

项目合同编号：25-37X

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：基于无人机自动巡检的高速公路边坡病害快速识别研究

承担单位：长安大学

项目负责人：唐蕾

通讯邮编、地址：710000、陕西省西安市南二环中段长安大学

传真、电话：029-82334204

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) 面向弱 GPS 环境的跨视角自适应视觉定位，实现视觉导航下的高精度自主巡检。
- 2) 构建多源融合感知体系，支撑巡检过程中的实时自主避障。
- 3) 开展边坡高精度实景三维建模。
- 4) 建立不少于 5000 张高分辨率、涵盖 6 类典型病害的边坡病害图像数据集。
- 5) 实现边坡病害目标的高精度智能识别。

2. 技术关键

- 1) 弱 GPS 环境下视觉定位的精度与稳定性难以保障。
- 2) 复杂边坡场景中障碍物种类多样、环境动态变化，难以实现实时可靠感知与规避。
- 3) 病害目标尺度小、纹理弱、边界模糊，在复杂背景下的精准提取与识别难度大。

3. 依托工程（依托工作）

依托汉宁高速 K1378+477 至 K1378+525 下行边坡治理工程。该边坡段位于弱膨胀土层，2024 年夏季的持续降雨导致土体膨胀，进而引起坡口外的灌溉渠开裂变形，同时边坡的骨架护坡也遭受了严重的滑塌和变形等病害。通过对现场的细致调查，并结合实测断面数据，目前该工程已制定了专门的护坡方案。然而，目前的巡查工作仍然依赖于人工徒步检查，辅以简易工具，通过直观观察、听音

和敲击等基本手段来评估边坡状况，这种方法不仅危险系数高，而且容易遗漏关键病害，难以发现细节问题。因此，迫切需要引入无人机巡查和智能灾害预测技术，以提升边坡治理的效率和安全性，确保工程的顺利进行和边坡长期稳定。

二、考核指标

1.预期目标

本项目面向高速公路边坡自动化养护施工与稳定性养护决策需求，旨在构建支撑巡查、建模、识别与决策的一体化技术体系。具体目标包括：（1）形成基于视觉的无人机自主定位与避障方法，提升巡查作业效率与环境适应能力；（2）建立高质量边坡病害数据集，缓解航拍样本不足、分布不均带来的数据约束；（3）开展边坡三维实景重建研究，实现复杂边坡地形的高精度快速建模；（4）研发复杂背景下边坡病害识别方法，提高多尺度病害目标的识别精度与稳定性。通过上述研究，提升高速公路边坡养护的智能化水平，为安全、高效养护决策提供技术支撑。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

（1）核心技术性能指标

病害识别准确率：边坡病害综合识别准确率 $\geq 92\%$ （即模型检出的病害中，实际确为病害的比例）。

病害检出率（召回率）：针对滑坡、裂缝等典型病害的检出率 $\geq 85\%$ （即实际存在的病害被成功发现的比例）。

处理速度：单张高分辨率图像从输入到输出识别结果的全流程处理时间 ≤ 15 秒，满足海量巡检数据快速分析需求 。

三维重建质量：生成的三维模型具备高密度点云与清晰纹理，能够还原边坡微细地貌特征 。

（2）数据资产质量指标

数据集规模：构建的高分辨率边坡病害图像数据集总量 ≥ 5000 张。

病害覆盖范围：涵盖滑坡、崩塌、裂缝、岩块松动、落石、冲刷水毁 6 类典型病害。

标注质量标准：核心病害的像素级标注准确率 (IoU) $\geq 95\%$ 。

3.经济和社会效益

1) 经济效益：无人巡检系统显著降低了传统的人工巡检成本，减少了人力物力的投入。通过无人机进行日常巡检，可以减少巡检车辆的使用和维护成本，同时降低巡检人员的安全风险。无人机巡检还可以实现无人值守自动巡查，提高了巡检的效率和减少了人力资源的压力。

2) 社会效益：无人巡检系统提高了高速公路的安全性和通行效率。通过对边坡病害的快速检测、障碍物识别以及应急事件的快速响应，无人机能够及时发现并预警道路安全隐患，有效预防交通事故的发生。

4.成果提供形式

- 1) 提供 1 个高速公路边坡三维实景模型；
- 2) 提供 1 个高质量边坡病害基准数据集；
- 3) 提供 1 个集成无人机自主导航的边坡病害识别系统；
- 4) 发表 1 篇高水平论文；
- 5) 申请 1 项国家发明专利，授权 2 项软件著作权

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）
第一年度	第一季度 计划内容：组建项目团队，走访陕西省交通运输厅及养护单位开展调研；完成巡检设备选型与调试；制定详细实施方案；选取典型路段启动首轮数据采集。 考核目标：完成设备采购与标定；确定采集路段清单。
	第二季度 计划内容：开展典型边坡病害航拍数据采集、裁剪、增强与清洗；标注完成 6 类病害样本整理；引入开源数据补充扩充样本库，启动识别模型训练。 考核目标：完成阶段性病害样本库建设；覆盖 6 类典型病害；形成初步识别模型研究
	第三季度 计划内容：开展边坡病害目标检测与分类识别算法研究；同步开展跨视角视觉定位方法研究，提升无人机自主定位精度。 考核目标：完成识别与定位算法原型开发；形成阶段实验结果；提交学术论文发表 1 篇，国家发明专利

	利申请 1 项。
	第四季度 计划内容：完成边坡病害识别原型系统开发与测试，优化模型精度和稳定性；整理阶段性技术资料。 考核目标：形成原型系统 1 套；
第二年度	第一季度 计划内容：开展边坡三维实景建模研发，推进识别系统与无人机平台集成，形成样机并启动软件著作权材料整理。 考核目标：完成三维建模模块原型；形成系统样机 1 套；完成软件著作权申报材料准备；

	第二季度 计划内容：完成综合系统联调测试与样机优化，形成集成巡检、识别、建模的系统；整理知识产权材料并提交申请。 考核目标：完成系统联调测试；提交软件著作权申请 2 项；
	第三季度 计划内容：在陕西典型高速公路边坡开展示范应用，验证系统识别与定位能力；同步完善成果总结，撰写科技报告和论文。 考核目标：完成技术集成示范 1 项；建成示范点 1 个；完成科技报告 1 份；
	第四季度 计划内容：完善知识产权材料，编制验收文件，完成项目总结与验收申报。 考核目标：获得软件著作权 2 项；提交验收材料并完成验收。

四、项目经费

项目总经费：38 万元
交通运输厅补助：18.9 万元
自筹资金：19.1 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	38	17.1
1. 设备费	5	5
(1) 购置设备费	5	5
(2) 试制设备费	0	0
(3) 设备改造与租赁费	0	0
2. 业务费	21.6	7.5
(4) 材料支出	5	2
(5) 测试化验实验加工支出	0	0
(6) 燃料及动力支出	0	0
(7) 差旅支出	7.5	2.5
(8) 会议支出	1.1	0
(9) 国际合作与交流支出	0	0
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	8	3
(11) 其他支出	0	0
3. 劳务费	9.6	4.6
(12) 劳务性支出	9.6	4.6
(13) 咨询专家支出	0	0
(二) 间接费用	1.8	1.8
4. 管理费	1.8	1.8
5. 绩效支出	0	0
合 计	38	18.9

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	1
		（2）实用新型	0
		（3）外观设计	0
		2.软件著作权授权数（项）	2
		3.发表论文（篇）	1
		（1）其中 SCI 索引收录数	1
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其他	0
		4.著作（部）	0
		5.制订标准数（项）	0
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	1
	其他成果	1.填补技术空白数	0
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	0
		2.获奖项数	0
		（1）国家奖项	0
		（2）部、省奖项	0
		（3）地市级奖项	0
		3.其他科技成果产出	0
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	0
		（3）新材料	0
		（4）新装备（装置）	0
		（5）平台/基地/示范点	1
		（6）中试线	0
		（7）生产线	0

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
		(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	否
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		2. 培养高层次人才	是
		(1) 博士、博士后	1
		(2) 硕士	2
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	否
		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）	0
		2. 科研仪器设备利用率（%）	0
		3. 孵化科技型企业（个）	0
		4. 转化科技成果（个）	0
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	0
		2. 新增销售（万元）	0
		3. 新增出口创汇（万美元）	0
		4. 新增利润（万元）	0
	社会效益	1. 新增税收（万元）	0
		2. 新增就业人数	0
		3. 就业培训（人次）	0
		4. 带动农民增收（万元）	0
		5. 培训和指导科技服务（人次）	0
		6. 新增产业带动情况	0
		7. 技术集成示范（项）	1
		8. 建立示范基地（亩数）	0
		9. 节约资源能源	0
		10. 环保效益	0
其他需要说明的情况	无		

六、承担单位或研究人员分工

唐蕾：主持项目全盘工作，负责总体设计与统筹管理。

惠冰/段宗涛：负责交通工程理论指导与标准制定。

李彬：负责无人机硬件集成与载具适配指导。

曹正鑫：负责视觉定位与自主避障算法研发。

陈龙彬：负责病害识别模型与三维重建算法研发。

范泽宇：负责传感器数据采集与后端开发。

周雄伟：负责无人机多源感知硬件系统的搭建与调试

七、项目参加人员表

项目承担单位：长安大学						
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
1	唐蕾	1983.03	长安大学	副教授	计算机科学与技术	项目负责人
主要研究人员						
2	惠冰	1982.10	长安大学	教授	交通运输工程	技术指导
3	李彬	1982.05	长安大学	教授	车辆工程	技术指导
4	段宗涛	1977.06	长安大学	教授	交通运输工程	技术指导
5	曹正鑫	1999.03	长安大学	无	交通信息工程及控制	算法研发
6	陈龙彬	2002.09	长安大学	无	计算机科学与技术	算法研发

