来显示目前的预警状态。灾害发生的时候,系统可以迅速产生影响范围分析图、应急救援路线图等专题地图,给应急指挥提供决策支持。云端发布方式不但是数据集中化、统一化的更新管理手段,更是将部门之间信息孤岛转变为统一的空间信息服务平台,为多方协作提供共享的空间环境。

(二) 多维数据的可视化展示与交互分析

面对复杂的多维地质安全大数据,单个地图或者表格不能完全体现其内在的规律。一个优秀的可视化分析平台要具备丰富的图表类型、灵活的交互分析功能,使用户可以从不同的角度去探索数据。平台应该支持空间数据和非空间属性数据联动的分析。用户在地图上选择滑坡隐患点的时候,系统就会显示出该点详细档案信息、历史变形曲线以及相关监测指标(降雨量、库水位)变化曲线。

多维可视化技术,三维地质建模等可以将钻孔数据、地质剖面图等二维信息构造成三维地质体模型来形象的表现地下结构。把公路模型叠加到三维地质体上,就可以清楚地看到公路结构与不良地质体的空间关系。从时间角度出发,平台可以模拟地质灾害(滑坡)的发展过程,也可以在三维场景中对不同的降雨工况下边坡稳定性变化进行仿真。用户可以利用缩放、平移、旋转、剖切等交互手段,对灾害体内部结构和变形机理有更深刻的认识,大大提高了对复杂地质问题

的理解。

（三）B/S 架构下的公路地质安全一张图系统

一张图系统是大数据分析平台最终成果的集成体现，采用 B/S 架构，把公路地质安全相关的所有数据资源、分析模型、业务流程整合到一个统一的 Web 界面中，为管理者提供全局、动态、可视化的决策驾驶舱。该系统完成从数据采集、存储、分析到应用的整个闭环。

一张图系统并不只是一个静态信息展示板，它更是一个动态的业务协同平台。巡检人员可以使用移动端 App 随时上报现场情况，数据会自动上传到“一张图”上；预警模型在后台一直工作，一旦发现异常就会在图上高亮警示，并通过短信、App 推送等方式通知相关人员；应急管理人员接到预警后可以在“一张图”上调阅灾害点的所有信息，进行会商研判，制定应急预案。把分散的业务流程、数据流放到地理空间框架之下，能够大大提高信息流转的效率、决策的科学性，这是公路地质安全精细化、智慧化管理的最重要目标。

第三节 人工智能预警系统

伴随着信息技术的迅速发展，人工智能技术给公路地质安全领域带来了革命性的改变。把传统上被动监测、经验判断的方式改变成主动预测、科学决策。本节主要分析深度学习技术在公路地质灾害预警系统中的应用，从模型建立、训练验证、最终实现智能化决策支持系统三个方面进行系统的阐述。

一、深度学习在地质灾害识别中的应用

由于深度学习具有很好的特征自学习和复杂的模式识别的能力，所以它在地质灾害的自动、智能检测上有着广阔的发展空间。利用模仿人脑神经网络结构的方法，深度学习可以从大量的、多种来源的监测数据当中，找到和灾害发生有关的深层次特征，大幅度提高预警的准确度和及时性。

（一）卷积神经网络在滑坡识别中的应用

卷积神经网络属于图像识别领域的重要技术，它在公路沿线滑坡隐患识别中的应用越发普遍。该技术依靠特有的卷积层、池化层结构，可以自动从高分辨率遥感影像、无人机航拍照片、激光雷达点云数据中提取地表的细微形态特征。坡

体的微小裂缝、植被覆盖异常变化、土体蠕变迹象、历史滑坡边界等。卷积神经网络比人工视觉检查更高效、更客观地完成大面积隐患排查工作，也能发现人眼容易忽视的早期灾害征兆。

通过对大量的发生过和没有发生过的滑坡的影像数据进行学习，模型就能建立影像特征和滑坡可能性之间的映射关系。在实际应用当中，系统会周期性获取到新的公路沿线的图像，利用训练好的卷积神经网络模型来进行快速的扫描以及风险评估。系统一旦识别出和滑坡特征非常相似的区域就会自动标记并发出预警，引导工程技术人员重点勘察核实。此方法极大提高了滑坡隐患早期识别的效率，有效减少由于人工排查不充分造成的安全风险，给公路安全保障提供前所未有的技术支撑。

