

项目合同编号：25-45K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

项目负责人：战昂

通讯邮编、地址：710075、陕西省西安市雁塔区科技四路 205 号

传真、电话：029-88853000

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) 基于机器视觉的公路边坡空间位移监测算法研究

空间位移是边坡监测的重点指标，本项目采取机器视觉对边坡空间位移进行实时监测，融合多场景智能视觉监测技术与大数据分析处理技术，相机标定及特征点提取算法研究、路域暗光环境下图像增强算法研究、雨雾等恶劣场景下图像复原算法研究、边坡监测多源大数据采集与预处理技术研究等内容，在提升机器视觉测量精度和稳定性及多场景适配性的基础上，构建大数据分析平台，实现空间分析与可视化展示，实现对边坡空间位移的实时高精度监测及变形趋势精准预判，研发智能视觉监测软件模块、预留定制化部署接口，适配不同边坡场景的监测需求

(2) 边坡突发灾害检测算法及临灾预警联动技术研究

针对边坡突发灾害，基于深度学习框架优化突发灾害检测算法，实现对该类事件的检测与识别，融合临灾预警模型构建与联动响应机制设计，结合位移监测结果、大数据分析的变形趋势预判结果及历史灾害数据，综合构建多级临灾预警模型，通过交叉验证、回测等方法优化模型性能，研发独立的大数据分析平台模块与临灾预警联动系统模块；在提升报警准确率的基础上，完善与路侧预警设备的联动机制，设计涵盖预警信息发布、应急资源调度、救援行动指导的全链条联动响应体系，通过路侧情报板、声光报警器、系统平台等多渠道发布预警信息，预留应急资源调度系统接口，结合灾害

现场数据为救援行动提供基础指导，在典型边坡区域开展系统实地测试，验证系统稳定性与实用性，根据测试反馈持续调整优化系统性能，实现从“单一路侧预警”到“多主体、全链条、一体化”预警联动的升级，避免灾害损失进一步扩大，确保道路运营安全。

2. 技术关键

（1）亚像素级角点检测的相机标定算法实现

根据相关标准，公路边坡位移的预警条件一般设置为持续 3~7 天发生变形，变形速率达 3~5mm/d，再结合现有常规自动化监测手段如 GNSS、无人机扫描等，监测精度约为 2 mm。因此结合常规相机设备参数，须在相机标定时实现亚像素级角点的检测。

（2）保留小尺度目标特征的暗光图像增强算法研发

项目通过监测分布于边坡上标靶的位移情况来反映边坡整体的变形，在采集图像中，标靶相对于整个边坡属于小尺度目标，现有的暗光图像增强算法在执行过程中，会造成因避免梯度消失而导致特征弱化的现象，容易将标靶特征掩盖或丢失，造成无法测量位移的情况，因此需在现有的暗光增强算法基础上进行改进，以保留小尺度目标特征。

（3）雾浓度分布不均情况下图像去雾算法研发

边坡一般分布范围较大，在一个边坡范围内，容易发生雾气浓度分布不均匀的情况，现有的图像去雾算法在进行卷积运算过程中，易导致全局结构信息丢失，此外由于卷积神经网络滤波器是空间不变的，导致现有去雾算法在面对真实有雾场景时，去雾效果不佳。

因此，须采用基于 Transformer+CNN 融合的算法，以提升算法在非均匀有雾图像的结构和纹理重建效果。

（4）雨量自适应的图像去雨算法研发

实际下雨场景中的雨量、方向、密度均会发生变化，卷积型的算法在处理这类问题时难以对全局特征进行有效提取，造成最终的算法在不同雨量的情况下去雨效果不尽如人意。因此，需要研发能够自适应于不同雨量情况下的图像区域算法。

（5）基于边缘计算的边坡临灾预警联动技术

在突发灾害时，监测系统要能够立即识别并同时与路侧预警装置进行联动，因此需要配备边缘计算设备以实现灾害现场的同步识别，同时能够将报警信息发送至路侧情报板并对声光报警装置进行驱动，以提示过往车辆，避免灾害损失的进一步扩大。

3. 依托工程（依托工作）

本项目依托于 G70 福银高速西安至陕鄂界段（蓝田县席家河至商州区林岔河段）K1602+200~+400 下行路堑边坡，该边坡为 4 级路堑高边坡，一级边坡坡脚设置挡墙，挡墙外露高度 5.5~6m。

该区段地层由老至新主要有：下元古界变质岩系(Pt)，主要有千枚岩(粉砂质板岩)夹变砂岩，分布在土层之下、岩石风化强烈节理、裂隙较发育，多呈碎裂状、角砾状、楔形块状等：硅质岩、砂质大理岩夹层，分布于千枚岩中，岩石呈灰白色，较破碎，岩芯呈碎块、短柱状，第四系全更新统坡积层，松散堆积物(Q4)，以坡洪积形成的碎石土、粉质黏土为主(Q4pl+dl)主要分布于宽缓的斜坡及坡脚地

带。另外，可见少量人工堆积的块石、碎石等。根据工程地质调绘及钻孔揭示资料，边坡区在勘探深度范围内上覆地层主要为第四系全新统残坡积层粉质黏土、碎石，下伏下元古界变质岩系(Pt)全-强风化千枚岩,局部夹有薄层的硅质大理岩。

本项目拟在该边坡开展相关的工程验证试验，包括：

(1) 多场景数据采集：在不同监测距离、光照条件、气象等场景下，采集标靶图像、边坡位移监测数据，构建算法训练与验证数据集；

(2) 算法实地验证：测试亚像素级角点检测、暗光图像增强、雨雾图像复原等算法的实际适配效果，确保位移测量精度、标靶识别准确率等技术指标达标；

(3) 预警联动实践：进行路侧预警设备（情报板、声光报警器）与监测系统等的联动测试，验证边缘计算驱动的秒级预警响应机制。

二、考核指标

1.预期目标

针对目前边坡监测存在实施费用及后期维护费用高，突发灾害难以预警、复杂环境下监测精度不足等问题，拟基于机器视觉技术，采用高清摄像头等多手段采集数据并开展预处理，开展公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究，融合大数据分析处理技术与多级临灾预警模型构建，通过对亚像素边缘角点提取、暗光图像增强、雨雾场景下图像复原等核心算法的研发，构建基于云计算的大数据分析平台并集成地理信息系统，实现对边坡空间位移的实时高精度监测及变形趋势精准预判；结合深度学习、大数据分析结果及历史灾害数据构建多级临灾预警模型，通过交叉验证、回测等方法优化模型性能，并建立涵盖预警信息发布、应急资源调度、救援行动指导的全链条联动机制，研发由智能视觉监测、大数据分析平台、临灾预警联动系统组成的成套软件系统，提供训练好的边坡灾害识别模型及临灾预警模型，支持定制化部署，实现边坡的低成本轻量化监测，在灾害发生时实现预警信息快速传达至相关人员，并对运行车辆、应急处置进行双重指导，避免损失进一步扩大，推动公路高风险边坡的“全时、全域、全链条”监测，确保公路运营安全。

2. 主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

主要技术指标：

(1)提出基于机器视觉的公路边坡空间位移监测高精度算法以

适应不同距离位移测量精度要求（50 m 以内 ≤ 1.5 mm、50~100 m ≤ 2 mm、100~150 m ≤ 3 mm、150~200 m ≤ 4 mm）。

（2）基于研发的暗光图像增强算法及去雨雾算法，提升靶标识别准确率及位移跟踪的稳定性，标靶检测召回率：正常环境 $\geq 98\%$ ，复杂环境 $\geq 95\%$ ，标靶 ID 识别准确率：正常环境 $\geq 95\%$ ，复杂环境 $\geq 90\%$ ，跟踪丢失率：正常环境 $\leq 1\%$ ，复杂环境 $\leq 3\%$ 。

（3）突发灾害时应急联动响应时间 ≤ 5 秒。

主要经济指标：

构建基于机器视觉的边坡轻量化监测及临灾预警联动系统，单套边坡监测综合成本控制在 10 万元以内。

3.经济和社会效益

（1）经济效益

①边坡直接监测成本的降低

按照常规边坡监测方法，一个边坡监测的实施成本约 30~60 万元，实施周期在 1 个月左右，根据本项目技术方案，一个边坡的位移监测成本可控制在 10 万元以内，实施周期可控制在 1 周以内。

②临灾预警联动带来的间接效益

本项目可在边坡突发灾害发生的第一时间与路侧预警设备进行联动，对过往车辆进行及时预警，避免灾害损失的进一步扩大，最大限度的降低对生命财产造成的损失。

③后期维护成本的降低

本项目基于机器视觉对边坡位移进行全天候监测，所需的主要

硬件设备为相机以及在边坡上设置的永久性标靶，在供电、网络、数据集成、辅材等方面相比传统监测方式更为简单，后期维护所需的人员成本和设备成本可减少 50%以上。

④市场潜力巨大

我国已建成公路 540 多万公里，其中包含巨量的高风险边坡，随着社会对于交通安全风险监测的不断重视，低成本的轻量化监测技术具有广阔的应用前景和市场潜力，有望带来显著的经济效益增长。

(2) 社会效益

①提升公路基础设施运营安全性

边坡作为公路基础设施中的重要结构物，一直以来是公路运营安全风险的高发点，本项目针对公路边坡实现全天候的实时监测及预警，并可在突发灾害发生时与路侧预警设备进行联动，大幅提升了公路运营的安全性。

②推动公路边坡监测的全面覆盖

本项目在满足边坡位移监测需求的同时，综合成本降低 50%以上，能够在一定程度上缓解养护需求与养护资金短缺之间的矛盾，有助于推动边坡安全监测在行业内的全面推广和落地实施。

4.成果提供形式

(1) 研究报告：《公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究》报告 1 本；

(2) 专利或软件著作权：申报专利或软件著作权 2 项；

(3) 论文：发表（含录用）核心及以上论文 1 篇；

(4) 基于机器视觉的公路边坡轻量化监测及临灾预警联动系统
1 套。

4. 其他考核指标

聚焦机器视觉监测、复杂环境图像优化、预警联动技术等核心方向，通过平台、媒体宣传报道不少于 3 次，技术交流不少于 1 次。

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）
2026 年 3 月~ 2026 年 5 月	计划内容：调研、收集、分析与本课题相关的国内外技术资料、各阶段文件资料和研究成果，编写工作大纲。 考核目标：完成前期调研，形成工作大纲。
2026 年 6 月~ 2026 年 8 月	计划内容：开展亚像素级角点检测的相机标定算法研究，以及相关的硬件设备选型，包括相机、监测标靶、边缘计算设备、供电、网络等。 考核目标：形成位移监测算法技术文档与硬件选型方案。
2026 年 9 月~ 2026 年 11 月	计划内容：开展路域暗光环境下图像增强算法研究。 考核目标：形成暗光图像增强算法技术文档。
2026 年 12~ 2027 年 2 月	计划内容：开展雨雾等恶劣场景下图像复原算法研究。 考核目标：形成雨雾图像复原算法技术文档，撰写相关论文 1 篇。
2027 年 3 月~ 2027 年 5 月	计划内容：开展边坡突发灾害检测算法及临灾预警联动技术研究。 考核目标：形成边坡灾害检测算法技术文档，申请专利 1 项。
2027 年 6 月~ 2027 年 8 月	计划内容：公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统开发。 考核目标：申请软件著作权 1 项。
2027 年 9 月~ 2027 年 11 月	计划内容：系统优化，总结项目成果与经验。 考核目标：形成基于机器视觉的公路边坡轻量化监测及临灾预警联动系统 1 套。

2027 年 12~ 2027 年 3 月	计划内容：撰写研究报告，进行结题验收，同时推广技术应用。 考核目标：《公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究》研究报告 1 本。
----------------------------------	---

四、项目经费

项目总经费：80.0 万元
交通运输厅补助：19.97 万元
自筹资金：60.03 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	74.00	17.97
1. 设备费	24.00	4.00
(1) 购置设备费	20.00	2.00
(2) 试制设备费	0.00	0.00
(3) 设备改造与租赁费	4.00	2.00
2. 业务费	36.00	11.97
(4) 材料支出	6.00	2.00
(5) 测试化验实验加工支出	0.00	0.00
(6) 燃料及动力支出	4.00	3.00
(7) 差旅支出	9.60	2.40
(8) 会议支出	5.40	1.60
(9) 国际合作与交流支出	0.00	0.00
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	5.00	0.97
(11) 其他支出	6.00	2.00
3. 劳务费	14.00	2.00
(12) 劳务性支出	6.00	1.00
(13) 咨询专家支出	8.00	1.00
(二) 间接费用	6.00	2.00
4. 管理费	2.00	1.00
5. 绩效支出	4.00	1.00
合 计	6.00	2.00

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
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	1
		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	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	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	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	无		

六、承担单位或研究人员分工

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

中交第一公路勘察设计研究院有限公司（以下简称“中交一公院”），始建于 1952 年，是国家大型工程勘察、设计、研究、咨询、监理骨干企业之一，是交通系统最早获得“中国勘察设计单位综合实力百强”称号的企业，是拥有丰富土木工程经验的国际化工程咨询公司。先后被授予“全国创新型试点企业”、“国家火炬计划重点高新企业”，荣获“全国交通建设科技进步先进集体”、“全国勘察设计行业创新型优秀企业”等称号。70 多年来，累计承担各类纵横向科技开发和技术服务项目 400 余项，其中省部级以上重大、重点项目 50 多项。拥有国家博士后科研工作站、国家工程实验室、省部级重点实验室多个高端科技创新平台。共获得省部级以上科学技术和工程技术创新奖励 300 余项，其中国家科技进步奖 8 项，拥有 200 余项专有知识产权。

2003 年专门成立了科技研发开发中心，经过十五年的培育发展，配套建设了占地约 70 亩的科技产业园，形成了较为完善的科研管理运行及科学研究与技术开发体系。经过十余年的发展，2017 年，面对新的产业发展态势，公司对科技创新体系进行调整优化，搭建集科技决策与咨询、职能管理、业务管理、项目执行于一体的科技创新体系，形成了 5+11 的科技创新业务体系，即 5 家专职研发中心（寒区环境与工程研发中心、交通安全与数字技术研发中心、道路工程与防灾减灾技术研发中心、结构智能建造研发中心、桥梁结构与标准化技

术中心)+11 家专业研发机构（公路岩土工程技术研发中心、结构消能与耐久防护技术研发中心、公路绿色智能养护技术研发中心、智慧交通研发中心、海绵城市研发中心、道路钢结构研发中心、隧道与地下工程研发中心、国际技术转移中心、BIM 技术研发与应用中心、城市地下空间与综合管廊设计研究中心、城市与综合交通规划中心）。

科技园区设有研发办公大楼、道路结构与材料实验室、桥隧结构实验大厅、大型步入式环境实验箱、交通安全与智能交通模型实验室、中试基地、综合服务楼以及其它配套设施，总建筑面积 3 多万 m²。拥有交通部公路工程试验检测综合甲级资质和桥隧甲级专项资质，实验厂房建筑面积 7000 多平方米。始终坚持以科技进步为先导，以技术创新支撑和引领企业发展，目前拥有 1 个国家重点实验室、1 个交通部重点实验室，1 个陕西省重点实验室，1 个中国交建重点实验室；1 个交通部研发中心，1 个交通部协同创新平台；1 个陕西省企业技术中心；共建 2 个国家工程实验室。

七十多年来，累计承担了各类纵横向科技研发项目 200 余项，共获得国家科技进步奖 8 项（其中一等奖 3 项），省部级科技进步奖、全国工程技术创新奖等各类科技奖 300 余项，获国际专利、国家专利、计算机软件著作权和注册商标等近 264 余项。承担国家及行业、地方技术标准、规范编制修订项目 82 项，出版专著 20 余部，发表学术论文 1500 余篇。

凭借丰富的工程实践经验与技术实力，我院在现代公路勘测设计技术、长大公路桥隧工程技术、地质勘察与减灾防灾技术、特殊路基

与地基处治技术、桥梁检测、维修改造与加固技术等专业领域取得了丰硕的科技创新成果,拥有寒区多年冻土公路建养技术、桥梁参数化、标准化、智能化设计技术、特殊复杂地下工程建设与运营技术、公路市政交通 BIM 设计成套技术等特色技术,为交通运输行业各类工程建设提供了宝贵的经验。

中交第一公路勘察设计研究院有限公司负责本项目立项申报、工作大纲、调研、编制、统稿、组织评审等所有的具体工作。

项目负责人:

战昂,正高级工程师,长安大学桥梁与隧道工程专业硕士。长期从事桥梁结构监测与预警、桥梁检测与评估以及桥梁维修养护与加固技术方面的研究工作。参与交通运输部行业规范《公路桥梁加固施工技术规范》、《公路钢结构桥梁养护技术规范》编写工作。获得中国公路学会科技进步二等奖 2 项,陕西省科技进步三等奖 1 项,中国交建优秀设计奖 1 项;获得发明专利 6 项,实用新型专利 7 项;在全国核心刊物上发表科研论文 5 篇。

执行负责人:

马明,高级工程师,西南交通大学桥梁与隧道工程专业博士。主要从事既有桥梁评定及加固技术研究、BIM 技术研发应用、人工智能技术研发、公路基础设施数字化养护技术研究、结构健康监测等方向。获省部级奖 5 项,主持和参与国家科技支撑计划、国家自然科学基金、交通运输重大科技项目、陕西省科技攻关等重大科研项目 10 余项;参与编制行业标准 2 部,地方标准 2 部,团体标准 6 部。发表

论文 18 篇(SCI 收录 3 篇, EI 收录 6 篇, 中文核心 9 篇), 专利 6 项, 软件著作权 8 项。

技术负责人:

王晓光, 高级工程师, 长安大学桥梁与隧道工程专业硕士, 目前博士研究生在读。主要从事公路基础设施智能感知、数字化养护管理及相关科研工作。主持或参与完成的数字化养护管理项目 5 项, 主要负责和重点参与结构健康监测项目 20 余项。“王晓光智能检测创新工作室”负责人, 获秦创原、沔东杯科技工作者创新创业大赛三等奖, 中国公路学会交通 BIM 工程创新二等奖以及科学技术二等奖, 入选陕西省科协青年人才托举计划。

技术顾问:

陈团结, 正高级工程师, 长期从事公路养护技术、交通铺面工程技术以及路面新材料研发工作, 在公路养护决策理论、铺面设计理论与方法、绿色铺面技术等领域开展了大量研究工作。主持和参与国家科技支撑计划、交通运输重大科技项目、陕西省科技攻关等重大科研项目 20 余项; 主编地方标准 2 项, 团体标准 2 项, 中国交通建设集团标准 2 项; 荣获省部级科学技术一等奖 1 项, 二等奖 8 项, 三等奖 3 项。在核心期刊及国际学术交流会议发表论文 40 余篇, SCI、EI 检索 5 篇。

项目组其他成员主要为中交一公院数智养护分公司骨干人员, 分别承担了该项目中数据采集、算法研发、系统开发研究与优化等工作。

七、项目参加人员表

项目承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

参与单位（排序）：

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	战昂	198302	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高/部门副总	桥梁与隧道工程	项目负责人（项目整体规划、质量及进度控制）	战昂

主要研究人员

2	马明	198307	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高/部门副总	桥梁工程	执行负责人	马明
3	王晓光	199109	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高/部门总工	桥梁工程	技术负责人	王晓光
4	高林丽	199101	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高	计算机技术	软件研发负责人	高林丽

5	刘祖锋	199511	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中级	桥梁工程	分项负责人	刘祖锋
6	党李涛	199012	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高	桥梁工程	分项负责人	党李涛
7	陈团结	197507	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高/公司 副总工	道路工程（路面）	技术顾问	陈团结
8	陆宏涛	199201	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中级	软件工程	系统研发	陆宏涛
9	辛凌风	199907	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	初级	桥梁工程	预警联动技术研发	辛凌风
10	宫成兵	197410	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高/子公司 董事长	隧道工程	依托工程验证	宫成兵
11	秦洲	197702	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高/子公司 总经理	隧道工程	依托工程验证	秦洲
12	曹海波	198207	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高/部门 主任	道路工程（路面）	去雨雾算法研发	曹海波
13	吴雪	198902	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中级	工商管理	暗光图像增强算法研发	吴雪