7	范泽宇	2004.05	长安大学	无	物联网工程	系统开发	范泽宇
8	周雄伟	2003.12	长安大学	无	通信工程	系统开发	周雄伟

八、信息表

项目合同编号		25-37X		密级		C		A: 机密 B: 秘密 C: 内部			
项目名称		基于无人机自动巡检的高速公路边坡病害快速识别研究									
项目实施所在地		陕西省西安市		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月					
总 经 费		38 万		厅 拨		18.9 万					
第一承担单位	单位名称	长安大学									
	所在地	陕西省西安市				代码	610100				
	通讯地址	陕西省西安市南二环 33 号				邮编	710000				
	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										
	2										
	3										
项目负责人	姓 名	唐蕾		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	13991380549 029-62630042			电子邮箱	tanglei24@sina.com					
项目联系人	姓名	唐蕾			性别	女					
	联系电话	13991380549 029-62630042			电子邮箱	tanglei24@sina.com					
项目组人数	8	高级	4	中级	0	初级	0	其他	4		
主要研究内容 (100 字以内)	构建基于无人机自动巡检的高速公路边坡病害在线识别系统: 建立高质量病害数据集; 研发跨视角自主定位、动态避障及三维实景建模技术; 开发高精度病害识别模型; 在陕西选取路段进行应用示范, 提升养护效率。										
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	A、B	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.合同正本一式柒份，甲方单位伍份，承担单位贰份。

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

陕西省交通运输厅

2026年3月27日

（公章）

合同乙方：（承担单位）

单位负责人：（签字）

项目负责人：（签字）

电 话：029-82334204

长安大学

2026年3月24日

（公章）

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：

年 月 日

2026年 03月 27日

项目编号：25-37X

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：基于无人机自动巡检的高速公路边坡
病害快速识别研究

申请单位：（盖章）

联系人：唐蕾

电 话：13991380549

陕西省交通运输厅制

2025 年 12 月

目录

一、 项目研究的背景和必要性	3
项目背景	3
研究目的	4
项目概括	5
市场需求前景或推广应用领域	5
达到的技术水平及在国民经济发展中的作用	6
二、 前期科研及工作基础	7
研究现状	7
参考文献	10
项目前期科研及现有工作条件	12
三、 实施方案	20
拟解决的关键问题	20
主要研究内容及实施方案	21
技术路线	24
后续技术改造或基本建设计划的衔接	30
有关技术经济指标	31
四、 项目承担单位及参加单位概况	32
单位概况	32
技术力量及人员构成	33
各自承担的主要工作	34
项目主要负责人情况	34
五、 项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	35
依托工程（工作）概况	35
投资来源	37
工程进度与项目科研进度的配合	37
组织管理形式	37
六、 项目经费估算及资金筹措情况	39
七、 项目绩效指标	40
八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益	42
项目预期目标	42
提交的研究成果及其形式	42
经济、社会、环境效益分析	42
九、 其它需要说明的问题	43
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

项目背景

高速公路是国家交通基础设施的重要组成部分，边坡稳定性直接关系到道路通行安全与运维效率。我国山区高速公路占据显著比重，这类路段边坡长期处于复杂自然环境与交通荷载双重影响下，病害隐患频发且处置困难。从自然因素看，持续降雨渗透会削弱土体强度，诱发滑坡与崩塌；风化作用使岩质边坡表层剥落，形成松动危岩；地表水冲刷易在土质边坡形成冲沟并扩大破坏范围；植被根系生长可能挤压或破坏防护结构；冬季冻融循环会加速护坡结构开裂与劣化。从人为因素看，长期车辆经过带来的振动可能影响加固与防护设施稳定性；同时，传统养护作业执行“发现-上报-处置”流程，周期长、响应滞后，容易导致小病害演化为重大隐患。

目前以人工为主的巡检方式已难以满足山区高速公路常态化、精细化养护需求，主要痛点包括：一是覆盖范围有限，山区高速公路边坡往往坡面高陡、地形复杂，人工徒步或远距离观测难以覆盖坡顶、背坡等隐蔽区域，漏检风险高；二是作业效率低下，人均日巡检里程有限，单条山区高速全线巡检需要投入大量人力与时间，难以实现高频次监测；三是安全风险突出，巡检人员在高陡边坡作业时面临落石、

滑坡、坠落等风险，安全隐患突出。

在此背景下，研发无人机自主巡航与边坡病害智能识别技术，既符合当前交通行业数字化转型的趋势，也能有效解决山区高速公路养护作业难度大、安全风险高的问题。该项目以无人机替代人工进入高危区域开展巡检任务，并通过智能算法实现病害快速识别与趋势分析，推动养护模式由被动处置向预防性维护转型。

研究目的

本项目面向山区高速公路边坡巡检与病害监测需求，构建无人机智能巡检技术方案，提升巡检覆盖率、作业效率和作业安全性。重点目标包括：

（1）高可靠自主巡航技术：针对山区复杂环境和 GPS 信号受限条件下，研发视觉/惯性多源融合定位算法，支撑无人机在无信号遮挡环境下实现稳定巡航、精准航线复飞及避障，确保复杂作业场景下的设备安全。

（2）引入 3D Gaussian Splatting 实现边坡全貌的高保真三维可视化，为病害定位、比对与复核提供基础；

（3）构建不少于 5000 张标准病害图像数据集；

（4）研发边坡病害自动识别方法，利用影像数据开展边坡病害识别，实现对病害精准识别。

项目概括

本项目针对山区高速公路边坡巡检中覆盖率不足、识别依赖经验、数据积累薄弱等问题，研发集自主巡航、三维建模、病害识别与预警分析于一体的无人机智能巡检方案。主要研究内容包括：

(1) 自主定位与航线巡航：研究基于多模态大模型的跨视角地理定位，提高无人机在复杂地形及 GPS 受限环境下的定位鲁棒性；

(2) 多源感知避障：融合固态激光雷达与双目视觉，实现复杂山区环境下的无人机自主避障与安全飞行；

(3) 三维实景重建：采用 3D Gaussian Splatting 构建边坡高保真三维实景，实现病害定位与多期对比；

(4) 病害识别与预警：研发基于 YOLOv10-EfficientViT 的病害识别模型，实现对滑坡、崩塌、裂缝、岩块松动、落石、冲刷水毁等 6 类典型病害的自动检测。

预期成果包括：形成不少于 5000 张高分辨率图像的标准数据集，开发无人机视觉自主定位以及避障系统，构建边坡病害识别系统，并在陕西省典型山区高速路段开展示范应用，验证系统在实地环境下的可靠性与可推广性。

市场需求前景或推广应用领域

我国山区高速公路规模大、边坡数量多，传统人工巡检在覆盖、效率与安全方面的短板突出，已难以满足日益增长的精细化养护需求。在国家智慧交通与预防性养护政策强力驱动下，行业急需智能化

巡检方案替代人工深入高危区域作业，实现人不涉险、机代人查的安全模式。同时，为了从根源上解决病害处置滞后问题，推动养护模式从被动抢修向主动防控转型，市场对具备高频次常态化监测与病害精准识别能力的自动化系统存在巨大的刚性需求。

本项目成果可在以下领域推广应用：

- 山区高速公路及普通公路边坡巡检与隐患排查；
- 山地隧道洞口、桥台锥坡等高陡边坡结构监测；
- 交通基础设施数字化运维平台的数据采集与智能分析；
- 应急处置场景下的快速勘查与风险评估（滑坡、落石等）。

达到的技术水平及在国民经济发展中的作用

本项目融合视觉定位、三维重建与多源避障等技术，面向实地应用构建可落地的无人机智能巡检系统，预期达到：滑坡、裂缝等典型病害检出率 $\geq 85\%$ 、综合识别准确率 $\geq 92\%$ 、单张图像全流程处理时间 ≤ 15 秒，并支持多期数据对比与演化分析。在国民经济发展中，该成果具有以下作用：

- 提升安全生产水平：减少养护人员在高陡边坡的攀爬作业，实现“人不涉险、机代人查”；
- 降低养护成本、提升效率：通过高频次、常态化巡检与自动识别，提高隐患发现效率，减少重大灾害风险与抢修成本；
- 支撑数字化运维：形成可持续积累的巡检数据与三维实景底座，为交通基础设施精细化管理与智能决策提供数据支撑。

二、前期科研及工作基础

研究现状

自 20 世纪 90 年代初期，随计算机技术的不断发展，特别是在发达国家，公路养护管理系统的研究与应用得到了迅速推进。这些系统在设计 and 开发初期便集成了数据库技术、地理信息系统（GIS）、全球定位系统（GPS）等先进技术，以提升边坡巡检的效率和准确性。这些技术的融合使得公路养护管理在数据收集、分析和应用方面迈出了重要步伐，尤其是在自动化和精细化管理方面取得了显著进步。新加坡于 1991 年建立了道路管理系统，利用先进的计算机技术和仪器有效提升了公路养护管理效率^[1]。1992 年，美国联邦公路署开发了集成多项功能的 GIS 技术公路资料库。1993 年，华盛顿交通运输部采用不稳定边坡管理系统，对约 250 条边坡进行了有效管理^[2]。2005 年，该系统升级增加了边坡照片、边坡地质测量、边坡现场勘探情况等功能，以提高边坡管理的经济效益^[3]。2013 年，马里兰州开发了土质边坡调查管理系统，通过对境内不稳定边坡进行数据分析优化了养护资金的使用^[4]。

随着我国基础设施建设高峰的到来，公路边坡养护管理的重要性日益凸显，推动了管理系统向信息化和智能化发展。西南交通大学与广东省高速公路有限公司合作开发了“京珠高速粤北段路堑高边坡养护管理信息系统”，有效提升了高边坡养护管理的效率和质量^[5]。该系统在实际工程中的应用表明，它在高边坡养护管理数据管理和技术

状况评价方面具有实用价值。翟文光研究并开发了针对石忠高速的边坡养护管理系统，通过综合分析和设计，增强了边坡信息管理^[6]。胡天琦基于 WebGIS 技术进一步研发了公路边坡养护管理系统，实现了边坡监测数据的可视化管理，为养护决策提供了有力支持^[7]。

我国在公路边坡养护管理领域推出的示范应用已经展现了卓越的成效。山东高速集团致力于全寿命周期养护，推动了预防性与绿色养护的研究，实现了养护工作的国际先进水平，并创新实施了集中养护作业模式，提升了养护的效率与质量^[8]。西藏昌都市也通过数字化手段，如公路养护 App 和信息化管理系统，提高了公路养护的科学性和决策的准确性^[9]。罗湖区应急管理局采用了“AI+物联网”的边坡治理模式，通过多元传感器感知、AI 视频实时监控、24 小时物联网监测等技术手段，实现了对危险边坡的科学化、智能化和自动化监测^[10]。这些举措体现了我国在公路边坡养护管理上的技术创新和系统化管理。