该技术的应用越来越深入，结合多光谱或者高光谱影像来分析坡面植被健康状况、土壤水分含量，这些都是判断边坡稳定性的间接指标。分析植被胁迫指数异常可以反演地下水位变化或者土体微小变形。卷积神经网络可以很好地处理多维数据，综合考虑各种因素进行分析，从而实现了对滑坡灾害更准确、更灵敏的识别，为预防性养护和主动防灾打下了坚实的基础。

（二）循环神经网络在位移预测中的应用

公路边坡稳定性为动态演变的过程，位移的变化中蕴含着大量的时序信息。循环神经网络，特别是它的变体 LSTM、GRU 等，天生就适合处理序列数据，所以在边坡位移预测中具有天然的优势。在边坡的关键部位布置 GPS、裂缝计、倾斜仪等传感器，可以获得连续的、高频的位移、形变时间序列数据。

循环神经网络可以很好地捕捉到时间序列中长期依赖性和变化规律。模型可以反映降雨之后边坡位移速率的加快，也可以体现季节性的冻融循环对位移周期波动的影响。利用历史数据训练得到的模型可以形成一个非线性动态预测系统，输入当前位移状态、速率和外部因素（降雨量、库水位）之后，可以预测一段时间内边坡可能的位移量。用数据驱动的方法预测，可以弥补传统物理模型参数确定难、计算复杂的问题，给临灾预警提供直接的定量依据。当预测的位移量或者位移速率超过设定的安全阈值的时候，系统就会自动发出警报，给人员撤离和交通管制争取宝贵的时间。

（三）基于深度学习的多源数据融合预警模型

单一来源的数据只能反映地质灾害的一个方面，地质灾害孕育和发生是多因

素耦合作用的结果。因此建立能够融合地质、水文、气象、遥感、实时监测等多源异构数据的预警模型,是提高预警可靠性的重要环节。深度学习框架具有很强的非线性拟合能力,给高效数据融合提供可能。可以用含有许多输入通道的复杂网络来处理不同种类数据。

可以设计卷积神经网络分支处理遥感影像提取空间特征,循环神经网络分支处理传感器时间序列数据掌握动态变化趋势,全连接网络分支接受并处理地质构造数据、岩土体参数、坡度坡向等非结构化数据,降雨量、气温等结构化数据。在网络的最深层,各个数据源提取出的特征被很好地融合起来,一起对最终的灾害风险评估起到作用。

端到端的学习方式,避免了传统方法里人工定义融合权重的主观性以及复杂性,让模型可以从数据中学习各个因素的最佳组合方式,以及各个因素对灾害发生所起的作用。在统一的框架之下,对于“天-空-地”一体化观测数据开展综合分析工作之后,可以更好地揭示出灾害体的孕育环境与动态发展情况,进而大幅度提高对滑坡、泥石流等突发性地质灾害所作出的综合研判以及预警能力。

该模型输出的不再是简单的“稳定”或者“失稳”二值判断,而是可以给出一个连续的风险概率值或者稳定性指数。这样细致的风险评价结果可以支撑灵活的、分等级的应急响应措施。低风险概率下加强监测,中等风险概率下实行黄色预警并进行交通疏导,高风险概率下实行红色预警并实施道路封闭、紧急避险。

二、基于神经网络的预警模型构建与训练

建立一个高效可靠的神经网络预警模型,就是数据准备、模型设计、训练优化的全过程工程。其科学性、严密性直接影响最终预警系统效果的好坏与实用价值大小,在理论研究和工程实践之间起着不可或缺的纽带作用。

(一) 神经网络输入变量的选取与优化

输入变量的选择是模型建立的基础,选择的好坏直接影响到模型的预测精度以及泛化能力。优秀的输入变量集应该全面、精简,并且与预测目标密切相关。公路地质灾害预警中的输入变量种类很多,可以大体分为如下几类:

神经网络输入变量分类表

变量类别	描述	示例数据来源
内部影响因素	决定边坡稳定性的基础地质条件	坡高、坡度、坡向、岩土体类型、结构面产状、抗剪强度
外部诱发因素	触发灾害发生的动态变量，时变性强	降雨量（累积、强度、持续时间）、地震动参数、库水位 / 河流水位变化、人类工程活动（开挖、加载）
状态响应变量	直接体现边坡对外界因素作用的反应	边坡表面位移、内部位移、孔隙水压力、土压力

