

项目合同编号：25-08K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控关键技术及装备
研发

承担单位：陕西高速公路工程试验检测有限公司

项目负责人：王晨

通讯邮编、地址：710086、陕西省西安市未央区丰产路 57 号

传真、电话：：029-89117158

起止年限：2025 年 12 月 至 2028 年 2 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) 高速公路线性工程偶发性灾害致灾模式及灾变机理

根据陕西不同区域高速公路特性，研究其偶发性灾害产生的致灾模式及灾变机理，在 G5 京昆高速，G65 包茂高速等局部重点路段，形成综合表达工程分布、灾害特征与风险等级分区等多要素的高速公路偶发性灾害风险“一张图”。

(2) 高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备研发

针对高速公路路面、桥隧结构局部破损等常见病害，研发基于“声-电-磁”的高精度融合快速探测技术和基于 AI 的智能化病害快速巡检装备。通过集成多种检测手段，实现病害的快速识别与定位，构建病害数据采集与分析系统。

(3) 高速公路基础设施（路-桥-隧-坡）智能监测关键技术与装备研发

结合无人机搭载激光雷达和地面雷达技术，以及多种轻量化传感监测技术，开展桥隧坡病害快速识别与定位研究，实现对基础设施的动态监测与数据采集，构建病害监测与评估系统。开发新一代基于物联网的结构安全监测技术、通讯技术及相关设备，重点研制基于激光、图像测量和多普勒微变形雷达原理的结构动态变形及裂缝监测设备、基于新型的固体阵列扫描式光敏成像的微光 AI 摄像头设备、基于 5G 通讯和卫星传输的联合数据通讯技术，研制用于高危边坡尤其是隧道洞口的基于物联网的高边坡崩塌监测传感器、基

于北斗、光电技术的新一代振动倾计位移一体化变形监测设备等。

(4) 高速公路基础设施多源异构数字化自动管控平台

构建偶发性灾害的预警模型，明确应急响应等级划分标准。研究多源异构数据深度挖掘方法，基于多模态数据融合与人工智能算法，构建多源数据融合分析平台，实现基础设施运行状态的动态监控与风险预警。建立高速公路偶发性灾害动态数据信息库，结合应急响应等级构建多源异构“通感一体化”自动管控平台。

2.技术关键

- (1) 高速公路线性工程偶发性灾害致灾模式及灾变机理研究；
- (2) 高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术研究；
- (3) 高速公路基础设施（路-桥-隧-坡）智能监测关键技术研究；
- (4) 基于偶发性灾害诱发高速公路路网灾变的多源数字化智慧预警技术与平台研究。

3.依托工程

根据陕西省交通运输厅关于印发《全省在役干线公路涉河桥梁隐患排查治理专项工作方案》的通知:关于印发《进一步提升高速公路防灾抗灾能力设计回溯工作方案》的通知(陕交函(2024)1086号):关于进一步加强高速公路监测预警提升防灾抗灾能力的通知。结合承灾体普查和设计回溯成果文件选取风险工点。以 G5 京昆高速，G65 包茂高速等高速公路为依托工程，开展本项目研究。

二、考核指标

1.预期目标

(1)明确陕西不同区域高速公路偶发性灾害致灾模式与灾变机理；完成 G5 京昆高速、G65 包茂高速等重点路段多要素（工程分布、灾害特征、风险等级分区）融合的偶发性灾害风险“一张图”。

(2)研发出基于“声 - 电 - 磁”的高精度融合快速探测技术及 AI 智能化病害快速巡检装备；实现路面、桥隧结构局部破损等常见病害的快速识别与定位，构建完成病害数据采集与分析系统。

(3)研究桥隧坡病害快速识别定位及基础设施动态监测关键技术；研制激光 / 图像测量类变形监测设备、微光 AI 摄像头、5G - 卫星联合通讯设备、高危边坡及隧道洞口崩塌监测传感器、北斗 - 光电振动倾计位移一体化设备等；构建完成基础设施病害监测与评估系统。

(4)建立高速公路偶发性灾害预警模型及应急响应等级划分标准；研发多源异构数据深度挖掘方法，搭建多源数据融合分析平台及“通感一体化”自动管控平台；建成基于示范路段重点区域的偶发性灾害动态数据信息库，实现基础设施运行状态动态监控与风险预警

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

技术指标：

(1)高速公路线性工程偶发性灾害致灾模式及灾变机理：明确 3 类典型偶发性灾害的致灾因子体系，揭示各灾害类型的灾变演化路径，有效提升致灾因子识别准确率；建立灾变机理数值模拟模型，提升灾害发生概率预测精度，为后续防控提供理论支撑。

(2)高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备

研发：研发的智能巡检装备具备雨雪雾等复杂天气适应能力和全天候有效巡检能力；针对高速公路基础设施典型病害，实现表面病害识别准确率提升 10%；相比传统人工显著提高巡检效率。

（3）高速公路基础设施（路-桥-隧-坡）智能监测关键技术与装备研发：研发的智能监测装备集成不少于 3 种监测功能；针对桥、隧、坡不同结构，监测精度达到领先水平；装备支持低功耗运行，数据无线传输稳定，可以实现监测数据实时采集与异常反馈。

（4）高速公路基础设施多源异构数字化自动管控平台：实现雷达、图像、传感器监测数据等 5 类多源异构数据的融合处理；平台具备基础设施全生命周期信息管理功能；支持病害识别、状态评估、风险预警全流程处理，预警准确率显著提升，平台运行稳定。

经济指标：

本项目在外省市场复制推广阶段，计划通过技术成果转化、销售与技术服务一体化输出，实现累计营业收入 300 - 500 万元的核心经济目标。

3.经济和社会效益

（1）经济效益分析

本项目研究成果可增强区域安全性，有利于监控和预防公路沿线偶发性灾害，降低偶发性灾害对公路及周边基础设施造成的直接损失，节省修复和重建费用；本项目通过理论研究、技术研发和应用示范，在实现公路偶发性灾害及基础设施通感一体化感知防控的同时，还有望创造可观的经济效益。通过灾害预警，提升公路安全性，减少因偶发性灾害导致的交通中断频率，提高道路通行能力，减少因偶发性灾害导致的公路维护成本。此外，相关研究成果还可用于山区地带城镇建设、旅游开发、管线工程等项目的防灾减灾，

尽可能地减少由于偶发性灾害引起的经济损失、灾害治理费用和灾害引起的区域经济损失。

(2) 社会效益分析

本项目顺利实施后将有助于提升陕西省公路偶发性灾害及基础设施安全防控等级和抗灾能力，尽可能地消除极端气候、地形地貌差异背景下公路沿线的地质隐患。研究成果将显著提升高速公路桥梁结构劣化预警效能和应急处置能力，减少因灾害导致的人员伤亡和财产损失，提高公众出行的安全感；研究成果将推动边坡监测的可持续发展，为区域经济的协调发展提供有力支撑；研究成果可以有效地调配救援资源和力量，提高应急响应、救援处置效率，大幅度减少灾害对社会的影响；将为政府提供科学的决策依据，有助于提升政府在应对突发事件和灾害方面的治理能力，增强政府的公信力和执行力。

(3) 环境效益分析

通过本项目成果的初步应用示范，进一步验证、优化和完善公路偶发性灾害感知、预警、应急救援、决策管控的技术方法体系后，不仅可以实现陕西省内的一系列示范应用和全域推广，还有望在我国的其他地区进行应用推广。进一步地，项目研究成果将全面提高陕西省公路偶发性灾害快速感知能力、监测预警能力和应急处治能力，降低重特大事故风险，最大限度减少和避免群死群伤事件发生，为高速公路安全运营提供科学的理论依据和技术保障，具有重大的工程实用价值和广阔的应用前景。

4.成果提供形式

有形交付物：

(1) 《高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控关键技术及装

备研发》报告 1 份；

- (2) 高速公路偶发性灾害危险等级量化评价方法 1 套；
- (3) 公路地质多致灾要素融合的监测预警模型 1 套；
- (4) 高速公路智慧巡检装备 1 套；
- (5) 高速公路病害监测装备 1 套；
- (6) 高速公路多源信息一体化感知防控平台 1 个。

无形交付物：

- (1) 知识产权：申请国家发明专利 3 件，申请软件著作权 5 项；
- (2) 论文著作：在中文核心及以上期刊发表论文，不少于 1 篇；

5.其他考核指标

- (1) 宣传报道：开展的媒体宣传报道 3 次；
- (2) 技术交流：参加技术交流会议 2 次。

三、项目计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标
2025 年 12 月 -2026 年 9 月	1. 致灾模式及机理：收集示范路段重点区域相关数据，分析偶发性灾害类型、分布及致灾/诱发因素影响，建立公路偶发性灾害空间分异致灾模式；2. 智能巡检技术与装备：研发三维激光雷达等成像与探测系统，构建道路病害精细化立体探测巡检车载平台；3. 轻量化智能监测：集成研发智能监测设备，研究数据处理与传输方法；4. 数字化管控平台：集成多源数据，探索多模态大数据 AI 融合分析方法，对灾害实现有效分析。
2026 年 10 月 -2027 年 6 月	1. 致灾模式及机理：确定致灾因素影响权重并分析其相互作用机制，建立多要素融合监测预警模型，结合数值模拟探究各类灾害发生演化过程；2. 智能巡检技术与装备：研发道路病害三维成像与声-电-磁一体化探测技术，研究 AI 多源信息融合分析方法，探明病害分布发育规律及演化特征；3.轻量化智能监测：研究监测数据辨识方法，形成基础设施潜在灾害智能监测技术；4.数字化管控平台：构建动态样本数据库，挖掘

