

项目合同编号：25-30X

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究

承担单位：长安大学

项目负责人：马静

通讯邮编、地址：710018、陕西省西安市未央区长安南路 356 号

传真、电话：61105255

起止年限： 2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制



一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

(1) 公路边坡精细化立体建模技术研究

目前对公路边坡进行的各种评价分析工作，其基础资料几乎都来源于野外调查工作，即通过人的观察以及利用手持工具进行测量获得相关数据，然后进行定性或者定量分析，从某种意义上讲，这是一个最精确的方法，但是这种方法存在很大的局限，主要是，一般山区（无论是黄土高原还是秦巴山区）的公路边坡都异常高陡，几十米甚至上百米的高陡斜坡，人力几乎难以到达，即使人在坡的某一个部位（如坡脚、坡顶），视野亦会受到限制，很难观察斜坡全貌，同时，在车辆高速行驶的公路上，以及陡峭的斜坡上，调查人员安全都难以得到保障。

本研究中，基于低空无人机分层联动航摄技术，多层次获取高精度像片数据，分层联动建模，建立实景三维立体模型的方法来克服上述限制条件。无人机航摄三维建模作为地表实景建模技术在公路行业正如火如荼的应用，大范围获取数据能力，高精度建模能力、高保真细节表现力的地表实景模型为公路行业的各项应用研究提供了极大的助力，但就公路边坡而言，仍然存在一个技术难题，亦即在保证航摄无人机安全的前提下，即便在最佳的条件下，高陡边坡因地形的原因，其中部分坡面以及坡脚的底部总是存在模糊区，这种模糊状态随着公路边坡高度差的增大而趋于严重，这是地形对无人机航摄的一个客观影响，从航摄角度去克服难度极大，甚至要牺牲安全性而得不偿失，对公路边坡的建模、评价、监测预警带来严重影响，因此，本研究中，采用低空大型旋翼无人机挂在倾斜相机

模式获取大面积区域数据，采用小型旋翼无人机航摄获取垂直陡坡及坡底部位高精度像片，分层联动建立公路边坡实景建模。

低空无人机航摄从面到点，两个层次获取研究区像片数据，有机联合到统一建模过程中，形成分层联动建模机制，形成更高质量的公路边坡三维实景模型。

（2）建立基于深度学习和层次分析法耦合的智慧型公路边坡危险评价技术方法

公路边坡危险性评价主要是在对边坡的基本变形破坏方式研究，根据公路边坡的地质特征，将公路边坡划分为黄土边坡、岩质边坡、混合型边坡，针对不同类型边坡的灾害特征，分别提取几何形态、物质组成、地质体活动性三大类评价因子，并对没类评价因子提取评价指标，构建评分系统和分级机制，形成差异化的评价指标体系（表 1）。

在基本形成条件和潜在危险性指标提取的基础上，提取对边坡稳定性有重要影响的指标或因素，分析评价各指标或影响因素的影响程度，设定定性或者定量评价标准，并对每个因子进行评分，建立综合评价模型。

目标	解译类别	解译因子	因子值来源	评分依据	
公路边坡危险分级评分系统	几何形态因子	路坡间距	测量值	分值说明	
				路坡距离 (m)	取值区间
				路坡重叠	[90-100]
				坡距路 [0-0.5)	[80-90)
				坡距路 [0.5-1)	[70-80)
				坡距路 [1-2)	[60-70)
				坡距路 [2-3)	[50-60)
				坡距路 [3-4)	[40-50)
				坡距路 [4-5)	[30-40)
				坡距路 [5-10)	[20-30)
				坡距路 [10-20)	[10-20)
				坡距路 [20-50)	[0-10)
				>=50	0
		斜坡坡型	定性描述	分值说明	
				斜坡坡型	取值区间
				凹形阶梯型黄土坡	[0-5)
				凹形阶梯型基岩坡	[5-10)
				凹形阶梯型基岩-黄土坡	[10-15)
				凹形直线型黄土坡	[15-20)
				凹形直线型基岩坡	[20-30)
				凹形直线型基岩-黄土坡	[30-40)
				凸形阶梯型黄土坡	[40-50)
				凸形阶梯型基岩坡	[50-60)
				凸形阶梯型基岩-黄土坡	[60-70)

+

表 1 评价因子及指标评分系统

项目在保证边坡危险性评价质量的前提下，在设计评价方法时，参考机器学习模型并结合层析法形成集识别、评价、判断、验证综合性智慧型评价方法。

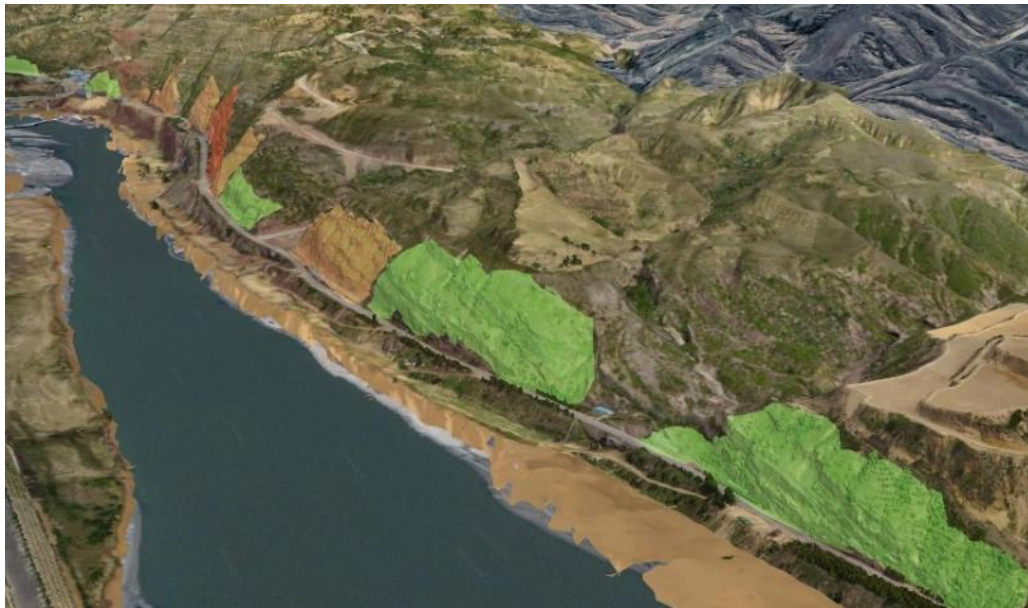


图1 公路边坡风险性评价

针对每个类型进行学习训练，得到符合要求的模型，然后利用该模型对所有边坡进行评价。具体如下：首先利用无人机航摄技术建立三维模型，然后，选择典型边坡，根据评价因子制定评分规则，并尽量制定定量评分方法和评分标准，针对每项因子进行评分并进行危险性分级，据此制作深度学习训练样本。训练的过程中，根据所给的指标和样本数，进行适当的调整。采用 Yolov 深度学习方法，利用样本库进行学习建模，根据训练样本对所有边坡进行学习训练，并建立综合分级模型，最后，利用模型对所有的边坡进行危险评价。

为验证深度学习评价模型的准确性，选取边坡进行人工评价，对学习的评分结果进行验证评价，主要是结合层次分析法，针对评价因子及评分标准对边坡进行危险评价，与深度学习结果进行对比分析，并逐级进行改进，最终得到优化的模型和算法。

（3）多源异构监测数据融合与预警模型研究

针对危险边坡的精细化监测需求，重点开展监测数据智能融合

与预警模型算法研究。具体包括：多源异构监测数据标准化融合技术研究，针对光纤感测、测斜仪等不同类型的监测设备采集的多源数据，构建分层联动预警模型构建，建立“单设备异常识别—多源融合决策”，开发多源数据融合决策模型，构建耦合边坡危险性评价结果的预警计算模型，研究不同地质条件下各监测指标的模糊隶属度函数，划定蓝、黄、橙、红四级动态预警阈值区间，实现点-面-体立体化分级预警，研发基于多源检测数据融合算法的分级预警模型，形成低成本、可落地的边坡灾害预警技术体系，为监测设备的工程布设、预警阈值设定及后期系统建设提供理论依据与决策支撑。

2. 技术关键

(1) 基于分层联动的公路边坡的高精度三维建模方法

公路边坡三维立体实景建模是利用大型旋翼无人机挂载倾斜摄影相机的方式，获取研究区高重叠度航摄像片，进而对研究区进行精细化地表建模，其优势是获取数据速度快，建模精度高，但是针对黄土区公路，其有明显的缺点，即对公路沿线两侧边坡的部分坡面及底部细节表达能力差（产生了模糊），这是因为山区公路边坡相对高差过大，对边坡坡脚的有效照片获取率低（重叠度低），特别位于航摄基线以下的部分区域，底部变形大，重叠度低，远不如山顶像片清晰。针对此问题，本项目采用小型无人机航摄方式克服该缺点，以获取整个公路高陡边坡的精细化模型。

大型旋翼无人机低空航摄能够获取整片区域的边坡像片、小型旋翼无人机通过快速贴近摄影方式获取公路边坡坡地以及垂直坡面的高精度高重叠度像片，低空获取的数据联动进行公路边坡的模型

构建，本项目拟解决建模过程中的不同层次坐标联动技术、高精度像片定位技术、像素融合技术等难题，为公路边坡三维建模提供技术流程和方法。最终构建格网分辨率 $\leq 1\text{cm}$ 的三维实景模型，满足边坡裂缝、危岩、卸荷裂隙等精细结构识别需求。

（2）基于层次分析法（AHP）- 深度学习耦合的公路边坡危险评价方法研究

公路边坡三维模型的进一步应用是热点，大部分的模型仅仅用来进行逼真的效果展示，或者是浅尝辄止的初步应用。

本项目首先基于层次分析法和专家评估法等稳定有效的地质灾害危险评估方法对获取的公路边坡精细化三维模型进行深度的分析，公路边坡按地质特征划分为黄土边坡、岩质边坡、混合型边坡三类，针对不同类型边坡的灾害特征，分别提取几何形态、物质组成、地质体活动性三大类评价因子，构建差异化的评价指标体系。在每类评价因子层面设置定量和定性评价指标，如坡型、坡高、坡度，层倾向、软性岩层厚度、软硬岩层的组成状态、节理裂隙密度、节理裂隙宽度、节理裂隙长度等，通过实景三维模型获取因子评分值，基于 AHP 方法计算每个边坡的综合得分。设定分级标准，确定边坡的危险级别。

根据项目要求，获取足够的经过精确评价的公路边坡数量，建立评估样本库。其次，采用 YOLOv 深度学习方法，并参考当前主流的方法，利用样本库进行学习建模，形成适合边坡危险评价的模型体系。最后，利用全新的深度学习模型对全部边坡进行危险性评价，并进行验证和误差分析。

本项目将深度学习、层次分析法进行耦合，最大程度地减少人

工的参与和影响，形成深度学习的公路边坡危险性评价方法。

(3) 面向多源异构监测数据的公路边坡预警关键技术

面向危险边坡监测数据精准预警的技术需求，构建多源监测数据轻量级融合技术，通过采集光纤感测、测斜仪、微芯桩采集数据；建立“感知-诊断-决策”分层联动预警机制，耦合边坡危险性智能评价结果，研发动态预警指数计算模型；提出基于危险性感知的自适应阈值优化技术，建立蓝-黄-橙-红四级预警区间的动态划定方法，形成点-面-体立体化分级预警技术体系，解决有限监测资源条件下的边坡灾害早期识别与精准预警难题，为轻量化监测预警系统建设提供理论依据与算法支撑。

3. 依托工程（依托工作）

本项目依托陕西省交通规划设计研究院有限公司开展研究工作。长安大学作为以交通运输为特色的国家“双一流”学科建设高校，多年以来，与高速公路建设运营单位保持着良好的合作关系，并深入参与到陕西省高速公路建设运营的各个方面。

长安大学科研团队长期扎根西部，紧跟国家公路边坡遥感应用需求，立足于灾害监测预警领域，研发的基于云平台的低成本高精度北斗/GNSS 监测系统已成功预警了三起黄土滑坡。该系统从硬件端低成本北斗接收机的设计，到服务端高精度北斗定位解算及预警平台的搭建均由该团队研发，已经形成了一整套完备成熟的解决方案。该监测预警系统是长安大学承担的国家自然科学基金重点项目“基于空天地技术的滑坡识别与智能监测预警”、国家重点研发计划项

目“特大滑坡实时监测预警与技术装备研发”、“川藏铁路重大灾害识别与预测”、国家 973 项目“黄土重大灾害及灾害链的发生、演化机制与防控理论”等国家重大项目的系列研究成果。

本项目依托宝汉高速（G85）相关路段实施，该路段于 2021 年 6 月建成通车，至 2026 年立项时已全面转入常规养护阶段并完成水土保持设施验收（2025 年 1-2 月）。经过近 5 年运营期雨水冲刷、岩体风化及运营扰动，路段自然边坡与人工边坡的地质灾害隐患逐步显现，恰逢开展边坡危险评估与养护方案优化的关键窗口期。科研工作精准对接常规养护阶段需求，依托现有养护监测体系，融合无人机航测、GNSS 监测等技术开展沿线边坡地质灾害调查与危险分级评价，同时基于养护监测数据与隐患处置案例持续优化评价模型与预警方法，实现科研服务工程养护决策、工程实践反哺科研落地的双向赋能，为降低边坡养护成本、提升养护智能化水平提供直接技术支撑。