14	王孝红	198706	中交第一公路勘察设计院有限公司	副高/部门 副总工	道路工程（路面）	监测设备选型	王孝红
15	李震	199009	中交第一公路勘察设计院有限公司	副高/部门 副总工	道路与铁道工程	监测数据分析及预警	李震

八、信息表

项目合同编号		25-45K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部				
项目名称		公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究										
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		80.00 万元		厅 拨		19.97 万元						
第一 承担 单位	单位名称	中交第一公路勘察设计研究院有限公司										
	所在地	陕西省西安市雁塔区						代码	610113000000			
	通讯地址	西安市雁塔区科技四路 205 号						邮编	710075			
	单位性质	(3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他						代码	3			
参与 单位	序号	单 位 名 称										
	1											
	2											
	3											
项目负责人		姓 名	战昂		性别 (1) 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	13488114858		电子邮箱		370429709@qq.com					
项目联系人		姓名	刘祖锋		性别		男					
		联系电话	18829505237		电子邮箱		2276003158@qq.com					
项目组人数		15	高级	11	中级	3	初级	1	其他	0		
主要研究内容 (100 字以内)		针对边坡监测实施与维护成本高、突发灾害难预警等问题, 依托机器视觉技术, 研发暗光图像增强、雨雾图像复原等算法, 实现边坡空间位移实时监测, 并联动路侧预警设施, 构建低成本轻量化系统, 保障公路运营安全。										
成果属性		A	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		F	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.合同正本一式拾份，甲方单位伍份，承担单位伍份。

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

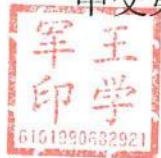
合同甲方：

负责人：（签字）  陕西省交通运输厅

联系人：（签字） （公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：

单位负责人：（签字） 中交第一公路勘察设计研究院有限公司

项目负责人：（签字） （公章）

电 话： 029-88372356

财务负责人：（签字）

账 户 名：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

开户银行：中国农业银行股份有限公司西安科技二路支行

账 号：2612 7101 0400 00725

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书约定，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：战昂

2026年3月23日

项目编号: 25-45K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 公路边坡多场景智能视觉监测及临灾
预警联动系统研究

申请单位: 中交第一公路勘察设计研究院有限公
司 (盖章)

联系人: 刘祖锋

电 话: 18829505237

陕西省交通运输厅制

2026 年 03 月

目录

一、 项目研究的背景和必要性	1
1.1 项目背景	1
1.2 研究目的	3
1.3 项目概括	4
1.4 市场需求前景或推广应用领域	4
1.5 达到的技术水平	6
1.6 在国民经济发展中的作用	6
二、 前期科研及工作基础	7
2.1 国内外研究现状	7
2.2 前期科研及现有工作条件	24
2.3 参考文献	28
三、 实施方案	41
3.1 拟解决的关键问题	41
3.2 主要研究内容及实施方案	43
3.3 技术路线	48
3.4 后续技术改造及计划	56
3.5 技术经济指标	58
四、 项目承担单位及参加单位概况	59
4.1 单位概况	59
4.2 技术力量及人员构成	61
4.3 各自承担的主要工作	62

4.4 项目主要负责人情况	62
五、 项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	64
5.1 依托工程概况	64
5.2 投资来源	66
5.3 工程进度与项目科研进度的配合	66
5.4 组织管理形式	68
六、 项目经费估算及资金筹措情况	69
七、 项目绩效指标	75
八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益	77
8.1 项目预期目标	77
8.2 提交的研究成果及其形式	78
8.3 经济、社会、环境效益分析	78
九、 其它需要说明的问题	80
十、 申请单位意见	81

一、项目研究的背景和必要性

1.1 项目背景

(1) 国家政策背景

近年来，国家密集出台多项政策推动交通基础设施安全监测与智能化转型，为公路边坡安全治理提供了明确的政策导向。2022年《“十四五”交通领域科技创新规划》提出“攻克基础设施服役状态智能感知、实时监测评估、结构无损检测、服役性能提升与延寿等技术，着力突破工程耐久性提升关键技术”及“提升重大基础设施安全风险评估能力和安全防护能力，突破地质灾害监测预警、山地灾害影响、无人区公路灾害监测、铁路沿线安全环境治理、全要素水上区域大交管、城市道路塌陷隐患探测与预警等技术。”；2024年6月，交通运输部印发《关于进一步提升公路防灾抗灾能力的指导意见》(交公路发[2024]76号)，要求到2024年底，完成高速公路视频监测基本全覆盖，完成公路高边坡专业监测200处试点，初步建立公路重大灾害风险防控体系；到2030年底，高风险公路高边坡专业监测布局基本完成，监测预警能力现代化基本实现，建成覆盖全面、运转有序、高效协同的公路行业重大灾害风险防控体系，公路防灾抗灾能力显著提升。2024年8月，交通运输部印发《进一步加强监测预警提升公路防灾抗灾能力的通知》(交办公路函[2024]1538号)，要求以公路安全运行为目标，以高速公路高灾害风险路段为重点，通过科技赋能方式，改善夜间行车条件，稳步提升公路监测预警能力，最大限度减少和避免群死群伤事件发生。2024年9月，交通运输部办公厅印发《全国公

路边坡监测工作实施方案(2024-2030 年)》(交办公路[2024]48 号),要求到 2024 年 12 月底,健全完善公路边坡巡查排查机制,充分发挥路网运行、养护、路政、执法人员主动性和“一路多方”、沿线群众积极性,强化人工巡查排查,并结合现有监测手段,对所有边坡实现群专结合的防控体系全覆盖;到 2025 年 6 月底,印发《公路风险边坡监测技术规范》,形成系列技术研究成果;2027 年 12 月底前,全国公路边坡监测体系基本建成,人防+技防群专相结合的防控体系与公路边坡监测技术标准体系健全完善,监测系统联网平稳运行,实现边坡灾害风险系统管控;到 2030 年 12 月底,部省联网运行的公路边坡监测预警体系全面建立,实现新技术新装备+群专结合的防控体系对所有边坡全覆盖。一系列政策表明,通过智能化、轻量化技术手段构建低成本、高效率的公路边坡监测预警体系,是落实交通强国战略、保障公路运营安全的重要举措。

(2) 公路边坡安全监测现状与挑战

我国已建成公路总里程超 540 多万公里,其中山区公路占比超 40%,广泛分布的公路边坡成为影响道路运营安全的关键风险点。2024 年梅大高速强降雨引发的边坡塌陷事故造成 48 人遇难,凸显了边坡灾害监测预警的紧迫性。当前主流监测手段依赖雨量计、土压力计、深孔位移计、北斗定位等设备,存在以下问题:一是实施与维护成本高,单边坡监测成本达 30-60 万元,难以在全国路网大规模推广;二是突发灾害响应滞后,传统设备对滑坡等瞬时灾害的预警能力不足。同时,现有监测系统多为单一功能设计,缺乏与路侧预警设施的

联动机制，灾害发生时无法及时引导车辆避险，导致损失扩大。

(3) 技术发展趋势与需求

随着机器视觉、深度学习、边缘计算等技术的快速发展，智能化监测已成为交通基础设施安全治理的重要方向。传统接触式监测手段逐渐难以满足“全时、全域、低成本”的监测需求，而机器视觉技术具有非接触式、多点测量、经济性好等优势，在结构位移监测领域的应用日益广泛。但当前基于视觉的边坡监测技术仍存在短板：**空间位移测量精度不足、暗光与雨雾环境下目标特征易丢失、突发灾害识别准确率低**等问题尚未有效解决。因此，研发适配公路边坡多场景的智能视觉监测技术及临灾预警联动系统，实现监测精度、环境适应性与预警时效性的协同提升，成为破解当前边坡安全治理难题的迫切需求。

1.2 研究目的

(1) 解决传统监测技术成本高、推广难的问题

通过机器视觉技术优化与算法创新，构建轻量化监测体系，将单边坡监测成本控制在 10 万元以内，缩短实施周期，打破传统监测技术“高投入、高维护”的局限，为全国路网高风险边坡大规模监测提供经济可行的方案。

(2) 突破复杂环境下监测精度不足的技术瓶颈

研发亚像素级角点检测的相机标定算法，实现边坡空间位移高精度测量；针对暗光环境研发保留小尺度目标特征的图像增强算法，针对雨雾场景研发基于多尺度增强的图像复原算法，确保标靶识别准确率，同时提升位移跟踪的稳定性，满足全时全域监测的精度要求。

(3) 构建突发灾害快速预警联动机制

结合图像识别技术以及突发性标靶大位移,利用边缘计算设备实现灾害现场同步响应,快速联动路侧预警设施向过往车辆发送预警信息,解决传统监测“预警滞后、联动不畅”的问题,最大限度减少灾害造成的人员伤亡与财产损失。

1.3 项目概括

本项目针对目前公路边坡监测存在的实施费用及后期维护费用高、突发灾害难以预警、复杂环境下监测精度不足等问题,基于机器视觉技术,开展公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究。通过对亚像素边缘角点提取、暗光图像增强、雨雾场景下图像复原以及基于时间序列的目标检测等核心算法的研发,实现对边坡空间位移的实时高精度监测,完成边坡突发灾害的快速检测与识别,并建立监测系统与路侧预警设施(情报板、声光报警器等)的联动机制,实现边坡的低成本轻量化监测,在灾害发生的同时对运行车辆进行及时预警,避免损失进一步扩大,推动公路高风险边坡的“全时、全域”监测,确保公路运营安全。

1.4 市场需求前景或推广应用领域

(1) 市场需求前景

① 存量高风险边坡改造需求巨大。

我国山区公路边坡数量众多,仅国省干线及高速公路中需重点监测的高风险边坡就达数百万处,现有传统监测设施存在精度不足、预警能力弱等问题,亟需低成本、高精度的智能化改造方案,市场空间

广阔。

②新建公路配套监测需求持续增长。

随着交通基础设施建设向山区、丘陵地带延伸，新建公路边坡的安全监测已成为工程建设必备环节，本项目研发的轻量化监测系统因成本优势与实用价值，将成为新建公路边坡监测的优选方案，需求持续攀升。

③政策驱动下的行业需求刚性增长。

国家层面密集出台交通基础设施安全监测与数字化转型政策，地方交通运输部门对边坡安全治理的重视程度不断提升，对智能化、低成本监测技术的采购需求逐年增加，为项目成果推广提供了强劲的政策支撑。

(2) 推广应用领域

①公路交通领域。适用于高速公路、国省干线、农村公路等各类公路的土质、岩质边坡，尤其适配山区高风险边坡、深挖路基边坡、降雨频繁区域边坡的常态化监测与应急预警，可覆盖全国路网中需重点防控的边坡场景。

②相关基础设施监测领域。可拓展应用于铁路边坡、矿山边坡、水利枢纽边坡、山区景区道路边坡等相似场景的安全监测，通过算法适配与硬件调整，实现跨领域技术复用，扩大应用范围。

③交通应急管理领域。可纳入地方交通运输应急指挥体系，与路网监测平台、应急处置系统联动，应用于极端天气、地质灾害高发期的边坡安全应急监测，为交通管制、车辆分流、应急救援提供实时数

据支撑。

④智慧交通生态领域。作为智慧公路建设的核心组成部分，可与公路数字化管理平台、数字孪生系统融合，为公路全寿命周期管理提供边坡安全数据支撑，助力智慧交通体系构建与完善。

1.5 达到的技术水平

(1) 多场景监测算法达到国内领先水平。

研发的亚像素级角点检测相机标定算法、小尺度目标特征保留的暗光图像增强算法、雨量自适应与雾浓度不均适配的图像复原算法，在位移测量精度、复杂环境适应性等关键指标上优于现有技术。

(2) 预警联动系统实现技术创新突破。

基于边缘计算与深度学习融合的突发灾害识别联动技术，实现灾害检测、报警、设施联动的快速响应，构建集多场景高精度监测、智能灾害识别、即时预警联动于一体的一体化系统，技术指标达到行业先进水平。

(3) 轻量化监测体系具备大规模工程推广意义。

形成的“硬件简化+算法优化”轻量化监测方案，在成本控制、实施效率、维护便捷性等方面形成核心竞争力，相关技术指标与应用模式可作为大规模工程推广参考，引领公路边坡监测技术发展方向。

1.6 在国民经济发展中的作用

(1) 保障公路运输安全，降低经济损失。

通过全时全域监测与即时预警联动，有效防范边坡灾害引发的交通中断、车辆损毁等事故，每年可减少直接经济损失数十亿元，同时

保障物流运输、旅客出行的畅通安全，支撑交通运输业稳定发展。

（2）降低公路养护成本，提升资产利用效率。

轻量化监测系统大幅降低监测与后期维护成本，缓解公路养护资金短缺的矛盾，同时通过精准监测指导养护，延长边坡使用寿命，提升公路资产的整体运营效益。

（3）推动交通行业数字化转型，助力交通强国建设。

项目成果可为交通基础设施智能化监测提供可复制、可推广的解决方案，加速公路行业从传统养护管理向数字化、智能化管理转型，为交通强国战略落地提供技术支撑。

（4）提升公共安全保障能力，促进社会稳定。

公路边坡灾害直接威胁人民群众生命财产安全，项目的实施可显著提升边坡灾害防控能力，减少人员伤亡，增强公众出行安全感，为社会和谐稳定提供重要保障。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

2.1.1 边坡监测技术研究现状

在众多边坡灾害为人们带来深痛教训后，边坡灾害监测受到广大科研工程人员的重视，监控手段的多样性也逐步发展起来。在研究起步阶段，受当时技术条件限制，通常只能利用宏观地质经验观测法对边坡进行监测，后面逐步出现利用埋桩、埋钉和贴纸片等方式来简单对位移判断的简易观测法。随着电子信息、空间卫星等科学技术的发

展,声发射监测技术、边坡测斜技术、光时域反射监测技术以及 GPS 测量技术、北斗测量技术、合成孔径雷达干涉测量(InSAR)都成功应用于边坡监测^[1]。

① 传统边坡变形监测方法

大地测量法^[2]基于现代光学测量仪器,一般采用的测量仪器分为两类,一类是经纬仪和水准仪等自动化程度较低的基础光学工程测量设备,另一类为全站仪为代表的自动化程度高、精度高、操作简便、监测范围广、监测数据量大、能实现边坡位移等参数快速监测的新型自动化测量设备。这两类设备均能实现边坡位移的监测,适用于各阶段的监测,受光学监测原理限制,在监测通视环境复杂,气象条件较差的区域,监测易受影响,自动化程度不足。

声发射监测法利用灵敏的传感器对边坡破坏过程中产生的弹性波进行监测,弹性波转化成电信号,再对电信号总结和分析,从而达到边坡稳定性监测目的^[3]。声发射监测方法需人工进行安装监测仪器,且监测精度易受波导管影响。

测斜仪监测法^[4]就是在边坡土体内部安装测斜仪,测斜仪在边坡土体发生变化时,测斜仪管会发生位移变化,使得测斜仪管内的传感器的倾角发生变化,实现边坡的监测,需要人工进行现场安装后才能达到远距离监测的目的,成本较高,监测安装较慢,此方法只适用于滑坡变形初期的监测。

光时域反射法(OTDR)是基于光纤中光线在传输过程中发生的散射来进行监测的一种方法^[5],传感光纤布设在边坡之后,当边坡状

态发生变化, 光纤里光线的传输随即也发生变化, 光纤某处在受到边坡外界作用力下, 光的散射特性发生变化, 通过有用信号与光在光纤中传输速度, 分析计算出边坡变形位置。此方法需在边坡现场进行人工布设, 虽布设灵活性较高, 能够大范围的对边坡进行监测, 但不能监测出边坡具体的位移量。

② 卫星定位边坡监测技术

近年来, 全球卫星导航定位(GPS /北斗)技术凭借高精度、全天候优势得到快速发展, 利用 GPS、北斗定位系统和 GLONASS 对边坡进行监测的方法也被更多的人研究应用, GPS 边坡监测易于操作, 不受通视条件影响, 具有较好的发展前景^[6]。Othman Z, Wan Aziz W^[7]等人使用 GPS 和测斜仪相结合的方法对边坡进行监测, 通过监测数据对比分析, 表明 GPS 结合测斜仪监测方法能有效提高监测精度。廖斌, 王洪辉^[8]等人提出了一种基于北斗通信的滑坡监测系统, 该系统可以对边坡裂缝位移、边坡倾角以及降雨量进行监测, 然后通过北斗和监测中心通信, 实现了边坡的远程监测。刘华, 和永军^[9]等人以北斗/GPS 双模监测技术为基础, 提出了一种新的边坡稳定性监测技术, 能够实现边坡的实时监测并进行预警。Li Yuanyao^[10]等人研究了一种基于 Web 的 GPS 监测方法, 用于水库边坡位移监测, 结果表明, 该种监测方法具有精度高、自动化程度高等特点。李治洪^[11]使用 GPS、BDS 和 Glonass 多种卫星系统对边坡监测, 结合多星监测数据进行分析, 有效改善了监测站在大截止高度角状态监测精度不高的情况。通过多星监测, 实时掌握边坡状态情况, 保障了水利设施施工期间的

安全。刘美琦, 吴建光^[12]使用了一种基于北斗的高精度监测技术, 结合北斗、RTK 技术和北斗短报文功能, 实现高速边坡的高精度自动化监测。Zuliani David, Tunini Lavinia^[13]等人提出使用单频 GPS 网络对边坡实行监测的方案, 使用多个单频 GPS 监测站和单个双频 GPS 监测站以及一个地震监测仪组成的监测系统, 对意大利东北部卡尼克阿尔卑斯山的滑坡进行了监测, 该方案具有一定成本优势, 在紧急状态下, 可以用来滑坡监测预警, 有较好的应用前景。

利用全球卫星导航定位技术监测边坡精度较高, 能够全天候监测, 适用于不同阶段边坡变形监测, 但成本相对较高。无论是利用北斗进行边坡监测, 还是 GPS 边坡监测, 虽能达到一次安装, 长时间实时监测的效果, 但是大量公路边坡并未在滑坡之前就安装监测设备, 等边坡发生滑坡时, 再利用卫星定位技术来监测, 安装时间较长, 且安装作业具有一定危险, 所以基于卫星定位技术的边坡监测手段并不能够适用公路滑坡应急监测。

③ 三维激光扫描技术

三维激光扫描是边坡监测中常用的一种非接触式监测技术, 该技术以精度高、安全以及能够快捷监测被人们研究和应用。裴东东, 官云兰^[14]等人使用车载三维激光扫描系统对边坡进行监测, 基于灰色系统理论对边坡监测数据分析, 通过实验发现, 利用车载激光扫描点云数据, 可以达到滑坡监测的目的。Bazarnik Mirosława^[15]使用三维激光扫描技术对露天矿山边坡进行监测, 提供了快速、详细和准确的监测数据, 为安全作业提供了保障。Mat Zam^[16]等人利用大地三维激光

扫描仪对滑坡区进行扫描,获取四种不同分辨率类型的图片,再用软件对这四种类型图片处理分析,结果表明分辨率的不同会影响滑坡监测的精度,只有在高分辨率或者极高分辨率情况下,才适合用于边坡监测。保振永,李学才^[17]等人在边坡布设大量的棱镜点,使用全站仪对边坡进行长时间监测,同时利用地面三维激光扫描对同一边坡监测,通过对比,使用全站仪单点监测精度要比三维激光扫描要高,但通过构建边坡三维模型,监测精度能有效提高。采用三维激光扫描技术对边坡监测能够实现非接触监测,保证人员安全,但是此方法易受边坡植被影响,且监测工序复杂,用于公路边坡监测时可能难以找到合适的监测点。