在初步选取了大量的相关变量之后，还需要进行优化。过多输入量增加模型复杂度容易引起维度灾难、噪声大、训练效率低、预测性能差。常用方法有相关性分析，主成分分析，基于机器学习的特征重要性排序等等。用上述方法可以去掉多余或者无关的变量，得到能够反映灾害发生与否的核心变量组合，进而建立一个更简单、更有效、更鲁棒的预警模型。

（三）预警模型的精度评价与验证

预警模型的精度评价是多维的，不能只看整体的准确率。在地质灾害预警这样的特殊场合下，漏报（预警不到将要发生的灾害）的后果比虚警（预警以后没有发生灾害）要严重得多。因此必须使用精细化的评价指标。常用的指标有精确率、召回率（又叫查全率）和 F1 分数。精确率是衡量所有发出的警报中有多少真正发生了灾害的比例，它影响到预警的可信度。召回率就是指实际发生的灾害中，成功预警的比例，这直接关系到人民生命财产的安全。

F1 分数就是精确率和召回率的调和平均数，用来综合评价模型的好坏。受试者工作特征曲线和曲线下面积也是评价模型分类能力的一种方法。AUC 值越接近 1，就说明模型对于正负样本的区分能力越强。模型的验证不能只依靠历史数据的统计指标，更重要的是要进行实际场景的检验。将训练好的模型部署到部分路段试运行，用新的实时监测数据预测，与同期的实际情况或者专家判断进行对比。可以检验模型在真实环境下是否可用可靠，找出潜在问题，改进它，保证它在重要的时候起作用。

三、智能化预警决策支持系统的实现

完整的人工智能预警系统，除了要有准确的算法模型之外，还要有稳定、高效、友好的决策支持平台。该平台主要是完成数据的整合、模型的运行、结果的

解释, 最终把预警信息传递给决策者, 是实现数据到决策闭环的关键, 也是技术能否真正落地的关键。

（一）智能预警推理机的设计与实现

智能预警推理机是决策支持系统的大脑, 主要任务就是调用已经训练好的深度学习或者神经网络模型, 对实时接入的监测数据进行分析计算。推理机的设计首先要考虑的就是实时性以及高并发处理能力。公路沿线的监测点很多, 数据流是连续不断的。推理机要能处理好这些数据流, 在秒级甚至毫秒级的时间内完成一次预测计算, 得出风险等级或者失稳概率。

一般需要对模型进行轻量化处理和计算优化, 然后部署到性能强大的服务器或者边缘计算节点上。推理机还要有较好的容错性以及稳定性。安全预警系统要能够 24 小时不间断地工作。系统设计要考虑到数据中断、服务器故障等各种异常情况, 建立相应的备份和恢复机制, 保证预警功能任何时候都不失效。

推理机得到的预测结果不应该只是冷冰冰的数字。需要把模型的预测结果转化成易于理解的预警信号, 即蓝色预警、黄色预警、橙色预警、红色预警等不同的等级。等级划分的标准要按照灾害危险程度和应急预案事先确定, 并固化在推理机的逻辑里。

推理机应该有日志记录和回溯功能。每一次的预警判断, 包括输入原始数据、模型输出结果、最终预警等级, 都应该做好详细的记录。不仅可以给事后分析、追溯提供支持, 还可以给模型的持续优化和迭代积累大量的案例数据。

（二）基于知识库的专家系统辅助决策

深度学习模型虽然强大, 但是它的决策过程往往是黑箱的, 缺少足够的可解释性。为了弥补这个不足, 现代预警系统一般都会用知识库为基础的专家系统来辅助决策。专家系统本质上就是计算机程序, 它里面储存着大量的地质工程专家总结、整理出来的专业知识和经验规则。

这些知识一般是以“IF-THEN”的形式来构成知识库的。如有一条规则规定: 若模型预测未来 24 小时的位移速率超过 10 毫米每小时, 现场检测到新的拉张裂缝的时候, 应立即启动二级应急预案。智能预警推理机输出预测结果之后, 专家系统就会开始工作, 把预测结果作为事实输入, 与知识库中的规则进行匹配。