二、考核指标

1.预期目标

- (1) 公路边坡实景三维模型 1 套；
- (2) 公路边坡危险性评价体系 1 套；
- (3) 多源数据融合公路边坡监测预警模型 1 套；
- (4) 编制《公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究》报告 1 份；
- (5) 发表期刊论文 1-2 篇；

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

- (1) 公路边坡倾斜摄影及建模技术流程 1 套；
- (2) 公路边坡实景三维评价技术流程 1 套；
- (3) 基于三维实景的公路边坡预警模型 1 套；
- (4) 完成依托工程应用。

3.经济和社会效益

本项目以宝汉高速(G85)宝鸡境内段高速公路边坡为研究对象，该路段穿越黄土梁峁区与秦岭北麓，以黄土边坡为主，兼具自然形成的高陡边坡与公路修建过程中切坡工程形成的人工边坡，边坡数量庞大、类型多样，虽分布范围、规模大小及对公路的威胁程度存在差异，但均需重点管控，以防范地质灾害发生、保障公路安全运营。

项目采用无人机倾斜摄影获取公路边坡高精度数据并构建三维实景模型，建立针对该路段边坡的深度学习危险性评价模型及算法，

开发自动化监测预警系统。该系统具备经济、实时、自动、高效的核心特点，可有效改变现有边坡监测系统自动化程度低、设备投入成本高、运维费用高、不利于在高速公路系统中大规模推广的局面，实现短时高效的边坡管控目标。本项目针对宝汉高速宝鸡境内段边坡数量多、监测范围广的特点，可高效开展公路边坡地质灾害调查及高危险性边坡危险评估；针对该路段新建切坡多、易受人类活动及极端天气影响的特性，可精准评估边坡地质灾害危险级别，及时捕捉灾害前兆，建立科学的地质灾害预警模型，最大限度预防崩塌、滑坡等地质灾害发生。

通过本项目的研究，可对宝汉高速宝鸡境内段及周边黄土梁峁区、秦岭北麓公路沿线地质灾害危险源进行精准识别、科学评价与分级，制定针对性监测方案，重点管控高危险性边坡，为政府交通、自然资源等相关部门开展边坡整治、加固工程提供精准技术支撑，有效避免地质灾害对交通基础设施造成的损毁，减少人员伤亡及财产损失。项目实施后，可使宝汉高速宝鸡境内段边坡灾害发生率明显降低，每年减少大量直接经济损失，间接减少因交通中断造成的物流、客运损失；同时，可大幅降低人工巡查及应急抢险成本，预计每年节省运维费用200-300万元，经济效益显著。

在社会效益方面，项目实施可有效保障宝汉高速宝鸡境内段交通动脉畅通，提升区域交通通行安全性，保障陕甘两省互联互通及区域资源运输顺畅；为沿线群众出行提供安全保障，降低地质灾害对周边群众生命财产的威胁，助力区域经济社会稳定发展。此外，项目研究成果可在全国范围内，尤其是黄土高原、秦岭山区等同类地质条件的高速公路中推广应用，潜在用户涵盖各地高速公路运营

管理单位、地质灾害防治机构等，市场前景广阔，能够进一步扩大成果应用价值，推动我国山区高速公路边坡管控技术升级。

在环境效益方面，项目的实施可极大保护宝汉高速沿线自然环境，通过科学的边坡危险评估及工程治理优化建议，避免盲目加固施工对周边生态环境的破坏；同时，对不稳定边坡进行精准整治，可有效防止水土流失、山体滑坡等生态问题，使公路边坡与周边自然景观相融合，美化公路通行环境，实现“安全防护+生态美化”的双重目标，推动公路建设与生态环境保护协同发展。

4.成果提供形式

- （1）公路边坡实景三维模型 1 套；
- （2）公路边坡危险性评价体系 1 套；
- （3）多源数据融合公路边坡监测预警模型 1 套；
- （4）编制《公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究》报告 1 份；
- （5）发表期刊论文 1-2 篇；

5.其他考核指标

开展与依托工程单位、行业专家的技术交流活动不少于 1 次，促进科研成果与工程实践对接。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
理论研究与方案设计阶段（第 1-3 个月）	开展文献调研与资料收集，制定详细研究大纲和技术路线；完成无人机航摄平台选型及监测设备配置方案；建立项目组织管理体系，明确人员分工；编制课题研究实施方案，完成开题评审。考核目标：提交研究大纲、技术实施方案。
技术研发与模型构建阶段（第 4-12 个月）	开展无人机倾斜摄影航摄，建立公路边坡精细化三维实景模型；基于机器学习算法构建边坡风险评价模型，完成评价因子提取与训练；开发多源数据融合预警模型及云端监测预警系统初版。考核目标：完成三维建模技术流程、风险评价模型、预警系统开发。
应用验证与优化阶段（第 13-20 个月）	依托宝汉高速（G85）宝鸡境内段高速公路开展现场试验，进行模型验证与精度测试；优化风险评价模型参数及预警阈值；完善监测预警系统功能，开展示范应用；采集多期监测数据验证系统稳定性。考核目标：完成示范段应用验证。
成果推广与总结阶段（第 21-24 个月）	编制《公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究》；撰写研究报告，发表高水平期刊论文；组织项目验收与成果鉴定。考核目标：提交研究报告 1 份、发表论文 1-2 篇。

四、项目经费

项目总经费：39.96 万元
交通运输厅补助：19.98 万元
自筹资金：19.98 万元

经费支出预算表

科 目	总经费 (单位：万元)	厅补经费 (单位：万元)
(一) 直接费用	27.96	13.98
1. 设备费		
(1) 购置设备费		
(2) 试制设备费		
(3) 设备改造与租赁费		
2. 业务费		
(4) 材料支出	10	5
(5) 测试化验实验加工支出		
(6) 燃料及动力支出		
(7) 差旅支出	5.96	2.98
(8) 会议支出		
(9) 国际合作与交流支出		
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	4	2
(11) 其他支出		
3. 劳务费		
(12) 劳务性支出	8	4
(13) 咨询专家支出		
(二) 间接费用	12	6
4. 管理费	5	2.5
5. 绩效支出	7	3.5
合 计	39.96	19.98

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	
		3.发表论文（篇）	1
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其他	1
		4.著作（部）	
		5.制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	
	其他成果	1.填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	
		2.获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3.其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	
		(1) 小试	是/否
		(2) 中试（样品样机）	是/否
		(3) 小批量	是/否
		(4) 规模化生产	是/否
	人才引育	1. 引进高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		2. 培养高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4. 是否设立科研助理岗位	是/否
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2. 科研仪器设备利用率（%）	
		3. 孵化科技型企业（个）	
		4. 转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	
		2. 新增销售（万元）	
		3. 新增出口创汇（万美元）	
		4. 新增利润（万元）	
	社会效益	1. 新增税收（万元）	
		2. 新增就业人数	
		3. 就业培训（人次）	
		4. 带动农民增收（万元）	
		5. 培训和指导科技服务（人次）	
		6. 新增产业带动情况	
		7. 技术集成示范（项）	
		8. 建立示范基地（亩数）	
		9. 节约资源能源	
		10. 环保效益	
其他需要说明的情况			

六、承担单位或研究人员分工

长安大学作为以交通运输为特色的国家“双一流”学科建设高校，多年以来，与高速公路建设运营单位保持着良好的合作关系，并深入参与到陕西省高速公路建设运营的各个方面。

长安大学科研团队长期扎根西部，紧跟国家公路边坡遥感应用需求，立足于灾害监测预警领域，研发的基于云平台的低成本高精度北斗/GNSS 监测系统已成功预警了三起黄土滑坡。该系统从硬件端低成本北斗接收机的设计，到服务端高精度北斗定位解算及预警平台的搭建均由该团队研发，已经形成了一整套完备成熟的解决方案。该监测预警系统是长安大学承担的国家自然科学基金重点项目“基于空天地技术的滑坡识别与智能监测预警”、国家重点研发计划项目“特大滑坡实时监测预警与技术装备研发”、“川藏铁路重大灾害识别与预测”、国家 973 项目“黄土重大灾害及灾害链的发生、演化机制与防控理论”等国家重大项目的系列研究成果。

陕西省交通规划设计研究院有限公司主要负责依托工程的落实与现场保障，将积极协调项目所需的工程资料、现场条件及运营管理相关资源，为项目现场调研、数据采集、设备布设及试验验证等工作提供支持，全力配合项目顺利实施。本单位承诺履行相关职责，对项目依托工程保障及相关工作负责。

七、项目参加人员表

项目承担单位：长安大学							
参与单位（排序）：陕西省交通规划设计研究院有限公司							
项目负责人							
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作	签名
1	马静	1983-02-13	长安大学	副高级	交通工程（安全设施）	进行项目总体规划，主持项目全面工作	马静
主要研究人员							
2	徐磊	1977-09-10	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	隧道工程	关键技术负责和现场总体负责	徐磊
3	田盟刚	1977-12-10	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	交通工程（安全设施）	关键技术指导	田盟刚
4	冯玉荣	1983-12-21	西安市常宁新区管委会	副高级	道路运输	系统开发	冯玉荣
5	贺欣	1980-04-18	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	交通工程（安全设施）	关键技术指导	贺欣

6	路庆昌	1984-07-08	长安大学	正高级	交通工程（安全设施）	关键技术指导	路庆昌
7	王宏宇	1990-02-08	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	隧道工程	实验测试及数据分析	王宏宇
8	赵宝俊	1980-05-14	陕西交控建投经营管理有限公司	正高级	隧道工程	实验测试及数据分析	赵宝俊
9	李政国	1979-02-13	中国地质调查局西安中心	副高级	遥感信息	模型建立	李政国
10	夏鹏	1981-10-02	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	隧道工程	数据采集及分析建模	夏鹏
11	王鹏	1981-09-20	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	道路运输	现场指导及数据采集	王鹏
12	乔文靖	1981-11-10	西安工业大学	副高级	道路运输	现场指导及数据采集	乔文靖
13	李徐阳	1994-10-13	陕西交控建投经营管理有限公司	中级	道路运输	现场指导及数据采集	李徐阳
14	陶涛	1982-09-02	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	交通工程（机电工程）	模型算法开发及改进	陶涛
15	赵治琴	2003-08-11	长安大学	学生	电子信息	文献收集	赵治琴
16	耿尧	2005-01-26	长安大学	学生	车辆工程	文献收集	耿尧
17	胥瀚	2004-09-17	长安大学	学生	交通控制	文献收集	胥瀚

八、信息表

项目合同编号		25-30X		密级		/		A：机密 B：秘密 C：内部		
项目名称		公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究								
项目实施所在地		陕西		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月				
总 经 费		39.96		厅 拨		19.98				
第一承担单位	单位名称		长安大学							
	所在地		陕西省西安（区、市）				代码	610100		
	通讯地址		陕西省西安市雁塔区二环南路中段 126 号				邮编	710061		
	单位性质		(1) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他				代码	10710		
参与单位	序号	单 位 名 称								
	1	陕西省交通规划设计研究院有限公司								
	2									
项目负责人		姓 名	马静		性别 (2) 1.男 2.女		出生年份	1983		
		学 历	(1) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其他							
		职 称	(1) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其他							
		联系电话	13096915299 82334558		电子邮箱		122458556@qq.com			
项目联系人		姓名	马静		性别		女			
		联系电话	13096915299 82334558		电子邮箱		122458556@qq.com			
项目组人数		17	高级	13	中级	1	初级	0	其他	3
主要研究内容 (100 字以内)		1、公路边坡精细化立体建模技术研究 2、建立基于深度学习和层次分析法耦合的智慧型公路边坡危险评价技术方法 3、多源异构监测数据融合与预警模型研究								
成果属性		G	A：新技术 B：新工艺 C：新材料 D：新产品 E：软科学 F：装备 G：其他							
成果形式		A	A：专著、论文 B：样机、样品 C：试验工程、产品 D：示范工程 E：产品 F：其他							

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

1.合同执行过程中，乙方如需修改合同某项条款，应向甲方提出变更内容及理由的申请报告，经甲方审核同意后实施。未接到正式批准以前，双方仍须按原合同条款履行，否则后果由自行修改条款的一方负责。

2.乙方因任何主观或客观原因（如：与大纲评审内容有出入，挪用经费、技术措施或某种条件不落实等）致使计划无法执行而要求解除合同的，需取得甲方书面同意且应视不同情况，部分或全部退还所拨经费；出现上述情况的，甲方有权单方解除本合同且视不同情况要求乙方部分或全部退还所拨经费。

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

5.项目完成后，乙方必须按要求向甲方提交一套真实、完整、详细的技术资料及样机，并提出项目验收申请报告，由甲方审查后组织验收。

6.合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：

负责人：（签字）

联系人：（签字）

电 话：029-88869067



合同乙方：（承担单位）

长安大学

单位负责人：（签字）

项目负责人：（签字）

电 话：029-61105261



2026年 03月 30日

财务负责人：（签字）

账 户 名：长安大学

开户银行：中国银行西安翠华路支行

账 号：102007335073

陕西交通科技项目科研诚信 承诺书

本单位承诺在科研项目实施过程中，遵守科学道德和科研诚信要求，严格执行《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》的规定和科技项目合同约定，保证所提交材料的真实性，确保专款专用。如违背以上承诺，愿意承担相关责任，并同意主管部门将相关失信信息记入公共信用信息系统。

项目承担单位（盖章）

项目负责人：马新

2026 年 3 月 30 日

项目编号: 25-30X

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 公路边坡危险性评价与智慧监测预警

申请单位: 长安大学 陕西省交通规划设计研究院有限公司 (盖章)

