

项目合同编号：25-47K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究

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：赵初晔

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：029-61322888

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

填写说明：

1. 此文本要求采用计算机打印，字迹清晰，字间距采用标准距离；
2. 合同甲方为陕西省交通运输厅；
3. 按照合同书正文、附件（修改后的科研项目研究大纲、专家评审意见、专家名单及意见处理表等）顺序双面打印胶装，封面、封底采用白色布纹纸张。

一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

- (1) 轻量化无人机抛投式 GNSS 监测装备研发
- (2) 无人机定点巡飞的边坡灾害识别方法研究
- (3) 公路边坡 GNSS 监测装备无人机抛投选点技术研究
- (4) 联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测工程应用

2. 技术关键

- (1) 研制适用于高位公路边坡的抛投式 GNSS 监测装备。
- (2) 基于无人机定期巡测的边坡灾害识别方法。
- (3) 无人机搭载抛投式 GNSS 监测装备的控制部署技术。

3. 依托工程（依托工作）

G5 京昆高速公路西安至陕川界段起于西安市鄠邑区涝峪口（K1133+730），途经康市宁陕、石泉县，汉中市佛坪、洋县、城固、南郑、汉台、勉县、宁强等县（区），止于宁强县棋盘关陕川交界（K1459+232），全长 326.02 公里。全线采用四车道高速公路标准建设，涝峪口至八里坪、马家坪至龙王坪段设计速度 60km/h、路基宽度 20.0 米/22.5 米；八里坪至马家坪、龙王坪至龙亭段、二郎庙至勉县元墩段、勉县元墩至宁强段、宁强至棋盘关段设计速度 80km/h、路基宽度 24.5 米；龙亭至二郎庙段设计速度 100km/h、路基宽度 26 米。

G5 京昆高速西安至陕川界段建设年代较早，建设标准偏低，随

着近 20 年的运营，其水文、地质、气象等外部环境已发生较大不利变化，存在重大自然灾害风险、突发事件风险、构造物性能严重衰减等多重风险叠加威胁，严重影响了区域交通的正常运行，降低了公路的安全保畅能力，无法满足人民群众对安全、便捷、高效出行的需求。据统计，沿线最近 5 年（2020—2024 年）较建设初期前 5 年（2000~2004 年）平均年降雨量平均增加了 15%，雨季（7、8 月份）平均降雨量增加了 27%；设于项目秦岭服务区的雨量观测站近三年（2022—2024 年）较建站初 3 年（2013—2015 年）平均年降雨量平均增加了 42%，雨季（7、8 月份）平均降雨量增加了 89%。沿线水系丰富，河道纵横，受多年来降雨增加、山洪及工程建设等因素影响，河道冲刷明显，其中涝峪河段下切约 3m，其余河段也存在不同程度的下切。项目区地震烈度区划调整，项目地震动峰值加速度和设防烈度均有重大变化，普遍由Ⅵ度、Ⅶ度调整为Ⅶ度、Ⅷ度，且近年来沿线发生 5 次 3 级及以上地震。项目区穿越秦岭、大巴山等复杂地质构造带，沿线岩性多样，断裂发育，地质灾害风险较高，近年来降水量增加，极端天气增多，进而引发滑坡、泥石流等地质灾害频发。在此背景下，基于本项目研究成果，依托该工程开展应用示范很有针对性和必要性。



二、考核指标

1.预期目标

围绕交通安全领域，针对复杂环境高危边坡 GNSS 监测设备智能化部署与高精度实时监测需求，开展辅助无人机精准抛投施作的 GNSS 边坡灾害高精度监测预警技术研究。通过研发集数据采集、无线通讯、抛投防护、太阳能供电功能为一体的轻量化无人机抛投式 GNSS 监测装备，结合实体边坡进行无人机定点巡飞的边坡灾害识别、GNSS 监测装备无人机抛投选点技术研究和野外测试。实现复杂环境高危边坡监测设备无人化智能化部署与高精度动态实时监测，提高公路沿线高危边坡灾害隐患的监测预警能力。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

（1）研发轻量化无人机抛投式 GNSS 监测装备，重量小于 10kg，监测精度不低于 2cm；

（2）基于无人机定期巡测的边坡灾害识别方法；

（3）提出无人机抛投式 GNSS 监测装备智能化部署选址方法。

3.经济和社会效益

无人机场部署与辅助无人机精准抛投的 GNSS 高精度地面传感器的协同，实现公路沿线边坡多类型灾害隐患的快速准确识别的同时，以无人机场部署的定期巡查动态评估沿线边坡灾害风险等级，避免监测传感大面积广泛布设的弊端，优化地面传感布设方法，并通过研发适用于高位高危和复杂地质环境条件下无人机抛投式 GNSS 监测装备、GNSS 监测设备精准抛投部署技术，实现复杂环

境高危边坡的全面动态监测，提高公路沿线边坡灾害隐患时空分布精准识别及预警能力，将创造可观的经济效益，促进公路沿线边坡灾害智能防控等方面的转型升级，提高监测效率，具有明显的经济效益。

项目形成监测手段具有一定的系统性、可实施性，为我国实现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，对灾害的精准预警将有利于减少灾害损失和保障人民生命安全，提高交通基础设施服务水平，具有重要社会效益。

4.成果提供形式

- (1) 研制适用于高位公路边坡的抛投式 GNSS 监测装备 1 套；
- (2) 提出无人机抛投式 GNSS 监测装备智能化部署选址方法；
- (3) 申请专利 2 项；
- (4) 发表论文 2 篇；
- (5) 联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究报告 1 册。

5.其他考核指标

无

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 8 月	调研收集并系统分析课题研究方向有关发展现状与趋势的相关资料和信息,有针对性地进行分类研究。编写申报书,进行项目申报。编制项目研究工作大纲。
2026 年 9 月 — 2027 年 2 月	全面开展各课题的具体研究工作,完成各课题的关键技术攻关,研发低成本轻量化无人机抛投式 GNSS 监测装备。
2027 年 3 月 — 2027 年 8 月	依托实体工程开展高位远程公路边坡抛投式 GNSS 监测装备无人化部署测试工作,开展监测结果分析与算法研究。
2027 年 9 月 — 2028 年 3 月	结合工程应用,开展成果总结提炼,组织专家对研究成果进行咨询,根据各方意见对研究成果进行修改完善。完成研究报告、工作报告等成果修编,申请课题验收。

四、项目经费

项目总经费：59.87 万元
交通运输厅补助：19.87 万元
自筹资金：40 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	57.87	19.87
1. 设备费	0	0
(1) 购置设备费	0	0
(2) 试制设备费	0	0
(3) 设备改造与租赁费	0	0
2. 业务费	39.87	17.87
(4) 材料支出	9.77	3.77
(5) 测试化验实验加工支出	0	0
(6) 燃料及动力支出	6.00	2.00
(7) 差旅支出	12.6	8.6
(8) 会议支出	2.0	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	9.50	3.50
(11) 其他支出	0	0
3. 劳务费	18.00	2.00
(12) 劳务性支出	12.00	0
(13) 咨询专家支出	6.00	2.00
(二) 间接费用	2.00	0
4. 管理费	0	0
5. 绩效支出	2.00	0
合 计	59.87	19.87

注：预算编制按照《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发〔2022〕3号）文件执行。项目验收将组织财务专项验收或审计。可参考《陕西省交通运输厅科研项目经费决算报告参考格式说明》

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	
		3.发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其他	2
		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
		（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）	1
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	
		(1) 小试	是
		(2) 中试（样品样机）	是
		(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			

六、承担单位或研究人员分工

中交第一公路勘察设计研究院有限公司负责项目总体牵头和组织执行。

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
1	赵初晔	1987年12月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高级	隧道工程	项目总体策划及组织实施
主要研究人员						
2	王君鹭	1990年3月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高级	岩土工程	项目技术质量控制
3	董长松	1982年9月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高级	隧道工程	项目统筹与督导
4	李震	1990年9月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高级	岩土工程	项目统筹与督导