在巡检领域，无人机的应用研究也在不断深化。天津某公司通过无人机航拍新疆塔里木河，分析河道变化和污染，辅助河道管理^[11]。南方电网昆明局和福建电力公司利用无人机提升输电线路巡检的精准度和效率^[12]。邹露鹏等研究人员使用无人机搭载的热成像仪和摄像机检测浙江省某大桥病害，推进桥梁养护^[13]。高昆等人提出无人机在边坡检查中的应用，并通过实践验证其效用^[14]。陕西富县公路养护管理所运用无人机航拍水毁高边坡，辅助养护管理^[15]。广东省仁新高速采用无人机巡检管理系统提升桥梁和边坡的养护效率和道路安全^[16]。

福建高速在罗宁高速实施无人机智能巡检系统，实现自动化、精细化巡查^[17]。在陕西省汉宁高速的边坡养护中，无人机辅助巡查，利用高清影像和激光点云等技术，有效提升了检查效率和质量，尤其在难以人工到达的区域，能精准检测边坡裂缝等病害^[18]。这些技术的应用不仅扩大了巡检的视野，还有效扩展了巡检的覆盖范围，全面提升了巡检工作的效率和质量。

研究现状小结：无人机技术在公路养护，尤其是高速公路边坡巡查方面的应用近年来取得了一定进展^{[19][20][21]}，目前主要用于航拍数据采集、点云/影像三维建模与坡面形态量测，可在一定程度上提升巡查覆盖范围与测绘精度。但总体上仍处于“数据采集-人工处理-人工判读”的半自动阶段，关键技术尚未完全突破，主要体现在：一是山区高速环境中常见的遮挡、多路径效应等导致 GPS/RTK 可用性下降，无人机稳定定位、航线复飞与近坡面安全飞行仍高度依赖人工操控；二是贴近坡面巡查时视角变化大、光照复杂、纹理重复且障碍物密集，现有避障与航迹控制能力不足，造成影像/点云质量不稳定，影响后续分析；三是病害识别与统计仍以人工筛查为主，缺乏面向多视角表观变化、尺度差异与复杂背景干扰的鲁棒自动识别方法与标准化数据支撑，导致“病害难发现、原因难定位、场景难复核”问题突出。上述未解决的问题制约了无人机从“辅助巡检工具”向“自动化养护装备”的升级。

针对这些技术短板，本项目拟将人工智能技术融入无人机边坡巡检流程：面向 GPS 受限场景研发适用于山区公路飞行的视觉导航与

自主巡航技术,提升近坡面巡检的定位稳定性与作业安全性;同时优化多视角数据采集策略以提高病害数据质量;进一步构建基于多视角病害表观特征提取的识别框架,降低人工参与度,实现边坡病害的自动发现与快速定位,从而支撑高速公路边坡养护巡查的高效率与高安全性。

参考文献

- [1] 周庆,陈可石,史相宾,等.新加坡电子道路管理实践及其对中国的启示 [J]. 现 代 城 市 研 究 , 2014(3):6.DOI:10.3969/j.issn.1009-6000.2014.03.017.
- [2] 徐志刚,李金龙,赵祥模,等.智能公路发展现状与关键技术 [J]. 中 国 公 路 学 报 , 2019, 32(8): 1-24, <https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.08.001>
- [3] 陈通杰.公路边坡不稳定处治评价[J].公路交通科技·应用技术版,2017,(5):108-109.
- [4] 郑涛,张玉灯,毛新生.基于 Geo—Slope 软件的土质边坡稳定性分析 [J]. 水 利 与 建 筑 工 程 学 报 , 2008, 6(1):4.DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2008.01.003.
- [5] 《京珠高速粤北段路堑高边坡养护管理信息系统》课题组.京珠高速粤北段路堑高边坡养护管理信息系统[J].广东公路交通, 2012(4):1.
- [6] 翟文光.运营高速公路边坡养护管理系统开发[D].重庆交通大

学,2017.

- [7] 胡天琦.基于 WebGIS 的公路边坡养护管理系统研究与开发[D]. 长安大学, 2021.
- [8] 山东高速集团: 精准长效养护赋能“畅安舒美”高速路, <https://news.iqilu.com/shandong/shandonggedi/20220511/5130401.shtml>, 2022-05-11.
- [9] 揭秘“十四五”期公路养护: 数字化、智能化成关键词, https://www.sohu.com/a/740693679_121123898, 2023-12-01.
- [10] 罗湖创新推出“AI+物联网”边坡治理模式 实时监测边坡安全隐患 , <https://www.163.com/dy/article/G9DPIMIN05340LS4.html>, 2021-05-07.
- [11] 曹雪娟, 王森. 无人机遥感影像在水利监测领域的应用[J]. 中国水利, 2015(04):69-70.
- [12] 王彦国. 无人机巡检输电线路技术的应用分析[J]. 中国高新技术企业, 2016(34):69-70.
- [13] 邹露鹏, 范钟倩. 微型无人机在公路桥梁养护检测工程中的应用 [J]. 公路, 2017, 62(07):172-175.
- [14] 王家杰. 无人机低空摄影测量系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [15] 陕西首次采用无人机养护勘察特殊区域[C]. 养护与管理, 12(5), 2015:1.
- [16] 开启高速公路“智慧眼”! 国内首个桥梁边坡养护无人机巡检系

统 上 线 ,
https://td.gd.gov.cn/dtxw_n/gdjrxw/content/post_3220939.html ,
2021-02-04

[17]会飞的“巡检员”！福建高速无人机巡检，守护高速公路安全，
http://www.china.com.cn/zhibo/content_117258618.shtml ,
2024-06-17

[18]吕梦.无人机在高速公路边坡日常养护巡查的应用研究[D].长安大学[2024-09-09].DOI:CNKI:CDMD:2.1018.791729.

[19]Kim, JInguk & Jeon, Woohoon & Kim, Seoungbum. (2023).
Evaluating Road Hazard Maintenance Efficiency Using Citizen
Science Data to Improve Road Safety. Sustainability. 15. 15074.
10.3390/su152015074.

[20]黄奕辉,李旭辉,谢帮华.基于物联网的公路养护施工安全智能监管
系统应用研究[J].公路,2019,64(12):282-285

[21]胡娟.基于大数据的高速公路智能养护系统研究[J].辽宁省交通高
等 专 科 学 校 学 报 , 2020,
22(5):5.DOI:10.3969/j.issn.1008-3812.2020.05.006.

项目前期科研及现有工作条件

项目支撑条件

(1) 在高速公路边坡监测技术方面，项目依托长安大学道路结

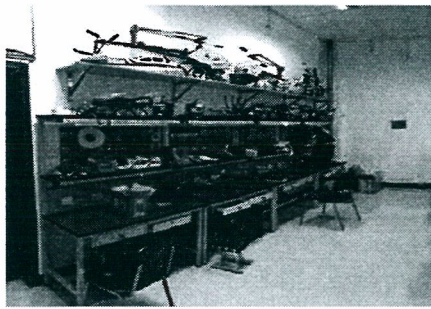
构与材料交通运输行业重点实验室和特殊区域公路建设与养护技术交通运输行业协同创新平台，平台长期面向我国公路建设与养护的重大需求，围绕关键科学问题与工程痛点持续开展研究，已形成较为完善的研究体系。重点方向包括：特殊地区路基路面结构与性能、路面材料结构理论与改性技术、山区高速公路现代测设技术、公路灾害防治技术、高速公路建设与养护管理。

实验室配备道路结构与材料试验成套设备，具备从材料微观结构到宏观力学与路用性能的系统测试能力，主要设备包括工业 CT、扫描电镜、凝胶渗透色谱（GPC）、红外光谱、MTS 伺服加载系统、SHRP 相关试验系统、汉堡车辙试验系统、SPT 试验系统等，可为边坡防护结构与材料性能分析提供稳定支撑。

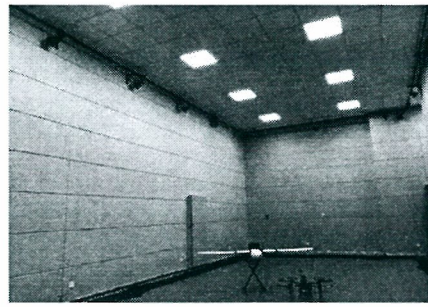


图1 边坡地质结构诊断相关实验设备

(2) 在无人机巡检技术研制方面，项目依托陕西省智能装备系统安全控制工程研究中心。中心围绕无人机、无人系统及高端制造领域的安全与控制需求，具备“关键技术攻关-工程化实现-应用验证与推广服务”的完整支撑链条，可为本项目无人机自主巡航、避障与系统集成提供研发与工程化保障。



各类无人机、传感器



无人机光学定位系统

图2 无人机巡检相关实验设备

研究工作基础

项目团队在无人机智能巡检与山区边坡病害治理方面已形成较扎实的技术积累与工程经验，主要体现在以下四方面：

（1）无人机自主视觉定位技术

团队持续开展无人机视觉定位研究，已形成基于“视觉大模型特征提取+图像定位”的算法原型与实机验证经验。该方法可利用岩面纹理、坡体轮廓等稳定视觉特征进行匹配与定位修正，提升在山区GPS弱信号/遮挡条件下的定位连续性与复飞一致性，并具备实际飞行控制与数据采集经验支撑。