④ 合成孔径雷达测量技术

随着遥感技术的发展,合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)更多的运用于边坡监测方面,合成孔径雷达干涉测量的原理就是利用合成的虚拟孔径拍摄出的多张不同时间的高分辨率雷达图像,通过比较这些图片相位差,得出在相隔的时间所产生的边坡位移。Fruneau^[18]等人使用合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR),对获得的6副合成孔径图像分析,验证了InSAR边坡小变形监测的适用性。王立伟^[19]利用合成孔径雷达差分干涉测量(D-InSAR)技术,建立了一套高山峡谷区滑坡监测技术,能有效消除地形地貌、卫星数据精度对边坡监测的影响。高斌斌,江利明^[20]等人利用地基InSAR对位于神农架的人工边坡进行监测实验,同时分析降雨与边坡变形的关系,结果表明,降雨与边坡变形存在较大关系,验证了地基InSAR边坡监测的可行

性。Journault J, Macciotta R^[21]等人使用星载 InSAR 对一河谷滑坡进行监测, 并比较了用 GPS 等监测方式所得数据, 所测位移比较接近, 为该区域的滑坡监测提供了新的方案。黄洁慧, 谢谟文^[22]等人基于 PALSAR 影像采用 SBAS-InSAR 技术对白格滑坡进行了滑坡趋势分析, 达到了滑坡监测目的, 证明了 SBAS-InSAR 技术能够用于滑坡动态监测。Mila Atanasova^[23]等人使用软件分析对比了 Sentinel-1 (SAR) 在不同时期对该区域拍摄的干涉图像, 发现干涉图像所得数据与两次事件引起的滑坡区变化情况相同, 证明 InSAR 能够用于地质灾害的监测预警, 但该技术依赖卫星数据, 对短时间突发灾害的响应能力不足。

以上研究表明, 针对边坡的监测手段已经随着技术发展有了长足的进步, 现有手段虽然能够满足边坡监测及预警的需求, 但普遍存在着实施成本高、软硬件体系复杂、现场施工要求高、后期维护复杂且维护成本高等问题, 难以在全国路网范围内进行大规模推广实施。

2.1.2 基于视觉的结构位移监测技术研究现状

随着 5G 大数据时代的到来, 计算机视觉在结构健康监测领域也得到了广泛的应用^{[24][25]}。传统的监测方法通常采用接触式单点测量方式, 存在前期布线困难, 准备工作繁重, 安装不便等不足^[26]。对于某些变形较大、动态监测试验过程会存在接触式传感器本身也随着结构的失效破坏而损坏的隐患, 从而导致监测数据的缺失^[27]。因此, 计算机视觉作为一种具有高精度、非接触式、操作方便、经济性好、多点

测量等优点的测量技术成为土木工程中结构变形监测的有力工具[28][29]。

周颖^[30]等将基于特征点匹配的光流技术应用于结构模型振动台试验中的位移监测,并利用获得的位移数据对结构的动力特性进行了较为准确的识别。周云^[31]等基于数字图像相关算法的亚像素位移测量研究,以毫米级精度实现了结构的位移及挠度测量。杜永峰^[32]等将安防摄像机作为图像采集设备并结合颜色匹配技术开发一种超远距离、实时、长周期的位移监测系统,并将该系统应用在西部某大型航站楼隔震支座的位移监测中。朱前坤^[33]等通过改进 YOLO 算法结合无线传感器实现运营状态下桥梁结构影响线非接触识别。传统单目视觉测量方法无法满足结构面外位移测量需求。而基于双目立体视觉测量技术,可通过将左右两相机所采集到的图像序列进行立体匹配获得视差,从而恢复被测对象的三维信息^[34]。单宝华^[35]等将 DICM 与 ELAS 算法结合,实现双目立体视觉结构全过程三维变形动态监测。Yuan^[36]等将立体视觉与深度学习结合,使用具有物联网数据通信系统的智能检测机器人对经历循环荷载破坏的钢筋混凝土柱进行损伤识别。

Shao^[37]等提出一种用于结构全场三维振动位移测量的先进机器视觉系统,采用基于深度学习的关键点检测和匹配算法实现精确的三维振动位移测量,并通过测量实验室的钢悬臂梁振动位移验证其性能。邱志成^[38]等将机器视觉测量方法应用于柔性板的低频振动中,通过极线校正和 Canny 边缘检测算子进行特征提取,实现机器视觉测量柔性板的振动信息。Khuc^[39]等通过多点位移监测实现一座四跨连续梁桥模

型的影响线分析。Ye^[40]等采用一个相机对一座拱桥进行车辆荷载下的行为监测,得到了其结构位移影响线。Lydon^[41]等采用多个相机对一座钢桁架桥进行多点同步位移监测,并分析测点的响应关系。Celik^[42]等采用视觉位移方法测得结构上荷载的运动情况,并将其作为结构的荷载输入进行结构性能分析。Xu^[43]等利用视觉方法测得的位移对一座人行桥在人群荷载作用下的频率变化进行了分析。Chen^[44]等采用基于相位的全场光流法、傅里叶变换和运动放大技术提取结构的即时模态振型。Yang^[45]等采用盲源分离、运动放大和图像边缘识别技术对基于相位的全场光流进行分析,得到结构的即时模态振型。Tian^[46]等结合加速度传感器和视觉位移测量方法进行结构的冲击试验并构造了结构的频响函数,实现结构的模态、振型、阻尼和模态尺度因子的估计。

结合现有研究现状,基于视觉的结构位移监测技术已经在工程实践中得到了部分应用,但现有应用大多是对平面内位移的监测,机器视觉在结构空间位移监测中的应用尚属少数,尤其是针对边坡整体空间位移这一类较大范围的监测更属少见,相关算法以及如何保证较远距离下的监测精度仍需开展进一步的研究。

2.1.3 暗光环境下图像增强算法研究现状

暗光目标检测是目标检测算法在暗光环境的具体应用。近年来,依靠大规模高质量的数据集,目标检测算法发展取得了巨大成功,但在实际应用场景中,低光和多雾等因素往往会导致图像出现可视度

低、噪声大、伪影等情况，给现有的目标检测方法带来巨大挑战，严重干扰目标检测方法的检测性能。为了提高检测算法在暗光场景的检测性能，常用的做法是在检测算法前面加入图像增强算法，使暗光图像恢复到正常光照效果。

现有低光照图像增强技术可粗略分为基于分布的映射、基于模型优化和基于深度学习的 3 类方法。基于分布的映射方法，指映射暗光输入的分布以放大较小的值，这是解决低光照图像增强的最直观思路。此类方法的两种代表性工作是直方图均衡化和基于 S 型曲线的方法。董^[47]等引入了直方图动态削峰技术和边缘信息融合技术对低光图像进行增强，且模型参数量较小；Fan^[48]等通过直方图约束和调整对比度来控制图像增强结果，增强效果较好；Hong^[49]等利用伽马校正处理 HSV 色彩空间中存在的噪声，进一步降低噪声，提升图像的对比度。但现有的基于分布映射的方法仍然存在颜色失真等现象，严重影响了增强结果的观感。现有的基于 S 型曲线的方法存在着曝光不均匀现象。

基于模型优化的方法 Retinex^[50]理论为增强弱光图像的过程进行了直观的物理描述。将低光图像分解为光照和反射率两部分，在保持反射率一致性的前提下，增加照明亮度以增强图像；Isha^[51]等在此基础上，提出一种新型图像复原技术，构建图像的最小颜色通道和暗通道，融合这两个通道的低通和高通分量，得到增强后的图像，进一步减少了图像细节信息的丢失；Gao^[52]等在反射图像通道中使用传统直方图均衡化并引导滤波器来增强图像的对比度，在光照图像通道中通

过伽马变换进行光补偿，融合这两个通道后得到的目标图噪声较低。但此类方法，如何设计先验正则项是大部分工作的核心，许多模型参数需要根据实际情况进行手动调整，迭代过程较多且相对耗时，不利于实际的应用。

基于深度学习的方法，Lore^[53]等首次提出深度自编码器 LLNet，对低光图像进行自适应增强；Lyu^[54]等提出多分支低光增强网络 MBLEN，进一步学习了低光图像到正常光照图像的映射；Wei^[55]等基于图像分解思想，首次将整个网络划分成分解模块和增强模块，设计全新的 Retinex-Net 网络；Guo^[56]等构建了一个无监督训练网络 Zero-dce，以迭代递进的方式估计输入图像的亮度曲线，从而实现低光图像增强；Zhang^{[57][58]}等提出的 KIND 和 KIND++ 网络通过使用不同曝光程度的图像进行训练，使得到的增强图像具有很好的效果，但 KIND++ 的去噪性能更佳，模型也较 KIND 更复杂。针对分解过程中产生的噪声；Hai^[59]等在 KIND 网络的基础上，提出的 R2R-Net 在分解过程中有效抑制了图片噪声；随后，Wu^[60]等进一步优化了 KIND 网络，提出了 URetinex-Net 模型，实现了分解过程中噪声抑制和细节保留；Zhang^[61]等利用 KIND 模型，设计两个增强网络对反射率进行去噪并增强照明度，将提取的特征重复地交互以合并空间和角度信息，高效同步处理所有视图；Sun^[62]等提出了一种基于 Retinex 理论和注意力机制的分解网络，设计了具有编解码结构的增强块来实现低照度图像增强，改善了增强后图片的色彩饱和度；Jiang^[63]等进一步改进 KIND，每个分支网络都是由 DenseNet^[64]和 U-Net^[65]组合而成的

新网络，进一步减少了图像细节的缺失。此类基于深度学习的方法均取得了不错的效果，但大多数方法在增强过程中没有很好的抑制住噪声，使得增强后的图像出现噪声大，对比度低等问题，不利于图像质量的提升，易导致小尺度目标（如边坡位移标靶）特征弱化，难以满足边坡监测中精准识别需求。

现有暗光环境图像增强技术可分为基于分布映射、模型优化和深度学习三类，各有局限：分布映射法易出现颜色失真、曝光不均，模型优化法需手动调参、迭代耗时，深度学习法虽效果较好，但多数难以有效抑制噪声，易导致增强图像噪声大、对比度低，进而造成边坡小尺度位移标靶等目标特征弱化，无法满足边坡监测精准识别的需求。

2.1.4 恶劣环境下图像复原算法研究现状

图像去雾作为近十几年来计算机视觉领域的热点之一，相关技术获得了长足的进步与发展。目前，图像去雾方法主要包括基于图像增强的去雾算法、基于物理模型的去雾算法和基于神经网络的去雾算法[66~69]。

① 基于图像增强的算法

基于图像增强的去雾算法主要手段是增强图像的对比度，可以从一定程度上改善图像的视觉效果。根据算法操作对象的不同，通常可以分为对整幅图像的全局化图像增强和对局部区域的局部化图像增强。为了实现全局化图像增强，Kim^[70]等提出了一种带有部分重叠的

字块直方图均衡化方法, Stark^[71]则构建了自适应直方图均衡化方法, 都起到了增加图像灰度值范围的作用, 使图像整体的对比度有所提高, 从而实现图像去雾。另一种经典算法 Retinex^[72]通过模拟人眼视觉系统, 达到全局化图像增强的效果, 也广泛应用于图像去雾领域。基于局部方差的图像增强算法则根据图像局部标准方差大小来决定该区域图像的增强程度, 通过拉伸灰度值范围对图像局部对比度进行提升。但由于此类去雾算法均未考虑雾天图像质量退化的本质原因, 而仅采用增强对比度的方法, 因此图像中部分较突出的信息会出现过度增强或质量损失^[73]。

② 基于物理模型的算法

基于物理模型的去雾算法则是从雾霾形成的根本原因出发, 通过建立相应的数学模型, 得到其中的映射关系, 再通过逆运算得到去雾后的图像。该模型的理论基础是著名的米氏大气散射理论, 最早由 McCartney^[74]提出。K He^[75]等人基于此提出了暗通道先验算法 (Dark Channel Prior, DCP) 且在多个领域得到了广泛应用。该算法认为, 在几乎所有的无雾图像中, 若取非天空区域像素点在各自 RGB 颜色通道中的最小值, 所组成的灰度图像会呈现趋于黑色 (像素值接近于 0) 的特征。而在有雾图像中, 得到的灰度图则含有大面积的灰白色。据此, 可以进一步推导出恢复清晰图像的数学公式从而实现图像去雾。Zhu^[76]等于 2015 年提出了基于颜色衰减先验理论的雾天图像恢复算法, 其基于对大量雾霾图像数据集的分析, 找出雾霾浓度与景深的正相关关系, 进而通过建立相应的数学模型对雾霾图像的深度信息

加以利用，最终得到清晰无雾的图像。2019 年，Lin^[77]等在暗通道先验理论的基础上提出一种亮度重建方案，通过设计一个新的模块来估算大气光值，可以在保证处理速度的同时更好地调整图像的对比度和饱和度。但由于基于先验知识所建立的物理模型往往与实际环境有所差异，因此该类去雾算法具有一定局限性。

③基于神经网络的去雾算法

近年来，神经网络作为一个热门研究方向被越来越多地应用到图像去雾领域。基于神经网络的去雾算法常根据其自身特点，应用于不同的任务场景中。2016 年 Ren^[78]等提出另一种用于单幅图像去雾的多尺度卷积神经网络 MSCNN。该算法先通过粗尺度网络得到初步的传输透射图，再通过精细尺度网络细化该传输透射图，从而达到较为细致的去雾效果。2017 年，Li^[79]等创新性地提出了一种一体化去雾网络（All-in-One Dehazing Network, AOD-Net）。在该网络的推导过程中，将大气散射模型中的两个估计参数统一成一个参数，避免了累计误差的产生。同时该算法具有参数少、运算速度快的特点，十分适合与其他高级视觉任务相结合，其基础网络和一系列改进网络都得到了广泛的应用。2019 年，北大和北航联合提出了端到端图像去雾网络 FFA-Net^[80]，其通过设计一种新的特征注意 FA 模块，将信道注意与像素注意机制结合起来，增强了网络对雾霾的感知能力，从而在图像细节和颜色恢复方面具有良好表现。2020 年，Zhang^[81]等利用拉普拉斯金字塔和泰勒公式，提出了一种能够高速处理高分辨率有雾图像的网络模型，提高了去雾算法在高清图像领域的可应用水平。2021

年, Cai^[82]等人为了提高雾霾环境下的无人机成像质量, 在 AOD-Net 的基础上提出一种端到端去雾网络 AEE-Net, 其同样具有较为简单的网络模型, 在无人机航拍场景下取得了良好的去雾效果。但现有算法在雾浓度分布不均场景下易出现全局结构信息丢失, 且缺乏自适应能力, 难以应对公路边坡复杂多变的雾环境。

基于图像增强的方法因未触及雾天图像退化本质, 易导致信息过度增强或丢失; 基于物理模型的方法受先验假设限制, 与实际环境存在偏差; 基于神经网络的方法在雾浓度分布不均场景下易丢失全局结构信息, 缺乏自适应能力。

除雾以外, 降雨天气往往会给镜头或者玻璃带来雨滴的残留或附着, 使得成像的部分区域产生畸变及模糊, 同时, 由于降雨等恶劣天气拍摄到的视频或图像在光照、清晰度等方面欠佳, 图像去雨滴问题成为了现阶段图像恢复领域的热点问题之一。由于深度网络具有很强的拟合能力, 基于深度学习的图像去雨滴算法愈来愈多。近年来, 基于深度学习的图像去雨滴算法已超越了传统的模型驱动的去雨滴算法。

2013, Eigen^[83]等使用了一个简单的卷积神经网络结构对单幅图像去雨滴做了开创性的研究, 但是由于结构的限制, 该工作只能去除一部分的污点和雨滴, 对于体积大、对图像内容产生较大形变的雨滴, 均不能很好地去掉。随着近年来深度学习的发展, 众多深度网络结构均在图像处理领域得到了非常好的应用。2018 年, 针对去雨滴问题, Qian^[84]等提出了新的解决方案, 基于生成对抗网络, 采用时序的注意

力机制网络对雨滴掩码进行监督学习，搭配带跳连接的自动编码器，将 Pix2Pix 网络实现作为生成器的主要结构，对应的判别器网络有 7 层卷积层，卷积核大小为 3×3 ，对应全连接层的神经元有 1024 个；同时，Qian 等开创性地建立了第一个雨滴基准数据集，其中有 1119 对图像(雨滴图/干净图)，包含 861 对训练图像和 239 对测试图像。接着，Quan 等根据观察到的雨滴形状先验知识，提出了形状驱动和通道维度的注意力机制来消除雨滴对单幅图像造成的失真模糊等现象。同期，Hao^[85]等提出了 3RN+网络结构进行雨滴去除，他们认为雨滴的去除可被看作检测雨滴、重构图像以及恢复最终图像 3 个阶段，因此设计了阶段网络学习算法，其网络分别由残差模块、卷积模块以及注意力雨滴检测模块组成。ALLETTO S 等采用自监督雨滴位置预测机制来定位图像中雨滴的位置并加以去除，同时也利用了雨图相邻帧的光流信息进行雨滴掩码的定位和雨滴图像的恢复。Peng^[86]等在 Quan 等工作的基础上继续沿用编码器 G 解码器网络，将注意力图像编码网络联合训练，并融合长短跳接，以增强网络的记忆能力。注意力机制与跳接融合到网络中联合训练，更进一步提升了去雨滴网络的性能。Ren^[87]等设计一个多阶段去雨滴深度网络，他们认为雨滴图像中的每一个图像块的权重均不相同，并设计范围分离模块，将雨滴图像与背景图像分离处理，再联合重构模块对雨滴图像特征进行图像重构。最后的融合模块主要是对雨滴特征图进行融合，得到更好的下游输出清晰图像。Luo^[88]等认为成对的图像在雨滴数据集中数量较少，即同一场景中雨滴图像和相应的干净图像配对训练的情况较少。为了

弥补这个数据上的缺陷, Luo 等提出了一个基于弱监督学习的深度网络模型, 模型需要收集具有图像级别注释的图像, 表明区域中是否有雨滴。他们的创新之处在于以多任务学习的方式训练一个雨滴检测器, 以突出雨滴的区域; 同样使用注意力机制的生成网络来去除雨滴, 并引入一个加权保留损失来保留非雨滴的细节。该工作取得了较好的弱监督领域去雨滴效果。Shao^[89]等注意到雨滴的多样性对雨滴去除任务的积极作用, 提出了一个软掩码概念来表示雨滴对背景的模糊程度, 并分析雨滴的模糊程度属性对雨滴去除任务的作用, 同时基于多尺度图像的深度特征对雨滴去除任务进行多尺度融合表示, 其多尺度金字塔结构也引入了迭代机制来提取雨滴的模糊程度信息, 用以指导不同尺度雨滴的去除; 进而通过注意力机制将输入雨滴图像与模糊级信息相融合, 去除雨滴图像中的冗余噪声, 提升图像恢复的质量。进一步, Shao 等通过将雨滴的形状特征与背景结构特征相结合来引导网络准确去除雨滴, 他们提出了一个选择性跳接生成对抗网络, 并结合选择性跳接和自注意力机制, 从雨滴退化的图像中恢复干净的图像。同时, 自注意力机制模块使生成器网络更加关注到雨滴的多样性和稠密性, 逆向修正雨滴的二值化掩码, 从而实现更好的雨滴去除效果。Yan^[90]等提出了一种新型去雨滴框架, 他们认为雨滴图像是由干净背景图像和雨滴风格图像组成, 因此采用不规则配对图像进行训练。将雨滴图像分解为干净背景图像和雨滴风格编码, 同时在合成阶段将干净背景图像和雨滴风格编码组成雨滴图像, 实现雨滴图像增强操作, 进一步提升了图像恢复质量。现有深度学习方法虽性能优于传