5	李博融	1983年 1月	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	副高级	岩土工程	装备研发	李博融
6	裘友强	1991年 10月	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	副高级	道路工程	设备定测	裘友强
7	刘昭	1987年 7月	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	副高级	隧道工程	设备定测	刘昭
8	何佳州	1991年 9月	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	中级	隧道工程	设备定测	何佳州
9	李琛	1993年 11月	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	副高级	交通工程	数据处理	李琛
10	崔锦栋	1994年 5月	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	中级	道路工程	装备研发	崔锦栋
11	胡博	1998年 7月	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	中级	桥梁工程	装备研发	胡博
12	黄永益	1982年 10月	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	中级	信息化	算法研究	黄永益
13	张续	1994年 5月	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	中级	计算机科学与 技术	算法研究	张续

14	刘毅	1999年 4月	中交第一公路勘察设计研 究院有限公司	初级	电子科学与 技术	算法研究	刘毅
15	李文帅	1995年 11月	中交第一公路勘察设计研 究院有限公司	初级	软件工程	数据处理	李文帅

八、信息表

项目合同编号		25-47K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部			
项目名称		联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究									
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		59.87		厅 拨		19.87					
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					代码	610100			
	通讯地址	陕西省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				
参与单位	序号	单 位 名 称									
	1										
	2										
	3										
项目负责人	姓 名	赵初晔		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份	1987				
	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	15929942394 029-88853000-8212			电子邮箱		1034665598@qq.com				
项目联系人	姓名	王君鹭			性别		女				
	联系电话	15829277270 029-88853000-8212			电子邮箱		291767127@qq.com				
项目组人数	15	高级	8	中级	5	初级	2	其他			
主要研究内容 (100 字以内)	(1) 轻量化无人机抛投式 GNSS 监测装备研发 (2) 无人机定点巡飞的边坡灾害识别方法研究 (3) 公路边坡 GNSS 监测装备无人机抛投选点技术研究 (4) 联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测工程应用										
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.合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：

陕西省交通运输厅

负责人：（签字）



2020年3月27日

联系人：（签字）

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）中交第一公路勘察设计研究院有限公司

单位负责人：（签字）



2020年3月27日

项目负责人：（签字）

赵邵晖

（公章）



电 话：

财务负责人：（签字）

董育辉

账 户 名：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

开户银行：农行西安科技二路支行

账 号：26127101040000725

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）中交第一公路勘察设计
研究院有限公司

项目负责人：赵和平

年 月 日

项目编号: 25-47K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究

申请单位: 中交第一公路勘察设计院有限公司

联系人: 王君鹭

电 话: 15829277270



陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

目录

一、 项目研究的背景和必要性.....	1
二、 前期科研及工作基础.....	2
三、 实施方案.....	9
四、 项目承担单位及参加单位概况.....	14
五、 项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件.....	19
六、 项目经费估算及资金筹措情况.....	22
七、 项目绩效指标.....	25
八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益.....	27

一、项目研究的背景和必要性

近年来我国公路交通基础设施发展迅速，截至 2025 年底，我国公路网里程接近 550 万公里，其中高速公路里程位居世界第一，同时，我国是世界上突发性自然灾害最为频发的国家之一，地质、洪涝等自然灾害严重损毁公路交通网基础设施，极大降低公路交通网服务能力，造成严重经济和生命财产损失。

地质灾害是指在自然或人为因素作用下，对人类生命财产、环境造成破坏和损失的地质作用（现象），主要类型包括滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降等。地质灾害的发生受自然环境类因素的影响，包括地形、岩性、地质、土壤、植被、降水等。此外，地质灾害与人类活动也有密切关系。

地质灾害在发生发展过程中，通常都会表现出一定程度的变形特征。因此，地表形变监测一直是地质灾害监测中的重要内容。长期以来，地表外部形变监测主要依靠经纬仪、水准仪及测距仪等传统仪器，这些以大地测量为主的方法具有直观、简单、投入快、监测较为准确等特点，在滑坡灾害监测中发挥了重要的作用。但这些监测手段也存在人工作业劳动强度高、受人为因素、地形通视和气候环境条件影响大、作业周期长等缺点，难以准确迅速及时发现灾害体的整体变形。随着现代空间技术、电子技术、计算机技术，以及网络、通讯技术和信息技术的发展，以全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）、遥感（Remote Sensing, RS）、合成孔径雷达干涉测量（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）、全自动测量

机器人和远程自动化监测系统为代表的现代高科技技术手段,逐渐成为地质灾害形变监测的重要技术方法,为地质灾害监测带来了一场全新的技术革命。其中,GNSS 技术因其具有全球性、全天候、连续性和实时性等特点,已被广泛应用于滑坡等地质灾害的三维形变监测中。

目前,用于地质灾害形变监测的 GNSS 监测设备大多是通过人工方式进行现场安装,不仅费时费力,而且在遇到突发灾害需要进行监测时具有很高的危险性。而复杂山区的地质灾害往往位于高山峡谷区,山势陡峭、地形地貌复杂,往往难以实现对 GNSS 监测装备的人工部署。因此,在高危地质环境条件下,采用无人机对 GNSS 监测装备进行无人化抛投部署成为一种可能的解决方案。但是,普通 GNSS 监测终端并不适合无人化抛投部署,需要将专用低功耗 GNSS 监测终端与抛投防护装置、供电装置、固定装置等有机集成,才能形成无人机抛投式 GNSS 监测预警装备。此外,在高危和复杂山区环境条件下,采用无人机进行 GNSS 监测装备抛投部署时也面临着无人机安全飞行难、精确导航定位难、抛投目标识别难、抛投装置自动稳固难等问题。因此,如何实现高危环境 GNSS 监测预警装备的高度集成和精准抛投,是亟待解决的关键技术问题。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

滑坡灾害具有复杂的成因机理和变化特征,在孕灾过程中受到多种诱发因素的综合影响,导致滑坡地质结构条件随着影响因素的不断

变化而产生连续性甚至突发性的变形。例如降雨量、地下水、地震、人类活动、工程扰动等外界影响因素都可能推动滑坡灾害发生。因此，为了更好地研究滑坡灾害的孕灾过程及变化特征，深入了解滑坡孕灾初期环境因素变化、灾害发生过程中的外界影响因子及发生时的形变特征，研究人员通过多种监测方法实现了对滑坡灾害发生全过程的跟踪监控。从滑坡监测的发展历史来看，滑坡的主要监测内容包括：早期的滑坡前兆现象观测，影响滑坡地质结构条件发生变化的外界因素监测，以及滑坡地质结构发生变化过程中的各种变形监测。

边坡灾害高精度实时监测技术主要指 GNSS 形变监测技术。目前，典型的全球导航卫星系统主要包括 GPS（Global Positioning System，GPS）、北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System，BDS）、格洛纳斯导航系统（GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM，GLONASS）等。通过在发生形变的滑坡重点区域部署相应的监测设备（监测站），并在滑坡体外的稳定端设置参考站（基准站），计算监测站和基准站之间的坐标差值来获取滑坡的位移变形监测数据。20 世纪 80 年代，美国地质调查局将 GPS 技术应用到夏威夷火山变形监测中，分别部署了 58 个监测点来获取各个点位的位移监测数据^[1]。20 世纪 90 年代，我国学者初步建立了链子崖-新滩滑坡的 GPS 监测网，GPS 监测技术逐步在我国崩塌、滑坡变形监测中得到应用^[2-12]。尤其是 21 世纪以来，GPS 在滑坡监测中得到广泛推广，例如，四川雅安峡口滑坡^[13]，雅砻江卡拉电站滑坡^[14]，重庆市万州区付家岩滑坡、云阳县滑坡^[15]，四川丹巴县典型滑坡^[16]，金

川二矿区地裂缝^[17]，重庆望霞危岩^[18]等崩塌滑坡灾害。在传统的 GNSS 形变监测方法中，一般选取待监测区域附近稳定的区域，自建基准站作为监测参考点^[19-20]。

目前针对每个滑坡地质灾害隐患点，均需要单独建设 GNSS 基准站，并且根据地质灾害隐患点区域大小和地质特性不同，需要建设一个甚至多个 GNSS 基准站，导致了监测系统成本的增加，不利于 GNSS 变形监测技术的大范围应用推广，研发低成本轻量化 GNSS 监测设备是亟待解决的问题。