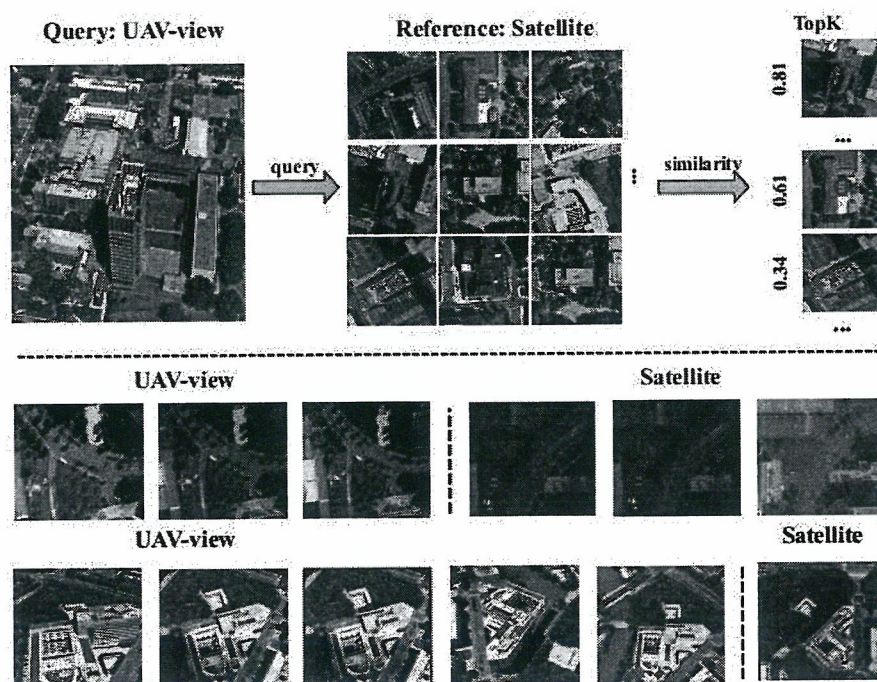


图3 无人机视觉自主定位

(2) 深度学习病害识别技术

团队成员在计算机视觉方向具备研究基础，围绕目标检测与复杂背景特征提取开展长期积累，并在相关领域发表论文与开展工程验证，可支撑本项目典型边坡病害自动识别算法的研发与迭代。

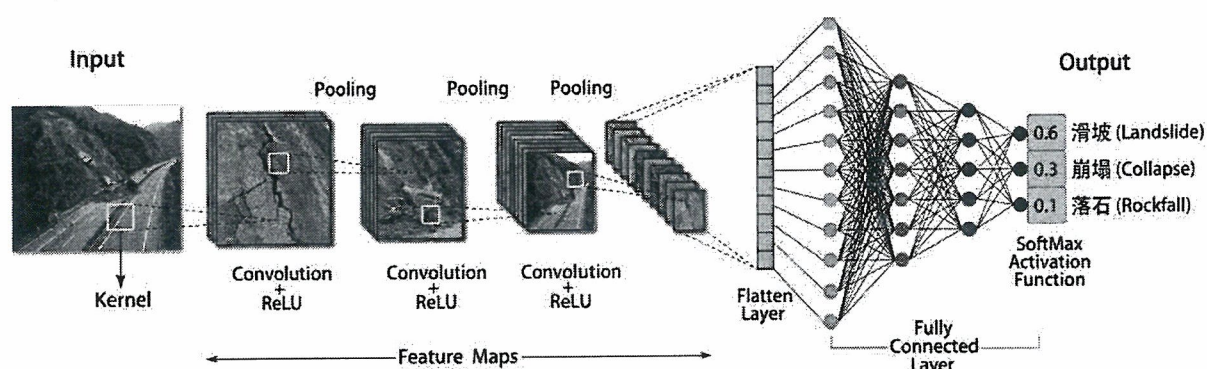


图4 边坡病害识别

(3) 三维重建与实景表达技术

团队掌握 3D Gaussian Splatting、密集匹配与泊松重建等三维重建方法，具备对无人机多视角影像进行像素级关联、生成高密度点云

及高保真三维模型的能力，可较完整还原边坡地形形态与纹理细节，为病害定位、对比复核与多期演化分析提供基础数据底座。

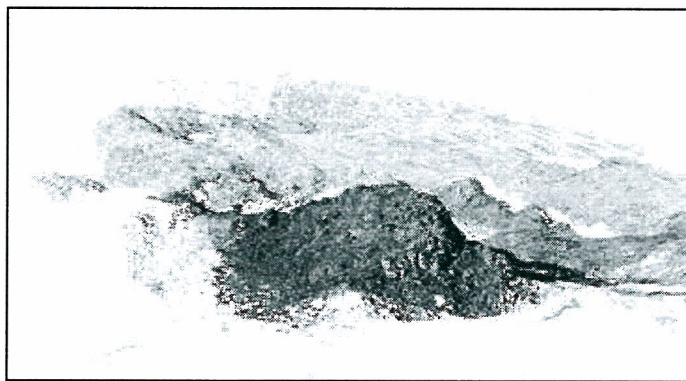


图 5 边坡三维模型

（4）边坡治理工程实践

本项目团队依托黄土滑坡的投放式监测、沥青路面车辙积水时序演变、国家高速路网重点路段（汉宁高速秦岭巴山段）的边坡治理工程，积累了深厚的复杂地质监测经验。针对区域气候温暖湿润、夏秋多雨以及弱膨胀土广泛发育的复杂地质环境，团队深入开展了公路风险隐患专项排查与整治工作。重点攻克了多级挖方边坡在连续降雨与排水系统失效双重作用下的失稳难题，对骨架护坡滑塌、路基变形、滑坡形变等典型病害进行了深入的机理分析。

依据现行技术规范，团队成功制定了针对性的综合治理措施，从而在滑坡灾害特征的真实形变提取、膨胀土路段边坡病害识别、水毁机理分析及工程处治等方面形成了扎实的技术储备与数据支撑。

现有的试验手段（设施、设备）

团队具备覆盖“数据采集—模型训练—仿真验证—实地测试”的软硬件条件，可支撑项目全流程开展。

(1) 无人机外场试验与载荷集成条件

项目组现有多旋翼无人机平台，可满足山区边坡近距离巡查的飞行任务需求，并支持载荷更换与二次开发。平台具备航线规划、航点飞行、定点悬停、姿态与速度控制等基本能力，可为视觉定位、路径跟踪与近坡面安全飞行算法提供实机验证条件。

(2) 多源感知与数据采集硬件基础

围绕本项目视觉导航、多源融合避障、高质量病害数据采集的需求，团队具备多类型视觉成像与测距传感器的集成与测试条件，能够开展多视角、多尺度、不同光照条件下的病害影像采集与对比试验；同时支持传感器标定、时间同步与数据对齐，为后续三维重建与识别算法训练提供可靠输入数据。

(3) 三维重建与精度核验手段

团队具备开展多视角摄影测量与三维重建的软硬件条件，可完成从影像预处理、特征匹配、稠密重建到模型表达与可视化的完整流程，并支持对同一边坡开展多期重建与对比分析。为保障模型尺度与定位精度，项目可结合现场测绘条件设置控制点或参考量测基准，用于三维模型的尺度统一、误差评估与复核验证，从而满足“可复测、可对比、可追溯”的工程要求。

(4) 模型训练、推理部署与数据管理条件

实验室具备高性能 GPU 服务器与大容量存储条件，可支撑病害检测模型训练、消融试验与批量推理评估；同时具备数据整理、标注与质检的工具链与流程基础，能够保障病害数据集构建的规范性与可

复用性。

(5) 仿真与半实物验证环境

团队已搭建无人机算法仿真与测试环境，可在外场试验前对定位、避障与航迹跟踪策略进行验证与参数整定；同时可结合实测数据进行回放测试，用于评估算法在不同场景、不同视角与不同干扰条件下的稳定性，降低外场试验风险并提高迭代效率。

研究人员情况

项目团队由高校科研骨干、工程研究中心研发人员与高速公路养护一线专家共同组成，形成“理论方法-系统实现-工程应用”一体化的攻关体系，能够保障从算法创新到现场落地的全过程推进。

(1) 学科结构完整，覆盖项目关键环节

团队人员能力覆盖本项目核心技术链条：

- 无人机飞行控制与自主导航：负责视觉定位、航迹跟踪、复飞一致性与飞行安全策略设计与验证；
- 多源感知与融合避障：负责视觉/测距传感器融合、障碍检测与近坡面安全飞行逻辑；
- 三维重建与实景表达：负责多视角重建流程、3D Gaussian Splatting 实现、模型质量评价与多期对比；
- 病害识别与演化分析：负责病害检测模型训练、复杂背景鲁棒性提升、误检漏检分析与阈值标定；
- 道路工程与养护业务：负责病害类型体系、工程判据、现场复

核流程与预警需求定义，确保算法指标与工程可用性一致。

(2) 工程化与外场组织能力明确

依托陕西省智能装备系统安全控制工程研究中心，团队具备无人机系统集成、载荷安装调试、飞行测试组织、数据链路保障与安全管理能力，可将算法快速落到可飞、可测、可复现的工程系统中。依托陕西交通控股集团一线工程力量，项目可获得稳定的现场试验窗口、病害复核与处治过程资料，支撑多期数据采集与演化验证。

(3) 项目管理与协同机制健全

项目负责人统筹技术路线、阶段目标与验收指标；各技术方向设牵头人，形成例会推进、问题闭环与版本迭代机制；工程单位同步提供现场反馈与应用约束，保证研发方向始终面向真实养护场景需求。

协作条件

项目依托汉宁高速 K1378+477~K1378+525 下行边坡治理工程开展外场试验与示范应用，并由长安大学交通运输行业重点实验室提供室内分析与算法验证条件。示范路段位于秦岭巴山山区，具有 GPS 信号弱、植被覆盖高、地形起伏大、近坡面障碍物复杂等典型特征，可用于验证无人机视觉定位、自主避障与重复航线复飞能力的工程适用性。现场存在骨架护坡滑塌、灌溉渠开裂、截水沟挤压变形等典型水毁病害，可为构建多类别、多尺度病害样本库提供稳定来源；同时工程治理全过程记录及历年巡检、可为病害演化分析与算法评估提供对照依据。

协作单位将提供外场试验组织与安全保障（试飞窗口协调、现场进出与作业许可、必要的交通组织与安全防护），并安排养护技术人员参与病害复核与标注规则确认；项目组负责无人机系统集成、数据采集规范制定、算法开发与系统部署，并在实验室条件下完成模型训练与性能测试。通过“外场采集—室内训练与评估—外场复测验证”的迭代流程，确保关键算法与系统功能能够在真实养护场景中完成验证与示范。