	<p>灾害预警关键参数组合，建立多模态综合预警模型及高速公路灾害预警数字孪生底座。</p>
<p>2027 年 7 月 -2028 年 2 月</p>	<p>1. 致灾模式及机理：整合多类数据构建全要素系统调查技术，研制基于示范路段重点区域灾害风险图集编制技术形成风险“一张图”；2. 智能巡检技术与装备：构建道路病害影响分析模型，建立智慧巡检综合平台；3. 轻量化智能监测：基于多参量监测数据确定关键预警指标，创新基础设施监测体系并完善部署方案；4. 数字化管控平台：构建通感融合一体化架构，研发“空-天-地”一体化智慧预警平台并开展示范应用，撰写结题报告。5. 基于所有研究内容，整理成果申请 3 件国家发明专利和 5 项软件著作权，并在中文核心及以上期刊发表不少于 1 篇论文。</p>

四、项目经费

项目总经费：	800	万元
交通运输厅补助：	49.808	万元
自筹资金：	750.192	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	655	40
1. 设备费	435	25
(1) 购置设备费	120	8
(2) 试制设备费	215	10
(3) 设备改造与租赁费	100	7
2. 业务费	150	12
(4) 材料支出	35	3
(5) 测试化验实验加工支出	15	2
(6) 燃料及动力支出	10	1
(7) 差旅支出	20	2
(8) 会议支出	20	1
(9) 国际合作与交流支出	20	1
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	20	1
(11) 其他支出	10	1
3. 劳务费	70	3
(12) 劳务性支出	30	1
(13) 咨询专家支出	40	2
(二) 间接费用	145	9.808
4. 管理费	120	6
5. 绩效支出	25	3.808
合 计	800	49.808

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）	3
		（1）授权发明专利	3
		（2）实用新型	0
		（3）外观设计	0
		2.软件著作权授权数（项）	5
		3.发表论文（篇）	1
		（1）其中 SCI 索引收录数	0
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其他	1
		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	0	
	其他成果	1.填补技术空白数	3
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	3
		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	2
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	1
		（3）新材料	0
		（4）新装备（装置）	1
（5）平台/基地/示范点		0	
（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）	是
		(3) 小批量	是
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1. 引进高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2. 培养高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	0
		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（%）	80
		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）	1000
		2. 新增销售（万元）	200
		3. 新增出口创汇（万美元）	0
		4. 新增利润（万元）	100
	社会效益	1. 新增税收（万元）	50
		2. 新增就业人数	5
		3. 就业培训（人次）	5
		4. 带动农民增收（万元）	0
		5. 培训和指导科技服务（人次）	10
		6. 新增产业带动情况	0
		7. 技术集成示范（项）	0
		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			

六、承担单位或研究人员分工

本课题由陕西高速公路工程试验检测有限公司作为第一承担单位牵头，陕西交控科技发展集团股份有限公司、交通运输部科学研究院、中国地质大学（北京）等单位具体承担。各个参研单位立足于自身发展特色，发挥科研主力军作用，根据各单位在公路技术领域的强项，加强与企业、高效联合，理论联系实际，推进“产学研用”深度融合，把高校融入企业的技术创新体系中，通过与企业的合作，不断推动自主创新，研发核心技术，服务国家重大工程。

陕西高速公路工程试验检测有限公司负责立项申报、招投标、总体协调等工作，负责项目组织实施，把控项目技术路线和实施进度，统筹项目阶段性成果汇总工作。总体把控项目实际进度，开展项目实地调研，提出系统完善的高速公路突发偶发性灾害应急协调机制与联动处置对策，主导高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备研发，重点研制基于激光、图像测量和多普勒微变形雷达原理的结构动态变形及裂缝监测设备、基于 5G 通讯和卫星传输的联合数据通讯技术，研制用于高危边坡尤其是隧道洞口的基于物联网的高边坡崩塌监测传感器、基于北斗、光电技术的新一代振动倾计位移一体化变形监测设备。构建“空-天-地”一体化偶发性灾害多级联动应急救援体系，建立高速公路基础设施灾害多参数融合预测模型，构建多源异构“通感一体化”自动管控平台。

陕西交控科技发展集团股份有限公司进行总体统筹规划与项目管理。

交通运输部科学研究院负责整体政策把控、技术导向，开展遥感数据融合应用研究，形成高速公路桥梁结构群跨塌“天-地”立体协同监测体系，搭建基于高速公路的遥感预警应用系统，实现灾害监测

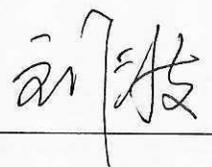
预警、应急处置。

中国地质大学(北京)负责研究陕西不同区域的高速公路线性工程偶发性灾害分布特点，建立陕西公路偶发性灾害空间分异致灾模式，构建高速公路线性工程偶发性灾害风险“一张图”，提出高速公路基础病害“声-电-磁”高精度融合智能探测方法，实现高速公路道路运营状态智能诊断及预测。

陕西交控数字科技有限公司负责设备研发及算法研究与平台开发工作。

陕西省交通规划设计研究院有限公司负责 BIM 相关专业技术开发及指导。

七、项目参加人员表

项目承担单位：陕西高速公路工程试验检测有限公司，陕西交控科技发展集团股份有限公司，交通运输部科学研究院，中国地质大学（北京），陕西省交通规划设计研究院有限公司，陕西交控数字科技有限公司							
项目负责人							
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作	签名
1	王晨	1974-07-12	陕西高速公路工程试验检测有限公司	高级工程师	道路工程	项目总负责人	
主要研究人员							
2	刘波	1987-11-04	陕西高速公路工程试验检测有限公司	中级工程师	电子信息工程	系统规划	
3	任晓辉	1981-04-21	陕西高速公路工程试验检测有限公司	高级工程师	桥梁工程	项目技术负责人	

4	马新	1974-08-27	交通运输部科学研究院	研究员	道路工程	项目技术负责人	马新
5	薛翊国	1976-08-18	中国地质大学(北京)	教授	地质工程	项目技术负责人	薛翊国
6	熊鹰	1969-08-24	陕西交控科技发展有限公司	正高级工程师	电子信息工程	项目统筹	熊鹰
7	邵永军	1977-03-22	陕西高速公路工程试验检测有限公司	正高级工程师	桥梁工程	项目技术负责人	邵永军
8	白斌	2000-12-20	陕西高速公路工程试验检测有限公司	中级工程师	集成电路工程	算法研发	白斌
9	尉青青	1992-03-18	陕西高速公路工程试验检测有限公司	中级工程师	交通信息工程及控制	理论研究	尉青青
10	张鑫	1991-10-20	陕西高速公路工程试验检测有限公司	中级工程师	信息化	软件开发	张鑫

11	赵杉盟	1993-09-23	陕西高速公路工程试验检测有限公司	中级工程师	交通信息工程及控制	框架设计	赵杉盟
12	董舒萌	1999-06-04	陕西高速公路工程试验检测有限公司	中级工程师	应用统计	数据挖掘	董舒萌
13	毛新越	2001-02-17	陕西高速公路工程试验检测有限公司	中级工程师	通信工程	软件研发	毛新越
14	高苗	2000-07-11	陕西交控数字科技有限公司	中级工程师	软件工程	算法研发	高苗
15	王珮汜	2002-04-10	陕西交控数字科技有限公司	助理工程师	计算机科学与技术	软件开发	王珮汜
16	常江铭	1995-01-28	陕西交控数字科技有限公司	助理工程师	电子科学与技术	软件开发	常江铭
17	屈敏杰	2000-03-29	陕西交控数字科技有限公司	中级工程师	大数据技术与工程	算法研发	屈敏杰
18	王显光	1980-02-20	交通运输部科学研究院	研究员	道路工程	理论研究	王显光

19	张宇	1979-12-21	交通运输部科学研究院	研究员	道路工程	测试分析	张宇
20	周紫君	1982-05-23	交通运输部科学研究院	副研究员	道路工程	理论研究	周紫君
21	庄杰	2001-02-12	陕西交控数字科技有限公司	助理工程师	计算机科学与技术	软件开发	庄杰
22	申亚博	1994-08-13	陕西交控数字科技有限公司	助理工程师	软件工程	软件开发	申亚博
23	李勇锟	2002-06-05	陕西交控数字科技有限公司	助理工程师	测控技术与仪器	软件开发	李勇锟
24	高林	1995-09-05	陕西交控数字科技有限公司	助理工程师	电气工程及其自动化	装备研发	高林
25	高轲	1993-04-19	陕西交控数字科技有限公司	助理工程师	计算机科学与技术	软件研发	高轲
26	王海荣	1991-08-04	陕西高速公路工程试验检测有限公司	助理工程师	结构工程	结构设计	王海荣
27	张彬	1975-07-24	中国地质大学(北京)	教授	岩土工程	理论分析	张彬

28	徐能雄	1971-12-08	中国地质大学(北京)	教授	岩土工程	理论研究	徐能雄
29	孔凡猛	1990-01-25	中国地质大学(北京)	讲师	偶发性灾害机理与防治	项目协调	孔凡猛
30	艾岩	1996-05-16	中国地质大学(北京)	博士生	土木工程	风险分级	艾岩
31	渠敬凯	1998-11-03	中国地质大学(北京)	博士生	地质资源与地质工程	风险绘制	渠敬凯
32	段进睿	2000-01-01	中国地质大学(北京)	博士生	地质资源与地质工程	统计分析	段进睿
33	王建宁	1991-10-04	中国地质大学(北京)	博士生	土木工程	装备研发	王建宁
34	李岷	1994-03-09	陕西省交通规划设计研究院有限公司	中级工程师	交通工程	BIM 咨询	李岷
35	李明	1983-12-21	陕西省交通规划设计研究院有限公司	高级工程师	隧道工程	BIM 咨询	李明