此外，在复杂地质环境条件下，地质灾害体往往位于高山区，山势陡峭、地形地貌复杂，难以实现监测装备的人工部署，因此，GNSS 监测装备的无人化部署成为未来的重要发展方向^[21-22]。目前，国外有采用无人机或直升机投放 GNSS 接收机用于监测冰川、火山表面位移的试验，但尚未有关于滑坡等地质灾害监测的报道；在国内，长安大学开展了无人机抛投式 GNSS 监测设备非接触式部署和地质灾害应急监测等方面的研究工作^[23-24]，并于 2020 年率先将其应用于黄土滑坡的变形监测。同时，顾及滑坡灾害体状态特征以及融合滑坡多源数据也是提高滑坡监测精度的重要因素^[25-29]。

目前，北斗/GNSS 边坡监测手段均是通过“人工部署”，监测设备的选址主要依靠地质专家现场踏勘评估，根据自身经验结合现场情况进行选址，而后施工人员将监测设备及配件运输至边坡区域，现场完成施工安装，实现边坡监测地表接触式部署。然而面对复杂艰险条件下的边坡，山势陡峭、地形地貌复杂、人员难至，GNSS 监测设备

的人工选址与部署难以实施。因此，如何实现监测设备无人化智能化部署，实现公路复杂边坡高精度实时形变监测仍是一个具有挑战的问题。

2.2 前期科研及现有工作条件

中交第一公路勘察设计研究院有限公司是公路勘察设计领军企业，具有工程设计综合甲级资质，是“国家创新型试点企业”和“国家重点高新技术企业”。获国家科技进步奖一等奖3项、二等奖6项、省部级科学技术和工程技术创新奖励300余项，起草各类技术标准130多项。成立70年以来，一直积极而深入地参与地区各等级公路勘察、设计、咨询等工作。在青藏高原多年冻土领域拥有的“极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室”“青海青藏高原公路冻土工程野外科学观测研究站”“多年冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室”“中国交建寒区旱区道路工程重点实验室”“青藏高原公路冻土工程交通运输行业野外科学观测研究基地”等多个高端研究平台。在青藏高原多年冻土区公路建设与养护、复杂环境下公路地质灾害综合防治技术研究等方面具有丰富的理论实践经验和强有力的科研队伍支撑。

在课题研究方面：近五年主持、参与的课题包括国家重点研发计划项目《基于分布式应变测量的特殊土路基和地质灾害监测研究》《基于分布式应变测量的地下结构工程监测研究》《进藏通道应急抢通关键技术及装备》《长大线形交通基础设施应急抢修与快速保通技术》《极端气候下在役交通基础设施寿命增强技术》《黄延高速公路黄土

高边坡预警技术研究》《“空天地体”一体化协同的公路边坡灾害监测应用技术研究》等国家级、省部级课题 20 余项，在边坡监测评估和预警方向积累了丰富的科研经验。

知识产权方面：申请专利 50 余项，授权发明专利 10 余项，实用新型专利 30 余项，软件著作权 6 项，发表学术论文 100 余篇，其中 SCI、EI、ISTP 收录 20 余篇，编写专著 2 部。

标准规范方面：近三年承担 23 项标准规范编制工作，其中行业标准 4 项，行业协会标准 16 项，地标 2 项左右，中国交建企业标准 1 项左右，如《多年冻土地地区公路设计与施工技术细则》《高寒高海拔地区公路生态保护及修复技术规范》等。

技术产品方面：近三年研发了高陡边坡支护结构分布式光纤监测与稳定性评估技术。针对滑坡地质灾害的破坏特征和分布式光纤测试技术的高精度、长距离和大范围特征，研究了边坡在降雨条件下的变形破坏演化过程，建立了降雨和荷载作用下公路边坡变形发展理论，提出了以分布式光纤监测技术为辅助监测手段的边坡灾害监测体系，形成了滑坡地质灾害浅表层与深部变形、土体与支挡结构相结合的分布式光纤监测技术，可以融合高分遥感、定点自动化测量等监测方法，构建多方法、多方式的自动化监测网络，实现边坡灾害的一体化监测。形成以灾变机理为基础、以实际监测数据为支撑、以风险控制为目标、以变形或变形速率为表征的黄土高边坡预警模型；建立集监测数据管理、展示、发布和风险控制与预警相结合的一体化数据分析平台和黄土高边坡实时预警、预报及灾害风险发布平台。

成果奖项方面：近 10 年获国家级科技奖励 7 项，获省部级科技奖励 20 余项，包括“青藏高海拔多年冻土高速公路建养关键技术及工程应用”获国家科技进步奖二等奖，“高寒地区公路工程运行状态监测体系及灾害预警关键技术”获陕西省科学技术进步一等奖。

成果应用转化：相关技术成果在青海省共和至玉树高速公路、花石峡至大武高速公路、陕西省黄陵至延安高速公路沿线边坡、江西省南昌至赣州高铁沿线边坡，支撑我国高寒高海拔地区第一条高速公路共和至玉树高速公路运维状态的长期跟踪监测，为工程施工安全和风险预测预警提供了理论、数据依据，取得了显著的社会经济效益。

参考文献

- [1] Miklius A, Iwatsubo E Y, Denlinger R, et al. GPS measurements on the Island of Hawaii in 1992 [R]. USA: United States Geological Survey, 1994.
- [2] BRACH M, ZASADA M. The Effect of Mounting Height on GNSS Receiver Positioning Accuracy in Forest Conditions[J].Croatian Journal of Forest Engineering : Journal for Theory and Application of Forestry Engineering, 2014, 35(2): 245-253.
- [3] HAN Junqiang, HUANG Guanwen, ZHANG Qin, et al. A New Azimuth-Dependent Elevation Weight (ADEW) Model for Real-Time Deformation Monitoring in Complex Environment by Multi-GNSS[J]. Sensors, 2018, 18(8): 2473.
- [4] YU Chen, LI Zhenhong, PENNA N T. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 204: 109-121.
- [5] INTRIERI E, CARLÀ T, GIGLI G. Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: A literature review[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 193: 333-349.
- [6] XU Qiang, LI Weile, JU Yuanzhen, et al. Multitemporal UAV-based photogrammetry for landslide detection and monitoring in a large area: a case study in the Heifangtai terrace in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(8):1826-1839.
- [7] BAI Dongxin, TANG Jingtian, LU Guangyin, et al. The design and

- application of landslide monitoring and early warning system based on microservice architecture[J]. Geomatics, natural hazards and risk, 2020, 11(1): 928-948.
- [8] KONG Jiaxu, ZHUANG Jianqi, ZHAN Jiewei, et al. A landslide in Heifangtai, northwest of the Chinese Loess Plateau: triggered factors, movement characteristics, and failure mechanism[J]. Landslides, 2021, 18(10): 3407-3419.
- [9] YAN Qiuyu, ZHAO Wufan, HUANG Xiao, et al. Automated Delineation of Smallholder Farm Fields Using Fully Convolutional Networks and Generative Adversarial Networks[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2022, 5(4): 10-22.
- [10] QIU Dongwei, WANG Laiyang, LUO D, et al. Landslide monitoring analysis of single-frequency BDS/GPS combined positioning with constraints on deformation characteristics[J]. Survey Review, 2019, 51(367): 364-372.
- [11] WANG Pengxu, LIU Hui, NIE Guigen, et al. Performance evaluation of a real-time high-precision landslide displacement detection algorithm based on GNSS virtual reference station technology[J]. Measurement, 2022, 199: 111457.
- [12] 王利,许豪,舒宝,等. 滑坡灾害GNSS监测技术研究进展与展望[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(01): 12-26.
- [13] 过静琚, 杨久龙, 丁志刚, et al. GPS 在滑坡监测中的应用研究——以四川雅安峡口滑坡为例[J]. 地质力学学报, 2004, (1): 65-70.
- [14] 薛志宏, 卫建东, 金新平. GPS 在雅砻江卡拉电站滑坡监测中的应用[J]. 测绘工程, 2007, (2): 65-68.
- [15] 王爱军, 杨秀元, 孙秀娟, et al. 重庆市万州区付家岩滑坡监测与变形分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, (2): 104-108.
- [16] 郑万模, 邓国仕, 刘宇平, et al. 四川丹巴县典型滑坡 GPS 监测效果研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2008, (3): 30-34.
- [17] 王杰, 叶茂, 马凤山, et al. 基于视频图像识别的崩塌落石监测预警系统设计与实现[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(5): 952-963.
- [18] 金泉豪, 张俊义, 杨强, et al. 望霞危岩应急监测方法研究[C]. 2011 年全国工程地质学术年会, 青海西宁, 2011, 361-366.
- [19] 曹阳威. 基于北斗和物联网的滑坡监测系统关键技术研究[D]. 廊坊: 华北科技学院, 2016.
- [20] 王铎, 黄观文, 杜源, 等. 顾及运动状态改正的GNSS滑坡监测基准站切换方法[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2117-2124.
- [21] 白正伟, 张勤, 黄观文, 等. “轻终端+行业云”的实时北斗滑坡监测技术[J]. 测绘学报, 2019, 48(11): 1424-1429.