三、实施方案

拟解决的关键问题

1. 山区 GPS 受限条件下的无人机自主视觉定位

针对山区卫星信号弱、遮挡严重，导致机载定位不准确甚至失效的问题，拟研究基于视觉大模型的跨视角地理定位方法。重点突破无人机倾斜视角影像与卫星/正射底图俯视视角之间的特征一致性与匹配鲁棒性，建立可靠的跨视角映射关系；结合几何约束与时序滤波实现全局一致位姿估计，在无 GPS 或弱 GPS 条件下获得稳定的绝对定位与航线复飞能力，并显著抑制长航时带来的累积漂移。

2. 复杂近坡面环境下的无人机自主避障

针对边坡近距离作业中高压线、枯枝等微小障碍物隐蔽性强及传统避障策略导致飞行姿态僵化的问题，本项目拟构建基于“时空紧耦

合感知—连续空间梯度规划”的无人机动态作业体系。首先，无人机通过多传感器联合标定与硬件同步技术，打破固态激光雷达与双目视觉的独立感知壁垒，并利用扩展卡尔曼滤波紧耦合 IMU 数据，实现高精度实时位姿估计与多源数据时空对齐。在此基础上，无人机采用贝叶斯概率更新模型构建抗噪型概率体素地图，有效滤除环境噪点并保留细微障碍物特征，进而实时计算欧几里得符号距离场以获取全空间环境梯度。最后，系统摒弃离散路点模式，将避障转化为非线性约束优化问题，结合无人机动力学硬约束，利用 B 样条算法生成具备平滑轨迹，实现无人机对微小障碍物的感知响应。

3. 复杂背景下微小病害特征增强与精准识别

针对植被遮挡、岩体纹理干扰、尺度变化显著等因素导致裂缝等微小病害特征易被复杂背景淹没、漏检与误检率较高的问题，拟研发面向小目标与弱特征的检测方法，通过注意力机制与多尺度特征融合，实现对关键区域响应的增强与背景干扰的抑制，从而提升复杂背景条件下的病害检出率与定位精度。

主要研究内容及实施方案

在数据采集与空间映射精度方面，为克服传统方法受限于单一 GPS 及影像清晰度不足的问题，本项目通过固态雷达与双目视觉的联合感知，保障无人机在复杂环境下的稳定贴近飞行，进而获取无运动模糊的高清晰度影像；同时，引入跨视角视觉定位与 3DGS 高保真建

模技术，解决 GPS 拒止环境下的定位漂移与传统建模的纹理畸变问题，确保底层数据在物理空间坐标与视觉纹理上实现高精度映射。

在病害识别精度方面，本项目采用数据与模型协同优化的方案：首先，构建包含 5000 张精细标注样本的高质量边坡病害图像数据集，为模型训练提供可靠的数据支撑；其次，研发基于 YOLOv10-EfficientViT 混合架构的检测模型，通过引入注意力机制与多尺度特征融合，重点攻克微小病害特征提取困难及相似病害易误判的技术瓶颈。上述各项研究内容紧密关联，构建了从前端高保真数据获取到后端高精度智能分析的完整技术闭环，从根本上提升了边坡病害检测的综合精度与工程实用性。

专题一：高质量边坡病害数据集构建

针对现有数据样本匮乏、标准不一的问题，本项目将构建规模 5000 张、涵盖滑坡、崩塌、裂缝、岩块松动、落石、冲刷水毁 6 类典型病害的高质量数据集。实施方案上：采取实地航拍采集和开源数据集补充的方式获取典型路段影像，利用旋转、裁剪、亮度调节等常规数据增强手段填补稀缺样本，提升数据多样性；同时制定统一的标注规范，通过 LabelMe 工具实施人工精细标注与专业审核相结合的流程，确保病害样本的准确性与规范性，最终封装为通用的 COCO 格式。

专题二：无人机跨视角自主视觉定位技术研发

为攻克山区边坡拒止环境下 GPS 定位不准确甚至失效的难题，本项目拟研发基于视觉大模型的跨视角自适应地理定位技术。具体实

施中，将引入冻结的预训练视觉大模型作为特征提取器，研发轻量化交叉注意力模块以对齐无人机倾斜视角与卫星垂直视角的特征差异，消除几何形变影响；在此基础上，引入多视图语义一致性约束机制，强制模型学习不同飞行姿态下的特征不变性，实现无卫星信号下的高精度定位。

专题三：多源融合感知避障技术研发

针对高压线、枯枝等非结构化微小障碍物的感知与规避难题，本项目将研究固态激光雷达与双目视觉的联合感知及基于梯度的连续空间动态规划技术。实施中首先通过异构传感器联合标定与 EKF 状态估计建立统一时空基准，构建抗噪型概率体素地图以滤除噪声并精准保留细微特征；进而实时计算欧几里得符号距离场，将距离梯度作为约束，利用 B 样条算法求解满足动力学要求的平滑轨迹，实现对障碍物的快速响应与平滑自动绕行。

专题四：边坡高保真三维实景与语义建模

针对传统建模技术渲染效率低、纹理细节丢失的问题，本项目拟利用 3D Gaussian Splatting 技术构建高保真三维模型。具体通过 SFM 算法生成稀疏点云并转化为高斯分布点，利用自适应密度控制算法精准拟合边坡表面几何形态，辅以直方图均衡化处理消除光照差异与纹理拼接痕迹，最终实现边坡场景的高保真重建与实时级渲染展示。

专题五：边坡病害智能识别模型研发

针对微小病害特征易被淹没及相似病害误判痛点，本项目将研发基于 YOLOv10-EfficientViT 混合架构的病害识别模型。实施路径包

括在检测模型中引入注意力机制以增强对细微裂缝等特征的捕捉能力，优化多尺度特征融合网络以适应不同尺寸的病害检测，并改进损失函数提升定位精度；基于构建的病害数据集进行模型训练与参数优化，确保在单张图像处理时间 ≤ 15 秒的前提下，典型病害检出率 $\geq 85\%$ 。

技术路线

研究技术方案

1. 高质量边坡病害数据集构建

本项目通过数据采集、精细标注、质量审核及格式封装四个步骤，建立标准化的数据集生产流程。首先，开展多场景数据采集，采用“无人机组航+人工补拍”方式，采集涵盖滑坡、崩塌、裂缝、岩块松动、落石、冲刷水毁 6 类典型病害，同时，积极引进高质量开源数据集，有效扩充不同地貌、光照及环境下的病害样本，确保有效样本不少于 5000 张。其次，实施像素级标注与质量控制，放弃矩形框，使用 LabelMe 工具进行多边形（Polygon）标注，精确勾勒病害边缘以确保核心病害标注准确率（IoU） $\geq 95\%$ ；执行严格的审核，每批次抽检 10%，不合格率超 5%则整批重做。最后，将合格数据转换为 COCO 通用格式，并按照 6:2:2 比例划分为训练集、验证集与测试集，用于模型训练与测试。

2. 无人机跨视角自主视觉定位



图 6 无人机视觉自主定位技术路线

针对山区边坡等 GPS 信号不稳定甚至完全拒止的环境，本项目摒弃易受干扰的传统单一卫星导航模式，采用基于视觉大模型的跨视角自适应地理定位技术。

首先，构建基于冻结视觉大模型的感知基座。为了克服边坡场景中季节性植被变化和光照差异对特征提取的干扰，我们选用预训练视觉大模型 BLIP-2 架构中的 ViT 作为图像编码器。在研发中保持该编码器参数冻结，直接复用其在海量通用数据上获得的零样本感知能力。这意味着无人机采集的实时航拍图像将被转化为包含深层语义的高维全局特征描述符，而非传统的、容易丢失的几何特征点。

其次，为了解决无人机倾斜视角与卫星正射影像之间的巨大几何形变与遮挡差异。技术团队拟研发轻量化交叉注意力模块作为连接两个视角的桥梁。该模块通过计算无人机图像 Token 与卫星图像 Token 之间的注意力权重，自动寻找并对齐不同视角下的同一地物特征，实现从粗粒度全局特征到细粒度定位特征的自适应转换。同时，计划引入多视图语义一致性约束机制，在训练阶段通过对比学习，强制模型

学习同一地物在不同飞行高度和姿态下的特征不变性，确保特征向量在特征空间中的紧密聚类，从而保证定位的鲁棒性。

最后，实现端到端的绝对定位解算。利用优化对齐后的特征向量，系统计算无人机实时画面与机载卫星底图库的余弦相似度，通过Top-K检索算法锁定最匹配的卫星影像，并提取其经纬度数据，结合IMU惯性导航数据，在无GPS信号下实现精准的绝对坐标输出。

3. 基于多源融合感知的无人机自主避障

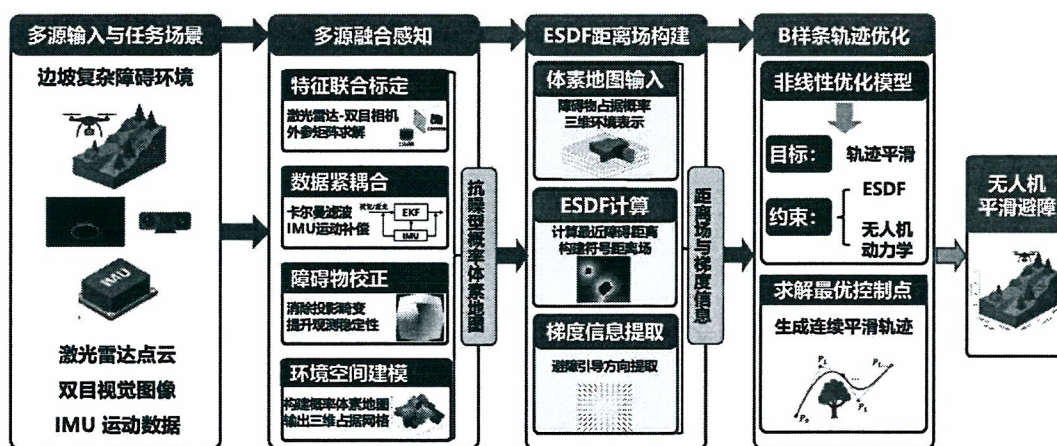


图7 无人机自主避障技术路线

面对边坡环境下复杂障碍物，传统单一传感器的避障策略极易失效。本项目提出构建时空紧耦合感知和连续空间梯度规划的动态作业体系，实现无人机避障。

在感知层面，通过异构传感器的时空联合标定打破数据壁垒。项目采用标定板与自然场景特征相结合的方法，精确计算固态激光雷达与双目视觉相机之间的外参矩阵。利用扩展卡尔曼滤波算法，将IMU高频运动学信息与视觉/激光观测数据紧耦合，消除因机身剧烈运动造成的障碍物投影畸变。在此基础上，构建抗噪型概率体素地图，摒弃传统的确定性占据栅格，采用贝叶斯概率更新模型：利用光线投射