七、信息表

项目任务书编号	25-08K	密级	/	A: 机密 B: 秘密 C: 内部					
项目名称	高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控关键技术及装备研发								
项目实施所在地	陕西西安	起止年限	2025年12月至2028年2月						
总经费	800万元	厅拨	49.808万元						
第一承担单位	单位名称	陕西高速公路工程试验检测有限公司							
	所在地	陕西省西安市						代码	/
	通讯地址	陕西省西安市未央区丰产路57号						邮编	710086
	单位性质	1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其它						代码	3
合作单位	序号	单位名称							
	1	陕西交控科技发展集团股份有限公司							
	2	交通运输部科学研究院							
	3	中国地质大学（北京）							
	4	陕西省交通规划设计研究院有限公司							
	5	陕西交控数字科技有限公司							
项目负责人	姓名	王晨	性别（1）1.男 2.女			出生年份	1974		
	学历	（1）1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其它							
	职称	（1）1.高级 2.中级 3.初级 4.其它							
	联系电话	029-89117158			电子邮箱	/			
项目联系人	姓名	刘波			性别	男			
	联系电话	17792859662			电子邮箱	1831596457@qq.com			
项目组人数	35	高级	12	中级	11	初级	8	其他	4
主要研究内容	<p>（1）高速公路线性工程偶发性灾害致灾模式及灾变机理</p> <p>（2）高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备研发</p> <p>（3）高速公路基础设施（路-桥-隧-坡）智能监测关键技术与装备研发</p> <p>（4）高速公路基础设施多源异构数字化自动管控平台</p>								

成果属性	A、D、F	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、E	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）

李涛

陕西省交通运输厅



联系人：（签字）

张喆

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：陕西高速公路工程试验检测有限公司

单位负责人：（签字）

王军

2025年12月17日

项目负责人：（签字）

王军

（公章）



电 话：

财务负责人：（签字）

张志飞

账 户 名：

陕西高速公路工程试验检测有限公司

开户银行：

兴业银行西安经济开发区支行
456850100100033592

账 号：

陕西交通科研项目科研诚信 承诺书

项目承担单位及项目负责人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》的规定和科研项目合同书约定，保证所提交材料的真实性，确保自筹经费全额到位、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：

项目负责人：

2025年12月17日

项目编号：25-08K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管理
管控关键技术及装备研发
申请单位：陕西高速公路工程试验检测有限公司
联系人：刘波
电 话：17792859662



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	1
二、 前期科研及工作基础	2
2.1 对项目领域国内外研究现状，研究水平和发展趋势的分析和评价	2
2.1.1 高速公路线性工程偶发性灾害致灾模式及灾变机理	2
2.1.2 高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备研发	3
2.1.3 高速公路基础设施智能监测关键技术与装备研发	4
2.1.4 高速公路基础设施多源异构数字化自动管控平台	7
2.2 项目前期科研及现有工作条件	8
2.2.1 项目支撑条件及科研基础	8
2.2.2 研究团队基础	22
2.3 参考文献	25
三、 实施方案	28
3.1 拟解决的关键问题	28
3.1.1 高速公路线性工程偶发性灾害致灾模式及灾变机理	28
3.1.2 高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备研发	29
3.1.3 高速公路基础设施（路-桥-隧-坡）智能监测关键技术与装备研发	29
3.1.4 高速公路基础设施多源异构数字化自动管控平台	30
3.2 主要研究内容及实施方案	30
3.2.1 高速公路线性工程偶发性灾害致灾模式及灾变机理	30
3.2.2 高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备研发	32
3.2.3 高速公路基础设施（路-桥-隧-坡）智能监测关键技术与装备研发	35
3.2.4 高速公路基础设施多源异构数字化自动管控平台	39
3.2.4.5 高速公路基础设施多源异构“通感一体化”自动管控平台	41
3.3 技术路线	42
3.3.1 研究方案	42
3.3.1.1 理论研究	42
3.3.1.2 技术研究	44
3.3.1.3 系统装备研发	47
3.3.2 技术路线	49
3.4 创新点	50
3.5 后续技术改造或基本建设计划的衔接	51
3.6 有关技术经济指标	52
3.6.1 技术指标	52
3.6.2 经济指标	52
四、 项目承担单位及参加单位概况	52
4.1 单位概况	52
4.2 技术力量及人员构成	54
4.3 各自承担的主要工作	57
4.4 项目主要负责人情况	58

五、 项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	61
5.1 依托工程（工作）概况	61
5.2 投资来源	61
5.3 工程进度与项目科研进度的配合	61
5.4 组织管理形式	62
六、 项目经费估算及资金筹措情况	62
七、 项目绩效指标	63
八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益	65
8.1 项目预期目标	65
8.2 提交的研究成果及其形式	66
8.3 经济、社会、环境效益分析	66
九、 其它需要说明的问题	68
十、 申请单位意见	68

一、项目研究的背景和必要性

在当前经济快速发展、区域协同格局不断深化的背景下，高速公路网络作为国家基础设施的重要组成部分，不仅是串联城乡节点、衔接产业集群的“经济动脉”，更在保障跨区域物流畅通、支撑供应链稳定、促进区域经济一体化进程中发挥着不可替代的作用。国家层面通过多项政策为高速公路的高质量发展与安全运行提供支撑：《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》明确提出要加强基础设施建设，加快智能技术深度推广应用，推进基础设施智能化升级，以提升灾害防控能力并推动经济高质量发展。“规划”还提出要加强重要通道和枢纽数字化感知监测覆盖，增强关键路段和重要节点全天候、全周期运行状态监测和主动预警能力。同时，交通运输部联合国家发展改革委、工业和信息化部等七部门印发《关于“人工智能+交通运输”的实施意见》，强调要加快建设交通基础设施服役性能智能监测和预警系统，组织实施重大灾害智能管控处置技术创新工程，形成智能监测、预警、响应、管控成套技术方案，逐步实现重点基础设施全覆盖。

近年来，受全球气候变化与人类活动影响，极端气候现象频发，导致高速公路面临着日益严峻的偶发性灾害威胁，如山体滑坡、泥石流、雨雪冰冻等，致使路基、边坡、桥梁、隧道等高速公路结构发生损坏，造成重大人员伤亡和经济损失，例如 2024 年发生的广东梅大高速路基坍塌事故与四川雅康高速公路隧间桥垮塌事故等，高速公路突发偶发性灾害预警防治问题已成为亟待解决的难题。

上述案例表明，严峻的自然灾害对高速公路基础设施的安全性提出了更高的要求，基础设施运营维护与安全管理面临着前所未有的挑战。因此，构建以传感器、智能算法和大数据为核心的高速公路偶发性灾害通感一体化防控体系显得尤为必要。目前，国内外在公路偶发性灾害智能感知方面虽然取得了一定的研究成果，但多为单一监测感知技术的研究，受监测环境、自身技术特性限制等方面的影响，感知精度与感知效果无法满足现场应用要求。此外，通感一体化研究主要局限在雷达通信领域，感知与通信之间相互独立，现实应用效果距离预期具有非常大的差距。因此，有必要开展基于光学、雷达、视觉、声波不同手段的公路偶发性灾害融合智能感知方法研究，最终形成高速公路基础设施抗灾能力提升与急管控关键技术及装备研发体系。

本课题在对陕西省公路线性工程偶发性灾害形成机理深入调研分析的基础

上，建立公路偶发性灾害分类分级监测体系，构建公路地质多致灾要素融合的预测预警模型；通过对路基、路面、桥梁、隧道结构设施致灾因素的研究，形成系列韧性提升轻量化智能检测、监测关键技术与装备；通过对路网级偶发性灾害事件应急联动处置对策及救援技术研究，为高效救援提供科学决策依据，并通过开发公路偶发性灾害通感一体化防控信息决策管控平台，提高公路安全运营智慧化管理水平。本课题的研究，将全面提高陕西省公路偶发性灾害快速感知能力、监测预警能力和应急处治能力，降低重特大事故风险，最大限度减少和避免群死群伤事件发生，为高速公路安全运营提供科学的理论依据和技术保障，具有重大的工程实用价值和广阔的推广应用前景。

二、前期科研及工作基础

2.1 对项目领域国内外研究现状，研究水平和发展趋势的分析和评价

2.1.1 高速公路线性工程偶发性灾害致灾模式及灾变机理

高速公路灾害的发生是大多由自然环境的客观因素和人类施工的主观因素决定的，并且具备一定的偶然性^[1]。同时，由于不同地区多样的地质环境和地貌类型，致使高速公路线性工程灾害的灾种及其灾变机理研究变得十分复杂^[2]。因此，研究高速公路线性工程灾害的灾变机理及致灾模式是制定有效防灾对策的基础。灾害的发生通常由内外因共同作用所致，内因包括地质结构、岩土体特性及地形条件等；外因则包括降雨、地震及人类活动等^[3]。目前，国内学者针对不同区域和地质条件下偶发性灾害形成机制及其在变因子开展了广泛研究，并在此基础上提出了相应的灾害预测模型和防治策略。Terzaghi 是从土力学角度开展滑坡机理研究的开创者，主要通过滑带土孔压变化规律来揭示滑坡机理^[4]；雷祥义认为地下水降低了土体强度，是诱发滑坡主因^[5]；许强分析研究了甘肃黑方台党川滑坡，认为长期的蠕变变形是滑动发生的诱发因素^[6]；张茂省认为诱发因素要么改变斜坡应力状态，要么弱化了土体强度，二者失衡则斜坡失稳，滑坡发生往往是多因素耦合诱发结果^[7]。