联系人: 马静

电 话: 13096915299

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

目录

一、 项目研究的背景和必要性	1
二、 前期科研及工作基础	4
三、 实施方案	18
四、 项目承担单位及参加单位概况	29
五、 项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	31
六、 项目经费估算及资金筹措情况	37
七、 项目绩效指标	38
八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益	40
九、 其它需要说明的问题	42
十、 申请单位意见	43

应用技术、信息化类及软科学类

编写主要内容

一、项目研究的背景和必要性

提出的背景、研究目的、项目概括、市场需求前景或推广应用领域，达到的技术水平及在国民经济发展中的作用等。

1. 项目研究背景

陕西省地质条件复杂多样，崩塌、滑坡、泥石流灾害易发区分布范围广，危害严重。全省共划分 23 个地质灾害易发区，约占全省国土面积的 48.8%。公路作为人类活动强度最大的地带，一直是地质灾害高发频发的区域，特别是陕西的公路穿行于沟壑纵横的黄土高原和沟壑纵横的秦巴谷地，受地质灾害的影响就更为严重。一旦发生地质灾害，将会阻塞交通，带来严重后果。

公路边坡是道路工程中最常见的地质地貌单元，与路线工程相伴而生，是工程建设与运营安全管控的关键组成部分。受人类工程开挖扰动及复杂多变自然条件的双重影响，公路沿线边坡失稳等地质灾害日趋频发，且多集中于高陡边坡路段。此类灾害危害性极大，不仅严重影响工程建设进度与道路正常通行，更会对沿线人民群众生命财产安全构成严重威胁。陕西省境内公路因修建过程中大规模切坡工程形成了大量黄土边坡、岩质边坡及混合型边坡，各类边坡受雨水侵蚀、岩体风化、地形高差等因素影响，崩塌、滑坡、落石等灾害频发，与公路运营长期形成“灾害共生”状态，因此，深入开展公路边坡危险评价、监测与预警技术研究，具有重要的理论价值与工程实践意义。

当前，边坡安全危险评估仍处于快速发展阶段，现有研究多针对

单一类型边坡地质灾害开展，评估体系与内容尚不完善。而高速公路运营期边坡地质灾害往往表现为多种灾变形式并存，受限于对病害发育程度的及时判别与综合评价能力不足，难以实现对重大边坡地质灾害的全面、有效防控，极易诱发崩塌、滑坡等大型地质灾害，进而造成严重的人员伤亡、财产损失及不良社会影响。

黄土高原地质环境异常脆弱，频繁遭受自然灾害侵袭，尤其是公路沿线地区，由于雨水侵蚀和黄土塌陷，加之谷坡陡峭，边坡稳定性较差，地质灾害高发频发。以公路交通为主的黄土高原腹地，修路形成的边坡受到自重及雨水剥蚀、侵蚀作用，易形成坡面泥流，进而形成坡面塌陷，此外自然因素形成的滑坡、崩塌及泥石流隐患分布较多。黄土边坡易因雨水侵蚀形成坡面冲沟和局部塌落，岩质边坡因砂岩泥岩差异性风化产生拉张裂隙并引发落石，混合型边坡则易在岩土接触面发生滑动错位，各类灾害均对公路通行造成持续性威胁。一旦发生公路边坡地质灾害，极易引起交通受阻或中断，破坏性影响极大。

2. 研究目的与意义

我国山区面积广阔、地质条件复杂，极端降雨频发导致山区高速公路边坡地质灾害呈现类型多、分布广、危害大的特点，已成为制约山区交通安全运营、威胁人民群众生命财产安全的重要瓶颈。此类灾害易造成公路中断、设施损毁，年均直接经济损失超数十亿元，且灾害频次呈上升趋势。当前边坡危险评价与监测预警仍存在明显不足：现有评价多针对单一灾害，体系不完善，缺乏对损失与影响的全面量化；传统监测模式存在盲区大、响应滞后等痛点，低空遥感等先进技术应用仍需优化；机器学习与传统评价方法融合不深入，预警模型精准度有待提升。

基于此，本研究以山区高速公路边坡灾害防控需求为导向，立足西部山区地质特征，开展危险评价与监测预警研究。核心目的是：融合机器学习与 AHP 评价方法，筛选适配山区地质条件的评价因子，构建完善的危险评价体系；依托低空航摄技术，获取高分辨率数据并构建三维实景模型，结合多类型监测数据建立精准预警模型；探索分级管控路径，破解评价不精准、预警不及时等难题。

本研究具有重要理论与实践价值。理论上，将边坡按地质特征划分为黄土、岩质、混合型三类，针对性提取评价因子并建立分级评价标准，实现对不同类型边坡的精准化、差异化评价与预警。丰富边坡危险评价与预警理论体系，完善机器学习与传统方法的融合路径，深化对西部山区边坡灾害机理的认知。实践中，成果可广泛应用于西部山区高速边坡管控，提升防控智能化水平，减少人员伤亡与经济损失。以宝汉高速（G85）宝鸡境内段为典型案例，其穿越黄土梁峁区与秦岭北麓，边坡灾害高发，研究成果可直接解决其管控难题，为陕西省乃至全国同类山区高速提供可推广的一体化技术方案，对完善交通安全保障体系、推动区域发展具有重要意义。

3. 项目推广应用前景

项目通过对大量已建工程资料收集和现场调研相结合、试验、理论分析、数值模拟和工程应用相结合等技术手段，对公路滑坡分类、进行边坡建模、边坡灾害危险性评价、监测、预警进行深入研究，提出了用倾斜摄影建立公路边坡模型，基于机器学习的灾前危险评估体系，研究了公路边坡监测预警模型，并开发公路边坡监测预警系统。项目成果可直接应用于陕西省内黄土高原、秦巴山区等地质条件复杂区域的公路工程，具备快速落地、大规模推广条件，应用前景广阔。

二、前期科研及工作基础

1.对项目领域国内外（省内外）研究现状，研究水平和发展趋势的分析和评价（应进行查新分析，主要分析本项目的技术领域发展状况和水平，有那些技术尚未解决，需要这次攻克的技术难点）

1.1 公路边坡监测国内外研究现状

近年来，随着遥感技术的飞速发展，使用遥感卫星和传统无人机航测技术开展地质灾害判别、提取、解译等方面的应用愈发广泛。

国外研究现状：

Fonstad 等以美国德克萨斯州佩德纳勒斯河为研究对象，使用手持直升机拍摄的数百张图像生成了河流地形环境。该测试表明，SfM 和低空平台可以产生点云，点密度可与机载激光雷达相媲美，水平和垂直精度在厘米范围内，资金和劳动力成本非常低^[1]；Chen 等针对倾斜摄影模型自身特点，提出了一种模型精细融合方法。首先，以一个模型作为中心模型，并以另一模型与中心模型外轮廓的空间关系计算融合区域；然后，以中心模型外轮廓作为约束，对原始模型三角面片进行精细剖分；最后，基于精细剖分的三角面片进行纹理坐标的插值计算^[2]；Li 等提出了一种基于双时间航拍正射影像的半自动 LIM 方法，通过一系列实验验证了所提方法的有效性和优越性^[3]；Cook 等为评估无人机获取的地形精度，利用云对云比较算法 M3C2 将其与同一调查期间采集的地面激光雷达数据进行比较。结果表明，即使是非常基本的无人机也可以产生适合测量一个通道范围内地貌变化的数据^[4]；James 用软件让一般的科学家很容易地从使用消费级相机拍摄的野外

照片中创建精确的 3D 模型。并集成了运动结构 (SfM) 和多视图立体 (MVS) 算法, 与传统的摄影测量技术相比, 它只需要很少的专业知识和很少的控制测量, 并且处理是自动化的^[5]; AGUERAV-EGAF 等研究无人机摄影测量方法, 允许数据收集和 DEM 生成的地理应用。与传统平台 (载人机载或卫星) 相比, 基于无人机平台的方法减少了工作时间, 避免了研究地点存在危险时的风险, 研究目的是分析用于地理参考的地面控制点的数量对数字地表模型和无人机摄影测量获得的正射影像精度的影响^[6]; LAGUE 等提出了一种基于多尺度模型的三维点云直接比较方法 (M3C2), 设计了一种精确测量两点云间正交距离的算法。它不同于基于匹配同源部分产生位移场的技术。通过采用倾斜摄影 3D 技术, 它显著改进了现有的距离测量解决方案^[7]; EKER 等以澳大利亚 Gallenzerkogel 滑坡为研究对象进行了无人机监测。无人机航拍照片通过运动结构生成高分辨率数字高程模型 (dem)、正射影像和密度点云。根据地面控制点 (GCPs), 所有模型的均方根误差 (RMSE) 均为 4 cm^[8]。

国内研究现状:

任广丽等从边坡工程的灾变种类、发生机理、监测内容及手段、预警方法等方面进行了较为系统的梳理, 归纳了边坡工程灾变研究的发展趋势及已有研究中存在的不足, 对后续研究及其工程应用提出了建议, 期待能够抛砖引玉, 完善我国边坡工程安全评价及监测预警方法, 提升我国基础设施的韧性防灾^[9]; 王慧敏等研究北斗+安全平台实时管理和分析地表位移和深层位移, 基于传递系数法计算边坡的剩

余下滑力并且用有限元软件进行数值模拟,其结果验证了监测系统的准确性^[10];殷全春等以深汕西高速公路某路堑边坡的同一测斜孔内监测点监测位移数据为依据,通过分形几何理论对深汕西高速公路某路堑边坡的同一测斜孔内监测点监测结果和测点分形维数的内在联系进行分析,将分形维数和监测时程曲线结合起来,为边坡稳定性的研究提供了一种新的思路^[11];方留杨等提出山区公路典型地灾的倾斜摄影三维建模与分析方法,系统地论述了照片检查和预处理、三维立体重建、灾害分析与应用的流程和方法^[12];伏坤等针对实际应用过程倾斜摄影数据,研发了倾斜摄影数据及时共享的网络快速发布平台,并在成昆铁路某岩体处长期监测,该技术可以及时发现高位隐蔽灾害点^[13];黄骞等结合倾斜摄影三维模型构建、机器学习、虚拟现实仿真模拟等关键技术,构建公路地质灾害识别流程,提升公路地质灾害自动化程度^[14];张祖勋院士团队 2019 年首次提出了“贴近摄影测量”,贴近摄影测量是精细化对地观测需求与旋翼无人机发展结合的必然产物,有助于推动无人机摄影测量与精细化三维建模的发展^[15];梁京涛等将贴近摄影测量高分辨率和“多角度”探测技术优势应用于高位崩塌早期识别,并以康定县郭达山高位崩塌为例,总结归纳了该技术方法的具体应用流程,可为地质灾害调查和高位崩塌早期识别提供一定的参考与借鉴^[16]。

1.2 公路高边坡危险性评价国内外研究现状

近年来在公路边坡灾害研究领域,易发性、危险性、危险性评价也开始发展并成熟。20 世纪 80 年代以前,公路边坡的灾害研究主要

局限于对灾害分布类型、规律、形成机理、趋势预测等方面的分析，基本依附于水文地质、工程地质勘查和研究工作。80 年代以后，地质灾害研究开始突破传统的研究模式，研究理论不断提高，研究内容日益丰富，迅速向新的独立学科发展，随之，灾害危险性评价开始起步。

国外研究现状：

Petpongpan 等通过数字高程模型（DEM）、土地利用和土壤类型来表征流域的物理特征。用于模拟和模型性能调查的水文数据包括暴雨期间每小时的降雨强度和河流流量。研究以小时时间尺度模拟高降雨强度事件期间的水文情势，因为此条件适合于滑坡评估。因此，当用该模型模拟另一个时间尺度时，可能存在不确定性。然而，它可以作为一种方法来评估滑坡事件的可能性逐小时或实时模拟。这对预警和灾害管理计划非常有帮助^[17]；Francioni 以英国康沃尔北部海岸为例，提出了一种综合地理信息系统（GIS）、遥感（RS）激光雷（LiDAR）、摄影测量等多学科为一体的评价方法，对海岸区块状岩体中不稳定性滑坡进行危险性评价，利用这种方法，可以重点显示产生海岸滑坡的运动学破坏机制类型，并识别那些更容易产生不稳定或在将来不稳定风险增加的地区^[18]；Gonzalez 等通过激光雷达获取的信息，选取俄勒冈海岸山脉选定区域的数字地形模型（DTM）和冠层高度模型（CHM），开发一套危险和风险指数地图，可以在“预后”中评估斜坡的风险状态，并在“诊断”中确定所需的条件，以达到规定的风险条件^[19]；Mao 等研究基于 AHC-OLID 聚类算法的滑坡风险性建模，旨在设计一种新的基于重叠区间分歧距离测度的聚类分层聚类算法（AHC-OLID）机器学习模型，用于滑坡易发性建模和评估^[20]；Ram 等对喜马拉雅山麓

Mussoorie 镇进行了滑坡危险性、易损性和风险评估。该地区以旅游闻名，有 7 000 栋建筑，约 30 000 人居住。采用证据权重法（WoE）、频率比法（FR）、Yule 系数法（YC）和信息值法（InV）4 种二元统计方法进行滑坡风险性评价，结果表明，这些方法在滑坡危险性制图中均具有 75% ~ 80% 的成功率和预测率^[21]。