统模型，但难以适配不同雨量、雨向的动态变化，且卷积型网络全局特征提取不足，导致去雨效果不稳定，需研发雨量自适应的图像去雨算法。

纵观已有的暗光增强以及恶劣天气下图像复原算法，基于机器学习的算法在泛化能力和稳定性上具有较强的优势，但就本项目需求来说，识别对象为分布在边坡上的固定标靶，如何在图像增强和复原的过程中保留足够的细节特征以确保能够准确识别出小尺度目标、算法能够适应不同雾浓度分布以及不同雨量影响是需要解决的关键问题。

2.1.5 临灾预警联动技术研究现状

现有预警技术多聚焦于单一灾害监测报警，缺乏与路侧设施的深度联动。国外研究中，Zuliani David 等人提出单频 GPS 网络监测方案，具备一定应急预警能力，但未涉及视觉监测与路侧设施联动；国内研究中，刘华等人^[9]基于北斗/GPS 双模技术实现边坡实时预警，但预警信息传递依赖中心平台，响应滞后。现有技术尚未解决边缘计算与现场预警设施的即时联动问题，难以实现突发灾害的秒级响应。

公路边坡监测技术正朝着“高精度、低成本、全场景、智能化、一体化”方向发展。未来趋势主要体现在：一是机器视觉技术与深度学习、边缘计算深度融合，替代传统高成本监测设备；二是复杂环境图像优化技术向“小尺度目标特征保留”“多场景自适应”升级；三是监测系统与路侧智能设施联动，形成“感知-分析-决策-执行”闭环体系。本项目正是顺应这一趋势，针对上述未解决的技术难点，研发适配公

路边坡的多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统。

2.2 前期科研及现有工作条件

2.2.1 前期科研

针对本项目所涉及的理论及相关技术,课题组已经进行了充分调研,分析了国内外技术现状及各类算法的适用性,充分了解了本项目实施所面临的主要技术问题以及工程问题。课题组成员前期在公路基础设施监测以及图像识别领域积累了大量相关经验。

1、机器视觉与图像处理技术积累

在陕西省科技计划项目(2020GY-096)《基于卷积神经网络(CNN)的桥梁病害智能识别与分类技术研究》中研发了基于CNN的目标识别算法,实现了小尺度病害特征的精准提取,识别准确率达92%以上,为本次边坡标靶识别、灾害检测提供了核心算法理论支撑;在农村公路轻量化智能检测相关研究中,攻克了低成本视觉监测设备的精度控制难题,形成了“算法轻量化+硬件小型化”的技术思路,可应用于本项目边坡轻量化监测系统构建;在陕西省交通运输厅(23-05K)《“空天地体”一体化协同的公路边坡灾害监测应用技术研究》中,利用高分遥感技术、PS-InSAR、无人机机载传感与高精度地面传感器的协同,形成的星、机、地、体协同的监测手段具有一定的系统性、可实施性,为我国实现山区公路边坡灾害的高效、智能排查提供了有力支撑,也有效提高了灾害防控水平,为本边坡灾害监测提供了有效的技术支撑。

2、监测与预警技术研究沉淀

团队长期关注公路边坡防灾减灾技术，深入研究了边坡变形机理、监测指标体系及预警阈值设定方法。已在多个公路边坡监测项目中开展技术验证，包括西汉高速公路边坡、江西省昌赣高铁峡江县段高陡边坡、陕西省包头至茂名高速（黄陵-延安段）黄土高陡边坡、宁夏自治区银川至昆明高速公路（宁夏自治区太彭段）黄土高陡边坡、广东清连高速岩质边坡等。在这些项目中，完成了监测设备布设、数据采集、变形分析等全流程工作，积累了不同地形、土质、气象条件下的工程实践经验，明确了现有监测技术的痛点与改进方向；同时，与路侧设备运维单位建立了良好合作，掌握情报板、声光报警器等预警设备的通信协议与联动逻辑，在深汕高速公路以及广明高速边坡中均布置了情报板、声光报警器等预警设备，为本次项目的临灾预警联动技术落地提供了工程支撑。





图 2.2.1-1 西汉高速公路边坡监测

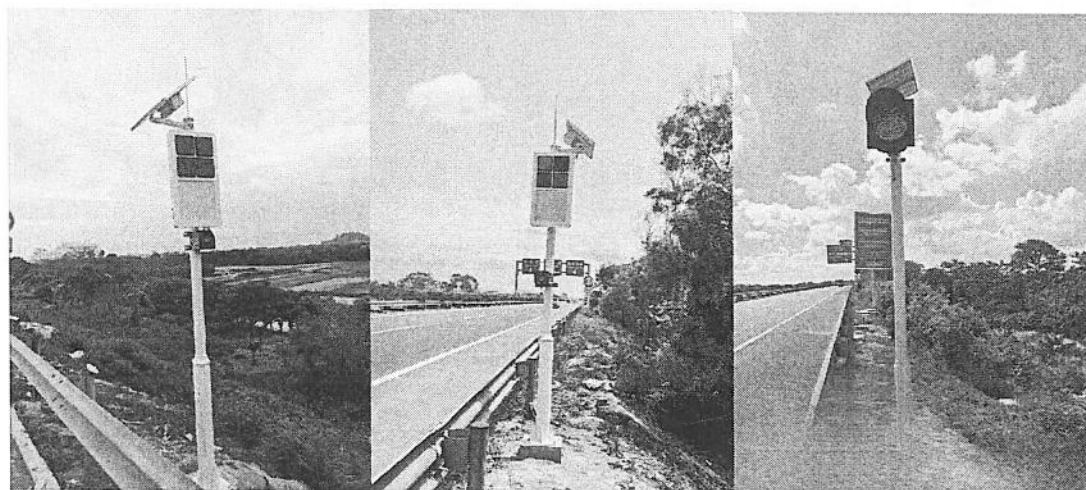


图 2.2.1-2 深汕高速公路路侧预警设备



图 2.2.1-3 广明高速公路边坡预警设备

2.2.2 现有工作条件

(1) 研究人员情况

本项目承担团队为中交第一公路勘察设计研究院有限公司健康监测与养护事业部，主要成员均为黄河流域/陕西省智能检测劳模工匠创新工作室核心人员，负责本项目立项申报、工作大纲、调研、编制、统稿、组织评审等具体工作。团队人员涵盖桥梁工程、信息化、道路工程等多个专业领域，核心人员长期从事公路结构物监测、检测以及数字化研发领域，具备丰富的理论研究与工程实践经验，团队专业结构合理、梯队层次分明，可保障项目研究高效推进。

(2) 技术与装备条件

技术平台支撑：依托极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室、公路与桥梁高效养护及安全耐久国家工程研究中心、陕西省公路交通防灾减灾重点实验室、陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室（共建）等多个国家级及省部级平台，具备开展边坡监测技术研究的良好科研环境。

实验设施设备：拥有交通部公路工程试验检测综合甲级资质和桥隧甲级专项资质，实验厂房建筑面积 7000 多平方米，配备 GDS 三轴仪、MTS 试验机、公路数字综合检测车、桥梁检测车、高清工业相机、边缘计算设备等先进仪器设备 300 多台（套），仪器设备总值 6000 多万元。同时构建了“大型路基模型试验系统、野外监测与检测系统”，建成“1 个试验中心、2 个野外基地、5 个观测站、18 个试验场”，可满足暗光、雨雾等复杂环境模拟及现场试验需求。

现有技术成果：团队已获得国际发明专利 2 项，国家发明专利

30 余项, 省部级科技奖励一等奖 3 项、二等奖 10 余项; 拥有自主开发的基础设施数字化管养平台、公路基础设施智能监测平台、养护分析软件、桥梁智检系统 (IBIS) 等, 主编行业标准、地方及协会团体标准 20 余部, 多项核心技术入选交通运输部成果库, 为项目技术研发提供了坚实基础。

2.3 参考文献

- [1] 崔然普. 基于物联网技术的边坡灾害监测系统设计与研究 [D]. 桂林电子科技大学, 2023.
- [2] 谢泽丰. 滑坡灾害的形成机理与探测方法[J]. 中国减灾, 2024, (13): 58-59.
- [3] 付兵杰, 夏金梧, 丁凡桢, 李书, 范萌, 李亚虎. 基于 SpringBoot 和 Cesium 的边坡声发射监测系统研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21 (11): 111-115.
- [4] 朱宝强, 邵长伟, 范志勇, 张亮. 边坡柔性测斜仪监测技术与工程应用 [A]. 第十六届边坡工程技术大会论文集[C]. 中国建筑学会工程勘察分会、中国水利学会勘测专业委员会、中国铁道学会工务委员会、西藏自治区水力发电工程学会、中国灾害防御协会交通分会、中国公路学会道路工程分会、中国环境科学学会生态地质环境专业委员会、国际工程地质与环境协会中国国家小组、国际地质灾害与减灾协会: 2024: 242-248.
- [5] 王兴, 张琪, 陈亮, 尹江辉, 李袁鹏. 时域反射法在核级电缆状态监测的应用[J]. 电子技术应用, 2021, (S1): 28-31.

- [6] 王盟.卫星定位系统在露天矿山边坡监测中的技术应用[J].江苏建材,2024,(01):122-124.
- [7] Othman Z., Wan Aziz W. A., Anuar A.. Landslide monitoring at hillside residential area using GPS static and inclinometer techniques[J]. Univ. Teknologi Malaysia (Malaysia);Univ. Putra Malaysia (Malaysia), 2012, 8334.
- [8] 廖斌, 王洪辉, 庾先国, 彭凤凌, 徐少波. 基于北斗通信的滑坡监测系统设计[J]. 自动化与仪表, 2014, 29 (05): 22-25.
- [9] 刘华,和永军,缪应锋.基于北斗卫星/GPS的边坡稳定性监测技术[J].云南大学学报(自然科学版),2016,38(S1):40-43.
- [10] Li Yuanyao, Huang Jinsong, Jiang Shui-Hua, Huang Faming, Chang Zhilu. A web-based GPS system for displacement monitoring and failure mechanism analysis of reservoir landslide.[J]. Scientific reports, 2017, 7 (1-4):
- [11] 李治洪.GNSS 系统在黄金峡坝肩边坡变形监测中的应用[J].人民黄河,2021,43(01):125-128.
- [12] 刘美琦, 吴建光. 基于北斗的四川高速公路边坡安全监测技术[A]. 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心、北京市经济和信息化局、北京市顺义区人民政府, 第十三届中国卫星导航年会论文集——S01 卫星导航行业应用[C]. 四川天奥空天信息技术有限公司;:中国卫星导航学术年会组委会, 2022: 154-158.
- [13] Zuliani David, Tunini Lavinia, Di Traglia Federico, Chersich

Massimiliano, Curone Davide. Cost-Effective, Single-Frequency GPS Network as a Tool for Landslide Monitoring[J]. Sensors, 2022, 22 (9): 3526-3526.

[14] 裴东东, 官云兰, 张勇峰, 贾宝. 基于车载三维激光扫描系统的滑坡变形监测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27 (01): 71-76+94.

[15] Bazarnik Mirosława. Slope stability monitoring in open pit mines using 3D terrestrial laser scanning[J]. E3S Web of Conferences, 2018, 66 01020-01020.

[16] P. M. Mat Zam, N. A. Fuad, A. R. Yusoff, Z. Majid.
EVALUATING THE PERFORMANCE OF TERRESTRIAL LASER
SCANNING FOR LANDSLIDE MONITORING[J]. ISPRS -
International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and
Spatial Information Sciences, 2018, XLII-4/W9 35-55.

[17] 保振永, 李学才, 陈科, 等. 地面三维激光扫描在不稳定边坡监测中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(06): 206-209.

[18] Fruneau B, Massonnet D, Feigl K L, et al. Observation and modelling of the Saint-tienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry [J]. Tectonophysics, 1996, 265 (3-4): 181-190.

[19] 王立伟. 基于 D-InSAR 数据分析的高山峡谷区域滑坡位移识别[D]. 北京科技大学, 2015.

[20] 高斌斌, 江利明, 孙亚飞, 等. 大型人工边坡稳定性地基 InSAR

监测研究[J].遥感信息,2016,31(06):61-67.

[21] Journault J M, Macciotta R, Hendry M T, et al. Measuring displacements of the Thompson River valley landslides using satellite InSAR [J]. Landslides, 2018, 15 (4): 839-852.

[22] 黄洁慧, 谢谟文, 王立伟. 基于 SBAS-InSAR 技术的白格滑坡形变监测研究[J]. 人民长江, 2019, 50 (12): 101-105.

[23] Mila Atanasova, Hristo Nikolov. Studying the coastal landslides processes by InSAR[A]. National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography (Bulgaria); Space Research and Technology Institute (Bulgaria): 2019:

[24] 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. 土木工程学报, 2019, 52 (05): 1-11.

[25] Billie F. Spencer, Vedhus Hoskere, Yasutaka Narazaki. Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring[J]. Engineering, 2019, 5 (2): 199-222.

[26] Dongming Feng, Maria Q. Feng. Vision-based multipoint displacement measurement for structural health monitoring[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23 (5): 876-890.

[27] 单宝华, 王海, 袁文厅, 左占宣, 李爽. 地震动作用下三层框架模型倒塌的平行双目视觉监测[J]. 振动与冲击, 2018, 37 (12): 48-52.

[28] 叶肖伟, 董传智. 基于计算机视觉的结构位移监测综述[J].

中国公路学报, 2019, 32 (11): 21-39.

[29] Chuan-Zhi Dong, Ozan Celik, F. Necati Catbas, Eugene J. O'Brien, Su Taylor. Structural displacement monitoring using deep learning-based full field optical flow methods[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16 (1): 51-71.

[30] 周颖, 张立迅, 刘彤, 龚顺明. 基于计算机视觉的结构系统识别[J]. 土木工程学报, 2018, 51 (11): 17-23.

[31] 周云, 程依婷. 基于数字图像相关理论的非接触式结构位移测量方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48 (05): 1-9.

[32] 杜永峰, 李向雄, 张超, 李超, 麦麦提明·图尔迪麦麦提, 马振和. 基于计算机视觉的复杂隔震结构支座变形监测及分析[J]. 工业建筑, 2022, 52 (10): 46-52.

[33] 朱前坤, 陈建邦, 张琼, 等. 基于计算机视觉人行桥挠度影响线非接触式识别[J]. 工程力学, 2021, 38(08): 145-153.

[34] Yoon H, Elanwar H, Choi H, et al. Target-free approach for vision-based structural system identification using consumer-grade cameras [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23 (12): 1405-1416.

[35] 单宝华, 李素超, 魏子奇, 白志霖, 熊亚凡. 基于改进的双目立体视觉模型重建三维空间点坐标[A] 第九届全国结构抗振控制与健康监测学术会议摘要集[C]. 中国振动工程学会结构抗振控制与健康监测专业委员会, 中国振动工程学会, 2023: 1.

- [36] Yuan C, Xiong B, Li X, et al. A novel intelligent inspection robot with deep stereo vision for three-dimensional concrete damage detection and quantification [J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21 (3): 788-802.
- [37] Shao Y, Li L, Li J, et al. Computer vision based target-free 3D vibration displacement measurement of structures [J]. Engineering Structures, 2021, 246: 113040.
- [38] 邱志成, 汪先锋. 基于双目视觉的振动测量及控制[J]. 振动. 测试与诊断, 2018, 38 (01): 51-58+205.
- [39] Tung Khuc, F. Necati Catbas. Structural Identification Using Computer Vision–Based Bridge Health Monitoring[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144 (2):
- [40] X.W. Ye, C.Z. Dong, T. Liu. Image-based structural dynamic displacement measurement using different multi-object tracking algorithms[J]. Smart Structures and Systems, 2016, 17 (6): 935-956.
- [41] Lydon Darragh, Lydon Myra, del Rincon Jesus Martinez, Taylor Susan E., Robinson Desmond, O'Brien Eugene, Catbas F. Necati. Development and Field Testing of a Time-Synchronized System for Multi-Point Displacement Calculation Using Low-Cost Wireless Vision-Based Sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18 (23): 9744-9754.
- [42] Celik, Ozan , C. Z. Dong , and F. N. Catbas .A Computer

Vision Approach for the Load Time History Estimation of Lively Individuals and Crowds[J]. Computers and Structures, 2018, 200: 32-52.

[43] Xu Y, Brownjohn J, Kong D. A non-contact vision-based system for multipoint displacement monitoring in a cable-stayed footbridge[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2018, 25(5): e2155.

[44] Justin G. Chen, Neal Wadhwa, Young-Jin Cha, Frédo Durand, William T. Freeman, Oral Buyukozturk. Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 345: 58-71.

[45] Yang Y, Dorn C, Mancini T, et al. Blind Identification of Full-field Vibration Modes from Video Measurements with Phase-based Video Motion Magnification [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 85: 567-590.

[46] Yongding Tian, Jian Zhang, Shanshan Yu. Vision-based structural scaling factor and flexibility identification through mobile impact testing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 122: 387-402.

[47] 董丽丽, 丁畅, 许文海. 基于直方图均衡化图像增强的两种改进方法[J]. 电子学报, 2018, 46(10): 2367-2375.

[48] Fan Xin, Wang Junyan, Wang Haifeng, Xia Changgao. Contrast-Controllable Image Enhancement Based on Limited Histogram[J]. Electronics, 2022, 11 (22): 3822-3822.

- [49] Hong N M, Chi Thanh N. A single image dehazing method based on adaptive gamma correction [C]//Proceedings of the 6th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science. IEEE Press, 2019: 558-562.
- [50] Park S, Yu S, Kim M, et al. Dual autoencoder network for Retinex-based low-light image enhancement [J]. IEEE Access, 2018, 6: 22084-22093.
- [51] Kansal I, Kasana S S. Fusion-based image de-fogging using dual tree complex wavelet transform [J]. International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, 2018, 16 (6): 1850054.
- [52] Gao Z, Zhai Y. Image dehazing based on multi-scale Retinex and guided filtering [C]//Proceedings of the International Conference on Image Processing, Computer Vision and Machine Learning. IEEE Press, 2022: 123-126.
- [53] Lore K G, Akintayo A, Sarkar S. LLNet: A deep autoencoder approach to natural low-light image enhancement [J]. Pattern Recognition, 2017, 61: 650-662.
- [54] Lyu F, Lu F, Wu J. MBLLN: low-light image video enhancement using CNNs [C]//Proceedings of the 2018 British Machine Vision Conference. BMVA Press, 2018: 1-15.
- [55] Wei C, Wang W J, Yang W H, et al. Deep Retinex

decomposition for low-light enhancement [C]//Proceedings of the 2018 British Machine Vision Conference. BMVA Press, 2018: 1-15.

[56] Guo C, Li C, Guo J, et al. Zero-reference deep curve estimation for low-light image enhancement [C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Press, 2020: 1777-1786.

[57] ZHANG Y,ZHANG J,GUO X.Kindling the darkness:a practical low-light image enhancer[C]//Proceedings of the Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia.New York:ACM,2019:1632—1640.

[58] Zhang Y, Guo X, Ma J, et al. Beyond brightening lowlight images [J]. International Journal of Computer Vision, 2021, 129 (4): 1013-1037.

[59] Hai J, Xuan Z, Han S, et al. R2RNet: Low-light image enhancement via real-low to real-normal network [EB/OL]. 2021: arXiv:2106.14501v2.

[60] WU W' WENG J' ZHANG P' et al. URetinex-net: Retinexbased deep unfolding network for low-light image enhancement[C] / / Proceedings of the IEEE/ CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.Piscataway: IEEE Press'2022: 5891—5900.

[61] ZHANG S' LAM E Y. A deep Retinex framework for light field

restoration under low-light conditions [C] // Proceedings of the 26th International Conference on Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press'2022: 2042—2048.

[62] Sun Q. RADFNet: A low illumination image enhancement network based on Retinex model and attention mechanism [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer. IEEE Press, 2022: 123-127.

[63] Jiang Y, Li L, Zhu J, et al. DEANet: decomposition enhancement and adjustment network for low-light image enhancement [J]. Tsinghua Science and Technology, 2023, 28 (4): 743-753.