近年来，随着 GIS 空间分析技术、数值模拟与遥感监测技术的不断发展，多种基于统计模型与物理模型相结合的因子敏感性分析和区域危险性评估方法被广泛应用于公路灾害研究中，并取得了一定成果。例如，李俊峰等基于前人研究成果，阐述数值模拟在常规状态滑坡稳定性分析、滑坡机制分析和滑动过程推

演中的应用状况^[8]。严克丽等利用多期次崩塌模拟方法，按照一定的概率能反映出多次崩塌后崩塌堆积体的变化情况和威胁范围^[9]。此外，尚慧等基于 GIS 应用综合评判法，开展了泥石流灾害危险性的量化评价^[10]；张平平基于统计学和层次分析的耦合方法，绘制了公路沿线灾害危险性分区图^[11]。尽管我国在高速公路沿线灾害时空分布规律分析、机理研究及危险性评估等方面已取得了一定的进展，但仍面临若干问题和挑战。具体表现为：不同高速公路沿线灾害的灾变机理研究尚未形成统一的分析框架；不同类型灾变因素的致灾模式评估尚不完善；不同灾害类型的耦合效应研究仍需深化；防治策略的系统性和针对性仍需提升。

2.1.2 高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备研发

近年来，针对高速公路病害高精度快速智能探测、自动诊断等技术问题，已有大量的国内外学者展开了相关研究^[12]。随着雷达技术的不断发展，大范围、快速且无损检测的特点使得地质雷达应用越来越广，如地下结构层厚度和密实度的估算，含水率的分布，构造物或自然病害的定位等^[13]。胡少峰等着重探讨了超声波检测和磁粉检测等高精度无损检测技术在高速公路桥梁施工过程中应用及其对质量控制的实际影响^[14]。杨美群等研究了高速公路路面隐性病害的无损检测技术，在对比传统探地雷达及高动态探地雷达数据采集原理的基础上，分析了 2 种探地雷达在高速检测状态下对于隐性病害识别的能力，提出了较为合适的探地雷达检测方法，并结合大量雷达检测及验证的实践经验，以雷达数据的三振相要素为基础提出了隐性病害识别 4 步法^[15]。国外的学者们主要基于深度学习和编码器-解码器网络对高速公路道路病害成因及演化特征进行分析。深度学习在计算机视觉领域取得了令人瞩目的成绩，许多学者尝试将深度学习应用于路面病害检测提取任务。Jana 等提出由四个卷积层和两个全连接层组成的神经网络实现裂纹检测^[16]。Feng 等提出了一种深度主动学习系统来处理标签资源有限的问题^[17]。Eisenbach 等提出了一个用于训练深度学习网络的路面病害数据集，并评估和分析了路面病害检测的最新方法^[18]。Song 等引入 Faster R-CNN 来自动识别和定位路面病害，包括裂缝、坑槽、渗油和表面修补等，并与 CNN 及 K 值分类法进行了对比，研究表明该算法可以更精确地定位带有边界框的路面破损^[19]。沙爱民等用 3 个 CNN 模型级联检测路面裂缝和坑槽，检测效果优于传统的图像处理方法^[20]。

综上所述，国内外对于高速公路基础设施的病害检测方面已取得大量成果。但是目前对于高速公路路面-路基-地层病害巡检技术尚处于摸索阶段，尚无高速公路基础病害空-地协同全天候高精度智能巡检装备。且高速公路病害高精度声-电-磁一体化融合探测技术还未实现，因此形成一套完整的高速公路病害声-电-磁一体化融合高精度快速智能探测技术体系迫在眉睫。另外，对于病害的评估仅局限于单类型病害，并没有无道路全域一体化感知网络及道路病害自动诊断系统。

2.1.3 高速公路基础设施智能监测关键技术与装备研发

目前，我国高速公路工程的建设发展迅速，同时高速公路病害问题也日趋显现，尤其以高速公路沿线路基、桥梁、隧道和边坡病害问题最为常见，长期承载性能受到影响，同时影响了建成公路的营运安全^[21]。

在高速公路路基沉降监测方面，目前，国内在高速公路路基沉降监测中，相继研发出了沉降板、沉降管、沉降计、压力计等沉降观测仪器。国内有一些学者应用以上几种传统方法进行路基沉降监测，比如刘尧军等在综合对比了常见的沉降监测方法及效果的基础上，结合实际路基填筑工程，进行数据分析后，指出监测路基全断面沉降时采用水平测斜仪比其他方法更为有效^[22]。刘观仕等人在软基路段通过埋设地面沉降板的方式，对新老路基及其结合部进行动态的沉降监测^[23]。蒋兴银基于某高速铁路深厚软土地基应用分层沉降法进行了现场监测与分析^[24]。随着监测需要越来越无法被满足，新型沉降监测方法不断涌现出来，代表性的有车载探地雷达监测技术(Ground Penetrating Radar, 简称 GPR)、合成孔径雷达干涉技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, 简称 InSAR)、分布式布里渊光纤传感技术(OTDR)及三维激光扫描技术等。逐渐有学者对传统沉降观测方法进行改良或结合其它领域采用新的沉降观测方法进行研究，如赵梦雪等对济宁地区高速公路采用双轨 D-InSAR(合成孔径雷达干涉监测技术)进行沉降监测分析^[25]。何倩等采用三维激光扫描与 D-InSAR 联合监测动态沉陷方法，结果表明该方法减小了误差，实现了范围大、精度高的地表沉降监测^[26]。张飞等人采用三维激光扫描技术对北京地区市环路沉陷进行监测，结果与常规方法进行对比后发现三维激光扫描技术能满足沉降变形监测要求^[27]。赵立都等提出通过地面三维激光扫描点云识别路面沉陷量的方法，结果显示该法可以高效准确分析沉陷状况^[28]。

在隧道病害成因分析与承载性能分析方面，Toshihiro、Asakura 等针对隧道

结构中出现的衬砌变形、渗漏水及混凝土剥落等病害提出了相应的处治措施^[29]。如 Meguid 等采用有限元数值模拟的方法探讨了衬砌结构围岩侧的空洞对支护结构内力的影响^[30]。潘洪科等根据某公路隧道监测结果从结构受力的角度进行正、反演分析,计算衬砌结构的内力,分析衬砌结构开裂原因,最终确定衬砌结构开裂原因为地质偏压作用^[31]。叶飞等对运营公路隧道进行现场裂缝调查统计,结合地质勘察报告及隧道开挖、支护情况,采用数值模拟的手段分析衬砌结构的开裂原因。研究表明,隧道衬砌结构开裂的主要原因是地质因素、偏压荷载、设计因素及施工因素^[32]。刘勇等以某高速公路双连拱隧道为背景,针对不同原因产生的裂缝,分别采用不同施工方法进行处理^[33]。孙洋等以多条软岩公路隧道为研究对象,对隧道二衬结构开裂的机理从岩体条件、地下水对围岩的软化效应、开挖对围岩的影响以及二衬结构的支护时间等方面进行分析研究^[34]。Housner 于 1997 年提出:结构健康监测 (SHM) 指利用现场传感技术,通过包括结构响应在内的结构系统特性分析,达到检测结构损伤或退化的目的^[35]。

在高速公路桥监测方面,国内外基础设施安全事故的惨痛经历推动了 SHM 技术的快速发展,为实现大型桥梁健康监测提供了技术支撑。桥梁结构健康监测主要包含信息采集和信息处理两部分内容。胡益铸等在进行飞云江跨海大桥安全监测系统设计时选用风速仪、温湿度计、雨量计、声呐传感器等智能传感设备对风速、温湿度、雨量、冲刷等环境参数进行监测^[36];赵建虎等证明了我国自主研发的多模全球导航卫星系统 (GNSS) 已能够实现高精度海底地形地貌的测量及信息获取^[37];王俊伟等在进行大门大桥健康监测系统设计时,利用车速车轴仪、加速度计、高清数字摄像仪等设备、动态称重系统实现了对运营阶段车辆荷载、交通运行以及船舶撞击等情况的信息采集^[38];郭建光等在进行赣江特大桥健康监测系统设计时,利用视频进行行车、表观、桥下交通等信息采集^[39]。同时,在结构响应信息采集技术上,王翔等表明光纤传感技术和雷达技术的发展实现了对桥梁结构应变、振动、挠度等物理量的高精度测量^[40];Hiroyasu 等证实了 BD 和 GNSS 可实现对结构空间变位信息的采集^[41]。而在病害表征信息采集方面,马晔等和 Morgenthal 等将红外热成像技术与无人机技术相结合,实现了多角度全方位的信息采集^[42-43];勾红叶等探索了利用超声波技术检测钢桥面的疲劳裂纹的可行性^[44];周建庭等将金属磁性记忆技术用于监测拉索腐蚀,取得了良好效果^[45]。