国内研究现状：

黄祥谈提出高边坡地质灾害风险指数和风险等级，并依据地质灾害危险管理准则，建立一套针对高边坡工程的安全检查与地质灾害危险性评价标准体系及相应的边坡防控对策，为保障高速公路安全运营提供有力保障^[22]；何海鹰等以高速公路岩质高边坡危险评估指标体系为研究对象，在调查多条高速公路 300 余处岩质高边坡的基础上，根据高速公路岩质高边坡的养护管理的工程实际并结合已有研究成果，根据各检查指标的重要性程度结合 AHP 方法计算得到各指标所占权重，建立适于高速公路边坡养护管理的岩质高边坡危险评估指标体系^[23]；刘洋洋等以河南省修武县 5 处典型山区丘陵公路边坡为例，构建了由 4 大类共 14 个指标组成的评价指标体系，针对山区丘陵公路边坡安全存在多种随机性、模糊性和不确定性因素等问题，优化改进了标准集对分析理论，并将熵权-集对分析模型应用于公路边坡安全评价中^[24]；王华俊等以浙江省高速公路边坡为研究对象，基于边坡动态信息，分层次评估坡体及加固体系病害特征，将边坡危险进行量化评分来评价边坡安全危险较以单纯通过计算边坡安全系数方式判断边坡安全危险更为合理^[25]；王卫东以柳州至南宁高速公路扩容公路某边坡为依托，对边坡失稳风险进行评估和分级，并利用北斗、倾斜摄影测量和物联网等技术建立三维自动化预警系统，对拆除支护过程中和

支护后的边坡进行监测及预警，根据边坡实际状态设定不同报警阈值和响应状态^[26]。

1.3 公路边坡监测预警系统国内外研究现状

国外研究现状：

Gamperl 等研究人员基于物联网技术，开发一种具有低成本效益的地质传感器网络，用在滑坡预警系统，可以快速降低风险。目前，该方案第一次在哥伦比亚麦德林郊区的一个项目中得到实施。该系统的硬件和固件是开源的，可以自由复制，由多功能的 LoRa 传感器节点组成^[27]；Abraham 等开发有效的滑坡预警系统（LEWS）是一种重要的降低风险的方法，通过它，当局和公众可以预测未来的滑坡事件。印度的喜马拉雅山脉是世界上最容易发生山体滑坡的地区之一，人们已经尝试确定该地区可能发生山体滑坡的降雨阈值。所建立的阈值对大多数滑坡事件的预测都是有效的，其主要缺点是虚报次数也随之增加^[28]；Chae 等人研究了遥感和地理信息系统（GIS）等信息和地理空间技术的应用，近年来对滑坡风险性评价研究作出了重大贡献^[29]。

国内研究现状：

刘建永等提出一种基于低功耗传感器设计技术、无线传感网络和北斗/GPRS 相结合的滑坡地质灾害无人监测方案，并设计了多传感器融合的滑坡地质灾害预测预警平台^[30]；刘冠洲等采用多源监测信息采集和融合、云数据存储与边坡稳定性分析、三维建模、综合预警等关键技术，建立了一套多源监测预警信息一体化平台^[31]；覃事河等采用高精度全站仪、全球导航卫星系统、三维激光扫描、微芯桩监测预警系统等多种智能手段对大渡河猴子岩水电站库区某滑坡体实施监测预警，提高了监测系统的可靠性，保障了滑坡体应急处置与管制通行

期间的安全稳定^[32]；任广丽等针对边坡工程灾变监测预警，总结分析了近 10 年来国内外该方面研究的现状。从边坡工程的灾变种类、发生机理、监测内容及手段、预警方法等方面进行了较为系统的梳理，归纳了边坡工程灾变研究的发展趋势及已有研究中存在的不足，对后续研究及其工程应用提出了建议^[33]；王卫东等针对单体边坡，使用地理力学方法对边坡的稳定性进行计算与分析，然后根据已有监测数据，运用预测模型，判断滑坡所处阶段，确定滑坡预警级别，运用到公路边坡信息管理系统中，从而实现对公路边坡的危险性分析和灾害预警^[34]；陈鹏年等针对目前用于滑坡灾害监测预警的诸多方法中存在的传感器选择种类单一、预警功能与监测数据相分离等问题，设计一种基于模糊控制的滑坡灾害监测预警系统。设计以导致滑坡灾害的主要因素为切入点，运用智能传感器组群对山体进行实时监测，对采集到的实时数据运用模糊控制系统进行处理，最终实现对滑坡灾害发生概率的预测^[35]；肖海平等针对现有边坡软件模型的预报可靠性与响应度难题，根据 GNSS/GIS 集成特点，结合现有互联网通信、空间信息等技术，提出远程滑坡系统的整体架构模型，设计灾害预警关键组合模型算法，最后在 GIS 系统支持下对空间信息进行分析和三维显示，实现了 GNSS 与 GIS 基于技术的集成^[36]；梁山等提出了基于无线传感器网络的山体滑坡预警系统的设计方案，对边坡危岩的失稳变形进行监测监控是预测滑坡等地质灾害发生的有效手段^[37]。

综上所述，国内外学者对公路边坡灾害的调查和评价研究，做了大量的工作，也取得了重要的进展，但仍然还存在一些问题和不足：

（1）目前公路边坡的危险性调查仍以人工调查为主，需要耗费大量人力物力财力。然而相当多的公路边坡极为高耸陡峭，人工调查

存在视野受限情况，同时，调查人员的安全性难以得到保障。

（2）目前大多数公路边坡三维建模局限在照片及数字高程模型（DEM）的渲染上，并不是真正意义上的三维可视化建模，更做不到公路边坡的精细化建模，目前最新的无人机航摄技术应用于公路边坡是一个热点，但是大多停留于展示和观赏，基于实景模型的深入性的应用研究较少。

（3）目前的公路边坡危险性评价技术方法仍以传统的静态评价为主或进行简单的人工分级，基于当前的深度学习技术，结合多层次的遥感分析技术的危险性评价还未有成熟且实用的技术方法。

（4）当目前的公路边坡监测预警平台利用专业监测仪器进行公路边坡预警时，各专业监测仪器仍是各自为战，联合预警问题一直无法很好地解决。

2.项目前期科研及现有工作条件（项目的支撑条件，过去相关研究的工作基础，获奖情况，现有的试验手段（设施.设备）.研究人员情况及协作条件等）

2.1 项目的前期研究基础

长安大学作为西北地区地质灾害防治领域的核心科研单位，依托地质工程国家级重点学科等优势平台，整合多方优质资源组建高水平研究团队，深耕西部典型灾害高发区域，在灾害机理研究、危险评价与防控技术研发等方面积累了深厚实力。电子与控制工程学院作为学校学科交叉融合的重要载体，凭借其在自动化、智能测控、信息通信等领域的专业优势，为地质灾害防治注入“智慧技术动能”，形成“地质灾害核心需求 + 电控技术创新支撑”的特色研究模式，学院

边坡预警研究团队涵盖自动化、电气工程、电子科学与技术等多个专业领域，与学校地质灾害领域院士团队、资深专家形成紧密合作。同时，依托学校与国土资源部地质灾害应急防治技术与指导中心，深度参与秦巴山区、黄土梁峁区等西部典型地质灾害高发区域的防治工作，将电控技术与地质灾害成因解析、风险评价体系构建等研究深度融合。通过产学研协同创新，既为西部地质灾害防治提供了精准监测、智能预警、高效防控的技术支撑，也培养了一批兼具地质灾害知识与电控技术能力的复合型人才，为区域防灾减灾提供了重要的人才保障。

长安大学设有大型地质灾害模拟实验厅、室内试验室以及 4 个野外观测实验基地，拥有数量众多的各类观测、实验装置和精密的专业分析仪器，如自行设计开发的大型滑坡模型试验装置、地裂缝模型试验装置、地面沉降观测实验装置等，以及先进的实验设备美国热电 X 系列电感耦合等离子质谱仪、日本电子 8100 型电子探针、MT-150C 岩石力学试验系统、微机控制电液伺服土动三轴试验机、CSS-2901TS 土体三轴流变试验机等和岩土数值模拟计算软件，如 MSC. MARC、3DEC、MIDAS. GTS 以及 FLAC3D 等，可开展以滑坡、泥石流、地裂缝和地面沉降等地质灾害与地表过程的观测、实验和研究。完成国家项目地灾类项目 48 项，地灾危险性评估百余项。

依托工程单位陕西省交通规划设计研究院有限公司负责管理陕西省范围内的公路建设与养护工作，能够为项目开展提供依托工程的建设条件，满足工作开展的必要条件。同时项目组成员通过现场调研和国内外资料搜集，较为充分地掌握了国内外在该领域的最新研究成果；通过实地观测及理论分析，在承灾体普查、路面状况诊断与测试、高性能材料设计与研发、大数据挖掘、数据管理系统等方面已经取得

了阶段性成果；同时在相关项目的研究与实施中，依托重大工程实践，积累了较为丰富的测试数据和基础资料。这些研究基础和成果积累都对本项目的顺利开展起到了良好的铺垫作用，奠定了坚实的工作基础。

项目组成员所在单位试验中心已配备了多项交通数据采集装置和数据分析软件，可以完成交通数据采集与分析的多项实地考察和数据挖掘，具备开展本项目研究所需的全部试验条件，能够为本项目试验工作的顺利开展提供充分的保障。目前项目承担单位和合作单位已与多家周边研究院所建立了密切的学术和科研合作关系，实现了部分信息与测试设备的共享，并与所在地的多家相关生产单位与研究机构保持了长期良好的产学研合作关系。项目核心研究人员已进行边坡危险性评价专题研究，积累了丰富的本土边坡评价实践经验，掌握了无人机倾斜摄影建模、三维遥感解译、分级评价体系构建等核心技术，所形成的评价方法和系统平台为本项目的开展提供了直接的技术参考和实践基础。上述条件为本项目的顺利实施提供了良好的硬件设备和软件环境。

2.2 项目支撑条件

（1）详细的资料搜集

查阅、搜集大量国内外有关公路边坡危险性灾前评估、监测、预警技术规范、课题研究资料。搜集了自 20 世纪 90 年代以来，中国地质灾害调查、评估的相关资料，分析其关于公路边坡的应用实际和案例。主要搜集了美国、英国、意大利等国家关于公路边坡评价的相关文章和案例。

（2）合理的人员构成

对课题研究工作进行了分工协作，明确了课题研究人员。项目实行项目组长负责制，实施分层管理，责任落实到人。将项目的内容进

行合理分解，落实到每个项目成员的实际工作中，并且在项目的实施过程中，充分调动研究人员的积极性和创新意识。

（3）前期的技术储备

依托工程项目管理单位拥有经验丰富的公路边坡监测评估人员，对公路边坡危险性评估需求有着深入了解，能够使本课题更加着重于解决公路边坡中存在的实际问题。

（4）完善的财务管理

长安大学拥有资深的公路灾害监测预警科研人才，具有完善的科研财务管理制度，团队不仅将科学研究真正应用于生产实践作为目标，更将研究与人民生命财产安全相结合作为追求。

（5）完善的示范工程条件

延长至黄龙段高速公路能为本项目提供极大的外业工作支持，同时，高速公路每年的公路养护、边坡防护等项目运行，能够保障项目顺利完成。

2.3 技术装备条件

经过多年研究，本项目组形成了适用于高山峡谷区、黄土高原区等不同景观区的自然资源、自然灾害遥感探测与监测技术，构建了黄土地质灾害的早期智能识别和监测预警前期技术体系；构建了基于3S技术的自然资源空间可视化分析体系。

目前，长安大学拥有30多套测量与地质装备仪器，覆盖重、磁、电、震、测井及测量等多个专业领域，这些设备均为国内外先进水平，并配备了各类物探、化探及遥感数据处理解释软件（图1），为中心



图1 部分大型设备

承担各类物化遥项目提供了有力保障。



图2 部分遥感设备

在测绘遥感方向，本项目组配置各类软硬件设备，特别是配置了大、中、小型的各类无人机 20 余台套（图 2），其中固定翼无人机可进行长航时飞行，旋翼机可进行三维倾斜摄影、正射测量等工作。各类小型无人机提供短时，小区域的航摄工作。软件上，购置了 ArcGIS、mapgis 等地理分析软件，遥感图像处理方面购置了基于面向对象思

想的 eCognition（易康）软件、以深度学习为特色的简译软件等国内外主流软件产品。

本项目承担单位已经拥有了无人机、三维摄影镜头等关键设备，同时，依托工程单位已经布设了云台监测相机、定位仪器等设备，本项目仅安装部分监测仪器即可。

3.参考文献

参考文献：

- [1] FONSTAD M A, DIETRICH J T, COURVILLE B C, et al. Topographic Structure from Motion: a New Development in Photogrammetric Measurement[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(4): 421-430.
- [2] CHEN H S, LIU Z D, WANG F, et al. An accurate oblique photography models merging method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020, 12: 90-92, 100.
- [3] LI Z, SHI W, MYINT S W, et al. Semi-automated Landslide Inventory Mapping from Bitemporal Aerial Photographs Using Change Detection and Level Set Method [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 175:215-230.
- [4] Cook K L. An Evaluation of the Effectiveness of Low-cost UAVs and Structure from Motion for Geomorphic Change Detection [J]. Geomorphology, 2017, 278: 195-208.
- [5] James M R , Robson S . Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application[J]. Journal of Geophysical Research Earth Surface, 2012, 117(F03017).
- [6] AGUERAV-EGAF, CARVAJAL-RAMIREZ, MARTINZ-CARRICONDO P. Assessment of Photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation Ground Control Points Number Using Unmanned Aerial Vehicle[J]. Measurement, 2017, 98: 221-227.
- [7] LAGUE D, BRODU N, LEROUX J M. Accurate 3D Comparison of Complex Topography with Terrestrial Laser Scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z) [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2013, 82: 10-26.
- [8] EKER R, AYDIN A, HUBL J. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based Monitoring of a Landslide: Gallenzerkogel Landslide (Ybbs-Lower Austria) Case study[J]. Environmental monitoring and assessment, 2018, 190(1): 28-41.
- [9] 任广丽,傅宇浩,李立云.边坡工程灾变监测预警研究述评[J].防灾科技学院学报, 2021, 23(01): 6-16.
- [10] 王慧敏,罗忠行,肖映城,刘正兴,何安良,梁晓东.基于 GNSS 技术的高速路边坡自动化监测系统[J].中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(06): 60-68.
- [11] 殷全春,冯青山,王云.基于分形理论公路路堑边坡监测分析[J].甘肃水利水电技术, 2020, 56(04): 58-62.
- [12] 方留杨,赵鑫,吴晓南,等.山区公路典型地质灾害倾斜摄影三维建模与分析方法研究[J].公路, 2018, 63(12): 170-176.
- [13] 伏坤,王珣,高柏松,等.无人机倾斜摄影测量技术在铁路突发地质灾害应急抢险中的应用[J].铁道标准设计, 2021, 65(03): 59-63.