[64] HUANG G' LIU Z' VAN DER MAATEN L' et al. Densely connected convolutional networks[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press' 2017:2261—2269.

[65] RONNEBERGER O' FISCHER P' BROX T. U-net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C] // International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Cham:Springer' 2015:234—241.

[66] Liu X, Ma Y, Shi Z, et al. Griddehazenet: Attention-based multi-scale network for image dehazing [C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. IEEE Press, 2020: 7314-7323.

[67] Chen D, He M, Fan Q, et al. Gated context aggregation network for image dehazing and deraining[C]. 2019 IEEE winter conference on applications of computer vision (WACV), 2019:1375–1383.

[68] Berman D, Avidan S, et al. Non-local image dehazing[C]. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016:1674–1682.

[69] Cai B, Xu X, Jia K, et al. Dehazenet: An end-to-end system for single image haze removal [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25 (11): 5187-5198.

[70] Kim J Y, Kim L S, Hwang S H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11 (4): 475-484.

[71] Stark J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization[J]. IEEE Transactions on image processing, 2000,9(5):889–896.

[72] Rahman Z U, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13 (1): 100-110.

[73] 郑凤仙,王夏黎,何丹丹,等.单幅图像去雾算法研究综述[J].计算机工程与应用,2022,58(03):1-14.

- [74] McCartney E J. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles[J].New York, 1976, 30(5):76–77.
- [75] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 33 (12): 2341-2353.
- [76] Zhu Q, Mai J, Shao L. A fast single image haze removal algorithm using color at-tenuation prior[J]. IEEE transactions on image processing,2015, 24(11):3522–3533.
- [77] Liu P J, Horng S J, Lin J S, et al. Contrast in haze removal: Configurable contrast enhancement model based on dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 28 (5): 2212-2227.
- [78] Ren W, Liu S, Zhang H, et al. Single image dehazing via multi-scale convolutional neural networks [C]//European Conference on Computer Vision. Springer, 2016: 154-169.
- [79] Li B, Peng X, Wang Z, et al. Aod-net: All-in-one dehazing network[C].Proceedings of the IEEE international conference on computer vision,2017:4770–4778.
- [80] Qin X, Wang Z, Bai Y, et al. FFA-Net: Feature fusion attention network for single image dehazing [C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. AAAI Press, 2020: 11908-11915.
- [81] Zhang J, Tao D. FAMED-Net: A Fast and Accurate Multi-Scale End-to-End Dehaz-ing Network[J]. IEEE transactions on image

processing: a publication of the IEEE Signal Processing Society, 2020, 29:72–84.

[82] Cai T, Zhang S, Tan B. AEE-Net: An Efficient End-to-End Dehazing Network in UAV Imaging System [C]//2021 13th International Conference on Machine Learning and Computing. IEEE Press, 2021: 397-403.

[83] Eigen D, Krishnan D, Fergus R. Restoring an image taken through a window covered with dirt or rain [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE Press, 2013: 633-640.

[84] Qian R, Tan R T, Yang W H, et al. Attentive generative adversarial network for raindrop removal from a single image [C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Press, 2018: 2482-2491.

[85] Hao Q, Sun J, Juefei-Xu F, et al. Efficientderain: Learning pixel-wise dilation filtering for high-efficiency single-image deraining [C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. AAAI Press, 2021: 1487-1495.

[86] PANG B, ZHAI D, JIANG J, et al. Single image deraining via scale-space invariant attention neural network [C]//Proceedings of ACM International Conference on Multimedia. 2020: 375-383.

[87] Ren D W, Zuo W M, Hu Q H, et al. Progressive image

deraining networks: a better and simpler baseline [C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Press, 2019: 3932-3941.

[88] LI X, WANG W, HU X, et al. Selective kernel networks[C] //Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019: 510-519.

[89] Shao M W, Li L, Meng D Y, et al. Uncertainty guided multi-scale attention network for raindrop removal from a single image [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 4828-4839.

[90] Yan W, Tan R T, Wang S, et al. Single image deraining: From model-based to data-driven and beyond [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 43 (11): 4059-4077.

[91] 刘华,和永军,缪应锋.基于北斗卫星/GPS 的边坡稳定性监测技术[J].云南大学学报(自然科学版),2016,38(S1):40-43.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

(1) 亚像素级角点检测的相机标定算法实现

根据相关标准，公路边坡位移的预警条件一般设置为持续 3~7 天发生变形，变形速率达 3~5mm/d，再结合现有常规自动化监测手段如 GNSS、无人机扫描等，监测精度约为 2 mm。因此结合常规相机设备参数，须在相机标定时实现亚像素级角点的检测。

(2) 保留小尺度目标特征的暗光图像增强算法研发

项目通过监测分布于边坡上标靶的位移情况来反映边坡整体的变形,在采集图像中,标靶相对于整个边坡属于小尺度目标,现有的暗光图像增强算法在执行过程中,会造成因避免梯度消失而导致特征弱化的现象,容易将标靶特征掩盖或丢失,造成无法测量位移的情况,因此需在现有的暗光增强算法基础上进行改进,以保留小尺度目标特征。

(3) 雾浓度分布不均情况下图像去雾算法研发

边坡一般分布范围较大,在一个边坡范围内,容易发生雾气浓度分布不均匀的情况,现有的图像去雾算法在进行卷积运算过程中,易导致全局结构信息丢失,此外由于卷积神经网络滤波器是空间不变的,导致现有去雾算法在面对真实有雾场景时,去雾效果不佳。因此,须采用基于 Transformer+CNN 融合的算法,以提升算法在非均匀有雾图像的结构和纹理重建效果。

(4) 雨量自适应的图像去雨算法研发

实际下雨场景中的雨量、方向、密度均会发生变化,卷积型的算法在处理这类问题时难以对全局特征进行有效提取,造成最终的算法在不同雨量的情况下去雨效果不尽如人意。因此,需要研发能够自适应于不同雨量情况下的图像区域算法。

(5) 基于边缘计算的边坡临灾预警联动技术

在发生突发灾害时,监测系统要能够立即识别并同时与路侧预警装置进行联动,因此需要配备边缘计算设备以实现灾害现场的同步识别,同时能够将报警信息发送至路侧情报板并对声光报警装置进行驱

动，以提示过往车辆，避免灾害损失的进一步扩大。

3.2 主要研究内容及实施方案

3.2.1 研究内容

(1) 基于机器视觉的公路边坡空间位移监测算法研究

空间位移是边坡监测的重点指标，本项目采取机器视觉对边坡空间位移进行实时监测，融合多场景智能视觉监测技术与大数据分析处理技术，相机标定及特征点提取算法研究、路域暗光环境下图像增强算法研究、雨雾等恶劣场景下图像复原算法研究、边坡监测多源大数据采集与预处理技术研究等内容，在提升机器视觉测量精度和稳定性及多场景适配性的基础上，构建大数据分析平台，实现空间分析与可视化展示，实现对边坡空间位移的实时高精度监测及变形趋势精准预判，研发智能视觉监测软件模块、预留定制化部署接口，适配不同边坡场景的监测需求。

(2) 边坡突发灾害检测算法及临灾预警联动技术研究

针对边坡突发灾害，基于深度学习框架优化突发灾害检测算法，实现对该类事件的检测与识别，融合临灾预警模型构建与联动响应机制设计，结合位移监测结果、大数据分析的变形趋势预判结果及历史灾害数据，综合构建多级临灾预警模型，通过交叉验证、回测等方法优化模型性能，研发独立的大数据分析平台模块与临灾预警联动系统模块；在提升报警准确率的基础上，完善与路侧预警设备的联动机制，设计涵盖预警信息发布、应急资源调度、救援行动指导的全链条联动

响应体系，通过路侧情报板、声光报警器、系统平台等多渠道发布预警信息，预留应急资源调度系统接口，结合灾害现场数据为救援行动提供基础指导，在典型边坡区域开展系统实地测试，验证系统稳定性与实用性，根据测试反馈持续调整优化系统性能，实现从“单一路侧预警”到“多主体、全链条、一体化”预警联动的升级，避免灾害损失进一步扩大，确保道路运营安全。

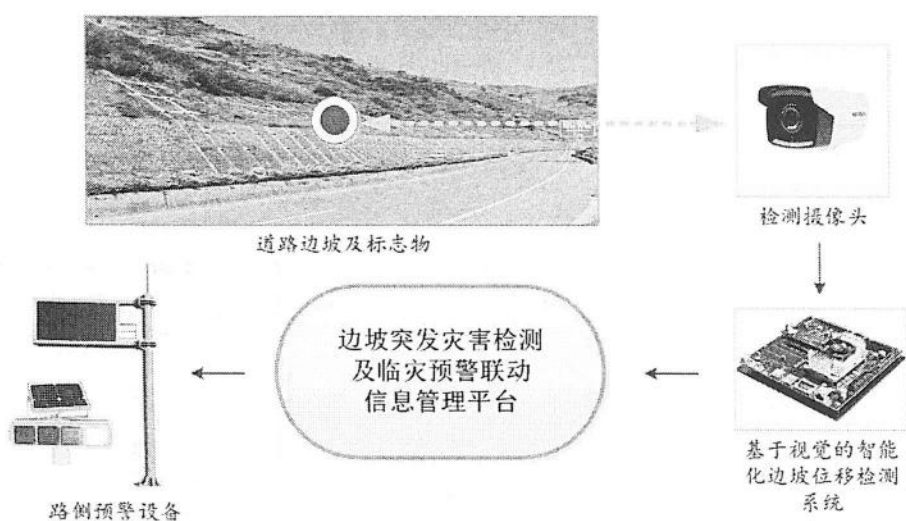


图 3.2.1-1 预警联动系统示意图

3.2.2 实施方案

(1) 亚像素级角点检测的相机标定算法研究

①数据采集与标定数据集构建：实地采集工程的标靶图像，覆盖不同监测距离（50~200m）、光照条件（晴天、阴天）、不同土质（岩质、土质混合）、地形坡度（缓坡、陡坡、多级边坡），确保固定标靶与边坡结构物特征差异清晰，构建适配多场景的标定数据集，同时融合高清摄像头、无人机航拍等多手段，采集全域边坡图像。

②相机标定算法选型与优化：对比张正友标定法、自标定法等主

流算法，聚焦亚像素级角点提取核心需求，优化算法迭代流程，通过引入最小二乘优化与鲁棒性阈值筛选，提升角点定位精度，针对不同土质、地形坡度的边坡特征，研发风力振动滤波模块，开发植被遮挡识别与剔除算法，建立标靶粉尘覆盖灰度补偿机制，差异化调整抗干扰算法参数以适配不同干扰强度，降低环境干扰影响。

③实验验证与参数调整：通过精度标定板开展不同距离下的测量实验，验证算法位移测量精度；增设多地形场景模拟测试，验证不同土质、地形坡度下的位移测量精度；在依托工程现场开展小规模实测，对比传统监测设备数据，持续调整算法参数，确保满足不同距离测量精度要求，同步验证不同场景下的算法精度与数据处理效率。

④算法集成与适配：将优化后的相机标定算法与特征点提取、坐标计算模块整合，形成完整的位移监测算法流程，适配工程现场实际监测场景的硬件部署需求。

(2) 路域暗光环境下图像增强算法研究

①暗光图像数据集构建：选用低功耗、长距离黑光摄像机搭配棋盘格反光标靶，在依托工程边坡现场，选取夜间、黎明、黄昏等不同时段的暗光环境，涵盖无车辆灯光、有车辆灯光干扰等场景，通过高清相机，采集不同监测距离、不同光强度下的标靶图像与边坡图像，确保数据集包含小尺度位移标靶；通过图像翻转、亮度扰动、噪声添加等数据增强技术，扩充样本多样性。

②深度学习网络选型与改进：进行抗干扰算法预处理后，基于Retinex-Ne等现有算法框架，针对小尺度目标特征保留需求，引入微

光信号放大、自适应噪声抑制、注意力机制模块，强化标靶边缘、角点等关键特征的提取与保留；优化网络层数与卷积核尺寸，平衡算法性能与计算效率。

③模型训练与优化：以标靶识别准确率为核心指标，通过多轮训练优化网络参数与损失函数，采用模型量化手段对增强算法模型进行轻量化处理，平衡图像整体增强效果与标靶特征保留效果。

④实地测试与适配调整：在工程现场暗光环境下开展实测，对比增强前后标靶识别效果，针对车辆灯光干扰、极暗光等特殊场景，优化算法适配策略。

(3) 雨雾等恶劣场景下图像复原算法研究

①雨雾图像数据集构建：采集依托工程边坡在不同雨强（小雨、中雨、大雨）、不同雾浓度（轻雾、中雾、重雾）下的图像，标注雾浓度分布、雨量等关键参数，构建雨雾图像数据集；通过模拟雨雾添加技术，扩充不同退化程度的样本。

②混合网络架构设计：构建轻量化的“CNN+Transformer”混合网络，利用 CNN 的局部特征提取优势，强化标靶细节重建；借助 Transformer 模型的全局感受野，捕捉图像中雾浓度分布不均、雨量差异的空间特征，提升算法自适应能力。

③算法优化与训练：设计多任务损失函数，同时优化去雨雾效果、细节保留程度与噪声抑制性能；引入自适应阈值调整机制，针对不同雨雾强度动态调整算法参数；通过多轮训练迭代，解决传统算法中噪声放大、细节模糊的问题。

④实地验证与效果评估：在工程现场雨雾天气下开展实测，对比不同算法的复原效果，通过标靶识别准确率、图像清晰度等指标进行量化评估；针对雾浓度突变、雨量不均等复杂场景，进一步优化算法。

（4）边坡突发灾害检测及临灾预警联动技术研究

① 基于深度学习框架融合大数据分析结果优化灾害检测算法：将边坡变形趋势预判数据、历史灾害关联数据及日常养护巡查、经常性检查和定期检查结果作为灾害检测的辅助判据，优化“图像特征+位移数据+检查数据”多维度检测模型，提升灾害检测的前瞻性和准确率；

② 构建多级临灾预警模型并完成验证：结合边坡地质特性、行业标准、历史灾害数据及大数据分析结果，划分预警等级（如一级、二级及三级），明确各等级判定指标阈值，在依托工程开展模拟测试，优化模型参数，确保临灾预警判定准确率；

③构建大数据分析平台：将轻量化后的算法模型部署至边缘计算设备，搭建基于云计算的边坡监测大数据分析平台，实现多源监测数据（高清摄像头、无人机、传感器等）的高效存储与并行计算；集成GIS 地理信息系统，将边坡位移数据与空间地理信息融合，实现监测数据的空间分析、可视化展示；

④ 典型边坡区域实地测试验证：选取全国不同地质类型、气候条件的典型公路边坡区域（如岩质边坡、土质边坡、降雨频繁区域边坡）开展系统全流程实地测试，验证系统在不同场景下的稳定性、实用性及预警准确率；

⑤设计全链条联动响应机制并完成测试：在路侧设备联动基础上，针对不同预警等级设计差异化联动策略，同时设计预警信息多端发布流程；预留与交通、养护、应急部门的应急资源调度接口；结合监测数据和灾害现场图像，生成灾害基础信息报告，为救援行动提供现场路线、作业区域等基础指导；开展全链条联动测试，验证系统的有效性和及时性。

3.3 技术路线

3.3.1 研究技术方案

(1) 亚像素级角点检测的相机标定算法研究

本研究以机器视觉测量原理为基础，聚焦相机标定核心环节，采用亚像素级角点检测理论与鲁棒性优化方法提升位移测量精度；覆盖50m~200m 监测距离及晴天、阴天等场景，采集多组固定标靶图像构建标定数据集，并通过全站仪同步采集位移真值数据作为算法验证基准；引入最小二乘优化与环境误差补偿机制，改进亚像素级角点提取算法，解决远距离监测下角点定位精度不足的问题；最后在依托工程边坡部署测试设备开展小规模实测，对比算法计算结果与全站仪数据并迭代优化参数，确保满足测量精度要求。

(2) 路域暗光环境下图像增强算法研究

本研究基于深度学习理论，结合图像分解原理，采用注意力机制与多尺度特征融合方法实现小尺度标靶特征保留；采集夜间、黎明、黄昏等时段的暗光图像，涵盖无灯光干扰、车辆灯光干扰等场景，获

取舍小尺度标靶的原始图像，并通过翻转、亮度扰动、噪声添加等数据增强技术扩充样本数据集；对比 Retinex-Net 等主流算法性能，引入标靶特征注意力模块，设计“亮度增强+特征保护”双目标损失函数开展模型训练与迭代优化；构建适配小尺度目标的暗光增强网络，强化标靶边缘、角点等关键特征的提取与保留，避免增强过程中特征弱化；最后在工程现场开展实测，验证模型在不同暗光场景下的标靶识别效果，调整算法适配策略。

（3）雨雾等恶劣场景下图像复原算法研究

本研究基于深度网络与 Transformer 模型融合理论，采用多尺度特征提取与全局感知方法解决雨雾环境下图像退化问题；采集不同雨强、雾浓度下的图像并标注相关参数构建原始数据集，同时通过模拟雨雾添加技术扩充不同退化程度的样本；设计“CNN+Transformer”混合网络架构，利用 CNN 强化局部细节重建、借助 Transformer 捕捉全局雨雾分布特征，采用多任务损失函数开展模型训练与参数优化；引入自适应阈值调整机制，提升算法对雾浓度分布不均、雨量差异的适应性，解决传统算法噪声放大、细节模糊的痛点；最后在工程现场雨雾天气下开展实测，对比不同算法的复原效果，通过标靶识别准确率、图像清晰度等指标量化评估并优化算法适配能力。

（4）边坡突发灾害检测算法及临灾预警联动技术研究

本研究基于深度学习目标检测理论，结合多源数据融合方法，构建“图像特征+位移数据”双维度灾害检测模型，并采用边缘计算与实时通信技术实现预警联动；基于 YOLO 算法框架优化网络结构以提

升检测速度，融合位移监测数据设计双维度判据模型降低误报率，并将算法部署至边缘计算设备开展轻量化优化与实时性测试；建立“监测数据-灾害识别-预警触发-设备联动”的闭环机制，设计适配路侧设备的通信协议与触发阈值确保响应及时性；最后在依托工程现场验证算法检测准确率、预警信息传输速度及路侧设备响应效果，迭代优化系统性能。