最后在信息处理方面，由于开放环境下，传感器采集的实测信号存在复杂噪声，无法直接进行数据分析，需先进行降噪处理，提高数据质量。

在公路边坡监测方面，当前，国内外众多传统边坡监测技术已广泛应用于实际工程之中，但存在时效性低、受气候环境影响大、造价高等问题^[46]。简易监测技术依赖于基础工具与设备的应用，具备低成本及操作简便的优势，然而其在测量精度与长期稳定性方面存在局限性^[47]。相比之下，专业监测技术则运用了诸如全站仪与精密水准仪等高级仪器，能够实现高精度与长周期的稳定监测，尽管如此，这类技术的初始投资与运行成本相对较高^[48]。而随着科技的发展，卫星遥感技术、无人机机载雷达技术等现代技术得到了广泛应用，逐渐形成空天地一体化边坡灾害监测技术。这些技术具有监测范围广、精度高、数据量丰富等优点，能够有效提高高速公路边坡灾害隐患判识的准确性和时效性^[49]。近年来国内外学者在边坡灾害监测方面取得了显著成果，提出了许多具有实际应用价值的理论和观点。如程俊等通过对汉马高速典型断面边坡稳定性情况进行的持续监测，采用抗滑桩钢筋应力监测、土压力监测、锚索框架梁预应力监测等应力监测技术手段，对边坡稳定性做出了判断^[50]。郭永建以岩质边坡为例，通过对边坡应力监测和现场试验数据对边坡的安全状况进行了评估结合 FLAC3D 软件对岩质边坡的开挖支护过程的数值模拟，得出了试验边坡处于安全运营状态的结论^[51]。王德咏等通过对岩质边坡的现场锚索应力监测的监测和分析，基于应力监测数据，提出了以监测应力为目标的边坡预警方法，建立了基于应力监测的突变模型，得出了锚索应力监测能够对岩质边坡的稳定状态进行预警以及基于突变理论建立的应力监测预警模型与位移监测变化具有良好一致性的结论^[52]。郭永建等以岩质边坡为例，对公路岩质边坡的支护锚杆进行应力监测，基于离心模型试验与现场试验的方法，对该段岩质边坡的应力变化规律进行了研究，并依此评价边坡稳定性，确定了预警值，得出了边坡失稳前的应力变化曲线，试验结果表明采用离心模型试验的成果对边坡的稳定性进行应力监测评价具有可行性^[53]。

综上所述发现，隧道长期健康监测技术尚处于起步阶段，系统性水平偏低，长期健康监测实施缺乏相关规范、标准参考，尤其是运营期带有病害的隧道结构健康监测技术没有系统深入研究，有必要通过开展公路隧道结构设施长期健康监测关键技术研究，建立基于运营环境和健康度评价的隧道结构健康监测方法以及

服役性能分级标准。而我国桥梁养护管理存在“重硬件，轻分析”的问题，传感设备、采集仪、通信设备等信息采集的硬件设施性能良好，相比之下对海量数据的分析能力明显不足。受理论不完善及结构损伤机理复杂的制约，适用于海量监测数据的智能化结构健康评估方法体系尚不完善，传统的层次分析法、基于可靠度分析的评估方法均具有其局限性。尽管高速公路边坡灾害早期监测领域的研究已取得一定成就，但仍面临若干亟待解决的问题。

2.1.4 高速公路基础设施多源异构数字化自动管控平台

我国地形、地貌较为复杂，同时降雨量等自然因素的加入，致使偶发性灾害一旦发生可能导致公路及其附属构筑物损毁，对人民的生命财产造成威胁^[54]。为此，部分学者已经开展了高速公路灾害监测及预警的相关研究。

高速公路灾害预测预报方面，国外学者利用卫星遥感数据（如高分辨率光学影像、合成孔径雷达数据等）、地理信息系统数据、现场监测传感器数据（如位移传感器、应力传感器等）以及气象数据等进行综合分析。Tiranti 等人阿尔卑斯山地区的公路灾害研究中，通过融合多种数据源，对滑坡、泥石流等灾害的空间分布特征进行了较为准确的刻画，能够识别出潜在的灾害高发区域^[55]。范晓雷等通过整合地质勘察数据、无人机航拍数据、卫星遥感影像以及现场监测设备采集的数据，提高了对公路灾害信息的全面掌握^[56]。

公路偶发性灾害多参数融合预警模型方面，早期学者们基于传统的回归分析、时序分析、趋势预测等方法对监测数据进行处理，初步形成了公路灾害预警系统。杜洋利用北斗卫星定位技术结合智能监测仪器形成物联网，构建了公路边坡灾害自动化监测预警系统^[57]。殷文彦等利用监测数据对常见的泥石流、崩塌以及不稳定斜坡等灾害进行了分析，结合多源数据建立灾害防治多维度指标的预警系统^[58]。赵晶利用 GIS、三维可视化、云计算等技术构建了公路灾害监测预警数据库及预警管理平台^[59]。近年来，随着人工智能技术的发展，深度学习已经被广泛应用于公路灾害的检测。Lv 等人提出了一种新的双路径全卷积网络(DP-FCN)模型，该模型基于双时相高分辨率(VHR)遥感图像构建滑坡清单图(LIM)^[60]。Wang 等人采用了一种深度学习方法(PickNet)来自动提取更多的本地地震的 P 波和 S 波到达时间，其提取精度接近人类专家，可以直接用于确定地震层析成像^[61]。

在公路偶发性灾害及基础设施信息集成决策管控平台方面，主要是同通过计

计算机程序语言，进行软件设计开发平台，目前的安全管理系统五花八门，水平参差不齐，目前的技术主要集中在三维的可视化表达、功能模块的设计等方面。如朱合华等使用 OpenGL 开发了 GeoV3D 可视化平台，并使用平台进行了管线等地质模型的可视化系统开发^[62]；朱良峰等使用 MAPGID-TDE 平台开发了三维地质建模的可视化系统^[63]；徐卫亚使用 X3D 语言进行复杂岩质边坡的三维建模^[64]。在 2000 年，刘大安等提出了“综合地质信息系统(SGIS)的构思”中，系统重要组成部分主要是地质工程监测信息，由数据库信息管理系统、数据分析及可视化查询等系统组成，该系统功能结构完整，针对边坡工程安全监测开发的，系统在数据库管理、分析与图形可视化等功能方面没有做出研究^[65]。同年，地理信息系统(GIS)在岩土工程中的应用研究日渐引起人们的关注，有不少人员在从事这方面的研究，如李青元、毛善军、王笑海等，研究多集中在三维实体建模、分析与可视化^[66-68]。梁桂兰，徐卫亚等基于程序设计语言 Visual Basic、数据库管理系统 SQL、可视化技术和地理信息系统 GIS 术等工具，在 VB 和 GIS 的基础上开发了边坡可视化分析系统，包含数据库管理模块、分析预测模块和图形可视化模块，把三者进行无缝集成，该系统功能满足可视化查询、数据分析及位移预测等，使监测数据信息化、可视化和预测预报的需要。系统具有方便、及时、快捷、直观、准确的特点^[69]。这些软件系统的应用，在不同程度上提高了监测资料管理分析的效率。

综上所述，利用数字化手段进行工程信息化管理经成为工程管控的重要发展方向，国内外在此方面已经取得了一定的研究成果，但多为隧道、桥梁、边坡单一管控平台，针对运营基础结构设施（边坡、隧道、桥梁）的数字化监控与灾害预警综合集成管控平台研究较少，同时目前该领域的研究工作及成果仍以尝试为主，尚未大范围的应用于实际工程，没有形成一套相适应的公路偶发性灾害及基础设施信息集成决策管控体系。

2.2 项目前期科研及现有工作条件

2.2.1 项目支撑条件及科研基础

2.2.1.1 高速公路滑坡监测预警系统关键技术研究

本项目在国内首次立足高速公路工程处治滑坡，研究基于设计验算方法的滑坡稳定性预测模型，形成滑坡监测管理和预警系统成套关键技术，并以陕西高速公路沿线高边坡监测为依托，建成高速公路滑坡监测预报及信息管理系统平台并

投入使用，系统实现了多等级、多层次预警信息的实时发布，对公路沿线滑坡危害，做到及时预警，迅速响应，有效防止滑坡危害扩大，保障行车安全及道路通畅。并且系统维护和数据管理可以远程进行处理，提高了滑坡监测信息管理的时空效率，体现了“互联网+”大背景下，高速公路滑坡监测预警的新模式、新方法。项目研究成果总体上达到国际先进水平，既有利于在高速公路的日常运管中，提前采取科学、有效的防范措施，防患于未然，减少道路在运营期间发生滑坡事故，保证道路畅通无阻，避免灾害治理封闭交通所引起的经济损失和社会压力，节约养护资金；又有利于提升高速公路的养管水平，保证人民群众安全与便捷出行，经济、社会效益十分显著。项目申请软件著作权 1 项，在国内外核心期刊发表就课题相关论文 9 篇。已在铜川至旬邑高速公路、渭南至蓝田玉山高速公路上的 2 处典型滑坡建设高速公路工程滑坡监测预警“示范工程”，能够提供高速公路滑坡监测基本信息、治理工程信息查询浏览、监测数据采集、统计和分析，可以很好地监测滑坡动态，减少道路在运营期间发生滑坡事故，保证道路畅通无阻，避免灾害治理封闭交通所引起的经济损失和社会压力，节约养护资金。课题研究虽以陕西省高速公路沿线滑坡为依托，但是所涉及的滑坡类型在全国范围具有较广泛的代表性。因此，研究成果对全省乃至全国山区高速公路滑坡的监测及预警预报也具有广泛的推广应用价值。

2.2.1.2 高速公路隧道综合监控与安全预防系统研究

高速公路隧道综合监控与安全预防系统在陕西省交通运输厅、陕西省高速集团的多项科研项目，以及全国多项隧道工程建设项目的支持下，针对隧道特殊环境下驾驶员声音感知、速度和距离感知、光学影响、隧道内警示诱导设备、隧道警示诱导体系及隧道监控各子系统信息联动等诸多方面进行了系统研究。明确了隧道声光信息传播原理、建立了三级警示诱导体系、研发了多功能车道控制器、建立综合智能管控平台，构建了完整的安全防控体系。项目总体研究路线如下图。