- [14] 黄骞,张玥,汪悦.基于倾斜摄影的实景三维公路地质灾害识别关键技术研究[J].公路,2018,63(01):154-158.
- [15] 言司. 独辟蹊径,不断创新 贴近摄影测量:第三种摄影测量方式的诞生——专访武汉大学遥感信息工程学院张祖勋院士[J]. 中国测绘, 2019, No.184(10):33-39.
- [16] 梁京涛,铁永波,赵聪,等.基于贴近摄影测量技术的高位崩塌早期识别技术方法研究[J].中国地质调查,2020,7(05):107-113.
- [17] Petpongpan C , Ekkawatpanit C, Kositgittiwong D. Landslide risk assessment using hydrological model in the Upper Yom River Basin, Thailand[J]. Catena, 2021, 204(2):105402.
- [18] Mirko Francioni, John Coggan, Matthew Eyre, et al. A combined field/remote sensing approach for characterizing landslide risk in coastal areas[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 67: 79-95.
- [19] Gonzalez P V , Medina-Cetina Z . Risk Assessment for Landslides Using Bayesian Networks and Remote Sensing Data[C]// Geo-Risk 2017. 2017.
- [20] Mao Y , Mwakapesa D S , Wang G , et al. Landslide Susceptibility Modelling based on AHC-OLID Clustering Algorithm[J]. Advances in Space Research, 2021(2).
- [21] Ram P , Gupta V . Landslide hazard, vulnerability, and risk assessment (HVRA), Mussoorie township, lesser himalaya, India[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021:1-29.
- [22] 黄祥谈.高速公路高边坡安全检查与地质灾害风险性评价[J].公路交通技术,2012(02):8-11+16.
- [23] 何海鹰,胡甜,赵健.基于 AHP 的岩质高边坡风险评估指标体系[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(07):2861-2868.
- [24] 刘洋洋,李永强,郭增长,等.基于熵权-集对分析的山区丘陵公路边坡安全评价——以河南省修武县为例[J].安全与环境学报,2017,17(05):1681-1685.
- [25] 王华俊,欧阳涛坚,杨超,等.浙江高速公路运营期边坡安全风险调查研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):72-75.
- [26] 王卫东,刘超,李大辉,等.基于 GIS 的公路边坡危险性分析与预警系统研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2015,49(03):452-459.
- [27] Gamperl M , J Singer, Thuro K . Internet of Things Geosensor Network for Cost-Effective Landslide Early Warning Systems[J]. Sensors, 2021, 21(8).
- [28] Abraham M T , Satyam N , Pradhan B , et al. IoT-Based Geotechnical Monitoring of Unstable Slopes for Landslide Early Warning in the Darjeeling Himalayas[J]. Sensors, 2020, 20(2611).
- [29] Chae B G , Park H J , Catani F , et al. Landslide prediction, monitoring and early warning: a concise review of state-of-the-art[J]. Geosciences Journal, 2017, 21(6):1033-1070.
- [30] 刘建永,王源,蔡立艮,等.滑坡地质灾害无人监测预警平台设计[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2016,17(001):38-42.
- [31] 刘冠洲,张达,张元生,等.高陡边坡多源监测预警信息一体化平台研究[J].冶金自动化,2018,042(006):1-7.
- [32] 覃事河,周全.多种智能监测手段在滑坡预警中的应用研究[J].四川水力发电,2020, v.39;No.216(05):89-92+98.
- [33] 任广丽,傅宇浩,李立云.边坡工程灾变监测预警研究述评[J].防灾科技学院学报,2021,23(01):6-16.
- [34] 王卫东,刘超,李大辉,谭捍华,罗强,龙万学.基于 GIS 的公路边坡危险性分析与预警系

统研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2015,49(03):452-459.

[35] 陈鹏年,温宗周,张航,李丽敏,王真.基于模糊控制的滑坡监测预警系统设计[J].微处理机,2021,42(01):52-57.

[36] 肖海平,陈兰兰,郭广礼,刘小生,何琦敏.GNSS+GIS 远程滑坡实时监测系统方案设计[J].测绘通报,2018(05):116-119.

[37] 梁山,胡颖,王可之,鲜晓东.基于无线传感器网络的山体滑坡预警系统设计[J].传感技术学报,2010,23(08):1184-1188.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题（指对项目成果水平起决定作用的技术难点，或研究中能形成较强竞争力，具有自主知识产权的创新技术）

关键技术：

（1）基于分层联动的公路边坡的高精度三维建模方法

公路边坡三维立体实景建模是利用大型旋翼无人机挂载倾斜摄影相机的方式，获取研究区高重叠度航摄像片，进而对研究区进行精细化地表建模，其优势是获取数据速度快，建模精度高，但是针对黄土区公路，其有明显的缺点，即对公路沿线两侧边坡的部分坡面及底部细节表达能力差（产生了模糊），这是因为山区公路边坡相对高差过大，对边坡坡脚的有效照片获取率低（重叠度低），特别位于航摄基线以下的部分区域，底部变形大，重叠度低，远不如山顶像片清晰。针对此问题，本项目采用小型无人机航摄方式克服该缺点，以获取整个公路高陡边坡的精细化模型。

大型旋翼无人机低空航摄能够获取整片区域的边坡像片、小型旋翼无人机通过快速贴近摄影方式获取公路边坡坡地以及垂直坡面的高精度高重叠度像片，低空获取的数据联动进行公路边坡的模型构建，本项目拟解决建模过程中的不同层次坐标联动技术、高精度像片定位技术、像素融合技术等难题，为公路边坡三维建模提供技术流程和方法。最终构建格网分辨率 $\leq 1\text{cm}$ 的三维实景模型，满足边坡裂缝、危

岩、卸荷裂隙等精细结构识别需求。

(2) 基于层次分析法(AHP) – 深度学习耦合的公路边坡危险评价方法研究

公路边坡三维模型的进一步应用是热点，大部分的模型仅仅用来进行逼真的效果展示，或者是浅尝辄止的初步应用。

本项目首先基于层次分析法和专家评估法等稳定有效的地质灾害危险评估方法对获取的公路边坡精细化三维模型进行深度的分析，公路边坡按地质特征划分为黄土边坡、岩质边坡、混合型边坡三类，针对不同类型边坡的灾害特征，分别提取几何形态、物质组成、地质体活动性三大类评价因子，构建差异化的评价指标体系。在每类评价因子层面设置定量和定性评价指标，如坡型、坡高、坡度，层倾向、软性岩层厚度、软硬岩层的组成状态、节理裂隙密度、节理裂隙宽度、节理裂隙长度等，通过实景三维模型获取因子评分值，基于 AHP 方法计算每个边坡的综合得分。设定分级标准，确定边坡的危险级别。

根据项目要求，获取足够的经过精确评价的公路边坡数量，建立评估样本库。其次，采用 YOLOv3 深度学习方法，并参考当前主流的方法，利用样本库进行学习建模，形成适合边坡危险评价的模型体系。最后，利用全新的深度学习模型对全部边坡进行危险性评价，并进行验证和误差分析。

本项目将深度学习、层次分析法进行耦合，最大程度地减少人工的参与和影响，形成深度学习的公路边坡危险性评价方法。

(3) 面向多源异构监测数据的公路边坡预警关键技术

面向危险边坡监测数据精准预警的技术需求，构建多源监测数据轻量级融合技术，通过采集光纤感测、测斜仪、微芯桩采集数据；建立“感知-诊断-决策”分层联动预警机制，耦合边坡危险性智能评价结果，研发动态预警指数计算模型；提出基于危险性感知的自适应阈值优化技术，建立蓝-黄-橙-红四级预警区间的动态划定方法，形成点-面-体立体化分级预警技术体系，解决有限监测资源条件下的边坡灾害早期识别与精准预警难题，为轻量化监测预警系统建设提供理论依据与算法支撑。

2. 主要研究内容及实施方案（根据研究目的和考核目标合理地分解确定研究专题，突出重点，各专题研究内容要具体，避免交叉重复）

主要研究内容及实施方案：

(1) 公路边坡精细化立体建模技术研究

目前对公路边坡进行的各种评价分析工作，其基础资料几乎都来源于野外调查工作，即通过人的观察以及利用手持工具进行测量获得相关数据，然后进行定性或者定量分析，从某种意义上讲，这是一个最精确的方法，但是这种方法存在很大的局限，主要是，一般山区（无论是黄土高原还是秦巴山区）的公路边坡都异常高陡，几十米甚至上百米的高陡斜坡，人力几乎难以到达，即使人在坡的某一个部位（如坡脚、坡顶），视野亦会受到限制，很难观察斜坡全貌，同时，在车辆高速行驶的公路上，以及陡峭的斜坡上，调查人员安全都难以得到保障。

本研究中，基于低空无人机分层联动航摄技术，多层次获取高精度像片数据，分层联动建模，建立实景三维立体模型的方法来克服上述限制条件。无人机航摄三维建模作为地表实景建模技术在公路行业正如火如荼的应用，大范围获取数据能力，高精度建模能力、高保真细节表现力的地表实景模型为公路行业的各项应用研究提供了极大的助力，但就公路边坡而言，仍然存在一个技术难题，亦即在保证航摄无人机安全的前提下，即便在最佳的条件下，高陡边坡因地形的原因，其中部分坡面以及坡脚的底部总是存在模糊区，这种模糊状态随着公路边坡高度差的增大而趋于严重，这是地形对无人机航摄的一个客观影响，从航摄角度去克服难度极大，甚至要牺牲安全性而得不偿失，对公路边坡的建模、评价、监测预警带来严重影响，因此，本研究中，采用低空大型旋翼无人机挂在倾斜相机模式获取大面积区域数据，采用小型旋翼无人机航摄获取垂直陡坡及坡底部位高精度像片，分层联动建立公路边坡实景建模。

低空无人机航摄从面到点，两个层次获取研究区像片数据，有机联合到统一建模过程中，形成分层联动建模机制，形成更高质量的公路边坡三维实景模型。

(2) 建立基于深度学习和层次分析法耦合的智慧型公路边坡危险评价技术方法

公路边坡危险性评价主要是在对边坡的基本变形破坏方式研究，根据公路边坡的地质特征，将公路边坡划分为黄土边坡、岩质边坡、混合型边坡，针对不同类型边坡的灾害特征，分别提取几何形态、物质组成、地质体活动性三大类评价因子，并对没类评价因子提取评价指标，构建评分系统和分级机制，形成差异化的评价指标体系（表 1）。

在基本形成条件和潜在危险性指标提取的基础上，提取对边坡稳定性有重要影响的指标或因素，分析评价各指标或影响因素的影响程度，设定定性或者定量评价标准，并对每个因子进行评分，建立综合评价模型。

目标	解译类别	解译因子	因子值来源	评分依据	
公路边坡危险分级评分系统	几何形态因子	路坡间距	测量值	分值说明	
				路坡距离 (m)	取值区间
				路坡重叠	[90-100]
				坡距路 [0-0.5)	[80-90)
				坡距路 [0.5-1)	[70-80)
				坡距路 [1-2)	[60-70)
				坡距路 [2-3)	[50-60)
				坡距路 [3-4)	[40-50)
				坡距路 [4-5)	[30-40)
				坡距路 [5-10)	[20-30)
				坡距路 [10-20)	[10-20)
				坡距路 [20-50)	[0-10)
				>=50	0
		斜坡坡型	定性描述	分值说明	
				斜坡坡型	取值区间
				凹形阶梯型黄土坡	[0-5)
				凹形阶梯型基岩坡	[5-10)
				凹形阶梯型基岩-黄土坡	[10-15)
				凹形直线型黄土坡	[15-20)
				凹形直线型基岩坡	[20-30)
				凹形直线型基岩-黄土坡	[30-40)
				凸形阶梯型黄土坡	[40-50)
				凸形阶梯型基岩坡	[50-60)
				凸形阶梯型基岩-黄土坡	[60-70)