3.3.2 工作流程

研究工作流程围绕“数据支撑-算法研发-验证优化-系统集成-全面落地”的核心逻辑展开，各环节层层递进、相互衔接，确保研究全过程高效推进，具体步骤如下：

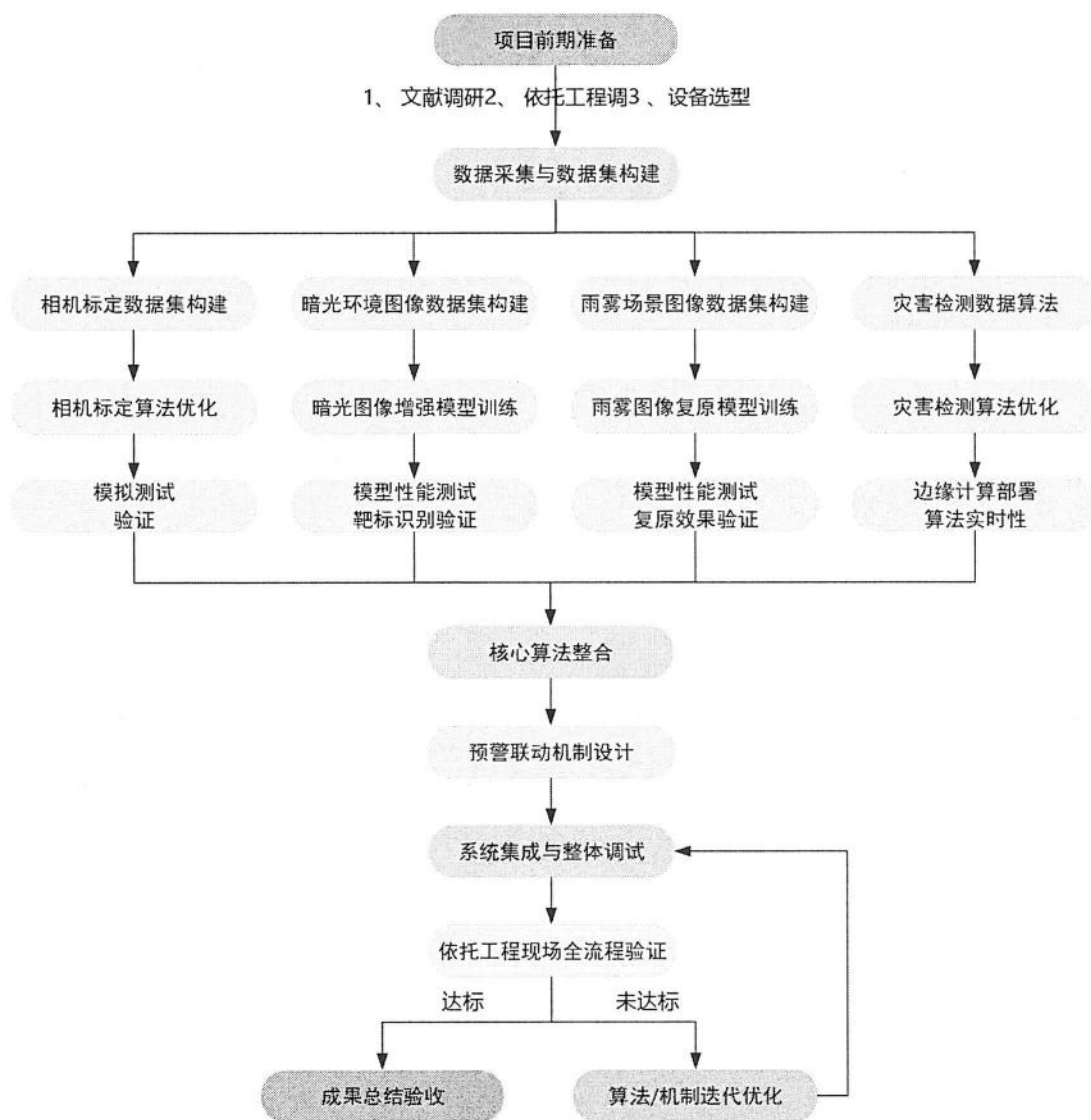


图 3.3.2-1 工作流程图

一、项目前期准备

(1) 文献与技术调研：系统调研公路边坡地形地质特征，梳理国内外机器视觉监测、暗光图像增强、雨雾图像复原、灾害检测预警等领域的研究现状、核心技术与应用案例，重点分析现有技术的优势与不足，明确本项目的技术突破口；研读相关行业标准、政策文件及依托工程设计资料，掌握边坡监测精度要求、预警响应时限等关键指标。

(2) 依托工程实地调研：对依托工程边坡进行全面勘察，明确

边坡长度、挖深、坡率、土质类型等基本参数；排查边坡潜在风险点，确定监测设备安装位置、标靶布设区域及预警设备（情报板、声光报警器）分布情况；记录该区域的光照变化规律、降雨雾天气特征等环境信息，为后续数据采集和算法适配提供依据。

（3）设备与工具选型：根据研究需求，选定高清工业相机、边缘计算模块、标准化监测标靶、数据存储设备等硬件，确保设备性能满足远距离监测、暗光/雨雾环境适配、实时数据处理等要求；选定框架、图像预处理软件等，为算法研发提供技术支撑。

二、多场景数据集构建

（1）相机标定数据集构建：在依托工程边坡布设固定标靶，通过高清相机在不同监测距离、不同光照条件（晴天、阴天、清晨、傍晚）下采集标靶图像；同步使用全站仪采集对应标靶的位移真值数据，建立“图像-真值”匹配的标定数据集，用于相机标定算法的训练与验证。

（2）暗光环境图像数据集构建：在夜间、黎明、黄昏等暗光时段，采集依托工程边坡的标靶图像，涵盖无车辆灯光干扰、有车辆灯光直射/反射等场景；采用图像翻转、亮度扰动、噪声添加、对比度调整等数据增强技术，扩充数据集，确保样本的多样性和代表性，适配不同暗光环境下的算法训练。

（3）雨雾场景图像数据集构建：在自然雨雾天气下，采集不同雨强（小雨、中雨、大雨）、不同雾浓度（轻雾、中雾、重雾）下的边坡标靶图像，标注雾浓度分布、雨量大小等关键参数；通过模拟雨

雾生成技术，在清晰图像上添加不同程度的雨雾效果，扩充不同退化程度的样本数据集，为雨雾图像复原算法提供充足训练数据。

在上述图像数据集基础上，同步采集边坡地质、环境、历史灾害等数据，构建多源融合数据库。

三、核心算法研发与训练

(1) 基于亚像素级角点检测的相机标定算法研发：以张正友标定法为基础框架，结合亚像素级角点检测理论，优化算法迭代流程；引入最小二乘优化与环境误差补偿机制，提升角点定位精度；利用构建的数据集开展算法训练，通过调整迭代次数、阈值参数等，优化算法对不同监测距离和环境的适配性。

(2) 路域暗光环境下图像增强算法研发：基于 Retinex-Net 等主流深度学习框架，引入标靶特征注意力模块，设计“亮度增强+特征保护”双目标损失函数；利用暗光环境图像数据集开展模型训练，通过多轮迭代优化网络层数等参数，平衡图像整体亮度提升与小尺度标靶特征保留效果，避免标靶特征弱化。

(3) 雨雾等恶劣场景下图像复原算法研发：构建“CNN+Transformer”混合网络架构，利用 CNN 强化局部细节重建能力，借助 Transformer 的全局感受野捕捉雨雾分布特征；设计多任务损失函数（去雨雾损失+细节保留损失+噪声抑制损失），基于雨雾场景图像数据集开展模型训练；引入自适应阈值调整机制，优化算法对雾浓度分布不均、雨量差异的适应性，解决噪声放大和细节模糊问题。

(4) 边坡突发灾害检测算法研发：基于 YOLO 算法框架，简化

冗余网络结构，提升灾害检测速度；融合位移监测数据，构建“图像特征+位移突变”双维度检测模型，降低误报率；优化模型对不同类型、不同规模灾害的识别能力；对算法进行轻量化处理，适配边缘计算设备的运行需求。

四、算法单独验证与优化

(1) 相机标定算法验证：搭建模拟测试平台，设置不同监测距离、光照干扰条件，测试算法的位移测量精度；在依托工程现场开展小规模实测，将算法计算结果与全站仪真值数据对比，评估算法在实际场景中的性能；针对精度不足的问题，调整标定参数、优化角点提取策略。

(2) 暗光图像增强算法验证：通过模拟暗光环境测试模型的增强效果，量化评估图像亮度、对比度及标靶特征清晰度；在依托工程现场的暗光时段开展实测，统计标靶识别准确率；针对车辆灯光干扰、极暗光等场景下的性能短板，优化注意力模块权重、调整损失函数参数。

(3) 雨雾图像复原算法验证：通过模拟不同雨雾强度的图像测试模型复原效果，评估图像清晰度、细节保留程度及噪声抑制效果；在依托工程现场的雨雾天气下开展实测，统计复原后标靶识别准确率；针对雾浓度不均、雨量突变等场景的适配问题，优化网络结构与自适应机制。

(4) 灾害检测算法验证：将优化后的灾害检测算法部署至边缘计算设备，开展实时性测试，确保响应延迟控制在秒级；在依托工程

现场验证算法，针对误报、漏报问题，优化双维度判据参数，提升算法可靠性。

五、核心算法整合与预警联动机制设计

(1) 算法整合：将经过单独验证优化后的相机标定算法、暗光图像增强算法、雨雾图像复原算法、灾害检测算法进行模块化整合，设计统一的数据交互接口和流程控制逻辑，确保各算法协同工作。

(2) 预警联动机制设计：制定监测系统与路侧预警设备的通信协议，明确数据传输格式、触发条件及响应流程；设定预警等级划分标准，根据灾害严重程度和距离，触发不同的预警方式；建立预警信息反馈机制，确保监测系统能实时接收预警设备的运行状态。

六、系统集成与整体调试

(1) 硬件集成：将高清相机、边缘计算模块、监测标靶、数据传输模块等硬件设备按照现场勘察确定的位置安装部署，完成设备间的线路连接与网络配置；确保相机角度、标靶位置满足监测需求，边缘计算设备能稳定接收和处理图像数据。

(2) 软件集成：将整合后的算法模块与硬件驱动程序、数据存储模块、预警联动控制模块集成，开发形成完整的公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统；优化系统运行流程，确保数据采集、处理、分析、预警等环节高效衔接。

(3) 整体调试：在依托工程现场开展系统整体调试，测试各模块的协同工作性能；模拟不同场景（正常光照、暗光、雨雾、灾害发生），验证系统的运行稳定性、数据处理准确性及预警响应及时性；

针对调试中出现的模块兼容、数据传输延迟、预警触发异常等问题，逐一排查并优化。

七、依托工程现场全流程验证

在依托工程现场部署整套系统，进行稳定运行测试，记录系统运行数据，评估系统的环境适应性和可靠性。

八、成果总结与验收

(1) 问题迭代优化：针对全流程验证中发现的性能短板或功能缺陷，对算法、系统软件或硬件部署进行最后优化调整，确保所有考核指标达标；若未达标，返回系统集成与整体调试阶段重新优化，直至满足要求。

(2) 研究成果整理：撰写研究报告；整理算法代码、系统软件，申请国家发明专利和软件著作权；发表核心及以上论文；汇总测试数据、报告等相关资料。

(3) 项目验收：按照陕西省交通运输厅科研项目管理要求，准备验收材料，邀请专家进行项目验收；根据验收意见完善成果，形成最终的技术成果和产品，总结设备布设、标靶设计、算法应用、系统运维等标准要求，为后续推广应用奠定基础。

3.4 后续技术改造及计划

本项目研发的公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动技术与系统，紧密贴合公路养护、智慧交通建设等实际需求，适配性强，可通过技术改造升级、新建工程配套、跨领域拓展等多种形式，与各类实际应用场景深度衔接，市场需求明确且潜力广阔。

(1) 与存量公路边坡监测系统技术改造的衔接

我国现有山区公路中，大量高风险边坡仍沿用传统监测手段，存在精度低、响应慢、成本高的问题。本项目成果可直接适配存量边坡的改造需求：

①针对已部署传统传感器的边坡，可通过加装高清相机、边缘计算模块等轻量化硬件，整合原有监测数据与视觉监测数据，构建“多源数据融合”的复合监测体系，无需大规模拆除原有设施，降低改造成本；

②针对无监测设施的存量高风险边坡，可直接部署本项目研发的轻量化监测系统，降低实施周期与成本，快速实现路网高风险边坡的监测全覆盖。

(2) 与新建公路工程基本建设计划的衔接

随着交通基础设施建设向山区、丘陵地带延伸，新建公路边坡的安全监测已成为工程建设必备环节，本项目成果可作为新建工程的标准化配套技术：

①在新建公路勘察设计阶段，可将智能视觉监测系统纳入边坡防护工程设计方案，同步规划相机安装点位、标靶布设区域及预警设备联动接口，实现“设计-施工-监测”一体化衔接，避免后期二次施工；

②针对高速公路、国省干线等重点新建项目，可直接配套部署本项目系统，作为边坡安全“同时设计、同时施工、同时投入使用”的核心内容，满足《公路工程技术标准》中对高风险边坡监测的强制性要求。

(3) 与跨领域基础设施监测需求的衔接

本项目研发的核心技术（多场景图像优化、小尺度目标监测、突发灾害识别）具有较强的通用性，可通过技术改造适配，拓展至铁路边坡、矿山边坡、水利枢纽边坡、山区景区道路边坡等相似场景：

①针对铁路边坡监测中“列车振动干扰、沿线供电困难”的特点，对算法进行抗振动优化（加入振动滤波模块），对硬件进行低功耗改造，将预警联动机制与铁路信号系统对接，实现边坡灾害时自动触发列车减速或停车指令；

②针对矿山边坡“面积大、地质复杂、易发生大面积坍塌”的特点，优化标靶布设密度与相机监测范围，强化算法对大规模坍塌灾害的识别能力，改造预警终端为矿山调度中心大屏与作业人员手持终端，实现“全域监测+精准预警+人员疏散”的协同。

③针对水利枢纽边坡“高湿度、多雾、靠近水体”的环境特点，升级雨雾图像复原算法的湿度适应性，采用防水防雾相机，将监测数据接入水利枢纽安全监测平台，与水位、流量数据联动分析，预警洪水期边坡滑坡风险。

3.5 技术经济指标

3.5.1 技术指标

(1) 提出基于机器视觉的公路边坡空间位移监测高精度算法以适应不同距离位移测量精度要求（50 m 以内 ≤ 1.5 mm、50~100 m ≤ 2 mm、100~150 m ≤ 3 mm、150~200 m ≤ 4 mm）。

(2) 基于研发的暗光图像增强算法及去雨雾算法，提升靶标识别准确率及位移跟踪的稳定性，标靶检测召回率：正常环境 $\geq 98\%$ ，复杂环境 $\geq 95\%$ ，标靶 ID 识别准确率：正常环境 $\geq 95\%$ ，复杂环境 $\geq 90\%$ ，跟踪丢失率：正常环境 $\leq 1\%$ ，复杂环境 $\leq 3\%$ 。

(3) 突发灾害时应急联动响应时间 ≤ 5 秒。

3.5.2 经济指标

构建基于机器视觉的边坡轻量化监测及临灾预警联动系统，单套边坡监测综合成本控制在 10 万元以内。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

中交第一公路勘察设计研究院有限公司（以下简称“中交一公院”），始建于 1952 年，是国家大型工程勘察、设计、研究、咨询、监理骨干企业之一，是交通系统最早获得“中国勘察设计单位综合实力百强”称号的企业，是拥有丰富土木工程经验的国际化工程咨询公司。先后被授予“全国创新型试点企业”、“国家火炬计划重点高新企业”，荣获“全国交通建设科技进步先进集体”、“全国勘察设计行业创新型优秀企业”等称号。70 多年来，累计承担各类纵横向科技开发和技术服务项目 400 余项，其中省部级以上重大、重点项目 50 多项。拥有国家博士后科研工作站、国家工程实验室、省部级重点实验室多个高端科技创新平台。共获得省部级以上科学技术和工程技术创新奖励 300 余项，其中国家科技进步奖 8 项，拥有 200 余项专有知识产权。

2003 年专门成立了科技研发开发中心，经过十五年的培育发展，配套建设了占地约 70 亩的科技产业园，形成了较为完善的科研管理运行及科学研究与技术开发体系。经过十余年的发展，2017 年，面对新的产业发展态势，公司对科技创新体系进行调整优化，搭建集科技决策与咨询、职能管理、业务管理、项目执行于一体的科技创新体系，形成了 5+11 的科技创新业务体系，即 5 家专职研发中心（寒区环境与工程研发中心、交通安全与数字技术研发中心、道路工程与防灾减灾技术研发中心、结构智能建造研发中心、桥梁结构与标准化技术中心）+11 家专业研发机构（公路岩土工程技术研发中心、结构消能与耐久防护技术研发中心、公路绿色智能养护技术研发中心、智慧交通研发中心、海绵城市研发中心、道路钢结构研发中心、隧道与地下工程研发中心、国际技术转移中心、BIM 技术研发与应用中心、城市地下空间与综合管廊设计研究中心、城市与综合交通规划中心）。

科技园区设有研发办公大楼、道路结构与材料实验室、桥隧结构实验大厅、大型步入式环境实验箱、交通安全与智能交通模型实验室、中试基地、综合服务楼以及其它配套设施，总建筑面积超 3 万平方米。拥有交通部公路工程试验检测综合甲级资质和桥隧甲级专项资质，实验厂房建筑面积 7000 多平方米。始终坚持以科技进步为先导，以技术创新支撑和引领企业发展，目前拥有 1 个国家重点实验室、1 个交通部重点实验室，1 个陕西省重点实验室，1 个中国交建重点实验室；1 个交通部研发中心，1 个交通部协同创新平台；1 个陕西省企业技术中心；共建 2 个国家工程实验室。

七十多年来，累计承担了各类纵横向科技研发项目 200 余项，共获得国家科技进步奖 8 项（其中一等奖 3 项），省部级科技进步奖、全国工程技术创新奖等各类科技奖 300 余项，获国际专利、国家专利、计算机软件著作权和注册商标等近 264 余项。承担国家及行业、地方技术标准、规范编制修订项目 82 项，出版专著 20 余部，发表学术论文 1500 余篇。

凭借丰富的工程实践经验与技术实力，我院在现代公路勘测设计技术、长大公路桥隧工程技术、地质勘察与减灾防灾技术、特殊路基与地基处治技术、桥梁检测、维修改造与加固技术等专业领域取得了丰硕的科技创新成果，拥有寒区多年冻土公路建养技术、桥梁参数化、标准化、智能化设计技术、特殊复杂地下工程建设与运营技术、公路市政交通 BIM 设计成套技术等特色技术，为交通运输行业各类工程建设提供了宝贵的经验。

4.2 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
战昂	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	43	正高级	桥梁工程	项目负责人（项目整体规划、质量及进度控制）
马明	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	39	副高级	桥梁工程	执行负责人
王晓光	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	35	副高级	桥梁工程	技术负责人
高林丽	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	女	35	副高级	计算机技术	软件研发负责人
刘祖锋	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	31	中级	桥梁工程	分项负责人

党李涛	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	36	副高级	桥梁工程	分项负责人
陈团结	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	51	正高级	道路工程 (路面)	技术顾问
陆宏涛	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	34	中级	软件工程	系统研发
辛凌风	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	27	初级	桥梁工程	预警联动技术研发
宫成兵	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	52	正高级	隧道工程	依托工程验证
秦洲	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	49	正高级	隧道工程	依托工程验证
曹海波	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	43	正高级	道路工程 (路面)	去雨雾算法研发
吴雪	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	女	37	中级	工商管理	暗光图像增强算法研发
王孝红	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	39	副高级	道路工程 (路面)	监测设备选型
李震	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	36	副高级	道路与铁道工程	监测数据分析及预警

4.3 各自承担的主要工作

本项目承担单位为中交第一公路勘察设计研究院有限公司，负责本项目立项申报、工作大纲、调研、编制、统稿、组织评审等所有的工作。

4.4 项目主要负责人情况

项目负责人：

战昂，正高级工程师，长安大学桥梁与隧道工程专业硕士。长期从事结构智能监测与预警、桥梁检测与评估以及桥梁维修养护与加固技术方面的研究工作。参与交通运输部行业规范《公路桥梁加固施工技术规范》、《公路钢结构桥梁养护技术规范》编写工作。获得中国公路学会科技进步二等奖 2 项，陕西省科技进步三等奖 1 项，中国交

建优秀设计奖 1 项；获得发明专利 6 项，实用新型专利 7 项；在全国核心刊物上发表科研论文 5 篇。

执行负责人：

马明，高级工程师，西南交通大学桥梁与隧道工程专业博士。主要从事结构健康监测、既有桥梁评定及加固技术研究、BIM 技术研发应用、人工智能技术研发、公路基础设施数字化养护技术研究等方向。获省部级奖 5 项，主持和参与国家科技支撑计划、国家自然科学基金、交通运输重大科技项目、陕西省科技攻关等重大科研项目 10 余项；参与编制行业标准 2 部，地方标准 2 部，团体标准 6 部。发表论文 18 篇（SCI 收录 3 篇，EI 收录 6 篇，中文核心 9 篇），专利 6 项，软件著作权 8 项。