法实时更新体素网格的占据概率，有效滤除传感器偶发噪点，精准保留细微但持续存在的障碍物特征。

在规划层面，基于感知结果实时计算三维空间中任意体素到最近障碍物表面的欧几里得符号距离场。随后，摒弃传统离散路点的模式，采用基于梯度的 B 样条连续轨迹优化技术。将避障问题转化为非线性约束优化问题，以轨迹平滑度为目标，ESDF 距离梯度为约束，并严格引入无人机动力学硬约束。最终快速求解出最优控制点，生成具备连续性的平滑轨迹，确保无人机能平滑避开障碍区。

4. 边坡三维实景模型重建

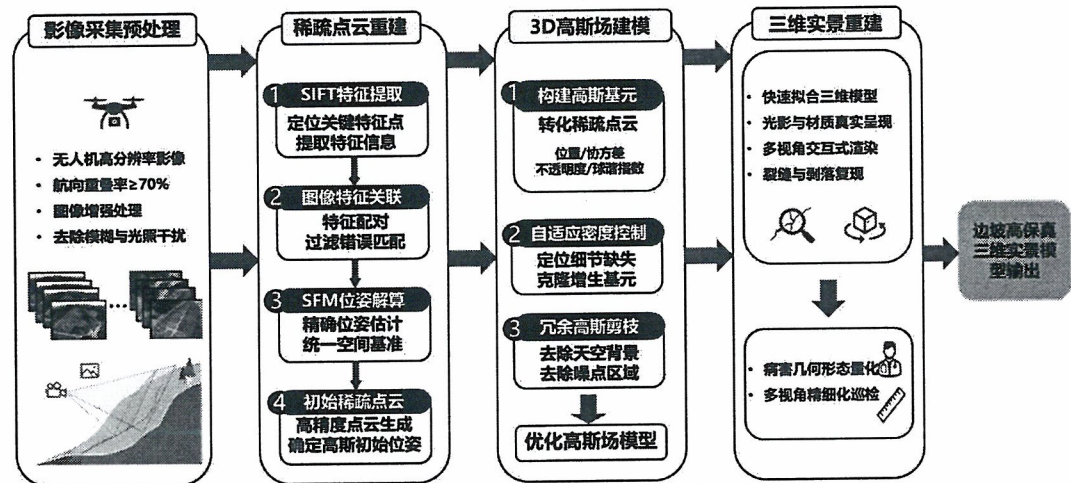


图 8 边坡三维重建技术路线

首先，构建稳固的空间几何骨架。严格筛选无人机按航向重叠率 $\geq 70\%$ 采集的高分辨率影像，通过图像增强算法去除运动模糊与光照不均干扰。随后，采用 SIFT 算法提取图像中对旋转与缩放具有鲁棒性的关键特征点，结合 FLANN 匹配器与 RANSAC 算法剔除误匹配，通过运动恢复结构技术解算每一帧影像的精确相机位姿，生成高精度的初始稀疏点云。这不仅确立了场景的空间坐标基准，也为后续

的高斯场生成提供了准确的初始化位置。

其次，实施从离散点云到连续高斯场的转化与优化。将初始稀疏点云中的每一个点转化为具有独立位置、协方差、不透明度及球谐系数的 3D 高斯基元。进入迭代优化阶段，系统利用自适应密度控制策略动态调整高斯分布：在裂缝边缘、岩石纹理等特征缺失或重建不足区域，自动执行克隆操作进行加密，填补细节空缺；在天空背景或噪点区域，执行剪枝操作剔除冗余高斯球，确保模型纯净。

最终，快速拟合生成高保真三维实景模型。打破传统静态纹理贴图的限制，能够随视角变化真实呈现边坡岩面的光影反射与材质质感。基于此数字底座，系统支持在其他视角下的实时渲染，能够清晰复现微小裂缝与岩体剥落形态，为后续的危害人工复核及精确的空间尺寸测量提供可信赖的三维几何基准。

5. 边坡病害智能识别模型

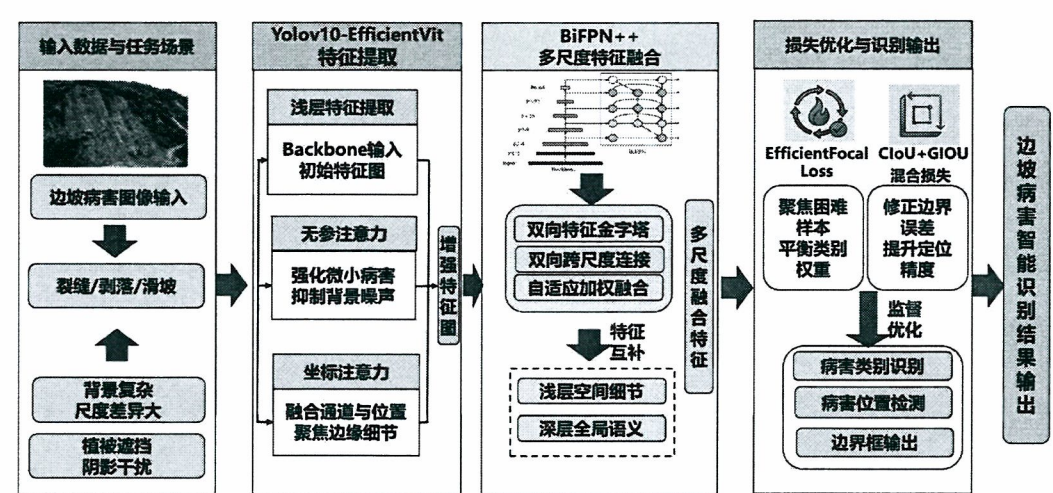


图 9 病害识别技术路线

针对边坡病害背景复杂、尺度差异大的特点，本项目定制研发

YOLOv10-EfficientViT 混合架构识别模型，从特征提取、融合到损失函数进行优化。

在模型架构设计上，重点强化细粒度特征提取能力。在网络浅层嵌入无参注意力与坐标注意力组合机制。无参注意力负责在像素级强化微小病害特征，抑制植被阴影等背景噪声；坐标注意力则将通道注意力与空间坐标结合，精准聚焦病害边缘细节。在中层网络，搭建BiFPN++双向特征金字塔替代传统单路径结构，通过加权双向跨尺度连接，自适应融合浅层低分辨率的细节特征与深层高分辨率的语义特征，从而兼顾对微小裂缝和宏观滑坡的识别能力。

在模型训练方面，针对边坡病害样本分布不均及遮挡严重的实际痛点。引入 EfficientFocal Loss 聚焦难以识别的疑难样本，平衡各类病害的识别权重；并结合 CIoU 与 GIoU 混合损失函数，精准修正由植被遮挡或拍摄角度导致的病害边界定位偏差，提升精度。

研究工作流程

本项目遵循“基础数据构建—关键技术研发—系统集成验证”的实施路径，有序开展研究工作。首先，启动高质量数据集构建，在实地采集的基础上，同步开展全球开源地质灾害数据集检索。通过筛选与本项目 6 类典型病害高度相关的公开样本，利用迁移学习思想，将搜集到的高质量开源图像注入样本库。所有外部引入数据均需经过人工审核，并按照统一的 LabelMe 像素级标注规范进行标准化重构，确保‘现场实采+开源补充’的融合数据集总量突破 5000 张，显著提

升模型对复杂地质灾害的泛化识别能力，最终将清洗后的数据转换为 COCO 格式并按 6:2:2 划分，为算法研发提供基础支撑。随后，并行推进无人机自主巡航与病害智能识别技术的研发：一方面，解决无 GPS 环境下的自主定位与避障问题，构建基于 BLIP-2 视觉大模型的跨视角定位系统，并融合激光雷达与双目视觉数据，利用概率体素地图与 B 样条优化技术实现避障；另一方面，同步开展三维建模与病害识别研究，基于 SIFT 特征匹配与 3DGS 技术生成高保真三维实景模型，同时定制研发 YOLOv10-EfficientViT 混合架构模型，通过注意力机制与混合损失函数优化，实现复杂背景下的微小病害精准识别。最后，完成各功能模块的系统集成与联调联试，验证技术方案的整体性能与可靠性。

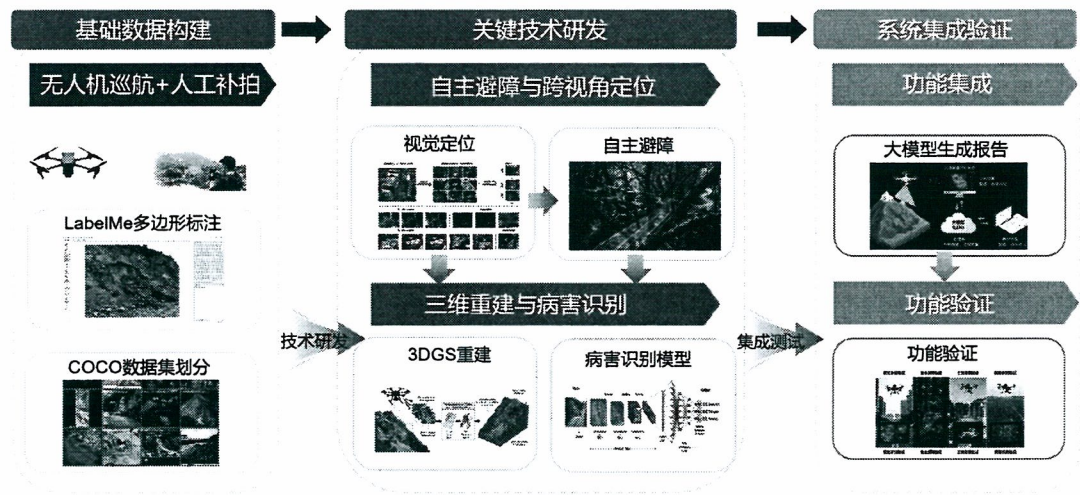


图 10 总体技术路线图

后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目属于应用技术研究，成果将以可工程化的原型系统、可复制的作业流程与可复用的数据资产的形式交付，并在示范路段完成外