- [22] 陈巧, 袁飞云, 付霞, 等. 无人机摄影测量技术在阿娘寨滑坡应急调查中的应用[J]. 测绘通报, 2023(1): 77-83+119.
- [23] 陈孜, 黄观文, 白正伟, 等. 基于低成本毫米级GNSS技术的膨胀土边坡现场监测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53 (01): 214-224.
- [24] 黄观文, 陈孜, 徐永福. 膨胀土边坡GNSS实时监测技术[J]. 测绘学报, 2023, 52(11): 1873-1882.
- [25] 杜源, 王纯, 张勤, 等. 顾及黄土滑坡灾害状态特征的实时GNSS滤波算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(07): 1216-1222.
- [26] 王利, 许豪, 舒宝, 等. 利用互信息和IPSO-LSTM进行滑坡监测多源数据融合[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46 (10): 1478-1488.
- [27] 刘健, 黄观文, 杜源, 等. 基于基准站信噪比先验信息的GNSS观测数据多路径误差识别方法及应用[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(2): 352-362.
- [28] 王川, 涂宽, 湛华, 等. Stacking InSAR 和IPTA 技术应用于探测宁夏隆德县滑坡隐患[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(5): 222-234.
- [29] 王利, 张懿恺, 舒宝, 等. 基于特征优选和逐步回归的黄土滑坡监测数据融合改进方法[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(03): 511-521.

三、实施方案

1. 主要研究内容及实施方案

研究内容 1: 轻量化无人机抛投式 GNSS 监测装备研发

针对公路边坡地形地貌复杂、难以实现 GNSS 监测装备的人工部署、监测数据不全的难题, 研制轻型抛投式监测预警集成装备, 考虑野外设备三防要求, 对 GNSS 装备进行抛投和固定场景下的抗冲击优化设计; 对设备材料及性能进行综合选型, 在确保安全的前提下有效控制集成设备的重量, 满足无人机搭载能力受限条件下监测装备的安全运输。

研究内容 2: 无人机定点巡飞的边坡灾害识别方法

通过部署无人机机场, 对边坡进行无人机定期巡测, 开展无人机载摄影点云提取、边坡面层裂缝信息提取、LiDAR 点云提取, 导入

无人机载测量数据,开展数字表面模型(DSM)、数字高程模型(DEM)和数字正射影(DOM)的处理与提取,结合边坡巡查形变信息,实现边坡灾害的识别与研判。以无人机场部署的定期巡查动态评估沿线边坡灾害风险等级,为GNSS监测装备的部署提供依据。

研究内容3:公路边坡GNSS监测装备无人机抛投选点技术研究

公路边坡地质灾害区域抛投目标点选取技术,顾及公路边坡形变监测、抛投监测装备固定及监测数据质量等实际需求,基于灾害区域DSM与DOM技术提供的形变信息采用高斯-拉普拉斯算子与ORB算法进行特征点的快速提取,利用K最近邻算法进行特征点匹配并计算坡度、地形粗糙度、植被指数等指标,依据多指标决策方法(MCDM)进行灾害区域抛投监测点选址适宜性评价。

研究内容4:联合无人机机场与装载抛投式GNSS的边坡监测工程应用

依托典型示范工程,开展边坡无人机定期巡查与装载抛投式GNSS的边坡监测技术应用。对研制的公路边坡的抛投式GNSS监测装备进行测试优化,验证无人机搭载抛投式GNSS监测装备部署技术的可行性。

2. 拟解决的关键问题

- (1) 适用于高位公路边坡的抛投式GNSS监测装备研发;
- (2) 基于无人机定期巡测的边坡灾害识别方法;
- (3) 无人机搭载抛投式GNSS监测装备的控制部署技术;

3. 技术路线

针对复杂环境高危边坡 GNSS 监测设备智能化部署与高精度实时监测需求,开展辅助无人机精准抛投施作的 GNSS 边坡灾害高精度监测预警技术研究。通过研发集数据采集、无线通讯、抛投防护、太阳能供电功能为一体的轻量化无人机抛投式 GNSS 监测装备,结合实体边坡进行无人机定点巡飞的边坡灾害识别、GNSS 监测装备无人机抛投选点技术研究和野外测试。实现复杂环境高危边坡监测设备无人化智能化部署与高精度动态实时监测,提高公路沿线高危边坡灾害隐患的监测预警能力。



图 3-1 研究技术路线图

根据研究需要,对研究内容进行细化、分解,制订主要实施方案如下:

(1) 适用于高位公路边坡的抛投式 GNSS 监测装备研发

复杂山区地质灾害往往位于高山峡谷区,山势陡峭、地形地貌复杂,难以实现 GNSS 监测装备的人工部署。无人机抛投 GNSS 监测装

备至滑坡区域是一种有效手段,但常规 GNSS 监测终端由于其重量及体积限制,并不适合无人机抛投部署,需要将 GNSS 监测终端与抛投防护装置、供电装置、稳固装置等有机集成,才能形成无人机抛投式 GNSS 监测装备。

供电模块由太阳能板、锂电池和太阳能控制器组成。为了保证监测终端的持续工作,按照设计要求,应选用至少 10W 的太阳能板。至少需要选择 15AH 的电池,可以保证无阳光条件下以变频式监测模式持续工作 30 天。太阳能控制器保证在太阳能板为装置供电的同时,将多余电量储存在锂电池中,在夜间使用锂电池的电量为装置供电,从而起到充放电的控制作用,同时还有过充过放保护功能。

监测模块即 GNSS 数据接收与传输模块,所选用的低功耗高精度轻量化 GNSS 接收机内部集成了高精度 GNSS 定位模块和 4g 通讯模块,可实现 GNSS 观测数据的高精度接收与发送。

为了实现抛投式 GNSS 监测装备在滑坡体上的可靠固定,本研究针对土质和岩质滑坡特征设计了相应的 GNSS 监测装备固定装置。在研发过程中,首先设计了第一代适用于土质滑坡的“多面体式”GNSS 监测装备固定装置和适用于岩质滑坡的“蜘蛛腿式”GNSS 抛投监测装备固定装置。可实现土质和岩质滑坡场景下 GNSS 监测装备的可靠固定。

(2) 无人机定点巡飞的边坡灾害识别方法

基于无人机获取的公路边坡灾害高分辨率航摄影像,经手动筛选,剔除受镜头抖动、天气、遮挡等影响的质量不佳的图像后,采用

Labeling 可视化图像标注工具对无人机影像和精细化模型中灾害表现特征进行人工标注，公路边坡灾害的表观特征可分类为风化剥落、雨水冲刷、滚石掉块、崩滑坡、地表裂缝等，将表观特征数据集输入 YOLOv8 目标检测模型进行训练，通过大量调试确定适用于边坡灾害表观特征目标检测的最佳网络参数，引入注意力机制模块，通过对特征图进行空间和通道维度的加权使模型具有更佳的特征提取能力，从而提升识别效果，实现公路边坡灾害表现特征智能识别。

(3) 公路边坡 GNSS 监测装备无人机抛投导引技术研究

复杂山区的高危地质环境条件下，如何有效识别出灾害体的变形特征点并引导抛投无人机安全到达该位置是非常困难的。因此，针对这一难题，开展了复杂山区 GNSS 监测装备无人机抛投导引技术研究，该技术首先采用勘察无人机对滑坡等地质灾害体进行前期勘测，构建监测区域的实景地图；然后基于灾害区域选址适宜性评价方法进行候选抛投点的选择；最后根据抛投点的位置规划出抛投无人机的最佳飞行路径，为无人机实施安全、快速、精准抛投奠定基础。多次的野外试验、测试和应用示范表明，该技术能够在复杂山区环境下将抛投无人机正确引导至预定抛投位置，实现对 GNSS 监测装备的精准抛投。