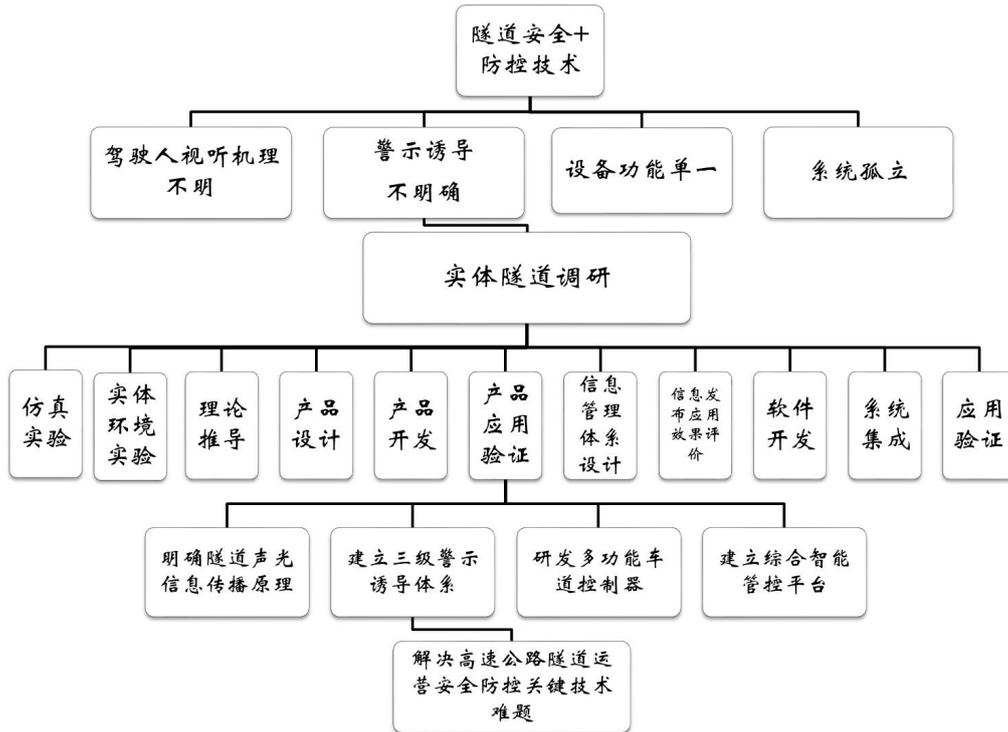


图 2.1 项目总体研究路线

该项目从理论和实践入手，历经 7 年产研学用攻关，主要解决了驾驶员视听机理不明、警示诱导不明确、设备功能单一、系统孤立四个问题，这同时也是隧道安全防控面临的四大技术挑战。能够达到全面提升高速公路通行能力、增强服务水平、有效降低交通事故、次生事故的发生概率，保护养护、维修作业人员安全，实现高速公路隧道交通安全运行目的，提升运营单位管理水平及高速公路服务水平。

成果在陕西、湖南、宁夏、河北、青海、四川等省份成功应用，提升了近 200 座隧道安全防控性能。该系统与传统系统相比，显著提高隧道路段的安全性能。通过软硬件的创新优化，提高了系统对异常事件的快速反应能力，发挥了科技示范作用，获得良好的社会效益。所研发的多功能车道控制器已列入 2017 年度交通运输部科技成果推广目录。获知识产权 10 项,包括发明专利 1 项、实用新型专利 2 项、外观设计专利 1 项、计算机软件著作权 6 项。发表科技论文 6 篇。2018 年 8 月 24 日，陕西省公路学会组织国内知名专家进行评价：一致认为该项目研究成果总体达到了国际先进水平。该项目成果获得了 2018 年陕西省交通运输科学技术一等奖、2019 年陕西省科学技术进步三等奖。

2.2.1.3 智能无人机桥梁检测系统的研发及应用

开发使用一种简单易操作、安全性高的智能化飞行载具，在基于伪卫星定位技术支持下，将定制视频检测设备运送到桥梁检测位置拍摄图像并对图像进行拼接处理，再利用相关算法，对桥梁表面图像进行病害识别与统计，并制定无人机进行桥梁检查的作业指南。该系统将能够非常有效地实现桥梁检测，解决一些现有桥梁检测手段不能解决的问题，是现有桥梁检测手段的必要和有效补充，有很好的应用前景。

基于伪卫星定位和倾斜摄影测量的智能无人机系统由伪卫星定位系统、飞行平台、飞控系统、地面站、倾斜视频检测系统、影像数据后期处理等部分组成。其中前几部分主要是为了确保能够获取质量较高的影像数据和 BD/IMU 数据，影像数据后期处理则是将获得影像经过一定的处理，最后拼接成一幅完整的测区地图或其他的数字产品。在无人机数据处理系统方面，开发图像自动识别病害系统软件，软件系统功能强大，能够快速高效的处理无人机影像数据，而且这些功能的实现都依靠着成熟的摄影测量理论体系，包括像方坐标系、物方坐标系、共线方程、空中三角测量等。而本智能无人机就是在目前这些成熟的技术基础上进行多元融合，图像融合(Image Fusion)用于将同一目标由多源信道采集到的不同图像数据经过图像分析处理，以最大限度的提取各自信道中的有利信息，最后综合成高质量的图像。图像融合技术能够提高图像信息的利用率、改善计算机解译精度和可靠性、提升原始图像的空间分辨率和光谱分辨率，利于桥梁病害检测。

智能无人机桥梁检测系统拥有发明专利 2 项，实用新型专利 4 项。核心期刊发表论文 2 篇。

2.2.1.4 斜坡地质灾害形成机理与生态地质环境风险评价体系研究

面向红土滑坡灾变机理，从微观角度出发，对红土滑坡滑带土的物质组成、矿物成分、理化性质及残余强度特征进行了分析，采用偏光显微镜和扫描电镜技术对红土滑坡滑带土的微观结构开展了系统研究（图 2.2），并基于超固结粘土力学模型解释了红土滑坡的变形机理。该项研究为红土滑坡的防治提供了重要依据。

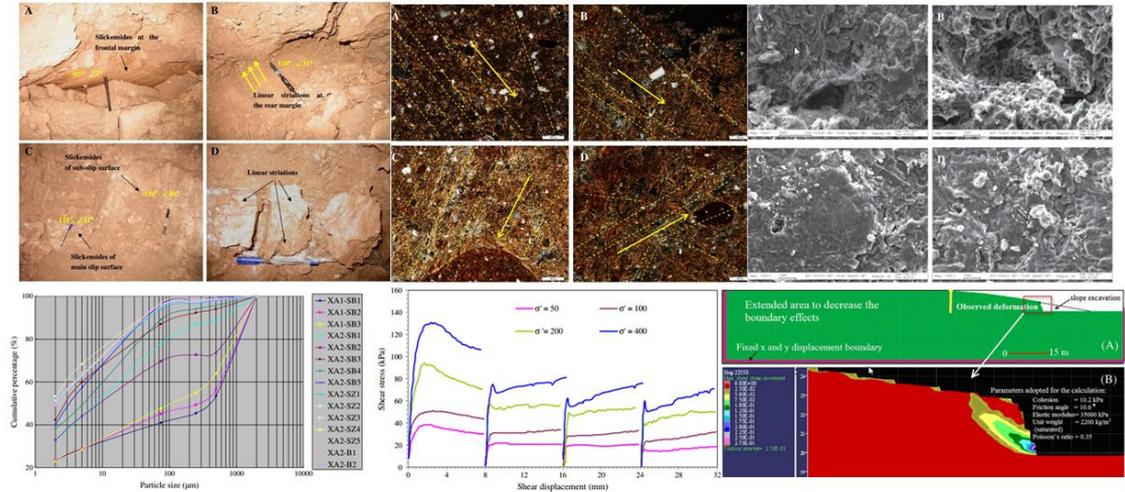


图 2.2 红土滑坡的微观结构与灾变机理研究

面向斜坡地质灾害的生态地质环境问题，开展了流域-场地-单体的多尺度斜坡地质灾害生态地质环境调查，构建了斜坡地质灾害的全链条生态地质风险识别与评价体系（图 2.3）。基于多源异构数据融合、机器学习和自动化算法，形成了面向对象的斜坡地质灾害及其生态损害的识别技术，能够实现斜坡地质灾害生态破坏效应及灾后生态恢复效应的快速识别；开发了精细化的斜坡地质灾害几何特征提取技术与灾害类型划分技术，考虑生态地质环境特征与灾害体几何特征基础上实现地质灾害类型划分；通过优化逻辑回归-频率比组合法，构建了斜坡地质灾害风险评价体系，能够实现区域斜坡灾害风险的快速识别与评价。



图 2.3 斜坡地质灾害生态地质环境风险识别与评价体系

2.2.1.5 高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备研发

中国地质大学（北京）基于高速公路运营病害检测实际需求和技术难点，采用机载探地雷达和红外成像等技术，形成病害三维立体透视与全景实时成像技术，研发病害立体化、多视域、高精度智慧车载巡检装备体系。在此基础上，构建集任务规划、数据采集、实时传输与云端存储等一体化完备体系，实现病害检测工作的自动化和智能化，建立高速公路运营病害一体化多元探测体系。



图 2.4 新型高速公路探测车检测系统

2.2.1.6 公路偶发性灾害智能通感一体化感知关键技术研究

中国地质大学（北京）结合基于北斗+无人机数字成像技术在边坡稳定性预测预判中的应用项目研究了基于无人机边坡检测快速成像方法及边坡病害图像识别技术以及基于数字图像边坡稳定性快速评价方法和指标，基于毫米波雷达对边坡进行监测已在安徽太蕲高速边坡进行测试应用。



图 2.5 大疆禅思 Zenmuse X3 云台 M100 旋翼无人机



图 2.6 安徽太蕲边坡监测

2.2.1.7 高速公路桥梁运营病害精准判识方法

交通运输部科学研究院基于不同类型病害特征的理论分析与海量实测数据集,采用深度学习与多源数据融合方法对机载探地雷达和红外成像结果与各类病害进行处理,探明了病害整体分布发育规律,提高了病害识别精度。