它模仿专家的思维方式, 不只是考虑模型定量计算的结果, 也把定性的、基于经验的知识纳入考虑。专家系统可以为决策者提供更加具体的、操作性强的行动建议, 解释发出什么样的等级警报以及应该采取什么后续措施。人工智能模型

加上专家知识的双重保证,使预警决策更加科学可信,决策者在面对紧急情况的时候,有更充足的依据和信心做出判断。

(三) 人机交互界面与预警信息推送

预警信息的价值最终体现在是否能及时、准确地传递给需要它的人。因此一个友好的、直观的人机交互界面和可靠的预警信息推送机制就显得十分重要。

1. 人机交互界面:一般为一个集成化的可视化平台,用地理信息系统地图为依托来直观地展示公路沿线所有监测点的位置、实时状态和预警等级。用户可以选择任何一个监测点来查看这个点的历史数据曲线、现在的预测结果、模型分析依据和专家系统给出的决策建议。界面设计应该简单明了,突出主要信息,用不同颜色的图示来表示预警状态,方便管理者了解全局。

2. 预警信息推送:系统在产生预警的时候,要通过不同的方式将预警信息发送给相应的责任人。这套机制要具备分级分类推送的功能。低级别的预警信息可以只通知给日常维护工程师;高级别的红色预警要同时通知路段管理者、应急指挥中心、交管部门,甚至向社会公布。推送渠道要多样化,手机短信、专用应用程序通知、电子邮件、电话语音播报等,保证信息可以被可靠接收。信息内容要简洁明了,即时间、地点、预警等级、主要处理意见等,使接收者能迅速行动。

第四节 未来发展方向展望

新一代信息技术同传统公路交通行业深度融合的时候,公路地质安全领域正在发生一场深刻的技术变革。未来不会是对灾害点被动地监测、处置了,而会是向着更加智能、系统、全生命周期的主动风险控制发展。创建综合立体、虚实结合、协同高效的现代化保障体系,是保证公路交通可持续安全发展的关键所在。

一、天地一体化监测网络的发展趋势

传统的地质安全监测主要依靠地面单点或者局部区域的手段,不能很好地覆盖广阔的复杂的公路沿线环境。将会形成一个太空到地面、宏观、中观、微观多尺度立体综合监测网络,实现对地质环境要素和灾害隐患的全域感知、动态捕捉、精准识别。

(一) 北斗卫星导航系统在形变监测中的应用

北斗卫星导航系统由于具有高精度、高可靠性等特点,正在引起公路地质形

变监测领域的一场变革。依托北斗系统开展全球导航卫星系统监测,可以对公路边坡、桥梁、高路堤等关键构造物的微小位移实施全天候、自动化、实时捕捉,测量精度可以达到毫米级甚至亚毫米级。高精度监测对滑坡、沉降等缓慢性变形灾害早期的发现十分重要,也给预警和干预争取了宝贵的时间。

与传统的地面测量方法相比,以北斗为依托的监测系统具有选点灵活、受地形气候条件影响小、自动化程度高等明显的优势,可以大大降低人工测量的成本和风险,特别适合于人迹罕至或者环境恶劣的山区公路。在监测点和稳定基准点上分别布设接收机,进行差分解算,得到准确的三维位移向量,用内嵌算法模型分析变形趋势,从而达到数据采集和预警发布自动化的目的。

(二) 卫星遥感与地面感知网的深度融合

单一的监测技术本身就存在着一些固有的缺陷。卫星遥感技术,尤其是干涉合成孔径雷达,可以对长达几百公里的公路走廊进行地表形变普查,在较短的时间里识别大面积的不稳定地段,实现从点向面的风险初步筛选。但是由于卫星的过境周期以及分辨率的制约,使得它不能够对局部的突发性灾害做出及时的反应。

地面感知网络很好地弥补了它的不足。在卫星遥感识别出的重点隐患区,可以有针对性地布置全球导航卫星系统接收机、深部位移计、孔隙水压力计、光纤光栅传感器等各种物联网传感器,从而获得高时间频率、高精度的原位监测数据。通过宏观巡查和微观详监相结合的方式,形成普查和详查有机融合的方法,从而极大地提高了整个监测的效果。未来主要问题就是多源异构数据融合技术。要用人工智能、大数据分析算法挖掘出不同尺度、不同物理量数据之间的内在联系,来建立更加准确、鲁棒性更好的综合预警模型。