4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接

川藏公路 G318 线起自成都市，途经雅安、康定、芒康、波密、林芝等市县，终至拉萨市，全长约 2083 公里，川藏公路始建于 20 世纪 50 年代，属军事急造公路。经多年整治改建，公路的抗灾能力、

通行能力和服务水平有了较大的改善。但受极其复杂的地形地质条件、极其特殊的自然气候和极其脆弱的生态环境制约，一些路段技术等级偏低，抗灾能力较弱，高海拔越岭段冬季断通时有发生。沿线崩塌、碎屑流、不稳定斜坡等灾害发育且地势高陡，常规监测手段布设困难，本课题研究成果可在该路段开展应用测试。

5. 有关技术经济指标

(1) 研发轻量化无人机抛投式 GNSS 监测装备，重量小于 10kg，监测精度不低于 2cm；

(2) 基于无人机定期巡测的边坡灾害识别方法；

(3) 提出无人机抛投式 GNSS 监测装备智能化部署选址方法。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

中交第一公路勘察设计研究院有限公司（简称“中交一公院”）是我国交通工程咨询、勘察、设计、研究领域大型骨干企业，是行业标准规范的制定者和行业科技创新的引领者。现有职工 3000 余人，各类执业注册人员近 300 人，培养包括中国工程院院士、全国工程勘察设计大师、万人计划、企业长江学者、全国创新争先奖、国务院政府特殊津贴专家等省部级以上人才 130 余人次，形成了一支行业影响力强、技术水平高的高层次专家团队。经过七十余年的砥砺奋进，中交一公院已发展成为资产总额逾 80 亿元，年新签合同额超过 60 亿元的世界综合交通领域的卓越技术服务商，建设项目遍布全国 30 个省、市、自治区及全球五大洲 30 多个国家，是共建“一带一路”的重要

参与者和交通工程的技术贡献者。

中交一公院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，构建了具有行业和企业特色的科技创新平台与技术创新体系。拥有全国重点实验室、国家野外观测站、国家行业研发中心、博士后科研工作站等高端科技创新平台 22 个，拥有包括工程咨询甲级、工程勘察综合甲级、工程设计综合甲级在内的各类各级资质 30 余项。依托“人才—团队—平台”的创新体系，承担各类科研项目 1000 余项，其中国家和省部级重大项目 200 余项；累计获得国家专利 500 余项，计算机软件著作权 230 余项，发表学术论文 5000 余篇；主编参编国家、行业标准规范制修订项目 200 余项；编译欧、美、日等国外主流标准规范 50 多部，组织编译外文版中国工程建设规范 18 部；累计获得国家级、省部级科技奖 400 余项，其中国家科技进步奖一等奖 3 项、二等奖 7 项、国家技术发明奖二等奖 1 项。

中交一公院在新材料研发、防灾减灾、数字公路、交通安全等多个领域，取得一系列重要科研成果，为我国公路行业的科技进步、工程建设和公路设计技术等作出了重要贡献，在行业有重要影响。在进一步巩固和提高已有领域传统优势的基础上，中交一公院按照国家重大科技需要、行业技术进步趋势和市场技术需求，积极拓展科研新领域，聚焦公路行业的智能化、数字化，赋能传统产业，聚焦生态环保、3D 打印、智慧交通、工程信息智能感知等领域，促进行业技术进步和引领企业发展。

在课题研究方面：近五年主持、参与课题包括国家重点研发计划

项目《基于分布式应变测量的特殊土路基和地质灾害监测研究》、《基于分布式应变测量的地下结构工程监测研究》、《进藏通道应急抢通关键技术及装备》、《长大线形交通基础设施应急抢修与快速保通技术》、《极端气候下在役交通基础设施寿命增强技术》、《黄延高速公路黄土高边坡预警技术研究》、《“空天地体”一体化协同的公路边坡灾害监测应用技术研究》等国家级、省部级课题 20 余项，在边坡监测评估和预警方向积累的丰富的科研经验。

知识产权方面：申请专利 50 余项，授权发明专利 10 余项，实用新型专利 30 项，软件著作权 6 项，发表学术论文 100 余篇，其中 SCI、EI、ISTP 收录 20 余篇，编写专著 2 部。

标准规范方面：近三年承担 23 项标准规范编制工作，其中行业标准 4 项，行业协会标准 16 项，地标 2 项，中国交建企业标准 1 项，如《多年冻土地区公路设计与施工技术细则》、《高寒高海拔地区公路生态保护及修复技术规范》等。

技术产品方面：近三年研发了高陡边坡支护结构分布式光纤监测与稳定性评估技术。针对滑坡地质灾害的破坏特征和分布式光纤测试技术的高精度、长距离和大范围特征，研究了边坡在降雨条件下的变形破坏演化过程，建立了降雨和荷载作用下公路边坡变形发展理论，提出了以分布式光纤监测技术为辅助监测手段的边坡灾害监测体系，形成了滑坡地质灾害浅表层与深部变形、土体与支挡结构相结合的分布式光纤监测技术，可以融合高分遥感、定点自动化测量等监测方法构建多方法、多方式的自动化监测网络，实现边坡灾害的一体化监测。

形成以灾变机理为基础、以实际监测数据为支撑、以风险控制为目标、以变形或变形速率为表征的黄土高边坡预警模型；建立集监测数据管理、展示、发布和风险控制与预警相结合的一体化数据分析平台和黄土高边坡实时预警、预报及灾害风险发布平台。

成果奖项方面：近 10 年获国家级科技奖励 7 项，获省部级科技奖励 20 余项，包括“青藏高海拔多年冻土高速公路建养关键技术及工程应用”获国家科技进步奖二等奖，“高寒地区公路工程运行状态监测体系及灾害预警关键技术”获陕西省科学技术进步一等奖。

成果应用转化：相关技术成果在青海省共和至玉树高速公路、花石峡至大武高速公路、陕西省黄陵至延安高速公路沿线边坡、江西省南昌至赣州高铁沿线边坡，支撑我国高寒高海拔地区第一条高速公路共和至玉树高速公路运维状态的长期跟踪监测，为工程施工安全和风险预测预警提供了理论、数据依据，取得了显著的社会经济效益。

2.技术力量及人员构成及各自承担的主要工作

姓 名	单 位	性别	年龄	技术 职称	专 业	在项目中担任 具体工作
赵初晔	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	男	39	副高级	隧道工程	项目总体负责
王君鹭	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	女	36	副高级	岩土工程	项目技术负责
董长松	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	男	44	正高级	隧道工程	项目统筹与督 导

李震	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	男	36	副高级	岩土工程	项目统筹与督 导
李博融	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	男	43	副高级	岩土工程	装备研发
裘友强	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	男	35	副高级	道路工程	设备定测
刘昭	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	男	39	副高级	隧道工程	设备定测
何佳州	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	男	35	中级	岩土工程	设备定测
李琛	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	男	33	副高级	交通工程	数据处理
崔锦栋	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	男	32	中级	道路工程	装备研发
胡博	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	男	28	中级	桥梁工程	装备研发
黄永益	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	男	44	中级	计算机科 学与技术	算法研究
张续	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	女	32	中级	计算机科 学与技术	算法研究
刘毅	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	女	27	初级	电子科学 与技术	算法研究
李文帅	中交第一公路 勘察设计研究 院有限公司	男	31	初级	软件工程	数据处理

3.项目主要负责人情况

赵初晔，男，工学硕士，高级工程师，现任中交第一公路勘察设计研究院有限公司工程信息感知与病害诊治研发中心副主任，主要从事工程智能监测、评估预警方法等研究。主持科研项目（课题）1项，参与科研项目（课题）10项，参编标准规范1部，授权发明专利2项、软件著作权1项，发表SCI/EI论文2篇，参编专著1部，荣获中交集团科技进步奖二等奖1项。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