技术负责人：

王晓光，高级工程师，长安大学桥梁与隧道工程专业硕士，目前博士研究生在读。主要从事公路基础设施智能感知、数字化养护管理及相关科研工作。主持或参与完成的数字化养护管理项目 5 项，主要负责和重点参与结构健康监测项目 20 余项。“王晓光智能检测创新工作室”负责人，获秦创原、沣东杯科技工作者创新创业大赛三等奖，中国公路学会交通 BIM 工程创新二等奖以及科学技术二等奖，入选陕西省科协青年人才托举计划。

技术顾问：

陈团结，正高级工程师，长期从事公路养护技术、基础设施智能感知、交通铺面工程技术以及路面新材料研发工作，在公路养护决策

理论、铺面设计理论与方法、绿色铺面技术等领域开展了大量研究工作。主持和参与国家科技支撑计划、交通运输重大科技项目、陕西省科技攻关等重大科研项目 20 余项;主编地方标准 2 项,团体标准 2 项,中国交通建设集团标准 2 项;荣获省部级科学技术一等奖 1 项,二等奖 8 项,三等奖 3 项。在核心期刊及国际学术交流会议发表论文 40 余篇,SCI、EI 检索 5 篇。

五、项目依托工程(工作)情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程概况

本项目依托于 G70 福银高速西安至陕鄂界段(蓝田县席家河至商州区林岔河段)K1602+200~+400 下行路堑边坡,该边坡为 4 级路堑高边坡,一级边坡坡脚设置挡墙,挡墙外露高度 5.5~6m。

该区段地层由老至新主要有:下元古界变质岩系(Pt),主要有千枚岩(粉砂质板岩)夹变砂岩,分布在土层之下、岩石风化强烈节理、裂隙较发育,多呈碎裂状、角砾状、楔形块状等:硅质岩、砂质大理岩夹层,分布于千枚岩中,岩石呈灰白色,较破碎,岩芯呈碎块、短柱状,第四系全更新统坡积层,松散堆积物(Q4),以坡洪积形成的碎石土、粉质黏土为主(Q4pl+dl)主要分布于宽缓的斜坡及坡脚地带。另外,可见少量人工堆积的块石、碎石等。

根据工程地质调绘及钻孔揭示资料,边坡区在勘探深度范围内上覆地层主要为第四系全新统残坡积层粉质黏土、碎石,下伏下元古界变质岩系(Pt)全-强风化千枚岩,局部夹有薄层的硅质大理岩。边坡区在勘探深度范围内可分为 6 个工程地质层,现由上而下分述如下:

①素填土 (Q4ml)：杂色，稍密-中密，稍湿-饱和，主要由施工期间块石、混凝土和碎石土等组成，颗粒不均。

②粉质黏土 (Q4dl+pl)：褐黄色，可塑-硬塑，土质较均匀，黏粒为主，切面光滑，韧性中等。承载力特征值 $[fak]=180\text{kPa}$ ，摩阻力标准值 $q_{ik}=50\text{kPa}$ 。

③粉质黏土 (Q4dl+pl)：灰白色，软塑-可塑，土质较均匀，黏粒为主，切面光滑。承载力特征值 $[fak]=130\text{kPa}$ ，摩阻力标准值 $q_{ik}=30\text{kPa}$ 。

④碎石 (Q4dl+pl)：杂色，稍湿，稍密-中密，骨架颗粒成分主要由硅质大理岩组成，一般粒径 2-4cm，呈棱角状，含量约占 75%。间隙粘粒及角砾充填。承载力特征值 $[fak]=300-500\text{kPa}$ ，摩阻力标准值 $q_{ik}=80-120\text{kPa}$ 。

⑤全风化千枚岩 (Pt)：褐-灰褐色，主要矿物成分为长石、石英、云母，岩质较软，手掰易散，岩芯破碎，呈碎屑状，岩芯采取率 65%。承载力特征值 $[fa_0]=280\text{kPa}$ ，摩阻力标准值 $q_{ik}=70\text{kPa}$ 。

⑥强风化千枚岩 (Pt)：灰绿色，岩体风化较严重，主要矿物成分为长石、石英、云母，岩质较软，手掰易散，岩芯破碎，多呈碎屑状，少量块径在 3-5cm 碎块状。承载力特征值 $[fa_0]=600\text{kPa}$ ，摩阻力标准值 $q_{ik}=130\text{kPa}$ 。

本项目拟在该边坡开展相关的工程验证试验，包括以下具体工作内容：

(1) 多场景数据采集：在不同监测距离、光照条件、气象等场

景下，采集标靶图像、边坡位移监测数据，构建算法训练与验证数据集；

(2) 算法实地验证：测试亚像素级角点检测、暗光图像增强、雨雾图像复原等算法的实际适配效果，确保位移测量精度、标靶识别准确率等技术指标达标；

(3) 预警联动实践：进行路侧预警设备（情报板、声光报警器）与监测系统等的联动测试，验证边缘计算驱动的秒级预警响应机制。

5.2 投资来源

本项目总经费 80 万元，交通运输厅补助：19.97 万元，承担单位自筹 60.03 万元。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

本项目以依托工程为载体，将科研进度与工程全周期（勘察-施工-试运行-运营）深度绑定，通过“阶段同步、场景适配、成果落地”的联动机制，实现科研与工程的双向支撑，具体配合如下：

1、前期准备阶段：科研调研与工程勘察同步推进（2026.3-2026.5）

①科研进度：调研国内外技术资料、编制课题大纲，明确研究方向与技术路线。

②工程进度：开展依托工程边坡实地勘察，确定边坡参数、风险点及监测设备布设区域。

③配合方式：

科研团队参与工程勘察，结合算法研发需求，提出标靶布设密度、相机安装角度等技术建议，确保工程勘察结果匹配科研数据采集标

准；工程方反馈边坡实际环境（光照、雨雾频率），为科研算法（暗光增强、雨雾复原）的场景适配提供现实依据，避免科研脱离工程实际。

2、算法研发阶段：科研攻关与工程施工联动（2026.6-2027.2）

（1）相机标定算法研发与工程硬件布设配合（2026.6-2026.8）

①科研进度：开展亚像素级角点检测的相机标定算法研究，完成相机、标靶等硬件选型，提交算法文档与选型方案。

②工程进度：同步完成标靶固定、相机支架安装。

③配合方式：

科研团队现场指导标靶安装精度，确保标靶特征满足算法提取需求；工程施工为科研硬件部署提供物理载体，保障后续数据采集的稳定性。

（2）暗光/雨雾算法研发与工程环境测试配合（2026.9-2027.02）

①科研进度：开展暗光图像增强、雨雾图像复原算法研究，提交测试报告、撰写论文。

②工程进度：完成监测设备（相机、边缘计算模块）安装调试，接入路侧供电/网络，具备数据实时采集能力。

③配合方式：

工程现场提供真实暗光（夜间）、雨雾环境，为科研算法提供实测数据；科研团队将初步算法部署至工程设备，通过工程环境验证算法性能，迭代优化适配性。

3、系统开发阶段：科研集成与工程试运行衔接（2027.3-2027.11）

①科研进度：开展边坡灾害检测及预警联动技术研究，完成系统开发与集成，申请软件著作权。

②工程进度：完成路侧预警设备（情报板、声光报警器）安装，打通监测-预警通信链路，开展工程试运行。

③配合方式：

工程方验证灾害识别、预警联动效果；科研团队根据工程试运行数据，优化系统响应时间与联动稳定性。

4、成果验收阶段：科研结题与工程运营落地（2027.12-2028.03）

①科研进度：系统优化、总结成果、撰写研究报告、结题验收。

②工程进度：依托工程交付。

③配合方式：

科研成果直接转化为工程运营资产，科研团队提供技术支持，指导工程运维；工程长期运营数据为科研成果的后续优化提供验证，同时形成可复制的工程应用案例，支撑技术推广。

5.4 组织管理形式

为保证本课题能够高质、高效按期达到预定目标，必须建立全面、高效的组织管理机制。本课题研究以中交第一公路勘察设计研究院有限公司科研团队丰富的人力资源、专业知识和广泛业务领域为支撑，以项目负责人为课题组织管理主体，由具有博士、硕士学位的专业技术人员组成课题组开展研究工作。

根据研究内容将课题组划分为不同研究小组，建立专人负责制，各小组组员对小组负责人负责，小组负责人对项目负责人负责。课题

立项后，设立包括项目负责人、技术负责人及依托工程负责人的课题负责小组，负责整个课题的统筹、协调工作。各研究小组向课题负责小组提供季报，课题组定期召开协调会，并进行专家咨询。通过高效、规范的组织管理，充分发挥各类资源、人才优势，高质高量的实现课题目标。

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	19.97	合 计	80.00	19.97	60.03
工程配套研究经费	0	1.设备费	24.00	4.00	20.00
单位自筹	60.03	（1）购置设备费	20.00	2.00	18.00
其他经费	0	（2）设备改造与租赁费	4.00	2.00	2.00
		2.业务费	36.00	11.97	24.03
		（1）材料费	6.00	2.00	4.00
		（2）测试化验实验加工费	0.00	0.00	0.00
		（3）燃料动力费	4.00	3.00	1.00
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	15.00	4.00	11.00
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	5.00	0.97	4.03
		（6）其他费用	6.00	2.00	4.00
		3.劳务费	14.00	2.00	12.00
		（1）专家咨询费	8.00	1.00	7.00
		（2）聘用人员劳务费	0.00	0.00	0.00
		（3）其他劳务费	6.00	1.00	5.00
		（二）间接费用	6.00	2.00	4.00
		4.管理费	2.00	1.00	1.00
		5.绩效支出	4.00	1.00	3.00

1. 设备费

(1) 购置设备费

本项经费用于项目实施过程中购置专用仪器设备, 共计 20 万元, 其中, 使用厅拨经费 2 万元。

序号	名称	单位	数量	总经费 (万元)	其中: 厅拨 经费(万元)
1	机器视觉相机及标靶	套	2	8	0
2	边缘计算模块	套	2	6	0
3	支架、供电模块、传输设备	套	2	4	0
4	路侧预警设备	套	1	2	2
费用合计				20	2

(2) 设备改造与租赁费

本项经费用于项目实施过程中对现有仪器设备进行升级改造以及租赁外单位仪器设备, 共计 4 万元, 其中, 使用厅拨经费 2 万元。

序号	项目	总经费 (万元)	其中, 厅拨经 费(万元)
1	设备改造费(相机防护改造、边缘计算模块接口适配等)	2	2
2	云服务器租赁费	2	0
费用合计		4	2

2. 业务费

(1) 材料费

本项经费用于项目实施过程中消耗的各种原材料、辅助材料等低值易耗品的采购及运输、装卸、整理等费用, 共计 6 万元, 其中, 使用厅拨经费 2 万元。

序号	材料名称	数量/单位	总经费 (万元)	其中: 厅拨经 费(万元)
----	------	-------	-------------	------------------

序号	材料名称	数量/单位	总经费 (万元)	其中：厅拨经 费（万元）
1	螺栓、支架配件、密封胶等安 装材料	2/套	2	0
2	户外专用网线、防水接线盒、 低功耗电源适配器、备用电池 等辅助材料	2/套	2	0
3	相机防水防护罩、线缆防护套 管等现场防护材料	2/套	2	2
费用合计			6	2

（2）测试化验实验加工费

本项经费用于项目实施过程中支付给外单位（包括项目承担单位内部独立经济核算单位）的检验、测试、化验、实验及加工等费用，共计 0 万元，其中，使用厅拨经费 0 万元。

（3）燃料动力费

本项经费用于项目实施过程中相关大型仪器设备、专用科学装置等运行发生的可以单独计量的水、电、气、燃料消耗费用等，共计 4 万元，其中，使用厅拨经费 3 万元。

序号	项目	总经费 (万元)	其中，厅拨经 费（万元）
1	电力消耗费（深度学习训练服务器、现场监测 设备长期运行等）	2	1
2	燃料消耗费（施工作业车、往返现场检测车）	2	2
费用合计		4	3

（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费

①差旅费

本项经费用于项目实施过程中开展科学实验（试验）、科学考察、业务调研、学术交流等所发生的外埠差旅费、市内交通费用等。本项

目预计科学考察、业务调研学术交流等次数预计 4 次, 每次出差人数 2 人, 出差平均天数 4 天, 食宿费加补贴 500 元/天/人, 交通费按 2500 元/次/人(含往返机票、市内交通费和省内长途交通费)。差旅费共计 9.6 万元, 其中, 使用厅拨经费 2.4 万元。

序号	人数、任务	总经费 (万元)	其中, 厅拨 经费(万元)
1	2 人赴现场进行现场调研	2.4	0
2	2 人赴已有边坡监测现场进行相关技术调研	2.4	0
3	2 人赴高清工业相机、路侧预警设施等厂家开展设备性能调研	2.4	2.4
4	2 人赴依托项目现场进行设备安装调试及数据采集	2.4	0
费用合计		9.6	2.4

②会议费

本项经费用于研究大纲评审、项目验收及相关研讨会, 本项目预计组织相关会议 4 次, 每次会议为期 1 天。每次会议邀请专家 5 名费用为 2000 元/人/天(包括往返交通费、食宿和专家费), 会议场地租赁等费用预计每次 0.35 万元。共计 5.4 万元, 其中, 使用厅拨经费 1.6 万元。

序号	会议名称	总经费 (万元)	其中, 厅拨经费 (万元)
1	研究大纲(实施方案)评审	1.35	0.4
2	中期咨询会	1.35	0.4
3	技术研讨、交流会	1.35	0.4
4	成果验收鉴定会	1.35	0.4
费用合计		5.4	1.6

③国际合作与交流费

本项经费用于项目实施过程中项目研究人员出国及外国专家来华工作的费用，共计 0 万元，其中，使用厅拨经费 0 万元。

故本项目差旅费/会议费/国际合作与交流费预计 15 万元。

(5) 出版/文献/信息传播/知识产权事务费

本项经费用于项目实施过程中，需要支付的出版费、资料费、印刷费、翻译费、专用软件购买费、数据购买和调查费、文献检索费、专业通信费、专利申请及其他知识产权事务等，共计 5 万元，其中，使用厅拨经费 0.97 万元。

序号	项目	总经费 (万元)	其中，厅拨经费 (万元)
1	出版费、资料费、印刷费	1.2	0
2	翻译费、数据购买和调查费	0.83	0
3	文献检索费、专业通行费	0.97	0.97
4	专利申请及其他知识产权事务费	2.0	0
费用合计		5	0.97

①出版费、印刷费等为开展研究及管理工作中各类文稿及相关文件资料的印刷以及课题查新费等支出；资料费为在项目研究过程中需要购置的资料的支出。日常相关文件打印预计 0.4 万元；会议准备文件资料，预计共 10 次会议，600 元/次，小计 0.6 万；资料费预计 0.2 万元。出版费、资料费、印刷费共计 1.2 万元。

②翻译费、数据购买和调查费是在项目研究过程中需要对外文文献翻译、研究调查等的支出，共计 0.83 万元。

③通信费预计 0.42 万元；国内外文献检索及下载费用 0.55 万元。文献检索费、专业通信费共计 0.97 万元。

④专利申请及其他知识产权事务费为项目研发过程中的专利、软著及论文费用，本项目需申报专利或软件著作权2项，发表核心及以上论文一篇，合计2.0万元。

(6) 其他费用

指在项目研究过程中发生的除上述费用之外的其他业务费支出。共计6.0万元，其中，使用厅拨经费2万元。

序号	项目	总经费 (万元)	其中,厅拨经费 (万元)
1	税费	4.8	1
2	其他支出	1.2	1
费用合计		6.0	2

①国家规定税费，按照6%计取，本项合计4.8万元。

②项目运行过程中可能产生的不可预见其他费用，例如对阶段性研究成果的推广和交流等支出，约1.2万元。

其他支出合计6.0万元。

3. 劳务费

(1) 专家咨询费

为保证项目研究过程的顺利进行以及研究成果的先进性，拟聘请行业内知名专家4人，对位移监测算法、临灾预警联动等研究进行技术指导 and 咨询，项目研究期内每位专家累计咨询天数为40天咨询费用按照一天500元/人。本项合计8.0万元，其中使用厅拨经费1万元。

(2) 聘用人员劳务费

本项经费主要用于项目实施过程中支付给参与项目的研究生、博士后、访问学者和项目聘用的研究人员、科研助理及辅助人员等的劳

务性支出，共计 0 万元，其中，使用厅拨经费 0 万元。

(3) 其他劳务费

针对系统平台的日常后台维护与优化升级，需要临时的计算机专业软件编程人员，预计需临时软件人员 2 人，标准为 5000 元/人/月，每人工作累计近 6 个月，合计 6 万元，其中使用厅拨经费 1 万元。

4. 管理费

本项经费用于项目实施过程中项目承担单位为项目研究提供的现有仪器设备及房屋占用，日常水、电、气、暖等消耗，以及有关管理费用的补助支出。预计 2 万元，其中，使用厅拨经费 1 万元。

5. 绩效支出

本项经费用于项目承担单位为项目研究激励科研人员的绩效支出。预计 4 万元，其中，使用厅拨经费 1 万元。

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
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	
		2、软件著作权授权数（项）	1
		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	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(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	
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	
		(1) 小试	否
		(2) 中试(样品样机)	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	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	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(%)	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
效果类指标		3、孵化科技型企业（个）	
		4、转化科技成果（个）	
	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			无

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

8.1 项目预期目标

针对目前边坡监测存在实施费用及后期维护费用高，突发灾害难以预警、复杂环境下监测精度不足等问题，拟基于机器视觉技术，采用高清摄像头、无人机等多手段采集数据并开展预处理，开展公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究，融合大数据分析处理技术与多级临灾预警模型构建，通过对亚像素边缘角点提取、暗光图像增强、雨雾场景下图像复原等核心算法的研发，构建基于云计算的大数据分析平台并集成地理信息系统，实现对边坡空间位移的实时高精度监测及变形趋势精准预判；结合深度学习、大数据分析结果及

历史灾害数据构建多级临灾预警模型,通过交叉验证、回测等方法优化模型性能,并建立涵盖预警信息发布、应急资源调度、救援行动指导的全链条联动机制,研发由智能视觉监测、大数据分析平台、临灾预警联动系统组成的成套软件系统,提供训练好的边坡灾害识别模型及临灾预警模型,支持定制化部署,实现边坡的低成本轻量化监测,在灾害发生时实现预警信息快速传达至相关人员,并对运行车辆、应急处置进行双重指导,避免损失进一步扩大,推动公路高风险边坡的“全时、全域、全链条”监测,确保公路运营安全。

8.2 提交的研究成果及其形式

(1) 研究报告:《公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究》报告 1 本;

(2) 专利或软件著作权:申报专利或软件著作权 2 项;

(3) 论文:发表(含录用)核心及以上论文 1 篇;

(4) 基于机器视觉的公路边坡轻量化监测及临灾预警联动系统 1 套。

8.3 经济、社会、环境效益分析

8.3.1 经济效益

①边坡直接监测成本的降低

按照常规边坡监测方法,一个边坡监测的实施成本约 30~60 万元,实施周期在 1 个月左右,根据本项目技术方案,一个边坡的位移监测成本可控制在 10 万元以内,实施周期可控制在 1 周以内。

②临灾预警联动带来的间接效益

本项目可在边坡突发灾害发生的第一时间与路侧预警设备进行联动，对过往车辆进行及时预警，避免灾害损失的进一步扩大，最大限度的降低对生命财产造成的损失。

③后期维护成本的降低

本项目基于机器视觉对边坡位移进行全天候监测，所需的主要硬件设备为相机以及在边坡上设置的永久性标靶，在供电、网络、数据集成、辅材等方面相比传统监测方式更为简单，后期维护所需的人员成本和设备成本可减少 50%以上。

④市场潜力巨大

我国已建成公路 540 多万公里，其中包含巨量的高风险边坡，随着社会对于交通安全风险监测的不断重视，低成本的轻量化监测技术具有广阔的应用前景和市场潜力，有望带来显著的经济效益增长。