(三) 天-空-地一体化协同观测技术

天-空-地一体化协同观测技术是以卫星、地面网络为依托,增加无人机为代表的空基平台,共同构成功能互补、信息共享的“三位一体”监测系统。该体系把各个平台的各自优势结合起来,实现对公路地质灾害全过程、全要素的无缝隙动态监测。

1. 天基平台主要指各种遥感卫星、导航卫星。它们是做宏观尺度上的周期性普查和形变趋势分析的,是寻找地质异常的“天眼”。采用高分辨率光学影像以及雷达影像,对地表植被、水文等环境要素的改变进行识别,给灾害背景剖析赋予有力的支撑。

2. 空基平台主要是搭载了高清相机、激光雷达或者高光谱成像仪的无人机。机动灵活、反应迅速，可以按照预警或者极端天气事件的指示，对某些高风险路段进行高精度、高分辨率的抵近侦察，获取厘米级的数字高程模型、三维点云数据，为灾害体的形态、规模及发展趋势评估提供重要信息，有效弥补了天基和地基观测在时空尺度上的不足。

3. 地基平台是部署在灾害体或者重要基础设施上，对它进行原地监测的各类传感器网络。它们是深入地质体内部的“神经末梢”，对位移、应力、含水率等主要物理参数实行 7×24 小时的不间断的实时监测，是发现灾害发生前兆信息的最后一道防线。

依靠三大平台的协同作业、数据联动，可以形成区域风险识别、隐患点详查、关键点精细化监测的闭环，明显提高灾害监测的全面性、及时性和准确性。各个平台主要特性与功能对比如下表所示。

天 - 空 - 地一体化协同观测平台特性对比表

平台类型	主要构成	观测尺度	核心功能	典型应用	优势	局限性
天基平台	遥感卫星、导航卫星	宏观（区域级）	周期性普查、形变趋势分析、背景信息获取	区域地质异常识别、大范围形变监测	覆盖广、成本相对较低、数据稳定	空间分辨率有限、过境周期长、无法实时响应局部突发事件
空基平台	无人机（搭载高清相机、激光雷达、高光谱成像仪等）	中观（局部重点区域）	高精度抵近侦察、厘米级三维建模、灾害体形态评估	隐患点详查、灾害应急快速评估、三维地形重建	机动灵活、反应迅速、高精度、高分辨率	续航时间有限、受天气影响、数据处理量大
地基平台	传感器网络（GNSS 接收机、深部位移计、孔隙水压力计、光纤光栅等）	微观（灾害体、关键设施内部）	原位监测、物理参数实时获取、前兆信息捕捉	关键点精细化监测、预警、健康状况评估	实时性强、精度高、物理参数直观	覆盖范围小、部署成本高、易受环境损坏

从上表可以看出，天基平台具有宏观视野，空基平台可以快速抵近侦察，地基平台可以进行精细化原位监测，三者结合起来形成了多层次、全方位的公路地质安全观测体系。

二、全寿命周期公路地质安全管理体系

未来的公路地质安全管理不能只重视建设而轻视运维,应该贯穿于规划、设计、施工、运营、废弃处置的全寿命周期。该体系的核心思想就是数据连续性、管理协同性、决策前瞻性,以达到公路资产价值最大化、地质风险持续可控的目的。

(一) 建设期与运营期地质数据的一体化管理

公路建设期和运营期的地质数据一般都互相独立。勘察阶段地质报告、施工过程中隐蔽工程记录等珍贵资料,项目移交后常常被搁置一旁,没有很好地传递给运营养护单位。从而养护工作没有历史依据,不能对地质病害的演变规律进行追溯和预测。

实现全寿命周期管理的第一步就是打破数据壁垒,创建起一个统一的、连续的地质信息数据库。该数据库应该包含项目前期地质勘察、设计图纸、施工工艺、材料检验、竣工验收、后期运营监测、巡检记录、维修养护历史等所有与地质安全有关的数据。给每条公路、每一个结构物赋予唯一的数字身份标识,从而达到地质信息纵向贯通、横向共享的目的,使运营期管理者能够清楚地了解公路的先天禀赋和后天经历,为科学决策提供可靠的数据支持。