表 1 评价因子及指标评分系统

项目在保证边坡危险性评价质量的前提下，在设计评价方法时，参考机器学习模型并结合层析法形成集识别、评价、判断、验证综合性智慧型评价方法。

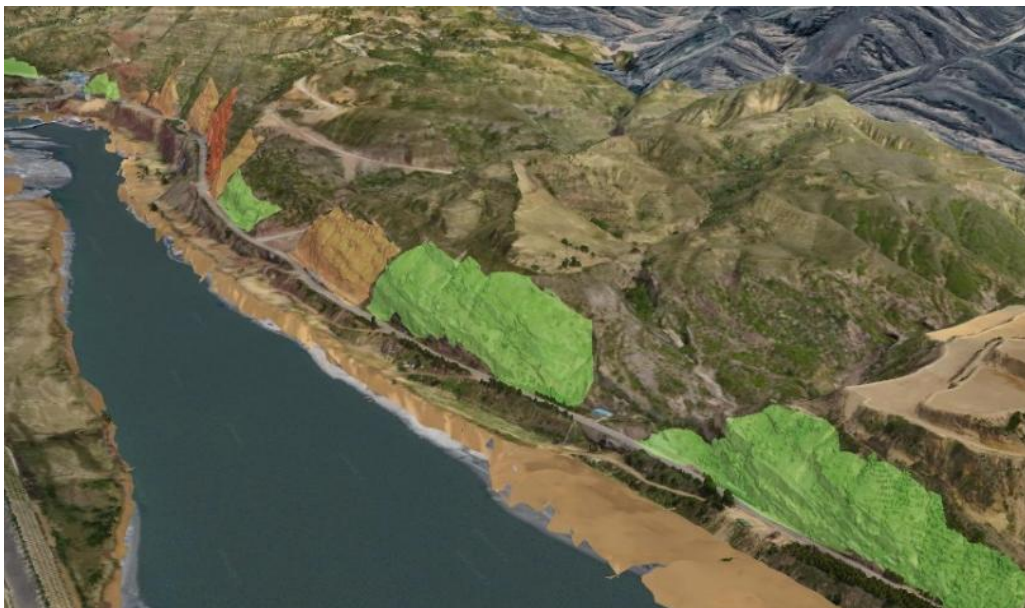


图3 公路边坡风险性评价

针对每个类型进行学习训练，得到符合要求的模型，然后利用该模型对所有边坡进行评价。具体如下：首先利用无人机航摄技术建立三维模型，然后，选择典型边坡，根据评价因子制定评分规则，并尽量制定定量评分方法和评分标准，针对每项因子进行评分并进行危险性分级，据此制作深度学习训练样本。训练的过程中，根据所给的指标和样本数，进行适当的调整。采用 YOLOv 深度学习方法，利用样本库进行学习建模，根据训练样本对所有边坡进行学习训练，并建立综合分级模型，最后，利用模型对所有的边坡进行危险评价。

为验证深度学习评价模型的准确性，选取边坡进行人工评价，对学习的评分结果进行验证评价，主要是结合层次分析法，针对评价因子及评分标准对边坡进行危险评价，与深度学习结果进行对比分析，并逐级进行改进，最终得到优化的模型和算法。

（3）多源异构监测数据融合与预警模型研究

针对危险边坡的精细化监测需求，重点开展监测数据智能融合与预警模型算法研究。具体包括：多源异构监测数据标准化融合技术研

究，针对光纤感测、测斜仪等不同类型的监测设备采集的多源数据，构建分层联动预警模型构建，建立“单设备异常识别—多源融合决策”，开发多源数据融合决策模型，构建耦合边坡危险性评价结果的预警计算模型，研究不同地质条件下各监测指标的模糊隶属度函数，划定蓝、黄、橙、红四级动态预警阈值区间，实现点-面-体立体化分级预警，研发基于多源检测数据融合算法的分级预警模型，形成低成本、可落地的边坡灾害预警技术体系，为监测设备的工程布设、预警阈值设定及后期系统建设提供理论依据与决策支撑。

3. 技术路线（包括研究技术方案和 workflows 两部分。研究技术方案：应清楚表达拟运用的理论和方法，如调查研究，要表述调查的对象、范围、数量和调查材料（数据），取得的方法及手段；室内外试验，要拟定出试验的种类、规模、数量及相应的方案；理论研究与分析，要提出分析依据的理论和拟采用的分析方法，明确有否创新或改进的内容，要做到思路清晰，技术可行，能全面包括研究全过程的各个环节；研究 workflows 反映各项研究工作之间的顺序和相互关系，可用树状框图表达）

3.1 技术方案

（1）基于低空无人机航摄的公路实景三维建模

对依托公路工程进行踏勘调研，分析公路边坡的起伏、高差，弯曲度以及周边环境等信息，利用旋翼无人机挂载三维相机进行航摄，获取高精度高重叠度像片。

检查并分析三维相机的数据，利用 photoscan、ContextCapture

等软件进行初始建模，观察模型表面的拟真程度，对模糊度较高的高陡边坡及坡底部位，将航摄获取的像片数据融入建模过程，使得模糊部位变得清晰，模型精度更高。

（2）基于深度学习的公路边坡三维评价

将利用 AHP 法进行危险评价的斜坡单元进行标准化处理，形成本项目的危险评价样本库，利用 YOLOv 等深度学习技术进行学习建模，利用该模型，将未评价的斜坡单元以及部分已经评价的斜坡单元输入模型，经过模型评价后，得到这些斜坡单元的危险评价结果。

对经过深度学习评价的斜坡单元进行验证分析，首先是已经过评价的斜坡单元进行评价，其次是对新评价的斜坡单元进行检验性评价，利用 AHP 进行危险评价，与深度学习评价结果进行比较，评估深度学习评价结果的有效性。

（3）面向多源监测数据的公路边坡预警技术方案

分层联动诊断：构建递进分析架构——单设备异常识别、同类设备一致性检验、多源融合决策，逐级筛选提取有效异常信息。

动态预警模型：耦合边坡危险性评价结果，建立多源数据融合决策模型与动态预警分值计算方法，划定蓝、黄、橙、红四级预警阈值区间，形成点-面-体立体化分级预警机制。

3.2 工作流程

本项目总体采用外业-内业工作模式，外业主要完成无人机航摄、设备安装调试等工作，内业主要包括三维建模、危险评价，系统开发等工作。

总体技术路线图如下（图 7）：

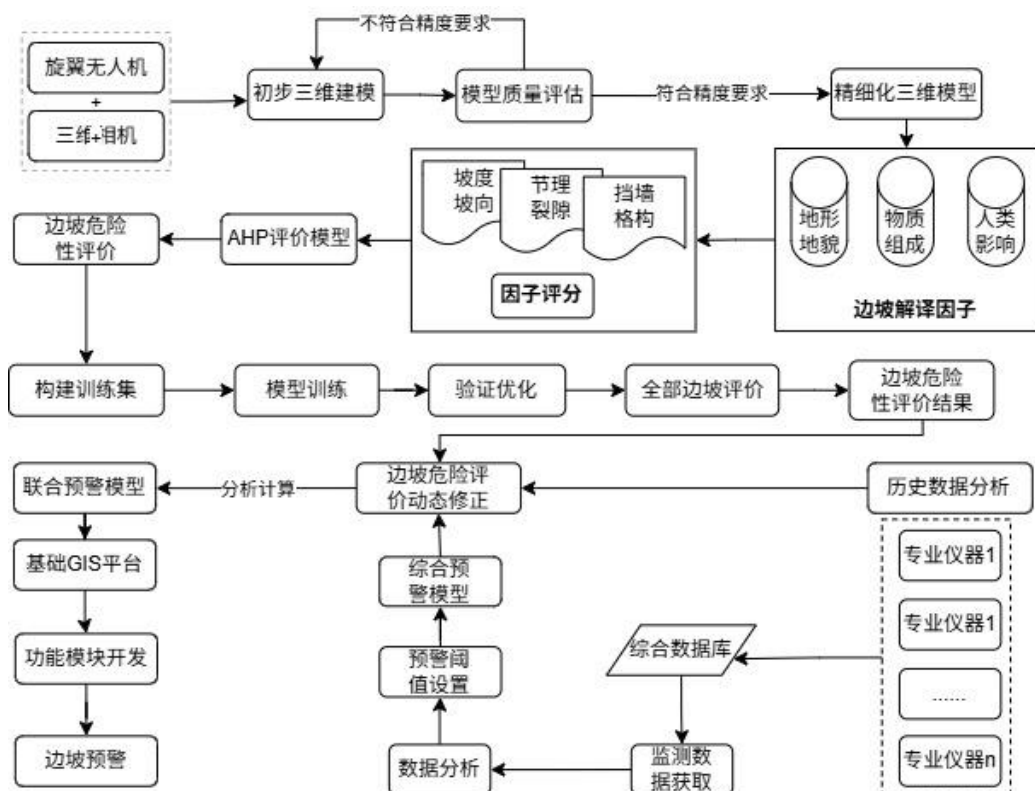


图 7 技术路线

4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接（项目研究的成果提出的技术或理论可供实际对象应用的推测，在一定程度上反映成果的成熟性和市场需求情况）

本项目提出的技术方法和工作流程是一套普适的工作机制，对于无法直接进行人工调查的高速公路边坡或者坡陡路险人力无法到达的边坡提供了解决方案。

项目提出的公路边坡三维建模方法可极为细致地对边坡进行全方位的诊断，能够切实评估危险边坡对公路的威胁程度，对于保障公路畅通，避免人员伤亡和车辆的损失具有现实的应用价值。

公路的三维实景模型不仅能够应用于公路边坡的危险性评估和预警，一旦公路出现事故，公路救援能够有效查明事故地点的环境和

路况，提出妥善的救援方案，本项目提出的技术方法可在未来公路交通管理过程中发挥积极的作用。

5. 有关技术经济指标（叙述项目取得的成果中研究开发的技术、产品具体的技术经济指标（如适用条件、单位耗材、单位造价等）以及性能指标（如技术参数、精度等）。定性描述与定量相结合，以定量为主）

本项目提出了一套公路边坡三维建模和危险评估的技术方法，主要技术经济指标如下：

5.1 三维建模技术经济指标体系

（1）技术指标

数据采集精度：倾斜摄影测量精度可达厘米级，满足边坡变形监测要求。

模型分辨率：三维模型格网分辨率优于 1cm，可清晰识别边坡表面小裂缝、卸荷裂隙、坡面变形及危岩体分布，满足高速公路边坡危险性评价与动态监测需求。

覆盖率：实现边坡表面及关键部位 100%覆盖监测。

（2）经济指标

成本降低率：三维监测技术相比传统人工监测成本大幅度降低。

投资回报率：通过预防性维护显著减少边坡灾害造成的损失。

建模效率：倾斜摄影测量效率是传统测绘的 3-5 倍，有效缩短工期。

运维成本：一次性投资获取公路边坡的全景三维数据，可用于后

期的建模、分析、救援模拟等。

5.2 危险评价技术经济指标体系

（1）技术指标

危险评估精度：采用定量危险评估方法，极大提升危险评估精度。

危险分级准确性：能够准确识别公路危险级别，确保公路畅通和安全。

（2）经济指标

危险治理成本：在精确危险评估后，明确需要治理区域，避免浪费治理资金。

风险降低率：对于治理后的边坡，危险程度大大降低，能够有效保障公路畅通和人员安全。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

长安大学是国家教育部直属并与交通部（现交通运输部）、陕西省人民政府、国土资源部（现自然资源部）、住房和城乡建设部“四部一省”共建的全国重点大学。是国家首批“211 工程”重点建设大学、国家“985 优势学科创新平台”建设高校、国家“双一流”学科建设高校。学校紧密围绕专业特色，构建“大方向、大团队、大平台、大项目、大成果、大贡献”六位一体科技创新体系，取得一系列标志性科研成果。近年来，共承担了包括国家“973”“863”计划、国家重点研发计划、国家自然科学基金重大及重点项目、国家社会科学基金项目、西部交通建设科技项目、国土资源调查项目在内的科研项目 10000 余项，获得包括国家科技进步一等奖在内的国家科技奖励 22 项、省部级奖励 300 余项。

学校科研平台条件完善，现有 3 个国家级实验教学中心、15 个省级实验教学示范中心，2 个国家工程实验室，1 个国际联合实验室，62 个省部级重点研究基地。其中遥感与地理信息工程研究中心、北斗卫星导航系统技术应用交通运输行业研发中心、交通技术设施与管理数字化工程研究中心等多学科交叉的科研平台为本课题提供了良好的科研条件，《基于云平台的低成本高精度 GNSS 滑坡变形动态监测软硬件技术研究》、《先进 InSAR 技术用于中美滑坡关键问题联合研究》等国家级课题为本课题积累了丰富的山区公路边坡监测和预警研发的成果转化经验，并为本课题提供完善的测试环境。