1. 依托工程（工作）概况

G5 京昆高速公路西安至陕川界段起于西安市鄠邑区涝峪口（K1133+730），途经安康市宁陕、石泉县，汉中市佛坪、洋县、城固、南郑、汉台、勉县、宁强等县（区），止于宁强县棋盘关陕川交界（K1459+232），全长 326.02 公里。全线采用四车道高速公路标准建设，涝峪口至八里坪、马家坪至龙王坪段设计速度 60km/h、路基宽度 20.0 米/22.5 米；八里坪至马家坪、龙王坪至龙亭段、二郎庙至勉县元墩段、勉县元墩至宁强段、宁强至棋盘关段设计速度 80km/h、路基宽度 24.5 米；龙亭至二郎庙段设计速度 100km/h、路基宽度 26 米。

G5 京昆高速西安至陕川界段建设年代较早，建设标准偏低，随着近 20 年的运营，其水文、地质、气象等外部环境已发生较大不利变化，存在重大自然灾害风险、突发事件风险、构造物性能严重衰减等多重风险叠加威胁，严重影响了区域交通的正常运行，降低了公路的安全保畅能力，无法满足人民群众对安全、便捷、高效出行的需求。据统计，沿线最近 5 年（2020—2024 年）较建设初期前 5 年（2000～2004 年）平均年降雨量平均增加了 15%，雨季（7、8 月份）平均降雨量增加了 27%；设于项目秦岭服务区的雨量观测站近三年（2022

—2024年）较建站初3年（2013—2015年）平均年降雨量平均增加了42%，雨季（7、8月份）平均降雨量增加了89%。沿线水系丰富，河道纵横，受多年来降雨增加、山洪及工程建设等因素影响，河道冲刷明显，其中涝峪河段下切约3m，其余河段也存在不同程度的下切。项目区地震烈度区划调整，项目地震动峰值加速度和设防烈度均有重大变化，普遍由VI度、VII度调整为VII度、VIII度，且近年来沿线发生5次3级及以上地震。项目区穿越秦岭、大巴山等复杂地质构造带，沿线岩性多样，断裂发育，地质灾害风险较高，近年来降水量增加，极端天气增多，进而引发滑坡、泥石流等地质灾害频发。在此背景下，基于本项目研究成果，依托该工程开展应用示范很有针对性和必要性。

2.投资来源

项目经费估算为59.87万元，其中，省交通运输厅补助19.87万元，承担单位自筹40万元。

3.工程进度与项目科研进度的配合

近年来区域内暴雨、大雨的出现频次明显增高，潜在边坡灾害相较于运营初期有所增加，结合高速安全运营的需求，相关研究成果与科研进度紧密结合，可以有效衔接，为高速公路安全运营提供技术支持。

4.组织管理形式

本项目实行项目负责人负责制，建立统一领导、分工协作、分级负责、全程管控的组织管理体系。成立专项工作小组，明确项目管理、技术实施、质量安全、后勤保障等岗位职责，形成权责清晰、流程规范、运转高效的管理机制。通过制度化管理、常态化调度、全过程监

督，确保项目依托工程有序推进、资源统筹配置、目标按期落地，为项目顺利实施提供坚实的组织保障。

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	19.87	合 计	59.87	19.87	40
工程配套研究经费		1.设备费	0	0	0
单位自筹	40	（1）购置设备费	0	0	0
其他经费		（2）设备改造与租赁费	0	0	0
		2.业务费	39.87	17.87	22
		（1）材料费	9.77	3.77	6.00
		（2）测试化验实验加工费	0	0	0
		（3）燃料动力费	6.00	2.00	4.00
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	14.60	8.60	6.00
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	9.50	3.50	6.00
		（6）其他费用	0	0	0
		3.劳务费	18.00	2.00	16.00
		（1）专家咨询费	6.00	2.00	4.00
		（2）聘用人员劳务费	12.00	0	12.00
		（3）其他劳务费	0	0	0
		（二）间接费用	2.00	0	2.00
		4.管理费	0	0	0
		5.绩效支出	2.00	0	2.00

注：预算编制按照《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发〔2022〕3号）文件执行，详见附件《科研经费预算编

制说明》。项目验收将组织财务专项验收或审计。

一、直接费用

1. 设备费:

无。

2. 业务费

(1) 材料费:

主要用于室内装备研发集成和实体工程验证中抛投装备测试材料、试验材料, 装置改造耗材等材料、运输和装卸费用, 共计 9.77 万元。

(2) 测试化验实验加工费

无。

(3) 燃料动力费

主要用于为野外设备测试及试验提供动力。野外考察及试验所用油价按照 10 元/升计算。野外设备安装 5 次, 每次 10 天; 现场测试 20 次, 每次 5 天, 合计 150 天。合计项目执行期间野外试验发电机燃油动力费: $150 \text{ 天} \times 40 \text{ 升/天} \times 10 \text{ 元/升} = 6.00 \text{ 万元}$ 。

(4) 差旅费/会议费/国际合作与交流费

差旅费: 主要包含依托工程现场调研、测试、工作等所发生的食宿、交通、补贴等费用。预计每次出差人数 3 人, 出差平均天数 4 天, 出差次数预计 10 次, 住宿费 300 元/天/人, 补贴 200 元/人/天。交通费按 2200 元/次/人 (含往返机票、市内交通费和省内长途交通费)。费用合计: $4 \text{ 天} \times 3 \text{ 人} \times (300 \text{ 元/人/天} + 200 \text{ 元/人/天}) \times 10 \text{ 次} + 3 \text{ 人} \times 2200 \text{ 元/次/人} \times 10 \text{ 次} = 12.6 \text{ 万元}$ 。

会议费: 根据项目需要, 组织举行立项评审、研究大纲评审、中期审查、验收鉴定等会议共 4 次, 每次会议为期 1 天。按 5000 元/天计算, 共计 $5000 \text{ 元} \times 1 \text{ 天} \times 4 \text{ 次} = 2 \text{ 万元}$ 。

国际合作与交流费：无

差旅费/会议费/国际合作与交流费合计 14.6 万元。

(5) 出版/文献/信息传播/知识产权事务费/印刷费

主要包括文章发表、专利申请、科技查新以及各阶段成果报告印刷费，共计 9.5 万元。

(6) 其他费用

无。

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，历次会议邀请行业内知名专家对课题研究进行咨询，咨询费用标准，按照 3000 元/人*天计算。 $(3000 \text{ 元/人} \times \text{天}) \times 5 \text{ 人/次} \times 4 \text{ 次} \times 1 \text{ 天} = 6.0 \text{ 万元}$ 。

(2) 聘用人员劳务费

根据项目需要，投入临时聘用人员协助项目的开展，临时聘用人员主要服务于现场科研监测协助和车辆驾驶等。

计划聘用临时工 2 人，标准为 5000 元/人*月，每人累计工作 12 个月，共计 $2 \text{ 人} \times 5000 \text{ 元/人} \times \text{月} \times 12 \text{ 月} = 12.0 \text{ 万元}$ 。

(3) 其他劳务费

无。

二、间接费用

(1) 管理费

无。

(2) 绩效支出

用于科研技术开发人员的绩效支出，按不超过直接费 5% 计，费用为 2.0 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）授权发明专利	
		（2）实用新型	
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	
		3.发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	0
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其他	2
		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
		（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）	1
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(7) 生产线	
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)	是
		(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	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
其他需要说明的情况			

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

1.项目预期目标

围绕交通安全领域,针对复杂环境高危边坡 GNSS 监测设备智能化部署与高精度实时监测需求,开展辅助无人机精准抛投施作的 GNSS 边坡灾害高精度监测预警技术研究。通过研发集数据采集、无线通讯、抛投防护、太阳能供电功能为一体的轻量化无人机抛投式 GNSS 监测装备,结合实体边坡进行无人机定点巡飞的边坡灾害识别、GNSS 监测装备无人机抛投选点技术研究和野外测试。实现复杂环境高危边坡监测设备无人化智能化部署与高精度动态实时监测,提高公路沿线高危边坡灾害隐患的监测预警能力。主要考核指标如下:

- (1)研发轻量化无人机抛投式 GNSS 监测装备,重量小于 10kg,监测精度不低于 2cm;
- (2)基于无人机定期巡测的边坡灾害识别方法;
- (3)提出无人机抛投式 GNSS 监测装备智能化部署选址方法。