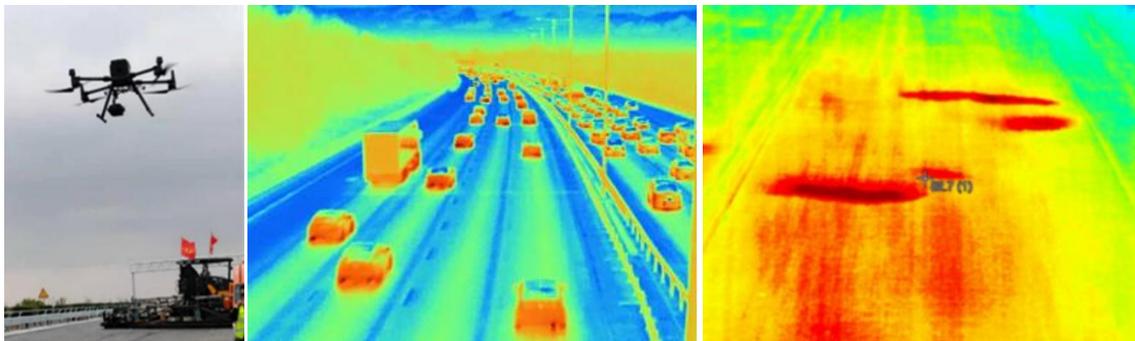


图 2.7 一体化探测与多维度监测

2.2.1.8 公路隧道结构设施长期健康监测关键技术研究

交通运输部科学研究院结合隧道结构智能健康监测及数字化管理方案研究项目建立了公路隧道结构健康监测方案,结合复杂地质超长大跨公路隧道高效建造与智慧运维关键技术研究及示范项研究了公路隧道结构设施长期健康监测关键技术,为后续研究提供了坚实的基础。

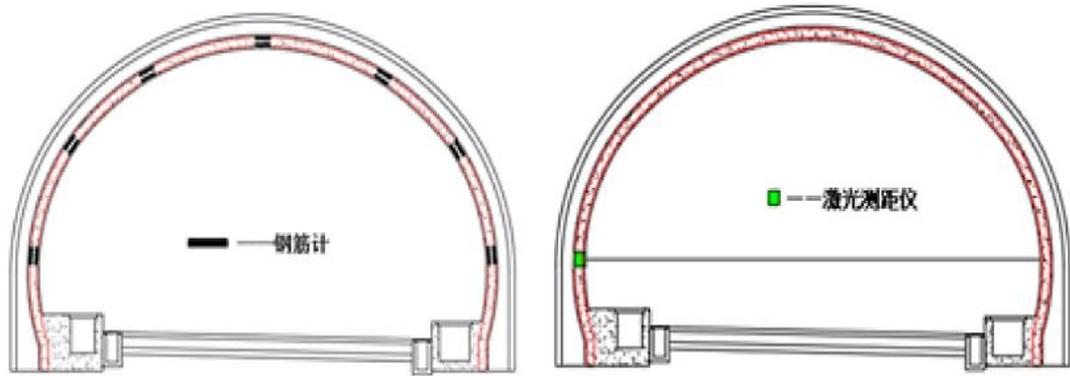


图 2.8 监测测点布置

2.2.1.9 公路边坡失稳多源监测设备关键技术研究

① 边坡安全物联轻量化监测设备

边坡安全直接关系到人民群众的生命财产安全。通过安装边坡安全监测预警设备，可以显著降低边坡灾害的发生概率和危害程度，因此，本课题研究团队开展了边坡失稳监测预警设备研究，对一体化 GNSS 地表位移监测站、一体化崩塌监测仪、一体化表面裂缝自动监测站进行优化，在节约经济的同时，提高了数据采集效率，为灾害预警提供了扎实的基础。

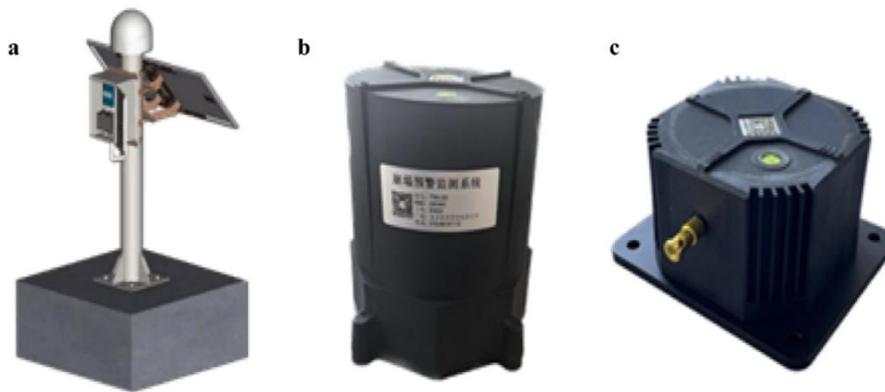


图 2.9 (a) GNSS 地表位移监测站 (b) 崩塌监测仪 (c) 表面裂缝自动监测站

② 边坡安全物联一体化监测预警关键技术研究

边坡灾害造成的损失巨大，易出现崩塌、滑坡、泥石流、地裂缝等自然灾害。边坡安全隐患多沿公路、铁路两侧及坝区两岸分布，线路工程跨度大的特性也增加了对边坡监测的难度，目前国内边坡安全监测主要存在监测响应不及时、边坡监测覆盖不足、无法随时了解现场情况和技术应用性不足等问题，针对上述问题，中国地质大学北京课题研究团队构建边坡安全物联一体化监测平台（图 2.10），提高边坡监测的实时性、可靠性及数据连续和严谨性，提供监测预警的深度、广

度和精度，掌握偶发性灾害变化趋势，及时进行风险预报、预警。

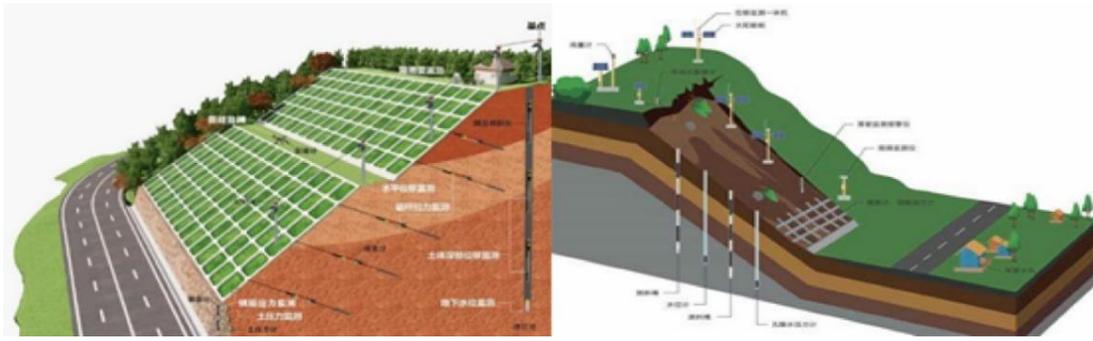


图 2.10 边坡安全物联一体化监测系统

综合运用数字化感知传感器、专业采集仪、工业无线通讯、后台数据分析服务软件模块及三维可视化数据平台，对边坡进行自动、连续、实时监测，具备前端监测数据管理、数据动态展示、预警分析以及数据应用服务能力；同时能在信息采集及预报分析决策基础上，根据预警等级及偶发性灾害威胁范围，通过短信、无线广播等预警方式及相应预警流程，将预警信息及时准确地传递到偶发性灾害危及区域，使预警信息接收人员能实时掌握偶发性灾害区域整体的安全状态。

③ 空天地一体化的边坡监测及道路塌方风险预警关键技术研究

道路边坡的形成是公路建设过程中为了适应地形、保持路基稳定、确保行车安全而进行的一项重要工程措施。路基下沉、边坡塌方等灾害事故，严重威胁着道路出行者的生命和财产安全，无论是传统的接触式测量还是非接触式测量，都存在各自的优点与技术限制。无法同时实现对偶发性灾害隐患风险场景进行全覆盖、长时间和高精度的形变监测。针对上述问题，中国地质大学北京课题研究团队综合运用 InSAR、北斗及新一代 AI 技术等手段，构建空天地一体化的边坡监测及道路塌方风险预警体系（图 2.11），将 InSAR 形变数据、北斗定位数据、以及双光谱 AI 识别结果进行综合分析，建立边坡稳定性评估模型。根据综合分析结果，评估边坡的安全等级，预测可能的滑坡、崩塌等灾害风险，指导对高风险隐患区域进行早期治理，防患未然。



图 2.11 空天地一体化的边坡监测及道路塌方风险预警系统

2.2.1.10 偶发性灾害诱发高速公路路网灾变应急联动处置对策及救援技术

① 高速公路大规模隧道群防灾救援联动控制技术

课题研究团队独创了高速公路隧道群与路网联动控制技术,自主开发了隧道群智能联动监控系统平台,创建了突发事件下隧道群应急救援联动控制预案体系。



图 2.12 高速公路大规模隧道群应急救援联动控制流程

② 滑坡体下人体生命体征的探测无人机平台及探测方法

课题组团队独创了一种滑坡体下人体生命体征的探测无人机平台及探测方法,其中,探测平台包括:任务管理终端、无人机模块、数据传输系统和数据处理中心。任务管理终端用于实现滑坡体下人体生命体征的探测任务的编辑、规划和查询中的一种或多种功能,并下发探测任务给无人机群;无人机模块用于对无人机群进行飞行控制,且无人机模块包括多种类型的探测设备;数据传输系统用于传输探测任务给无人机群,并接收无人机群探测的多种类型的生命探测数据;数据处理中心用于根据多种类型的生命探测数据识别滑坡体生命体征,发送救援信息救援终端。由此,解决了传统救援模式救援慢、配合弱、数据复杂、传输速度慢等问题。