2. 技术力量及人员构成

姓名	单位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
马静	长安大学	女	1983-02-13	副高级	交通工程（安全设施）	进行项目总体规划，主持项目全面工作
徐磊	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1977-09-10	副高级	隧道工程	关键技术负责和现场总体负责
田盟刚	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1977-12-10	副高级	交通工程（安全设施）	关键技术指导
冯玉荣	西安市常宁新区管委会	男	1983-12-21	副高级	道路运输	系统开发
贺欣	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1980-04-18	副高级	交通工程（安全设施）	关键技术指导
路庆昌	长安大学	男	1984-07-08	正高级	交通工程（安全设施）	关键技术指导
王宏宇	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1990-02-08	副高级	隧道工程	实验测试及数据分析
赵宝俊	陕西交控建投经营管理有限公司	男	1980-05-14	正高级	隧道工程	实验测试及数据分析
李政国	中国地质调查局西安中心	男	1979-02-13	副高级	遥感信息	模型建立
夏鹏	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1981-10-02	副高级	隧道工程	数据采集及分析建模
王鹏	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1981-09-20	副高级	道路运输	现场指导及数据采集
李徐阳	陕西交控建投经营管理有限公司	男	1994-10-13	中级	道路运输	现场指导及数据采集
陶涛	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1982-09-02	副高级	交通工程（机电工程）	模型算法开发及改进
任涛	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1990-01-10	中级	交通工程（安全设施）	文献收集
赵治琴	长安大学	女	2003-08-11	学生	电子信息	文献收集
耿尧	长安大学	男	2005-01-26	学生	车辆工程	文献收集
胥瀚	长安大学	男	2004-09-17	学生	交通控制	文献收集

3. 各自承担的主要工作

长安大学技术人员主要负责的是项目的总体规划、模型建立、算法开发；陕西省交通规划设计研究院有限公司主要负责的是项目的现场指导及数据采集、文献收集工作。

4. 项目主要负责人情况

马静，工学博士，博士后，副高，硕导，陕西省综合评标评审专家。主要研究方向为公路边坡灾害监测预警、风险评价及 Ai 大数据分析研究等，发表学术类论文 20 余篇。

2001.9-2005.7：长安大学，信息与计算科学专业，本科；

2005.9-2008.7：长安大学，计算机应用技术，硕士；

2008.9-2010.7：西安市公路勘察设计院，工程师；

2010.9-2014.7：长安大学，交通运输规划与管理，博士；

2014.9-2016.9：长安大学，交通信息工程及控制，博士后；

2016.9-至今：长安大学，电子与控制工程学院。

承担主要科研项目情况：国家自然科学基金青年项目：“高山峡谷区域暴雨泥石流成灾临界阈值研究”（41302224），主要参与人，结题；国家自然科学基金面上项目：“地面三维激光扫描技术（TLS）在滑坡监测与评价中的应用研究”（41372330），主要参与人，结题；陕西省重点研发计划：“基于大数据的地质灾害机理及风险评估关键技术研究与应用”（2019ZDLSF07-07-02），主要参与人，在研。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

1. 依托工程（工作）概况

宝汉高速（G85）宝鸡境内段作为国家高速公路银昆线的核心组成部分，北起陕甘界，南至坪坎镇接宝汉高速汉中段，是陕甘两省互联互通、宝鸡区域经济发展及秦岭山区资源开发的重要便捷通道。该路段的安全运营，对进一步完善陕西省高速公路网布局、改善宝鸡北部能源运输与南部山区出行条件、带动沿线旅游等特色产业发展、保障区域交通动脉畅通具有重要现实意义。鉴于边坡安全是高速公路运

营安全的关键性、控制性因素，直接关系到公路通行安全与人民群众生命财产安全，本项目以宝汉高速（G85）宝鸡境内段为依托工程，系统开展边坡危险评价与监测预警相关研究工作。

该路段穿越黄土梁峁区与秦岭北麓，地质条件复杂多样，修建过程中因大量切坡、桥隧工程施工，形成了众多高陡边坡，加之区域内自然形成的各类边坡，导致整条公路边坡数量庞大、类型多样，且稳定性差异较大。受强降雨（其中 7—8 月为高发期）等自然因素影响，该路段易诱发崩塌、滑坡、落石等地质灾害，其中滑坡主要集中在千阳—陇县黄土梁峁段及宝坪高速秦岭段高边坡区域；崩塌、落石灾害多发于中岩山、天台山隧道群等隧道洞口及路堑高陡边坡，严重威胁公路运营安全。2024 年 7 月 16 日宝鸡地区遭遇特大暴雨，引发宝汉高速宝鸡境内段多起地质灾害，其中中岩山隧道口发生山体滑坡，天台山隧道群出现泥石流并伴随电力中断，隧道内积水倒灌，天台山服务区及岩湾收费站出口均发生滑坡灾害，导致路段多处交通中断，宝鸡通往汉中西南方向的危化品通道受阻，造成重大险情。千阳—陇县段因地处黄土梁峁区、地质环境脆弱，曾多次因暴雨引发边坡灾害，2023 年汛期，千阳段因持续降雨导致多处黄土边坡出现滑塌隐患，2021 年陇县段遭受近七十年来最强降水，沿线边坡发生多起小型滑坡、崩塌，部分路段临时管控，2025 年 10 月，受强降雨影响，千阳境内与宝汉高速相连的周边路段发生大型坡面滑坡，虽未直接影响高速主线，但也反映出该区域边坡地质灾害的高发态势，进一步凸显了宝汉高速千阳段边坡安全管控的紧迫性。边坡稳定性直接决定公路通畅性与运营安全性，因此亟须对该路段边坡开展系统的危险评价工作，科学划分边坡危险级别，对高危险性边坡精准定位并进行针对性安全

处置，对一般危险性边坡实施常态化定期巡查与动态管控，切实保障公路安全稳定运行。

本项目依托先进技术手段获取公路边坡高分辨率基础数据，在重点路段构建边坡高精度三维立体实景模型，在此基础上结合路段地质特征与灾害高发规律，筛选边坡典型评价因子，利用机器学习集成 AHP 评价方法对边坡进行危险性分级评价，同步安装专业化监测设备，融合多类型监测数据，建立精准高效的边坡预警模型，最终实现公路边坡的全方位、全时段监测与及时预警。

2. 投资来源

本项目资金来源为陕西省交通运输厅和长安大学。

3. 工程进度与项目科研进度的配合

宝汉高速（G85）相关路段于 2018 年 9 月正式开工建设，新建里程 149.5 公里，与青兰高速共线 17.1 公里；2021 年 6 月 28 日，该路段通过交工验收，确认具备通车条件，并于 6 月 30 日正式通行；工程后续验收工作有序推进，2024 年 12 月 22 日完成水土保持自主验收，2025 年 1-2 月顺利通过水土保持设施验收，标志着该路段工程建设全面收尾，正式转入常规养护阶段。结合宝汉高速秦岭段（含相关路段）常规养护阶段边坡隐患逐步显现的工程实际，以及山区高速公路养护期科研工作开展的相关研究经验，本项目科研工作精准契合工程养护需求，于 2026 年立项，实现科研与工程常规养护阶段的紧密衔接、同频发力。

本项目科研工作于 2026 年正式实施，精准契合该路段工程进度节点，与常规养护阶段工作紧密联动、双向赋能，切实体现科研服务工程实际、工程支撑科研落地的核心原则，助力提升公路养护智能化

水平。科研工作启动时，该路段已全面转入常规养护阶段，各类自然边坡与人工边坡经过近 4 年运营考验，受雨水冲刷、岩体风化及运营扰动等因素影响，地质灾害隐患已初露端倪，正是开展边坡危险评估、优化养护方案的关键时期，这与边坡监测技术研究中“养护期为隐患排查与危险评估最佳阶段”的结论高度契合。科研工作启动后，聚焦常规养护阶段的核心需求，同步对接路段养护部门，依托现有常规监测体系，结合无人机倾斜摄影、GNSS 监测等先进技术，系统开展公路沿线边坡地质灾害分布调查、危险分级评价等核心研究；同时，结合依托养护过程中的边坡监测数据、隐患处置案例，完善边坡危险评价模型与预警方法，确保科研成果贴合工程养护实际、具备可落地性。整个过程中，科研工作既针对性解决常规养护阶段边坡安全管控的痛点难点，为养护部门开展边坡整治、加固及常态化监测提供科学技术支撑，降低养护成本、提升养护效率，又依托工程养护实践优化科研思路，丰富山区高速公路养护期边坡危险管控的科研成果，对保障宝汉高速该路段通行畅通、延长公路使用寿命、促进区域经济高质量发展具有重要意义。

4. 组织管理形式

为确保项目高效推进、科研与工程协同落地，建立“三级管理、分工协作、全程管控”的组织管理体系，具体如下：

领导小组

组成人员：陕西省交通运输厅相关业务处室联络人、长安大学科研管理部门负责人、陕西省交通规划设计研究院有限公司科研主管、依托工程项目经理。

主要职责：统筹协调项目总体推进，监督资金使用计划；解决科

研与工程衔接中的问题（如试验段调整、资源调配等）；定期召开项目推进会，监督项目进度与成果质量；负责项目验收组织协调工作。

技术工作组

主要职责：

科研方面：制定详细科研实施方案与试验计划，开展试验测试构建数学模型，编制技术指引；定期召开技术研讨会，解决科研过程中的技术难题；负责学术论文、专利等知识产权申报。

工程方面：监督指导现场试验段施工；监督施工过程中科研要求的落实，采集工程现场数据；反馈工程应用中的技术问题协助科研方案优化。

协同工作：每月召开科研与工程对接会，更新进度、共享数据；建立技术文档共享平台，确保科研数据与工程资料的实时互通。

执行保障组

组成人员：长安大学实验室管理人员、陕西省交通规划设计研究院有限公司科研人员、依托工程施工班组、财务管理人员。

主要职责：

试验保障：负责实验室设备调试（如无人机调试）、维护与试验耗材采购，协助开展室内试验；承担现场试验航摄工作（制订计划，路线设计等）。

施工保障：按照技术工作组要求，完成试验段无人机航摄及相关工作。

资金与后勤保障：严格执行经费预算，负责资金支付与核算；协

调科研团队驻场期间的后勤保障，确保工作顺利开展。

监督评估机制

建立“月度进度核查+季度成果评估+年度综合考核”的监督机制；领导小组每月核查项目进度，季度组织专家对科研成果（试验数据、模型构）与工程应用效果进行评估，年度开展综合考核，及时发现并解决推进中的问题。

六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科 目	估算数	科 目	总经费	厅补经费	其他经费
省交通运输厅补助	19.98	合 计	39.96	19.98	19.98
工程配套研究经费	0	1.设备费			
单位自筹	19.98	（1）购置设备费			
其他经费	0	（2）设备改造与租赁费			
		2.业务费	20	10	10
		（1）材料费	9.96	4.98	4.98
		（2）测试化验实验加工费			
		（3）燃料动力费			
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	6	3	3
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	4	2	2
		（6）其他费用			
		3.劳务费	8	4	4
		（1）专家咨询费			
		（2）聘用人员劳务费	8	4	4
		（3）其他劳务费			
		（二）间接费用			
		4.管理费	5	2.5	2.5
		5.绩效支出	7	3.5	3.5

七、项目绩效指标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1、专利授权数（项）	
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	
		（3）外观设计	
		2、软件著作权授权数（项）	
		3、发表论文（篇）	1
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其它	1
		4、著作（部）	
		5、制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	
	其他成果	1、填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	
		2、获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3、其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	
		(1) 小试	是/否
		(2) 中试（样品样机）	是/否
		(3) 小批量	是/否
		(4) 规模化生产	是/否
	人才引育	1、引进高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		2、培养高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4、是否设立科研助理岗位	是/否
	产业化情况	1、开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2、科研仪器设备利用率（%）	
		3、孵化科技型企业（个）	
		4、转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1、新增产值（万元）	
		2、新增销售（万元）	
		3、新增出口创汇（万美元）	
		4、新增利润（万元）	
	社会效益	1、新增税收（万元）	
		2、新增就业人数	
		3、就业培训（人次）	
		4、带动农民增收（万元）	
		5、培训和指导科技服务（人次）	
		6、新增产业带动情况	
		7、技术集成示范（项）	
		8、建立示范基地（亩数）	
		9、节约资源能源	
		10、环保效益	
其他需要说明的情况			

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

1.项目预期目标（项目的考核目标）

本项目的开展，旨在规范建立公路边坡灾前评估体系，降低公路全周期建管养安全成本，提高公路全周期建管养管理水平。具体而言，本项目的开展可以有效解决公路全周期建管养过程中的以下多方面的实际需求，具有重要的现实意义。项目研究已经达成总体目标如下：

- （1）建立公路边坡三维实景模型；
- （2）建立公路边坡危险性评价指标体系；
- （3）建立公路边坡智慧监测预警模型；

2.提交的研究成果及其形式

- （1）公路边坡实景三维模型 1 套；
- （2）公路边坡危险性评价体系 1 套；
- （3）多源数据融合公路边坡监测预警模型 1 套；
- （4）编制《公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究》研究报告 1 份；
- （5）发表期刊论文 1-2 篇；

3.经济、社会、环境效益分析

本项目以宝汉高速（G85）宝鸡境内段高速公路边坡为研究对象，该路段穿越黄土梁峁区与秦岭北麓，以黄土边坡为主，兼具自然形成的高陡边坡与公路修建过程中切坡工程形成的人工边坡，边坡数量庞大、类型多样，虽分布范围、规模大小及对公路的威胁程度存在差异，但均需重点管控，以防范地质灾害发生、保障公路安全运营。

项目采用无人机倾斜摄影获取公路边坡高精度数据并构建三维

实景模型，建立针对该路段边坡的深度学习危险性评价模型及算法，开发自动化监测预警系统。该系统具备经济、实时、自动、高效的核心特点，可有效改变现有边坡监测系统自动化程度低、设备投入成本高、运维费用高、不利于在高速公路系统中大规模推广的局面，实现短时高效的边坡管控目标。本项目针对宝汉高速宝鸡境内段边坡数量多、监测范围广的特点，可高效开展公路边坡地质灾害调查及高危险性边坡危险评估；针对该路段新建切坡多、易受人类活动及极端天气影响的特性，可精准评估边坡地质灾害危险级别，及时捕捉灾害前兆，建立科学的地质灾害预警模型，最大限度预防崩塌、滑坡等地质灾害发生。