2.提交的研究成果及其形式

- (1)研制适用于高位公路边坡的抛投式 GNSS 监测装备 1 套;
- (2)提出无人机抛投式 GNSS 监测装备智能化部署选址方法;
- (3)申请专利 2 项;
- (4)发表论文 2 篇;
- (5)联合无人机机场与装载抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究

报告 1 册。

3.经济、社会、环境效益分析

无人机场部署与辅助无人机精准抛投的 GNSS 高精度地面传感器的协同，实现公路沿线边坡多类型灾害隐患的快速准确识别的同时，以无人机场部署的定期巡查动态评估沿线边坡灾害风险等级，避免监测传感大面积广泛布设的弊端，优化地面传感布设方法，并通过研发适用于高位高危和复杂地质环境条件下无人机抛投式 GNSS 监测装备、GNSS 监测设备精准抛投部署技术，实现复杂环境高危边坡的全面动态监测，提高公路沿线边坡灾害隐患时空分布精准识别及预警能力，将创造可观的经济效益，促进公路沿线边坡灾害智能防控等方面的转型升级，提高监测效率，具有明显的经济效益。

项目形成监测手段具有一定的系统性、可实施性，为我国实现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，对灾害的精准预警将有利于减少灾害损失和保障人民生命安全，提高交通基础设施服务水平，具有重要社会效益。

九、其他需要说明的问题

无。

十、申请单位意见

课题依托工程和配套经费落实，具备开展科技攻关的条件！

(公章)



单位负责人：(签字)



年 月 日

联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术 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“联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究”（项目编号：25-47K）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. 进一步明确考核指标，研究内容应补充监测数据融合与分析及预警模型构建；

2. 结合依托工程提交一套完整的边坡监测系统模型。

主任委员：



2026 年 3 月 11 日

专家审查意见表

项目名称	联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究				
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、项目研究研究目标明确，内容完整，技术路线可行。
- 二、项目研究人员组成比较合理，前期研究基础比较扎实，具备开展研究工作的条件。
- 三、预期成果覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架高度契合。

建议：

- 1、细化技术路线中轻量化无人机抛投式 GNSS 监测装备研发的描述。增加抛投工法工艺研究相关内容，避免因设备滑移对滑坡的误判，并保持适宜的姿态。
- 2、尽快落实依托工程

评审专家（签字）：封捍东

2026 年 3 月 9 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	联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究				
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. 项目旨在探索联合无人机机场与载装抛投式 GNSS（全球导航卫星系统）技术的边坡监测方法，以实现边坡稳定性及变形情况的高效、精确监测，立项必要。

2. 研究内容应包括无人机机场设计与优化（针对边坡监测的特殊需求，设计并优化无人机机场的布置与功能，包括无人机的起降、充电、数据传输等基础设施的建设与优化）、载装抛投式 GNSS 系统开发（开发一种适用于边坡监测的抛投式 GNSS 系统，该系统能够在远距离、复杂环境下稳定工作，并能实时传输高精度定位数据）、监测数据融合与分析（研究如何将无人机获取的影像数据与 GNSS 系统提供的定位数据进行融合分析，以实现边坡变形情况的全面、准确评估）、预警模型构建（基于监测数据，构建边坡变形预警模型，实现边坡稳定性的实时监测与预警）。

3. 通过无线通信技术，实现无人机与机场之间的数据传输与指令控制。同时，引入太阳能等可再生能源，降低运行成本；采用高灵敏度 GNSS 接收模块，结合抛投机构设计，确保系统能够在复杂环境中稳定部署。通过内置电池与太阳能充电板，实现系统的长期自主运行；利用计算机视觉与 GIS 技术，对无人机获取的影像数据进行处理与分析；结合 GNSS 高精度定位数据，构建边坡三维变形模型；基于机器学习算法，构建边坡变形预警模型。通过对历史监测数据的训练与优化，提高预警模型的准确性与可靠性。

4. 提交一套完整的边坡监测系统原型，包括无人机机场、载装抛投式 GNSS 系统、数据融合与分析软件等和一套边坡变形预警模型软件，能够实现对边坡稳定性的实时监测与预警。提供实验过程中采集的原始数据与分析结果数据，以供进一步验证与评估。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 11 日

专家审查意见表

项目名称	联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究 (项目编号: 25-47K)				
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) 轻量化低功耗无人机抛投式 GNSS 监测装备研发

1. 优势与亮点

装备设计针对性强：聚焦高危边坡人工部署难题，明确将 GNSS 监测终端与抛投防护、供电、固定装置有机集成，兼顾野外“三防”要求与抗冲击性能，同时严格控制装备重量以适配无人机搭载能力，技术方案贴合工程实际需求。

场景适配性考虑全面：针对土质滑坡、岩质滑坡及应急滑坡等不同场景，研发差异化稳固装置，确保装备在复杂地形下的可靠固定，避免单一设计难以适配多场景的问题，实用价值突出。

低功耗设计契合长期监测：充分考虑野外无外接电源的工况，突出低功耗技术研发，搭配太阳能供电功能，满足边坡长期连续监测的能源需求，解决了传统监测装备续航不足的短板。

2. 优化建议

(1) 强化装备轻量化与性能的平衡设计：建议明确装备重量控制的具体量化指标（如 $\leq 2\text{kg}$ ），在轻量化设计的同时，优化 GNSS 接收模块的信号捕获能力，确保在高山峡谷等 GNSS 信号遮挡严重区域的定位精度（如平面定位误差 $\leq 2\text{cm}$ ）。

(2) 补充抛投防护的精细化设计：建议增加装备抛投过程的仿真试验，优化防护装置的缓冲结构，明确适配的无人机抛投高度范围（如 5-20m），避免抛投过程中装备损坏或固定失效。

(二) 无人机定点巡飞的边坡灾害识别方法

1. 优势与亮点

数据融合维度全面：整合无人机载摄影、LiDAR 点云数据，同步处理 DSM、DEM、DOM 三类模型，实现边坡地形、表观裂缝、形变信息的多维度提取，突破单一数据源识别不全面的局限。

识别算法先进性强：采用 YOLOv8 目标检测模型并引入注意力机制，通过空间与通道维度加权提升特征提取能力，针对风化剥落、地表裂缝等典型灾害特征进行专项训练，识别精度与效率兼顾。

风险分级支撑精准部署：通过定期巡飞动态评估边坡灾害风险等级，为后续 GNSS 装备抛投部署提供科学依据，避免盲目布设导致的资源浪费，形成“巡飞识别 - 风险分级 - 精准监测”的闭环逻辑。

2. 优化建议

(1) 补充微小灾害特征的识别优化：建议针对宽度 $<5\text{mm}$ 的微小裂缝、面积 $<1\text{m}^2$ 的小规模风化剥落等易遗漏灾害特征，优化算法的小目标检测能力（如采用特征金字塔增强小目标特征），提升灾害识别的全面性。

(2) 明确巡飞频率与精度的适配设计：建议根据边坡风险等级划分差异化巡飞频率，同时明确 LiDAR 点云密度的最低要求、影像分辨率阈值，确保数据质量满足识别需求。

(三) 公路边坡 GNSS 监测装备无人机抛投选点技术研究

1. 优势与亮点

选点指标体系科学全面：基于坡度、地形粗糙度、植被指数等多维度指标，采用多指标决策方法（MCDM）进行选址适宜性评价，避免单一指标导致的选点不合理问题，决策逻辑严谨。

特征提取算法高效精准：融合高斯 - 拉普拉斯算子与 ORB 算法进行特征点快速提取，搭配 K 最近邻算法实现特征点匹配，兼顾选点效率与准确性，为精准抛投奠定基础。

选点与装备适配性强：充分考虑 GNSS 监测数据质量、装备固定稳定性等核心需求，选点评价直接服务于后续监测效果，避免选点与实际应用脱节，技术衔接紧密。

2. 优化建议

(1) 补充选点的动态调整机制：边坡灾害是动态演化的，建议增加基于多期巡飞数据的选点动态调整技术，明确当边坡形变速率超过阈值（如 $\geq 5\text{mm}/\text{月}$ ）时的选点更新流程，确保监测点始终覆盖高风险区域。

(2) 增加抛投可达性与安全性评估：建议在选点评价体系中补充无人机抛投可达性指标（如抛投点周边障碍物距离 $\geq 3\text{m}$ ）、飞行安全指标（如坡度 $\leq 60^\circ$ ），避免因选点位置导致无人机难以精准抛投或发生飞行事故。