场验证，为后续装备配置、信息化建设与常态化巡检机制提供依据。

具体衔接计划如下：

（1）形成可试用的巡检装备与可复制的作业流程

项目将交付无人机边坡巡检原型系统，并在示范路段开展多轮实地测试与复核对比，形成包含航线规划、近坡面作业、安全控制、数据采集与成果输出的作业流程与操作要点。上述测试结果与流程文件可直接用于养护单位后续的装备选型论证、采购技术参数制定与作业规程完善，降低规模化部署的试错成本。

（2）构建可复用、可扩展的病害数据资产

项目将建立包含不少于 5000 张高分辨率图像及其标注信息的标准数据集（COCO 格式），并配套提供数据字典与标注规范。该数据资产可作为养护单位的长期历史资料进行复用，支持在新增路段、扩展病害类型时开展增量标注与模型再训练，从而支撑系统的持续更新与能力扩展，避免重复采集与重复建设。

有关技术经济指标

（1）核心技术性能指标

- 病害识别准确率：边坡病害综合识别准确率 $\geq 92\%$ （即模型检出的病害中，实际确为病害的比例）。
- 病害检出率（召回率）：针对滑坡、裂缝等典型病害的检出率 $\geq 85\%$ （即实际存在的病害被成功发现的比例）。
- 处理速度：单张高分辨率图像从输入到输出识别结果的全流程处

理时间 ≤ 15 秒，满足海量巡检数据快速分析需求。

- 三维重建质量：生成的三维模型具备高密度点云与清晰纹理，能够还原边坡微细地貌特征。

(2) 数据资产质量指标

- 数据集规模：构建的高分辨率边坡病害图像数据集总量 ≥ 5000 张。
- 病害覆盖范围：涵盖滑坡、崩塌、裂缝、岩块松动、落石、冲刷水毁 6 类典型病害。
- 标注质量标准：核心病害（如裂缝、剥落）的像素级标注准确率（IoU） $\geq 95\%$ 。

(3) 成果产出指标

- 知识产权：申报发明专利 ≥ 1 项，获得软件著作权 ≥ 2 项，高水平论文 ≥ 1 篇。
- 示范应用：在陕西省内高速公路选取 ≥ 1 处路段，完成路段巡检示范。
- 技术文档：编制科研报告、技术手册、数据集说明文档等。

四、项目承担单位及参加单位概况

单位概况

项目团队所在的长安大学在公路交通安全与灾害防治领域，围绕路基路面性能衰变机理与智能监测、高边坡防护与安全预警等方向形成了稳定的技术积累，并自主建设了轮胎—路面相互作用足尺试验平

台，可为本项目提供试验条件与实测数据支撑。学校主持编制《公路水毁防治技术规范》，并获得陕西省科技进步一等奖 1 项、二等奖 1 项、三等奖 5 项，以及中国公路学会科技进步一等奖 1 项。相关成果已在约 150 处边坡工程中应用，完成 7 处高边坡风险预警并在工程中得到验证，且在甘肃、浙江、福建、陕西、山西等省的边坡工程及青海德香高速公路香日德河特大桥等重大工程中实现工程化应用，为本项目实施提供了扎实的研究与应用基础。

技术力量及人员构成

姓 名	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
唐蕾	女	42	高级	计算机科学与技术	项目负责人
惠冰	男	43	高级	交通运输工程	技术指导
李彬	男	43	高级	车辆工程	技术指导
段宗涛	男	48	高级	交通运输工程	技术指导
曹正鑫	女	26	无	交通信息工程及控制	算法研发
陈龙彬	男	23	无	计算机科学与技术	算法研发
范泽宇	男	21	无	物联网工程	系统开发
周雄伟	男	22	无	通信工程	硬件开发

各自承担的主要工作

唐蕾：主持项目全盘工作，负责总体设计与统筹管理。

惠冰/段宗涛：负责交通工程理论指导与标准制定。

李彬：负责无人机硬件集成与载具适配指导。

王景春：负责示范工程协调与现场验证。

周欣：负责视觉算法架构与数据安全指导。

王一婷：负责系统产品化架构与开发指导。

曹正鑫：负责视觉定位与自主避障算法研发。

陈龙彬：负责病害识别模型与三维重建算法研发。

范泽宇：负责传感器数据采集标注与后端开发。

周雄伟：负责无人机多源感知硬件系统的搭建与调试。

项目主要负责人情况

唐蕾，博士生导师，长安大学信息工程学院副教授。陕西省高校青年杰出人才。中国计算机学会西安委员，陕西省重点科技创新团队骨干成员。研究工作主要集中在无人机自主巡航、多模态信息处理与多模态大模型，主持承担国家级、省部级项目等各类纵向科研项目 6 项。授权国家发明专利 6 项，实用新型专利 1 项。在 IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 等国际、国内期刊与国际会议发表论文 50 余篇。目前担任国际期刊 IEEE TITS 等杂志审稿人。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

依托工程（工作）概况

项目依托汉宁高速 K1378+477-K1378+525 下行边坡治理工程。汉宁高速是国家高速公路“71118”网国道主干线（北）京昆（明）线（G5）陕西境的重要一段，也是陕西省“2367”高速公路网六条辐射线中的重要组成部分，2003 年 11 月建成通车。工程所在区域穿越秦岭和巴山的区域，气候温暖湿润，夏秋季多雨。为了全面提升汉宁高速的安全管理水平，2024 年夏季启动了一项针对公路风险隐患的专项排查与整治工作。此项工程综合考虑了山区地形、地质、气候以及项目本身的特点，依据现行的技术规范，对存在的病害进行了深入分析，并提出了相应的治理措施。

（1）现状边坡状况

XK1378+477 至 XK1378+525 段现状共三级挖方边坡，边坡位于弱膨胀土路段。一级边坡设置护脚挡土墙防护，面坡坡率 1:0.25，墙高 2 米，平台宽 3 米。二、三级坡高 5 米，两级边坡之间设置 1.5 米宽平台，坡率均为 1:2，采用骨架护坡防护，且 K1378+486.6 及 K1378+496.8 处分别设置一道支撑渗沟，渗沟宽度 1.2 米，间距 10 米，二级平台设置 40cm×40cm 现浇混凝土矩形截水沟，壁厚 0.2 米。坡口处设置 70cm×70cm 现浇混凝土矩形顶截水沟，壁厚 0.3 米。现状坡口处即为公路用地界，顶截水沟以上为耕地，坡口外 8~20 米处为灌溉渠。

(2) 边坡病害描述

该段位于弱膨胀土路段，受 2024 年夏季连续降雨影响，膨胀土遇水膨胀，坡口外 8~20 米处灌溉渠开裂变形，XK1378+477~XK1378+525 段二、三级边坡骨架护坡出现严重滑塌、变形等病害，二级平台截水沟挤压变形，路堑顶截水沟沉降后水流方向改变，导致截水沟水从坡面排出，坡面强度降低，边坡失稳，导致坡面滑塌变形。

(3) 日常巡检方案

日常养护巡查中主要是采用徒步（必要时借助绳索等防护用具）辅以简单的工具，通过眼看、耳听、敲打等简便的手段了解边坡的大体情况；对于无法攀爬的边坡主要是通过望远镜进行观察。

(4) 病害治理方案

该处为膨胀土边坡，经现场调查及结合现场实测断面情况，对该段边坡方案进行细化。工程设计方案为修复灌溉渠+修复堑顶截水沟+增设纵向盖板涵+增设急流槽+修复二级平台截水沟+拆除并新建拱形骨架护坡方案。

(5) 工程验收依据及相关指标

防护、排水、土方等治理工程验收应符合《公路养护工程质量检验评定标准》(JTG 5220-2020)、《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/2-2017)、《公路养护技术标准》(JTG5110-2023) 及《公路路基养护技术规范》(JTG5150-2020) 相关要求。各项工程施工应建立健全施工质量保证体系，对施工全过程进行全面的质量控制，配备足量

质检仪器设备和人员。对施工各工艺环节的各项质量标准应做到及时检测，根据检测结果对施工进行动态控制，保证施工各项质量指标合格、稳定。

投资来源

本依托工程的建设资金全部来源于企业自筹资金（养护专项资金）。

出资主体：陕西交通控股集团有限公司汉宁分公司。

工程进度与项目科研进度的配合

科研进度与依托工程的施工周期保持高度同步，采取“全程嵌入、分阶段验证”的配合模式。在施工准备期，科研团队提前介入，采集边坡原始地形地貌与病害现状数据，完成基线模型构建与初始诊断；在施工实施期间，结合现场工况与作业环境的动态变化，开展无人机自主巡航与复杂场景避障测试，并同步采集与整理过程数据，为算法迭代与效果评估提供依据；在施工阶段性完成后，组织复测与对比验证，形成可用于后续推广的技术参数与作业流程建议。

组织管理形式

本项目实行产学研融合、双向管理的组织形式，依托汉宁高速边坡治理工程成立校企联合项目工作组，确立由高校科研团队主导技术路线、企业工程团队主导现场实施的双组长联合领导架构。在执行层面，建立定期会议的常态化沟通机制，通过线上沟通实现边坡地质

勘察资料的共享与反馈；针对施工与科研同步进行的特点，执行严格的现场协同流程，科研团队需严格遵守工程安全规范，利用施工间隙或特定工序阶段进行数据采集与算法验证，确保科研活动不干扰正常养护施工。