通过本项目的研究，可对宝汉高速宝鸡境内段及周边黄土梁峁区、秦岭北麓公路沿线地质灾害危险源进行精准识别、科学评价与分级，制定针对性监测方案，重点管控高危险性边坡，为政府交通、自然资源等相关部门开展边坡整治、加固工程提供精准技术支撑，有效避免地质灾害对交通基础设施造成的损毁，减少人员伤亡及财产损失。项目实施后，可使宝汉高速宝鸡境内段边坡灾害发生率明显降低，每年减少大量直接经济损失，间接减少因交通中断造成的物流、客运损失；同时，可大幅降低人工巡查及应急抢险成本，预计每年节省运维费用200-300万元，经济效益显著。

在社会效益方面，项目实施可有效保障宝汉高速宝鸡境内段交通动脉畅通，提升区域交通通行安全性，保障陕甘两省互联互通及区域资源运输顺畅；为沿线群众出行提供安全保障，降低地质灾害对周边群众生命财产的威胁，助力区域经济社会稳定发展。此外，项目研究成果可在全国范围内，尤其是黄土高原、秦岭山区等同类地质条件的

高速公路中推广应用，潜在用户涵盖各地高速公路运营管理部门、地质灾害防治机构等，市场前景广阔，能够进一步扩大成果应用价值，推动我国山区高速公路边坡管控技术升级。

在环境效益方面，项目的实施可极大保护宝汉高速沿线自然地理环境，通过科学的边坡危险评估及工程治理优化建议，避免盲目加固施工对周边生态环境的破坏；同时，对不稳定边坡进行精准整治，可有效防止水土流失、山体滑坡等生态问题，使公路边坡与周边自然景观相融合，美化公路通行环境，实现“安全防护+生态美化”的双重目标，推动公路建设与生态环境保护协同发展。

九、其它需要说明的问题

无。

十、申请单位意见

我单位同意申报本项目，项目依托宝汉高速（G85）宝鸡境内段开展边坡风险评价与监测预警研究。

宝汉高速（G85）宝鸡境内段是国家高速公路银昆线的核心组成部分，北起陕甘界，南至坪坎镇，是陕甘两省互联互通、宝鸡区域经济发展及秦岭山区资源开发的重要便捷通道。该路段的安全运营，对于优化陕西省高速公路网络布局、改善区域交通出行条件、促进沿线产业经济发展、保障国家交通主干线畅通具有重要战略意义。开展该路段边坡风险评价与监测预警研究，具备显著的工程实践价值与应用前景。

本单位作为项目申报单位，将全力保障项目实施：一是明确以宝汉高速（G85）宝鸡境内段为依托工程，确保研究工作紧密结合实际需求；二是严格落实项目配套经费，保障研究经费足额到位；三是统筹协调内部资源，为项目研究提供必要的的数据支持与现场工作条件；四是建立健全项目管理机制，确保项目按期保质完成。

长安大学（公章）

单位负责人：陈建（签字）

科研项目专用章
2026年3月30日

本单位同意申报《公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究》项目。项目依托工程为宝汉高速（G85）宝鸡境内段，该工程作为国家高速公路银昆线的重要组成部分，对完善区域高速公路网络、保障交通运营安全和促进地方经济发展具有重要意义，项目研究具有较强的现实需求与工程应用价值。

本单位主要负责依托工程的落实与现场保障，将积极协调项目所需的工程资料、现场条件及运营管理相关资源，为项目现场调研、数据采集、设备布设及试验验证等工作提供支持，全力配合项目顺利实施。本单位承诺履行相关职责，对项目依托工程保障及相关工作负责。

陕西省交通规划设计研究院有限公司（公章）

单位负责人：徐磊（签字）

年 月 日

公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究

大纲评审意见

2026年3月20日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究”（项目编号：25-30X）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容全面，研究目标较为明确，技术路线基本可行。

二、项目研究人员组成较为合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，经费预算符合规定，具备开展研究工作的条件。

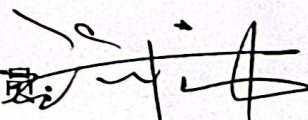
三、预期成果基本覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架基本契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

- 1.进一步明确考核指标。
- 2.聚焦项目研究内容。
- 3.进一步优化技术路线。

主任委员



2026年3月20日

专家审查意见表

项目名称	公路边坡危险性评价与智慧检测预警研究				
专家姓名	站勃	职务/职称	正高工	专 业	交通工程
专家单位	中交第一公路勘察设计院有限公司			联系电话	13991927998

评 审 意 见

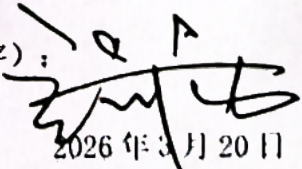
一、课题立项需求翔实，前期工作支撑条件较好，研究内容基本齐全、关键技术路线合理可行。

二、公路边坡危险性评价内容已经有前期的大量工作，进行了综合分类、监测，本课题的研究重点可与之做区分说明。

三、无人机摄影取得的照片的精度、可信度如何，植被覆盖问题如何解决？北斗系统的应用可做一些考虑，

四、技术经济指标再细化、优化：依托项目和试验验证样本区段再丰富，

五、在监测预警方面在补充、量化，如阈值设置等，

评审专家（签字）：

2026年3月20日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究				
专家姓名	刘柳	职务/职称	高工	专 业	岩土工程
专家单位	西安公路研究院			联系电话	18621387951

评审意见

研究内容进一步聚焦

公路边坡危险性评价的依据不够充分
输入输出边界不清

AI深度学习与耦合创造性需论证

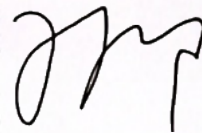
材料库、评价因子体系和数据值确定机制

是当前材料中的薄弱环节

量化考核指标体系验证方案还需

进一步细化

评审专家(签字):



2020年3月21日

(本意见入档, 应填写工整, 纸面不敷, 可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	公路边坡危险性评价与智慧检测预警研究				
专家姓名	顾明臣	职务/职称	正高	专 业	交通信息化工程
专家单位	交通运输部规划研究院			联系电话	13910897715

评 审 意 见

1. 大纲总体方案合理、可行，同意按照此大纲推进相关研究工作。
2. 基于深度学习和层次分析法耦合的智慧型公路边坡风险评价技术方法的适用条件、制约因素、数据获得条件进行分析。
3. 建议进一步优化选择依托工程路段。

评审专家（签字）：

顾明臣

2026年3月20日

（本意见入档，应填写工整，纸面不散，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	25-30X 公路边坡危险性评价与智慧检测预警研究				
专家姓名	季锦章	职务/职称	专业总工/研高	专 业	智能交通
专家单位	华设设计集团股份有限公司			联系电话	13601465599

评 审 意 见

- 1、 因为气候变化，陕西省公路边坡危害性风险激增，课题研究方向很好，但工作大纲中没有对公路边坡危险性评价的方法进行阐述，是不是要对边坡按地质条件进行分类？是否要分析什么样的条件下边坡会产生什么样的危害？危害过程的演变规律是什么？大工作大纲中要有明确的思路。
- 2、 智慧检测预警研究只提了几种传感器，这些传感器各自检测什么样的参数，其结果如何用于预警？
- 3、 网格精度 5cm 太低了，对边坡病害分析的模型精度至少要达到 1cm。
- 4、 要对采购的设备进行描述，是否需要采购无人机，是否需要采购相机，是否需要采购地下、地表监测的传感器？
- 5、 明确基于哪个软件成果申请软件著作权。

评审专家（签字）：

季锦章

2026 年 5 月 20 日

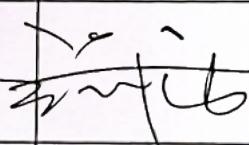
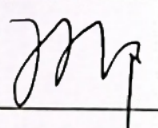
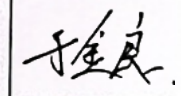
（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究				
专家姓名	于金良	职务/职称		专业	桥隧
专家单位	陕西交控集团			联系电话	13892800150
评 审 意 见 一、建议进一步明确智慧监测的项目指标， 二、明确技术和经济指标，便于考核。 评审专家（签字）：于金良 2026年3月20日 （本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）					

公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究 (项目编号: 25-30X)

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓 名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签 名
1	主任委员	靖勃	中交第一公路勘察 设计研究院有限公司	交通工程	交通工程	正高工	
2	委员	孙楠	西安公路研究院	电子信息	电子信息	正高工	
3	委员	于金良	陕西交控集团	桥梁与隧道 工程	桥梁与隧道 工程	正高工	
4	委员	季锦章	华设集团	无线电与信 息系统	智能交通	研高	线上评审
-	委员	顾明臣	交通运输部规划 研究院	交通信息化 工程	交通信息化 工程	正高工	线上评审

专家意见处理表

项目名称：公路边坡危险性评价与智慧监测预警研究（项目编号： 25-30X ）

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应，详细说明修改情况)
1	靖勃	1. 课题立项需求翔实，前则工作支撑条件较好，研究内容基本齐全、关键技术路线合理可行。 2. 公路边坡危险性评价内容已经有前期的大量工作，进行了综合分类、监测，本课题的研究重点可与之做区分说明。 3. 无人机摄影取得的照片的精度、可信度如何，植被覆盖问题如何解决？北斗系统的应用可做一些考虑。 4. 技术经济指标再细化、优化：依托项目和试验验证样本区段再丰富。 5. 在监测预警方面而在补充、量化，如阈值设置等。	已采纳。 本课题研究重点在于基于实景三维模型模拟专业人员进行野外调查的模式，获取研究区高精度实景模型，在室内能够详细的分析边坡的各危险要素，基于AHP评价模型给出有效可信的危险性评价结果，同时结合深度学习等智能方法，提升该技术方法的应用广度和深度，这都是与之前的危险性评价技术的主要区别。 本课题的研究采用低空无人机航摄，精度可优于1cm，能够仿真地表真实状态。利用黄土高原区植被冬季落叶时机与岩石边坡的裸露特性选择航摄时间和公路区段来避免植被的影响。 技术指标已经细化和优化，增加精度指标与可评价经济指标。 监测预警技术方法补充了可量化的阈值标准。
2	孙楠	1. 研究内容进一步聚焦。 2. YOLO 用于边坡风险评价的依据不够充分。 3. 输入输出边界不清。 4. AHP 与深度学习的耦合创新性需论证。 5. 样本库、评价因子体系和阈值确定机制是当前材料的薄弱环节。 6. 量化考核指标与示范验证方案还需进一步细化。	已采纳。 已进一步修改研究内容，聚焦于评价和预警技术方法。 YOLO 方法已经有益于平面滑坡数据集的应用，其评价方法是可行的。 AHP 方法主要提供了可信的、可操作的边坡危险性评价方法，其建立样本数据集可验证数据集，深度学习在训练样本集的基础上，验证方法的有效性与精度，其耦合应用是可行的。

3	于金良	1. 建议进一步明确智慧检测的项目、指标。 2. 明确技术和经济指标，便于考核。	已采纳。 公路边坡的智能检测项目与指标已经进一步说明。技术和经济指标已经进行细化和量化。
4	季锦章	1. 因为气候变化，陕西省公路边坡危害性风险激增，课题研究方向很好，但工作大纲中没有对公路边坡危险性评价的方法进行阐述，是不是要对边坡按地质条件进行分类？是否要分析什么样的条件下边坡会产生什么样的危害？危害过程的演变规律是什么？大工作大纲中要有明确的思路。 2. 智慧检测预警研究只提了几种传感器，这些传感器各自检测什么样的参数，其结果如何用于预警？ 3. 网格精度 5cm 太低了，对边坡病害分析的模型精度至少要达到 1cm。 4. 要对采购的设备进行描述，是否需要采购无人机，是否需要采购相机，是否需要采购地下、地表监测的传感器？ 5. 明确基于哪个软件成果申请软件著作权。	已采纳。 补充了公路边坡评价方法的阐述，地质条件分类及产生的灾害类型。本研究仅就已经存在的边坡危害进行评价，其演变规律是一个更为广泛的研究课题，本研究重点不在这个方向，后续研究会深化这里。 智慧监测需要安装部分仪器，依托工程已经安装了相关的仪器，受限于项目资金的有限，本研究仅补充必要的部分仪器，主要监测边坡土体岩体的移动、含水特征等信息，用于预警的要素信息输入。 航摄精度已经修改为优于 1cm。 不需要采购无人机和相机，需要采购简单的传感设备。 基于本项目评价的技术方法形成软著成果。
5	顾明臣	1. 大纲总体方案合理、可行，同意按照此大纲推进相关研究工作。 2. 基于深度学习和层次分析法耦合的智慧型公路边坡风险评价技术方法的适用条件、制约因素、数据获得条件进行分析。 3. 建议进一步优化选择依托工程路段。	已经就深度学习和层次分析法耦合的智慧型公路边坡风险评价技术方法的适用条件、制约因素、数据获得条件进行分析，如上述几位专家的意见，公路边坡危险性评价的基础条件，创新特点、与深度学习的结合模式都做了说明。 选择的依托工程包含黄土高原和秦岭两类区域，能够有效支持本项目的逐步推进。

大纲评审委员会专家（签字）： 于金良

项目负责人（签字）： 马静