(四) 联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测工程应用

1. 优势与亮点

依托工程贴合实际需求：选取陕西省内 1-2 处代表性高速公路边坡作为示范工程，涵盖复杂地形与多样灾害类型，为技术验证提供真实场景与实测数据，确保研究成果能够直接落地应用。

验证环节闭环完整：通过工程应用测试优化装备性能与选点技术，同步验证无人机巡飞、抛投部署、数据传输的全流程可行性，避免实验室研发与工程实际脱节的问题。

示范效应助力推广：打造“巡飞识别 - 精准抛投 - 动态监测”的一体化示范样板，为后续全省乃至全国类似工程提供可复制的技术方案，推广价值显著。

2. 优化建议

（1）增加与传统监测方法的对比试验：建议在示范工程中同步布设人工部署的 GNSS 监测点，从监测精度、部署效率、成本投入等维度进行对比分析，量化本项目技术的优势。

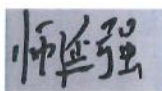
（2）完善工程应用的操作规范：建议在申请过程中同步编制操作手册，明确无人机巡飞路线规划、装备抛投操作流程、数据处理与预警阈值等实操内容，为工程技术人员提供直接指导，加速成果转化。

（五）其他建议

1. 强化多技术融合的协同监测：建议增加无人机巡飞识别与 GNSS 监测数据的融合分析，将边坡表观灾害特征与三维形变数据结合，构建“表观特征 + 形变趋势”的双维度灾害预警模型，提升预警的准确性。

2. 增加全生命周期成本分析：建议补充技术方案的全生命周期成本分析，涵盖装备研发、无人机运维、数据传输、装备更换等成本构成，通过优化设计降低长期运维成本，提升技术的经济可行性。

评审专家（签字）：



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（25-47K）

项目名称	联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究				
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 本项目开展的轻量化低功耗无人机抛投式GNSS监测装备研发、无人机定点巡飞的边坡灾害识别方法、公路边坡GNSS监测装备无人机抛投选点技术研究和联合无人机机场与载装抛投式GNSS的边坡监测工程应用等研究，具有一定的现实意义和创新性。 提交的研究大纲，内容全面、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. 题目，无人机机场与载装抛投式的含义不清楚。 2. 抛投式GNSS监测装备如何保证理想姿态，能否自身定位、可发回什么信息、是否回收，使用寿命如何？ 3. 协调GNSS监测装备采集的数据与常规监测技术采集数据的对接。 4. 增加GNSS监测装备预警信息的处理结果和现场复核要求的内容。 评审专家（签字）： 2026 年 03 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	联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究				
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

△ 同意项目研究大纲通过评审

△ 建议:

细化主要考核指标, 对主要指标提出适当的量化技术指标, 如成本、功耗、精度、精度等。

评审专家(签字):

2026 年 3 月 11 日

联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究 (项目编号: 25-47K)

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

专家意见处理表

项目名称：联合无人机机场与载装抛投式 GNSS 的边坡监测技术研究

(项目编号： 25-47K)

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	进一步明确考核指标，研究内容补充监测数据融合分析及预警模型构建	已增加考核指标“重量小于 10kg，监测精度不低于 2cm”；本项目采用现有模型进行预警，预警模型不在本项目研究范围。
2	边世斌	提交一套完整的边坡监测系统模型，包括无人机机场、载装抛投式 GNSS 系统、数据融合与分析软件等和一套边坡变形预警模型软件，能够实现对边坡稳定性的实时监测与预警。	项目研究内容涵盖无人机抛投式 GNSS 监测装备研发、无人机定点巡飞的边坡灾害识别方法、公路边坡 GNSS 监测装备无人机抛投选点技术等众多研究内容，由于经费有限，现阶段无法开展边坡监测系统模型研发工作。
3	封捍东	细化技术路线中轻量化无人机抛投式 GNSS 监测装备研发的描述及抛投工艺相关内容，避免因设备滑移对滑坡的误判，并保持适宜的姿态。	在实施方案技术路线（1）中增加以下内容“供电模块由太阳能板、锂电池和太阳能控制器组成。为了保证监测终端的持续工作，按照设计要求，应选用至少 10W 的太阳能板。至少需要选择 15AH 的电池，可以保证无阳光条件下以变频式监测模式持续工作 30 天。太阳能控制器保证在太阳能板为装置供电的同时，将多余电量储存在锂电池中，在夜间使用锂电池的电量为装置供电，从而起到充放电的控制作用，同时还有过充过放保护功能。

			监测模块即 GNSS 数据接收与传输模块,所选用的低功耗高精度轻量化 GNSS 接收机内部集成了高精度 GNSS 定位模块和 4g 通讯模块,可实现 GNSS 观测数据的高精度接收与发送。 为了实现抛投式 GNSS 监测装备在滑坡体上的可靠固定和保持适宜姿态,本研究针对土质和岩质滑坡特征设计了相应的 GNSS 监测装备固定装置。在研发过程中,首先设计了第一代适用于土质滑坡的“多面体式”GNSS 监测装备固定装置和适用于岩质滑坡的“蜘蛛腿式”GNSS 抛投监测装备固定装置。可实现土质和岩质滑坡场景下 GNSS 监测装备的可靠固定。”
4	封捍东	尽快落实依托工程	选取 G5 京昆高速西安至陕川界段沿线代表性边坡开展应用示范。
5	师延强	建议明确装备重量控制的具体量化指标(如$\leq 2\text{kg}$),在轻量化设计的同时,优化 GNSS 接收模块的信号捕获能力,确保在高山峡谷等 GNSS 信号遮挡严重区域的定位精度(如平面定位误差$\leq 2\text{cm}$)。	重量小于 10kg, 监测精度不低于 2cm。
6	师延强	建议增加装备抛投过程的仿真试验,优化防护装置的缓冲结构,明确适配的无人机抛投高度范围(如 5-20m),避免抛投过程中装备损坏或固定失效。	无人机抛投高度一般为 3-5m。
7	师延强	建议针对宽度$< 5\text{mm}$的微小裂缝、面积$< 1\text{m}^2$的小规模风化剥落等易遗漏灾害特征,优化算法的小目标检测能力(如采用特征金字塔增强小目标特征),提升灾害识别的全面性。	根据光学图像分辨率,裂缝一般可识别 3-5cm 的裂缝。

8	师延强	建议根据边坡风险等级划分差异化巡飞频率，同时明确LiDAR点云密度的最低要求、影像分辨率阈值，确保数据质量满足识别需求。	采纳
9	师延强	建议在选点评价体系中补充无人机抛投可达性指标（如抛投点周边障碍物距离 $\geq 3\text{m}$ ）、飞行安全指标（如坡度 $\leq 60^\circ$ ），避免因选点位置导致无人机难以精准抛投或发生飞行事故。	采纳
10	师延强	建议在示范工程中同步布设人工部署的GNSS监测点，从监测精度、部署效率、成本投入等维度进行对比分析，量化本项目技术的优势。	采纳
11	师延强	建议增加无人机巡飞识别与GNSS监测数据的融合分析，将边坡表观灾害特征与三维形变数据结合，构建“表观特征+形变趋势”的双维度灾害预警模型，提升预警的准确性。	无人机采用巡检方式监测灾害表观特征，为GNSS监测选点提供支撑，预警模型主要以GNSS实时形变序列作为主要输入，本项目主要针对投放式检测、无人机巡检技术开展，融合预警模型后续项目会考虑。
12	牛开民	建议对主要考核指标提出适当量化的技术指标，如抛投精度、监测精度。	已增加量化的考核指标“重量小于10kg，监测精度不低于2cm”。
13	王松根	题目，无人机机场与载装抛投式的含义不清楚。	载装抛投式是指本项目研发的GNSS监测设备可以装载在无人机上进行抛投。
14	王松根	抛投式GNSS监测装备是否回收？	本研究所设计的抛投式GNSS监测装备主要用于在目标区域快速部署监测节点，因此在完成抛投与数据采集任务后不进行回收。

15	王松根	增加 GNSS 监测装备预警信息的处理结果和现场复核要求的内容。	采纳
----	-----	----------------------------------	----

大纲评审委员会专家（签字）：



项目负责人（签字）：