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	18.9	合 计	38	18.9	19.1
工程配套研究经费	0	1.设备费	5	5	0
单位自筹	19.1	（1）购置设备费	5	5	0
其他经费	0	（2）设备改造与租赁费	0	0	0
		2.业务费	21.6	7.5	14..1
		（1）材料费	5	2	3
		（2）测试化验实验加工费	0	0	0
		（3）燃料动力费	0	0	0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	8.6	2.5	6.1
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	8	3	5
		（6）其他费用	0	0	0
		3.劳务费	9.6	4.6	5
		（1）专家咨询费	0	0	0
		（2）聘用人员劳务费	0	0	0
		（3）其他劳务费	9.6	4.6	5
		（二）间接费用	1.8	1.8	0
		4.管理费	1.8	1.8	0
		5.绩效支出	0	0	0

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	1
		（2）实用新型	0
		（3）外观设计	0
		2、软件著作权授权数（项）	2
		3、发表论文（篇）	1
		（1）其中 SCI 索引收录数	1
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其它	0
		4、著作（部）	0
		5、制订标准数（项）	0
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	1
	其他成果	1、填补技术空白数	0
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	0
		2、获奖项数	0
		（1）国家奖项	0
		（2）部、省奖项	0
		（3）地市级奖项	0
		3、其他科技成果产出	0
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	0
		（3）新材料	0
		（4）新装备（装置）	0
		（5）平台/基地/示范点	1
		（6）中试线	0
		（7）生产线	0

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
		(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	否
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		2、培养高层次人才	是
		(1) 博士、博士后	1
		(2) 硕士	2
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	否
		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）	0
		2、科研仪器设备利用率（%）	0
		3、孵化科技型企业（个）	0
		4、转化科技成果（个）	0
效果类指标	经济效益	1、新增产值（万元）	0
		2、新增销售（万元）	0
		3、新增出口创汇（万美元）	0
		4、新增利润（万元）	0
	社会效益	1、新增税收（万元）	0
		2、新增就业人数	0
		3、就业培训（人次）	0
		4、带动农民增收（万元）	0
		5、培训和指导科技服务（人次）	0
		6、新增产业带动情况	0
		7、技术集成示范（项）	1
		8、建立示范基地（亩数）	0
		9、节约资源能源	0
		10、环保效益	0
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

项目预期目标

提供 1 个高速公路边坡病害多视角图像数据集，数据总量 ≥ 5000 张，覆盖病害类型 ≥ 6 类，标注准确率 $\geq 95\%$ ；构建高速公路边坡病害在线识别系统 1 套，病害识别时间 ≤ 15 秒，病害检出率 $\geq 85\%$ ，识别准确率 $\geq 92\%$ ；研发一套基于视觉的无人机自主定位和避障技术；提出高速公路边坡智能化养护方案，降低运维成本，提高养护效率；应用示范 ≥ 1 处；申请发明专利 ≥ 1 项，登记软件著作权 ≥ 2 项。

提交的研究成果及其形式

- 1) 提供 1 个高速公路边坡三维实景模型；
- 2) 提供 1 个高质量边坡病害基准数据集；
- 3) 提供 1 个集成无人机自主导航的边坡病害识别系统；
- 4) 发表 1 篇高水平论文；
- 5) 申请 1 项国家发明专利，授权 2 项软件著作权；

经济、社会、环境效益分析

1) 经济效益：无人巡检系统有望显著降低传统人工巡检的单位里程成本，减少长期的人力、车辆和设备投入。通过无人机承担日常巡检任务，在保证甚至提高巡检频次的前提下，可减少巡检车辆的使用和维护支出，压缩燃油、折旧和差旅等运营费用，同时降低高危作业带来的安全成本和潜在经济损失。无人机巡检还可以在重点路段实

现定时或按需的无人值守自动巡查,将人均日巡检里程提高到人工模式的数倍,从而缓解养护单位的人力资源压力,提升整体运维效率。

(2) 社会效益:无人巡检系统有助于提高高速公路的运行安全性和通行保障能力。通过对边坡病害的快速检测、障碍物的及时识别以及对应急事件的快速发现和信息回传,无人机能够在险情早期发出预警,为养护和路政管理部门争取处置时间,有效降低滑坡、落石等次生灾害引发交通事故的风险,减少人员伤亡和财产损失。

九、其它需要说明的问题

十、申请单位意见



单位负责人: (签字)

年 月 日 科研项目专用章

基于无人机自动巡检的高速公路边坡病害快速识别研究 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“基于无人机自动巡检的高速公路边坡病害快速识别研究”（项目编号：25-37X）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，依托工程落实，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.进一步核实技术经济指标。
- 2.进一步落实数据集规模。
- 3.明确六类边坡病害类别。

主任委员

2026年3月20日

专家审查意见表

项目名称	基于无人机自动巡检的高速公路边坡病害快速识别研究				
专家姓名	顾明臣	职务/职称	正高	专 业	交通信息工程
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. 典型病害高质量数据集的病害场景分析建议补充完善，突出研究范围内的数据标注独特属性需求，对于小规模数据集，训练集、验证集与测试集建议按 3:1:1 的比例划分。
3. 为标注后的数据集与现有病害监测系统数据库如何融合应用和技术实际，进一步补充。

评审专家（签字）：

顾明臣

2016 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	基于无人机自动巡检的高速公路边坡病害快速识别研究				
专家姓名	靖 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研究院有限公司			联系电话	13991927998

评 审 意 见

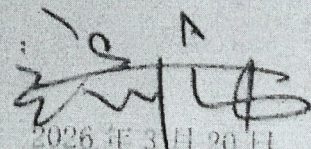
一、课题立项需求翔实，前期工作支撑条件较好，研究内容基本齐全，关键技术路线可行。

二、本课题重点解决识别问题，并对灾害合理进行分类，分类形式应与养护需求进行有效对接、衔接。

三、绿化植被覆盖条件下的识别问题应做考虑。

四、进一步核实技术经济指标。

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）

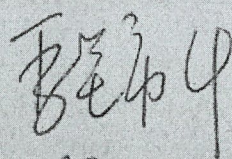
专家审查意见表

项目名称	25-37X 基于无人机自动巡检的高速公路边坡病害快速识别研究				
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、 项目预期目标与正文中的表述有很多不一致的地方，如文中的图片是5000张，提交成果中只有4000张，典型病害检出率有85%、80%两种数值，标注准确率92%指标偏低。
- 2、 提交的研究成果形式要把专利放进去，专利是授权还是申请（受理）要明确。
- 3、 明确6种以上的病害类别。

评审专家（签字）：



2026 年 3 月 20 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不散，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	基于无人机自动巡检的高速公路边坡病害快速识别研究				
专家姓名	于金良	职务/职称		专 业	测绘
专家单位	陕西交控集团			联系电话	13892800150

评 审 意 见

一、现有无人机技术已成熟，建议不开展无人机飞行控制、避障等。

二、对病害识别中要充分考虑植被覆盖的影响，依托工程中48m的数量太少，一个边坡的数据太少，不能支持研究，建议加大依托工程的量。

评审专家（签字）：于金良

2016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	基于无人机自动巡检的高速公路边坡病害快速识别研究				
专家姓名	孙楠	职务/职称	正高工	专 业	电子信息
专家单位	西安公路研究院			联系电话	18629389959

评 审 意 见

查该研究完整, 比较扎实, 建议:

1. 完善说明在验收工程主下如何确保5000张高质量数据收集完成。
2. 文字前后进行校对。如桩号:
 $K1378+477 \sim K1378+525$
 $K1378+477 - K1378+525$

评审专家(签字):

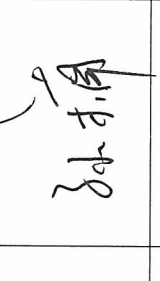
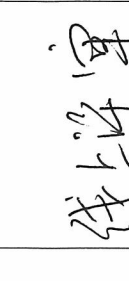
孙楠

2016 年 3 月 20 日

(本意见入档, 应填写工整, 纸面不敷, 可另加纸)

基于无人机自动巡航的高速公路边坡病害快速识别研究 (项目编号: 25-37X)

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	
5	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	

专家意见处理表

项目名称：基于无人机自动巡检的高速公路边坡病害快速识别研究

(项目编号： 25-37X)

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. 分类形式应与养护需求进行有效对接、衔接。 2. 绿化植被覆盖条件下的识别问题应做考虑。 3. 进一步核实技术经济指标。	1.与依托工程方进行详细的沟通以及对接，明确需要的病害分类 2.主要考虑使用特征增强技术对于植被部分覆盖的病害进行处理，增强识别效果 3.已经核实技术经济指标
2	顾明臣	1.典型病害高质量数据集的病害场景分析建议补充完善，突出研究范围内的数据标注独特属性需求，对于小规模数据集，训练集、验证集与测试集建议按 3:1:1 的比例划分。 2..为标注后的数据集与现有病害监测系统数据库如何融合应用和技术实际，进一步补充。	1.病害场景分析完善，对于工程需要的病害分类已经补充完善，病害数据集按照 6: 2: 2 划分； 2.对于标注后数据集的使用进行了进一步的说明以及阐述
3	季锦章	1.项目预期目标与正文中的表述有很多不一致的地方，如文中的图片是 5000 张，提交成果中只有 4000 张，典型病害检出率有 85%、80%两种数值，标注准确率 92%指标偏低。 2、提交的研究成果形式要把专利放进去，专利是授权还是申请(受理)要明确。 3.明确 6 种以上的病害类别。	1.已经校对修改所有指标数据 2.将专利明确为申请，并写入研究成果 3.明确了 6 种病害类型

4	孙楠	1. 完善说明在依托工程下如何确保大于 5000 张高质量病害数据集完成 2. 文字前后进行校对	1. 对于 5000 张病害数据集的获得进行了说明，处理依托工程还考虑使用历史数据以及数据增强手段进行扩充； 2. 文字前后校对完成
5	于金良	1. 现有无人机技术已经成熟，建议不开展无人机飞行控制 和避障 2. 对病害识别中要充分考虑植被覆盖的影响，依托工程数量太少，建议加大依托工程的数量	1. 考虑完善成熟的无人机技术不开源，无法进行集成算法调优，所以需要不进行无人机飞控和避障研究 2. 病害识别中植被覆盖的影响，无法完全解决，考虑了如何在部分覆盖情况下进行判断识别，利用数据增强等手段丰富数据集，利用病害数据集，算法对于常见的病害有泛化性，在该依托工程下可以完成病害识别任务；

大纲评审委员会专家（签字）



项目负责人（签字）：