该种一体化管理方式把地质安全工作由被动的“亡羊补牢”变为主动的“防患未然”。根据施工期记录的边坡支护参数和运营期微小变形数据,可以更准确地评价边坡支护的长期稳定性,从而制定预防性养护措施,而不能等到出现明显的开裂或者变形后再进行抢修。

(二) 基于 BIM 技术的地质信息集成

建筑信息模型技术在建筑行业已经得到发展,并且也逐渐被应用于公路工程领域,给地质信息的整合与展示提供了一个强有力的平台。BIM 不是简单的三维模型,它是一个包含大量信息的数据库,可以将抽象的地质数据和真实的工程实体在三维空间中准确对应。

公路项目中可以创建包含地形、地层岩性、断裂构造、水文地质条件等的三维地质模型,并与公路的 BIM 模型(路线、桥梁、隧道、边坡)无缝集成。将 BIM 和地质模型结合起来后得到的模型,可以清楚地展示公路结构物同周围地质环境之间空间的关系。设计人员可以在模型上做虚拟开挖,查看隧道洞口到不良地质体的距离,也可以分析桥梁桩基和软弱土层之间的相互作用,在设计阶段就

优化方案、规避地质风险。

施工阶段可以利用带有进场资源、现场监测等数据的 BIM 模型,进行施工过程精细化管理以及风险预控。运营期模型就成了数据载体,它把各种传感器的监测数据、巡检图像、维修记录融合在一起,形成不断更新、发展的公路数字档案。管理者利用可视化平台可以清楚的看到任一位置地质情况、健康状况,大大地提高管理效率,使决策更加科学。

（三）公路地质全寿命风险评估与管养

以一体化数据和 BIM 平台为基础,全寿命周期风险评估、科学管理养护才可实现。其核心就是风险动态评估和管理的前瞻性、主动性。传统风险评估一般是一次性的、静态的;全寿命周期风险评估是贯穿始终、不断迭代的过程。

规划设计阶段根据沿线地质情况找到可能的地质灾害危险源,按照危险程度分析结果选择路线,对结构进行优化设计,从源头上防止危险发生。施工期间要对施工活动给地质环境造成的扰动实施实时监控,动态评判施工风险,及时对施工方案作出调整。

运营期以后风险评价就变得动态、细致。系统会把实时监测数据,气象预报以及历史灾害数据等融合起来,用概率论,模糊数学或者机器学习这些方法,对不同路段,不同地质灾害风险展开定量化,动态化的评价和预测。评估结果会以风险地图的形式呈现出来,从而指导养护资源的合理分配,把有限的资金、人力投入到风险最大的地方。管养决策将会由原来的周期性的、经验性的管养,变成以风险评价为依据的预见性、差异化管养,由以前的“按计划维修”变成现在的“按状态维修”,并实现安全效益和经济效益的统一。

三、数字孪生在公路地质安全中的应用前景

数字孪生技术是实现全寿命周期管理的最高形式,在数字空间里创建出与物理世界完全一致的虚拟实体,从而达到公路地质系统状态实时映射、诊断预测和智能控制的目的。不仅有简单的三维可视化,而且有仿真、推演、闭环控制的能力。

（一）公路地质环境数字孪生模型构建

创建公路地质环境的数字孪生模型,是一项复杂的多尺度、多物理场建模工作。利用无人机倾斜摄影、激光雷达扫描等技术,将 BIM 模型与公路基础设施几何模型相结合,创建出高保真的公路基础设施几何模型。之后把勘察钻孔、地

质剖面、物探数据等多种地质信息融合，建立三维地质模型，准确地反映地下岩土体分布、结构面产状和不良地质体的位置及形态。

更重要的是，给这个静态几何模型赋予生命，即建立物理模型和行为模型。物理模型是对岩土体、结构材料的力学性质、渗透性等内在参数的精确定义。行为模型就是将一系列的算法和规则植入系统中，使系统受到降雨、地震、车辆荷载等不同荷载作用时，可以表现出相应的反应规律和发展过程。最终得到的数字孪生模型就是可以反映现实世界物理规律、和现实世界同步演化的虚拟副本。