8.3.2 社会效益

①提升公路基础设施运营安全性

边坡作为公路基础设施中的重要结构物，一直以来是公路运营安全风险的高发点，本项目针对公路边坡实现全天候的实时监测及预警，并可在突发灾害发生时与路侧预警设备进行联动，大幅提升了公路运营的安全性。

②推动公路边坡监测的全面覆盖

本项目在满足边坡位移监测需求的同时，综合成本降低 50%以

上，能够在一定程度上缓解养护需求与养护资金短缺之间的矛盾，有助于推动边坡安全监测在行业内的全面推广和落地实施。

8.3.3 环境效益

传统监测系统施工周期长、土建工程量大，易破坏边坡植被与土壤结构；本项目系统施工周期短、无需大规模土建，对边坡生态环境的扰动降至最低。同时，维护频次减少，避免频繁维护作业对沿线生态环境的反复干扰。

九、其它需要说明的问题

无

十、申请单位意见

该项目聚焦公路边坡安全监测痛点，研发多场景智能视觉监测算法、临灾预警联动技术，构建低成本轻量化监测系统，实现边坡空间位移高精度实时监测与突发灾害秒级预警，对提升公路运营安全、推动边坡监测智能化转型具有重要的理论价值与应用意义。

本项目研究总经费 80 万元，其中厅拨经费 19.97 万元，申请单位自筹经费 60.03 万元，可保障项目研究工作顺利开展。

同意申报！



单位负责人：（签字）



年 月 日

公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统 研究大纲评审意见

2026年3月11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“公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究”（项目编号：25-45K）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、项目研究内容比较全面，研究目标明确，技术路线基本可行。

二、项目研究人员组成比较合理，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.进一步明确陕西省内的依托工程；
- 2.完善本项目的技术与常规监测的数据集成；
- 3.进一步阐述夜间、雨雾等暗光场景视觉监测的可能性。

主任委员：

2026年3月11日

专家审查意见表

项目名称	公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究				
专家姓名	边世斌	职务/职称	正高工	专 业	交通土建
专家单位	陕西交通技术咨询有限公司			联系电话	13709187350

评 审 意 见

1. 公路边坡作为道路基础设施的重要组成部分，其安全稳定性直接关系到交通运行的安全与公众生命财产的安全。项目通过多场景智能视觉监测技术，实现对公路边坡的全方位、全天候、高精度监测，并结合临灾预警联动系统，提升边坡灾害预警的准确性和时效性，立项必要。
2. 研究内容应包括多场景智能视觉监测技术、大数据分析处理、临灾预警模型构建、联动响应机制设计等。研究成果应设计一套完整的临灾预警联动系统，包括预警信息发布、应急资源调度、救援行动指导等，确保预警信息能够迅速传达至相关部门及责任人，有效应对边坡灾害。
3. 通过数据采集与预处理（利用高清摄像头、无人机航拍、卫星遥感等多种手段获取边坡高清图像，进行图像增强、噪声过滤等预处理工作）；基于深度学习框架（如 TensorFlow、PyTorch），开发边坡灾害识别算法；构建基于云计算的大数据分析平台，实现数据的高效存储与计算，集成 GIS 地理信息系统，实现空间分析与可视化展示；利用历史灾害数据对预警模型进行训练，通过交叉验证、回测等方法优化模型性能，确保预警准确率；并应在典型边坡区域进行实地测试，验证系统稳定性与实用性，根据反馈调整优化系统，最终实现大规模部署应用。
4. 最终应提交一套软件系统（包含智能视觉监测软件、大数据分析平台、临灾预警联动系统，具备用户友好的操作界面和强大的后台支持）、提供训练好的边坡灾害识别模型及预警模型，支持定制化部署、选取若干典型边坡区域进行应用示范，提交应用效果分析报告及改进建议。

评审专家（签字）：



2026年3月11日

专家审查意见表

项目名称	公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究				
专家姓名	封捍东	职务/职称	正高级工程师	专 业	桥梁工程
专家单位	陕西交控科技集团			联系电话	13991816558

评 审 意 见

一、项目研究目标明确，研究内容全面，技术路线可行。

二、项目研究人员组成比较合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，具备开展研究工作的条件。

三、预期成果完全覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架高度契合。

建议：

1、依托工程情况不明确，请尽快落实依托工程，

2、P41 现有常规自动化监测手段如 GNSS、无人机扫描等，监测精度约为 2 mm。P56（1）提出基于机器视觉的公路边坡空间位移监测高精度算法以适应不同距离位移测量精度要求（50 m 以内 ≤ 2 mm、50~100 m ≤ 3 mm、100~150 m ≤ 5 mm）；野外边坡稳定性监测观测点与靶标距离超过 100m 常见，精度 ≤ 5 mm 是否合适？大于 150 米精度达到多少？请斟酌。

3. 加强预警研究 进行分级预警

评审专家（签字）：

封捍东

2026 年 3 月 8 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	公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究				
专家姓名	师延强	职务/职称	正高工	专 业	道路与桥梁
专家单位	铜川市交通运输综合执法支队			联系电话	13309195936

评 审 意 见

（一）基于机器视觉的公路边坡空间位移监测算法研究

1.优势与亮点

核心算法研发精准对标行业痛点：针对传统监测成本高、复杂环境下精度不足的问题，聚焦亚像素级角点检测的相机标定、暗光图像增强、雨雾图像复原三大核心算法，技术切入点精准，研究深度充足。

技术方案兼具创新性与可行性：相机标定算法明确不同监测距离（50m、50-100m、100-150m）的精度指标，通过引入最小二乘优化与鲁棒性阈值筛选提升角点定位精度，方案具体可操作；暗光图像增强算法针对“小尺度标靶特征保留”核心需求，引入注意力机制模块，有效规避传统算法特征弱化的缺陷；雨雾图像复原采用“CNN+Transformer”混合网络架构，兼顾局部细节重建与全局特征捕捉，适配雾浓度不均、雨量动态变化的复杂场景，技术路线先进。

数据集构建贴合实际场景：明确采集不同监测距离、光照条件、雨雾强度下的真实边坡图像，结合数据增强技术扩充样本，确保数据集的多样性与代表性，为算法训练与验证提供坚实支撑。

2.优化建议

（1）优化补充多地形场景适配设计：现有算法主要聚焦光照、气象环境适配，建议增加对不同土质（黄土、岩质、土质混合）、地形坡度（缓坡、陡坡、多级边坡）的适配研究，通过调整标靶特征设计与算法参数，提升在复杂地形条件下的位移监测精度。

（2）强化算法抗干扰能力：公路边坡监测易受风力振动、植被遮挡、粉尘覆盖等干扰，建议在算法中增加针对性优化模块，如振动滤波模块、植被遮挡识别与剔除算法、标靶粉尘覆盖补偿机制，进一步提升算法的鲁棒性。

（3）明确算法实时性优化目标：机器视觉算法易受数据量影响导致实时性不足，建议补充算法实时性量化指标（如单帧图像处理时间 $\leq XXms$ ），通过模型轻量化（如剪枝、量化）、核心计算模块硬件加速等方式，确保满足实时监测需求。

（二）边坡突发灾害检测算法及临灾预警联动技术研究

1.优势与亮点

检测模型设计兼具精度与可靠性：基于 YOLO、Faster R-CNN 等成熟算法框架，构建“图像特征+位移数据”双维度检测模型，有效降低单一检测维度的误报率，设计思路科学；通过优化网络结构减少冗余计算，兼顾检测速度与精度，适配突发灾害快速识别需求。

预警联动机制贴合工程实际：明确与路侧情报板、声光报警器的联动逻辑，设计专属通信协议与触发条件，解决传统监测“预警滞后、联动不畅”的行业短板；依托边缘计算设备实现灾害现场同步响应，确保预警联动响应时间不高于 5 秒，技术指标明确且符合应急处置需求。

全链条验证方案完善：规划了算法单独验证、系统集成调试、依托工程全流程验证的完整验证体系，通过模拟灾害场景与实地测试相结合的方式，确保预警联动的准确性与及时性，验证方案全面且具有说服力。

2. 优化建议

（1）细化预警等级划分与联动策略：现有方案未明确预警等级梯度，建议补充基于位移速率、灾害规模的多级预警机制（如预警、紧急预警、特紧急预警），针对不同预警等级设计差异化联动策略（如情报板显示内容、声光报警器频率、是否联动路网调度平台），提升预警的实用性与针对性。

（2）增加设备兼容性与冗余设计：建议增加对不同厂商和不同的“声光预警”设备的通信协议适配研究，确保系统兼容性。

（三）其他建议

1. 强化多源数据融合应用，提高“事前预警空间”：建议整合北斗定位、雨量计、土压力计等现有监测数据，与机器视觉监测数据进行多源融合分析，构建“视觉+传感”的复合监测模型，进一步提升灾害预判的准确性与预警的提前量，避免单一技术手段的局限性。

2. 补充跨领域适配技术研究：项目核心技术具有跨领域推广潜力，建议在研究内容中增加针对铁路边坡、矿山边坡、水利枢纽边坡等场景的适配技术研究框架，明确算法调整方向与硬件改造方案，为后续技术推广奠定基础。

3. 完善系统的标准化与可推广性：建议在系统研发中同步开展相关技术规范和应用指南的研究，明确设备布设、标靶设计、算法应用、系统运维等标准要求，为研究成果的规模化推广和行业应用提供标准化支撑。

4. 补充长期运维与成本分析：建议补充系统长期运行的维护方案和成本分析，进一步明确设备故障率、维护周期、运维人员配置等内容，为项目成果落地后的实际应用提供更全面的参考。

评审专家（签字）： 师延强

2026年3月11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	公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究				
专家姓名	牛开民	职务/职称	研究员	专 业	道路工程
专家单位	交通运输部公路科学研究院			联系电话	13701028353

评 审 意 见

△项目研究内容全面，研究思路明确，技术路线基本可行。

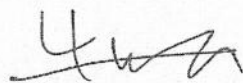
△项目研究人员配备合理。前期研究基础扎实，具备开展研究工作条件。

△建议

。落实陕西省境内的宣传与申报。

。严格按照科研计划要求落实实施计划。

评审专家（签字）：



2026 年 3 月 11 日

专家审查意见表

项目名称	公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究				
专家姓名	王松根	职务/职称	研究员	专 业	公路工程
专家单位	原山东省交通厅公路局			联系电话	13488700091

评 审 意 见

本项目紧密贴合公路养护、智慧交通建设等实际需求，开展的基于机器视觉的公路边坡空间位移监测算法研究、边坡突发灾害检测算法及临灾预警联动技术研究，具有一定的现实意义和创新性。

提交的研究大纲，研究内容较全面、技术路线和实施方案可行，项目承担单位和研究团队人员组成可满足项目研究要求，工作基础扎实，研究经费已落实，基本具备开展项目研究的条件。

同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

1. 视觉监测能否解决夜间（即能见度几乎为零的情况下）监测的问题？
2. 应与其他检测手段、日常养护巡查、经常性检查和定期检查相结合，避免单一路径依赖。
3. 实现灾害发生后5秒内预警（准确说是报警）还不够，应根据检测数据和分析，尽可能在灾害发生前预警，临灾预警是指灾害发生前。

评审专家（签字）：王松根

2026 年 03 月 11 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究 (项目编号: 25-45K)

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	边世斌	陕西交通技术咨询 有限公司	道路工程	交通土建	正高工	
2	委员	封捍东	陕西省公路学会	桥梁工程	公路工程质量管理	正高工	
3	委员	师延强	铜川市交通运输 综合执法支队	道路与桥 梁工程	交通运输工程	正高工	
4	委员	牛开民	交通运输部公路 科学研究院	道路工程	道路工程	教授	网上评审
5	委员	王松根	山东省公路局	公路工程	道路工程	正高工	网上评审

评审会参会人员签到表

姓 名	职称/职务	工作单位	联系电话
李斌	副总工	陕西交通技术咨询有限公司	13709087350
张强	正高工	省交通运输规划所	13309151936
林晓东	正高工	陕西路桥科技集团	13991816558
张颖	正高	省公路局	15388602751
齐娟	正高	省公路局	13991366181
王海亮	高工	“	13609198517
战昂	正高	校-公院	13488114858
马月	高工	校-公院	17795696086
王晓光	高工	校-公院	15353585568
刘祖锋	工程师	校-公院	18829505237

2026 年 3 月 11 日

专家意见处理表

项目名称：公路边坡多场景智能视觉监测及临灾预警联动系统研究 (项目编号： 25-45K)

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	边世斌	1、研究内容应包括多场景智能视觉监测技术、大数据分析处理、临灾预警模型构建、联动响应机制设计等。研究成果应设计一套完整的临灾预警联动系统，包括预警信息发布、应急资源调度、救援行动指导等，确保预警信息能够迅速传达至相关部门及责任人，有效应对边坡灾害。 2、通过数据采集与预处理(利用高清摄像头、无人机航拍等多种手段获取边坡高清图像，进行图像增强、噪声过滤等预处理工作)；基于深度学习框架(如 TensorFlow、PyTorch)，开发边坡灾害识别算法；构建基于云计算的大数据分析平台，实现数据的高效存储与计算；集成 GIS 地理信息系统，实现空间分析与可视化展示；利用历史灾害数据对预警模型进行训练，通过交叉验证、回测等方法优化模型性能，确保预警准确率；并应在典型边坡区域进行实地测试，验证系统稳定性与实用性，根据反馈调整优化系统，最终实现大规模部署应用。 3、最终应提交一套软件系统(包含智能视觉监测软件、大数据分析平台、临灾预警联动系统，具备用户友好的操作界面和强大的后台支持)、提供训练好的边坡灾害识别模型及预警模型，支持定制化部署、选取若干典型边坡区域进行应用示范，提交应用效果分析报告	1、已在研究内容、实施方案、技术路线中将大数据分析处理、临灾预警模型构建、联动响应机制设计等融入进来，详见 3.2 等节相关内容。 2、将数据采集与预处理、深度学习框架、大数据分析平台等内容已融入研究内容及配套实施方案、技术路线中，详见 3.2 等节相关内容。 3、已在研究内容及目标等中明确软件系统及模型的要求，详见 3.2 等节相关内容。

		告及改进建议。	
2	封捍东	1、依托工程情况不明确，请尽快落实依托工程。 2、P41 现有常规自动化监测手段如 GNSS、无人机扫描等，监测精度约为 2mm。P56(1)提出基于机器视觉的公路边坡空间位移监测精度算法以适应不同距离位移测量精度要求(50m 以内$\leq 2\text{mm}$、50~100m$\leq 3\text{mm}$、100~150m$\leq 5\text{mm}$)；野外边坡稳定性监测观测点与靶标距离超过 100m 常见，精度$\leq 5\text{mm}$ 是否合适？大于 150 米精度达到多少？请斟酌。 3、加强预警研究，进行分级预警。	1、本项目已落实了具体的依托工程，详见 5.1 依托工程概况。 2、3.5.1 技术指标中对精度指标做了进一步的优化，涵盖 50~200m；同时本方案除了位移精度要求外，还做了位移趋势预判，通过位移的变化量与变化趋势综合进行预警，不单独依赖于位移精度。 3、已在研究内容及方案中明确了构建多级临灾预警模型，进行分级预警。
3	师延强	1、优化补充多地形场景适配设计：现有算法主要聚焦光照、气象环境适配，建议增加对不同土质(黄土、岩质、土质混合)、地形坡度(缓坡、陡坡、多级边坡)的适配研究，通过调整标靶特征设计与算法参数，提升在复杂地形条件下的位移监测精度。 2、强化算法抗干扰能力：公路边坡监测易受风力振动、植被遮挡、粉尘覆盖等干扰，建议在算法中增加针对性优化模块，如振动滤波模块、植被遮挡识别与剔除算法、标靶粉尘覆盖补偿机制，进一步提升算法的鲁棒性。 3、明确算法实时性优化目标：机器视觉算法易受数据量影响导致实时性不足，建议补充算法实时性量化指标(如单帧图像处理时间$\leq XX\text{ms}$)，通过模型轻量化(如剪枝、量化)、核心计算模块硬件加速等方式，确保满足实时监测需求。 4、细化预警等级划分与联动策略：现有方案未明确预警等级梯度，建议补充基于位移速率、灾害规模的多级预警机制(如预警、紧急	1、已在 3.2.2 实施方案中补充了多地形场景适配设计，涵盖不同土质、地形坡度的适配研究内容。 2、在原有核心算法研发的基础上，新增算法抗干扰专项优化模块，针对性研发风力振动滤波算法、植被遮挡特征识别与剔除算法、标靶粉尘覆盖灰度补偿与特征还原机制，详见 3.2.2 实施方案相关章节。 3、制定“模型轻量化+硬件加速”的双重优化策略，通过对核心算法进行剪枝、量化等轻量化处理，结合边缘计算设备的核心计算模块硬件加速适配，实现算法实时性优化。详见 3.2.2 实施方案相关章节。 4、在临灾预警联动技术研究中，明确了构

	预警、特紧急预警), 针对不同预警等级设计差异化联动策略(如情报板显示内容、声光报警器频率、是否联动路网调度平台), 提升预警的实用性针对性。 5、增加设备兼容性与冗余设计: 建议增加对不同厂商和不同的“声光预警”设备的通信协议适配研究, 确保系统兼容性。 6、强化多源数据融合应用, 提高“事前预警空间”: 建议整合北斗定位、雨量计、土压力计等现有监测数据, 与机器视觉监测数据进行多源融合分析, 构建“视觉+传感”的复合监测模型, 进一步提升灾害预判的准确性与预警的提前量, 避免单一技术手段的局限性。 7、补充跨领域适配技术研究: 项目核心技术具有跨领域推广潜力, 建议在研究内容中增加针对铁路边坡、矿山边坡、水利枢纽边坡等场景的适配技术研究框架, 明确算法调整方向与硬件改造方案, 为后续技术推广奠定基础。 8、完善系统的标准化与可推广性: 建议在系统研发中同步开展相关技术规范和应用指南的研究, 明确设备布设、标靶设计、算法应用、系统运维等标准要求, 为研究成果的规模化推广和行业应用提供标准化支撑。	建“多级预警+差异化联动”的完整机制。 5、已在 3.3.1 研究技术方案中增加了对不同厂商设备的通信协议适配研究, 通过开发标准化协议适配接口与兼容模块, 实现系统与不同设备的无缝对接。 6、本项目依托工程为滑坡不良地质抗灾能力提升区域, 后期研究中, 会增加与北斗、雨量计、土压力计等常规监测数据的集成融合分析, 提升灾害预判的准确性与预警的提前量。 7、跨领域适配技术研究放在后续技术改造及计划中, 见 3.4 节相关内容。 8、在 3.3.2 中增加“设备布设、标靶设计、算法应用、系统运维等标准要求”, 为推广应用奠定基础。
4	1、落实陕西省境内的实体工程。 2、严格按科研计划要求落实实施计划。	1、已落实了具体的依托工程, 详见 5.1 依托工程概况。 2、已按要求明确了项目的起止时间, 重新制定了科研计划, 详见 5.3 节相关内容。

5	王松根	1、视觉监测能否解决夜间(即能见度几乎为零的情况下)监测的问题? 2、应与其他检测手段、日常养护巡查、经常性检查和定期检查相结合,避免单一路径依赖。 3、实现灾害发生后 5 秒内预警(准确说是报警)还不够,应根据检测数据和分析,尽可能在灾害发生前预警,临灾预警是指灾害发生前。	1、通过“硬件升级+算法创新”的组合策略,通过选用黑光摄像机和棋盘格反光标靶,搭配专为极低能见度场景研发的图像增强与目标识别算法,确保夜间极低能见度场景的持续监测,详见 3.2.2 节相关内容。 2、已补充了视觉监测数据与传统监测以及日常巡查等数据的融合分析,详见 3.2.2 节相关内容。 3、已在临灾预警联动技术研究中,明确了构建“多级预警+差异化联动”的完整机制,同时修改对应的技术指标,详见 3.5.1.
---	-----	---	---

大纲评审委员会专家(签字):



项目负责人(签字):