（二）物理实体与虚拟模型的实时数据映射

数字孪生最本质的价值就在于它的“孪生”特性，也就是物理实体和虚拟模型之间实时双向的数据交互。这就需要在公路实体上布设大量的传感器，以及高速率、低延迟的通信技术。布置在边坡、隧道、桥梁等地方的各种传感器，不断地采集位移、应变、温湿度、降雨量等生命体征数据，并通过网络实时传送到数字孪生平台。

平台接收到的这些实时数据，就会使虚拟模型的状态进行同步的更新。当物理世界中边坡受到降雨影响产生微小位移时，虚拟模型中对应的边坡也会实时表现出相同的变形姿态，内部应力场和渗流场也随之变化。于是管理者可以在办公室里，利用虚拟模型对物理世界任何一个角落的细微变化进行实时的观察，从而获得前所未有的远程透明化监管能力。

（三）基于数字孪生的灾害仿真与推演

拥有能够实时反映现实世界状况的数字孪生体之后，公路地质安全的管理模式就由原来的被动应对转变为积极预测、智能决策。数字孪生平台最强大的功能之一就是可以进行假设分析的仿真推演。管理者可以利用虚拟模型模拟各种极端工况，从而预测系统会做出什么样的反应，并且可以识别出潜在的风险。

将未来 72 小时的极端暴雨预报数据输入数字孪生模型，进行降雨入渗的加速推演，可以预测出某个边坡失稳的时间、规模和影响范围。还可以模拟不同震级地震作用下桥梁结构、隧道围岩的动力响应，找到最薄弱环节。从仿真结果中，管理者可以在灾害发生之前就制定出最佳的应急方案，提前确定需要封堵的路段、疏散的地区、调集的抢险设备等，从而达到决策科学化、精准化的目的。预演未来、优化对策的能力在虚拟世界中得到运用，就会彻底改变公路地质安全应急管理依靠经验、反应迟缓的状况，开启公路地质安全智能化、主动化的新时代。

参考文献

- [1] 曾小艳,田宏岭,温成志,等.高原区高植被覆盖型公路滑坡特征及成因机制分析[J].科学技术与工程, 2025, 25(13):5330-5339.
- [2] Lin Bao-jia,Liu Xiao-dong,Yang Chuan,等.XGBoost机器学习模型与GIS技术结合的公路崩塌灾害易发性研究[J].公路, 2020(7):20-26.
- [3] 王硕,王晨阳,陈常松.测绘业务与地质灾害监测预警业务之间的融合途径分析[J].测绘通报, 2020(11):151-154.DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0375.
- [4] 张群,许强,李江,等.南江”9·16”群发性缓倾浅层土质滑坡特征与成因机制研究[J].自然灾害学报, 2015(3):8.DOI:10.13577/j.jnd.2015.0314.
- [5] 赵永国.川藏公路沿线地质灾害及其整治对策[J].自然灾害学报, 1993. DOI:CNKI:SUN:ZRZH.0.1993-01-014.
- [6] 钮涛,李栋,王平,等.基于地质保障系统的煤矿灾害监测预警及综合防治平台研究[J].中国煤炭, 2024, 50(5):82-89.
- [7] 刘春龙,胡亦鹤,周传武.浙南山区公路承灾体自然灾害分布特征及防治研究[J].公路, 2023, 68(12):328-336.
- [8] 林报嘉,刘晓东,杨川,等.XGBoost机器学习模型与GIS技术结合的公路崩塌灾害易发性研究[J].公路, 2020, 65(7):7.
- [9] 吕维东.山区公路建设过程中泥石流安全风险预防措施——评《泥石流灾害风险分析与聚落减灾——以岷江上游为例》[J].安全与环境学报, 2024, 24(8):3292-3292.
- [10] 任康.基于WebGIS的滑坡灾害预警在线监测系统研究[J].公路交通科技:应用技术版, 2019(10):3.DOI:CNKI:SUN:GLJJ.0.2019-10-082.
- [11] 冯义林.物探技术在隧底隐伏岩溶探测中的运用[J].现代隧道技术, 2023, 60(S01):192-197.
- [12] 唐强,林述涛.基于BIM技术的黄茅海跨海通道计量管理系统研究[J].公路交通科技, 2023, 40(S02):151-157.

- [13] 于洋,陈炳乾,花奋奋,等.矿山地质环境灾变与保护修复研究现状与展望[J].金属矿山, 2024(3):1-18.
- [14] 陈永灿,陈嘉杰,王皓冉,等.大直径长引水隧洞水下检测机器人系统关键技术[J].清华大学学报:自然科学版, 2023, 63(7):1015-1031.DOI:10.16511/j.cnki.qh-dxxb.2023.26.015.
- [15] 张宏,季蓓蕾,刘燊,等.地质灾害段管道结构安全数字孪生机理模型[J].油气储运, 2021, 40(10):7.DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2021.10.003.
- [16] 阳吉宝.基于尖点突变模型确定静载试验的基桩极限承载力[J].水文地质工程地质, 2024, 51(5):114.DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202308052.
- [17] 王勇,岑宗羲,何正龙,等.低空无人机遥感技术在公路巡检中的应用进展,挑战和前景[J].资源科学, 2025, 47(8):1675-1688.DOI:10.18402/resci.2025.08.06.
- [18] 余涛,蒋天宇,刘旭,等.土壤重金属污染现状及检测分析技术研究进展[J].中国地质, 2021, 48(2):17.DOI:10.12029/gc20210208.
- [19] 徐晗,姚孔轩,程丹仪,等.基于非开挖随钻检测系统与随机森林的地层岩性识别[J].地质科技情报, 2021(005):040.
- [20] 田野,徐忠林,张涵轶,等.高压电缆隧道结构病害整治典型案例剖析[J].现代隧道技术, 2024, 61(S01):892-900.
- [21] 凌同华,陈梓浓,张胜,等.岩石岩性轻量化网络识别方法及其隧道工程应用[J].铁道科学与工程学报, 2023, 20(9):3604-3615.
- [22] 徐从杰,陈阳,司小东,等.运营地铁隧道车载探地雷达衬砌检测适用性研究[J].现代隧道技术, 2022(S1):627-634.
- [23] 孙琪皓,刘桂卫,王飞,等.铁路地质灾害早期识别与监测预警技术及应用研究[J].铁道标准设计, 2024, 68(9):24-31.DOI:10.13238/j.issn.1004-2954.202302100005.
- [24] 张晨,石峰,孟超,等.铁路隧道衬砌病害智能检测技术研究[J].铁道工程学报, 2024, 41(10):57-62.
- [25] 李志星,韩观胜,李博.基于综合探测手段的地铁隧道岩溶注浆处置研究[J].科技通报, 2023, 39(8):25-32.DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2023.08.005.
- [26] 刘允秋,肖益盖,李同鹏,等.深井高应力破碎岩体支护技术研究与应用[J].金属矿山, 2022(6):6.

- [27] 时佳斌,柴雪松,王智超,等.轨道变形监测系统设计与应用[J].铁道建筑, 2022(004):062.DOI:10.3969/j.issn.1003.
- [28] 高亮,饶法强,杨忠民,等.基于语义分割的公路路面裂缝智能识别技术研究[J].中外公路, 2024, 44(5):241-247.DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2024.05.027.
- [29] 王有刚.城市轨道交通勘测技术发展研究[J].城市轨道交通研究, 2022, 25(9):I0038.
- [30] 杨晓华,李爱明,李吉富.山区既有公路桥梁桩基下伏溶洞处治技术[J].公路, 2020, 65(10):7.
- [31] 徐云福,吴迪亮,沈燕倩,等.地下空间岩土工程安全监测技术分析[J].工业建筑, 2021(012):051.
- [32] 吴铭芳,曾仲毅,黄义雄,等.运营高速公路隧道衬砌裂损处治方案研究[J].地下空间与工程学报, 2023, 19(S02):942-954.
- [33] 石妍,张建峰,李锋,等.复合浆材堆石体技术与现场探索性试验研究[J].长江科学院院报, 2021, 038(003):137-141,148.DOI:10.11988/ckyyb.202004152021.
- [34] 朱小明,冯勇,李彦伟.甘肃省运营公路隧道仰拱缺陷特征及处治技术[J].公路, 2020(1):6.