③ 隧道洞口突发地质灾害监测预警系统及方法

课题组团队独创了一种隧道洞口突发地质灾害监测预警系统及方法,其中,系统包括:隧道洞口周边灾害实时监测预警系统用于对隧道洞口周围的目标重点区域实时监测,获得第一监测结果;隧道洞口崩滑流灾害实时监测警报系统用于对隧道洞口及铁路干线实时监测,获得第二监测结果;数据融合传输基站对第一监

测结果和第二监测结果进行数据融合,生成第一数据图像和第二数据图像;灾害监测预警中心基于第一数据图像和第二数据图像进行现场预评估,得到预评估结果,从而评估人员进行评估,得到最终的评估结果并进行灾害预警。由此,解决了相关技术中使用光纤传感器的监测方式较为单一,降低了地质灾害的监测效率,并且降低了地质灾害监测的自动化水平的问题。

2.2.1.11 高速公路基础设施韧性提升关键技术

本课题聚焦高速公路基础设施(涵盖路段、桥隧坡等关键节点)火灾应急管理需求,以降低火灾事故危害、提升应急处置效能为目标,核心围绕“风险可接受标准构建-应急韧性能力基准表征-基准值确定”展开研究,重点探索适应、吸收、恢复三大核心韧性能力的科学表征方法,为高速公路基础设施火灾应急管理提供量化依据。

首先开展高速公路基础设施火灾风险可接受标准的系统性构建研究。以行业现行设计规范、应急管理标准及历史火灾事故统计数据为基础,采用 F/N 曲线法(社会风险)、F/D 曲线法(经济风险)、F/T 曲线法(交通延误风险),分别构建适用于高速公路场景的风险可接受标准体系。在社会风险标准构建中,结合高速公路人员流动特征(如驾乘人员密度、应急疏散路径差异),研究不同人员伤亡等级对应的可接受与可容忍频率阈值,建立覆盖“少量伤亡-较大伤亡-重大伤亡”的 F/N 曲线模型;在经济风险标准构建中,考虑高速公路基础设施的经济价值构成(如道路主体结构、附属机电设备、交通中断间接损失),研究不同经济损失规模对应的频率阈值,形成涵盖“轻微损失-较大损失-重大损失”的 F/D 曲线模型;在交通延误风险标准构建中,结合高速公路交通流量特征(高峰/平峰、主线/匝道),研究不同交通中断时长对应的频率阈值,构建覆盖“短期中断-中期中断-长期中断”的 F/T 曲线模型。研究过程中,需系统梳理高速公路火灾事故历史数据(如事故发生频率、损失程度、处置周期),结合行业安全目标与社会经济发展水平,优化曲线模型参数,确保风险标准既符合实际安全需求,又具备技术可行性与经济合理性。

其次进行高速公路基础设施火灾应急韧性适应能力基准的表征方法研究。适应能力基准核心聚焦救援行动介入的时效性,以“救援行动介入时间满足期望要求的概率约束值与期望值”为核心表征指标,研究介入时间的构成要素与量

化方法一将救援行动介入时间分解为疏散引导介入时间（如人员疏散指引、交通分流启动）、灭火处置介入时间（如消防力量抵达、灭火设备部署）、人员搜救介入时间（如被困人员定位、救援实施），结合高速公路不同基础设施节点的空间特征（如路段开阔度、互通复杂程度、服务区人员集中度），分析各时间构成要素的影响因素（如救援力量部署距离、交通疏导难度）。参考行业应急响应时间标准，初步确定救援行动介入时间的期望目标值，并基于 IPCC 等权威机构的事件发生可能性概率分级体系，研究概率形式的基准表征逻辑—通过历史救援数据统计与模拟推演，计算“救援介入时间达标”的概率期望值（反映理想处置水平）与概率约束值（反映最低可接受水平），确保基准既能体现应急效率要求，又能适应不同区域高速公路救援资源配置差异。

随后开展应急韧性吸收能力基准的表征方法研究。吸收能力基准以“提升火灾损失可接受度”为核心，围绕“生命损失-经济损失”双维度构建量化表征体系。在生命损失维度，基于已构建的社会风险 F/N 曲线与高速公路火灾事故基础频率（通过历史数据统计分析，计算平均每处基础设施单位时间内的火灾发生概率，暂不区分具体路段长度、交通量等个体差异），研究不同人员伤亡等级的概率基准计算模型，通过公式推导建立“伤亡人数-概率期望值-概率约束值”的对应关系，其中概率期望值反映理想状态下控制生命损失的能力，概率约束值反映可容忍的生命损失风险上限；在经济损失维度，依托经济风险 F/D 曲线与火灾事故基础频率，研究不同经济损失规模的概率基准计算方法，结合高速公路基础设施的损失评估指标（如结构修复成本、设备更换费用、交通中断间接损失），确定“损失金额-概率期望值-概率约束值”的量化关联，确保基准能覆盖直接经济损失与间接经济损失，全面反映基础设施对火灾损失的承载能力。研究过程中，需通过典型火灾案例复盘（如过往高速公路路段火灾、服务区火灾），验证概率计算模型的合理性，优化模型参数以提升基准的实际适配性。

再者进行应急韧性恢复能力基准的表征方法研究。恢复能力基准聚焦“交通延误损失可接受度”，以高速公路火灾后的交通功能恢复效率为核心指标，采用 F/T 曲线法与火灾事故基础频率相结合的方式，构建表征模型。研究不同交通中断时长（如“1 天内恢复-1 天至 1 个月恢复-1 个月以上恢复”）对应的概率期望值与概率约束值，其中概率期望值反映理想状态下的交通恢复速度，概率约

束值反映可容忍的交通延误风险上限。研究过程中，需重点分析影响高速公路交通恢复的关键因素（如火灾破坏范围、抢修资源调配效率、临时交通疏导方案），结合不同基础设施节点的交通功能重要性（如主线贯通性、匝道分流作用），优化恢复能力基准的量化逻辑—例如，针对交通枢纽型节点（如互通立交），适当提高恢复速度要求，降低长时延误的可容忍概率；针对普通路段，在确保安全的前提下，平衡恢复效率与成本投入。同时，通过交通流模拟软件（如 VISSIM）搭建火灾后交通恢复场景，验证基准值对交通运行的影响，确保基准既能推动快速恢复，又能避免过度抢修导致的资源浪费。

最后开展高速公路基础设施火灾应急韧性基准目标与基准值的确定研究。基于前期构建的风险可接受标准与三大韧性能力表征模型，结合高速公路运营管理实际需求（如安全目标、应急资源配置水平、区域经济发展状况），综合确定各韧性能力的基准目标—适应能力以“救援介入时间达标”为核心目标，吸收能力以“控制生命与经济损失在可接受范围”为核心目标，恢复能力以“快速恢复交通功能、降低延误影响”为核心目标。通过多轮参数迭代与案例验证（选取不同区域、不同类型的高速公路基础设施进行试点分析），优化概率期望值与概率约束值，最终形成一套涵盖“适应-吸收-恢复”的完整应急韧性基准体系。研究过程中，需建立基准动态调整机制，定期收集新的事故数据与行业标准更新信息，对基准值进行适应性修正，确保其长期符合高速公路基础设施火灾应急管理的发展需求。

2.2.1.12 高速公路基础设施多源异构数字化自动管控平台

① 边坡自动化健康监测预警关键技术研究

综合现代测试与传感技术、网络通信技术、信号处理和分析技术、数学理论和结构分析理论等多个学科领域的边坡健康监测系统，可连续地、实时地、在线地对结构“健康”状态进行监测和评估。建立结构健康监测系统的目的在于确定边坡结构的安全性，监测支护结构的承载能力、运营状态和耐久性能等，以满足安全运营的要求，对边坡的运营安全和提高边坡的管理水平具有极大的指导意义。中国地质大学北京课题研究团队开展了知物云边坡自动化健康监测关键技术研究，建立了边坡自动化健康监测平台（图 2.13），研究对边坡的位移、变形、受力情况、渗流和支护结构等进行有效监控，修正在施工过程中各种影响支护结构的参数误差对支护结构的影响，实现监测数据的采集、展示、分析、预警、评估

等功能，及时有效地反馈边坡安全状况，为边坡偶发性灾害预警提供充实的研究基础。



图 2.13 边坡自动化健康监测平台

通过及时把握边坡的安全状态，评定边坡的稳定性，并结合支护结构的运营阶段的工作状态，识别支护结构的损伤程度评定支护结构的安全、可靠性与耐久性，为运营、维护、管理提供决策依据，验证边坡支护结构设计建造理论与方法，完善相关设计施工技术规程，提高边坡工程设计水平和安全可靠度，保障结构的使用安全，具有重要的社会意义、经济价值和广泛的应用前景。

② 综合预报警计算及平台

同时基于多源信息智能监测与采集系统、多源异构数据融合处理结果和预警指标时间序列预测模型，构建预测信息-实测信息、预报警度-实际警度基础数据库，融合 5G 通讯、深度学习、大数据、云计算等智能技术，通过工程风险预报精度与速度的双重突破形成一套智能化的工程风险预警云脑平台，实现工程文物保护的经验调度、预案调度和智能调度，在综合预报警度技云脑平台领域取得一定的研究成果，为项目课题的实施提供研究基础。



图 2.14 综合预报警度计算及云脑平台

③ 公路偶发性灾害及基础设施信息集成决策管控平台研发

本课题研究团队依托于井冈山厦坪至睦村高速公路全寿命三维数字建管养一体化管理系统开发及应用、复杂地质超长跨公路隧道高效建造与智慧运维关键技术研究及示范等项目研发了基础设施信集成管控平台。

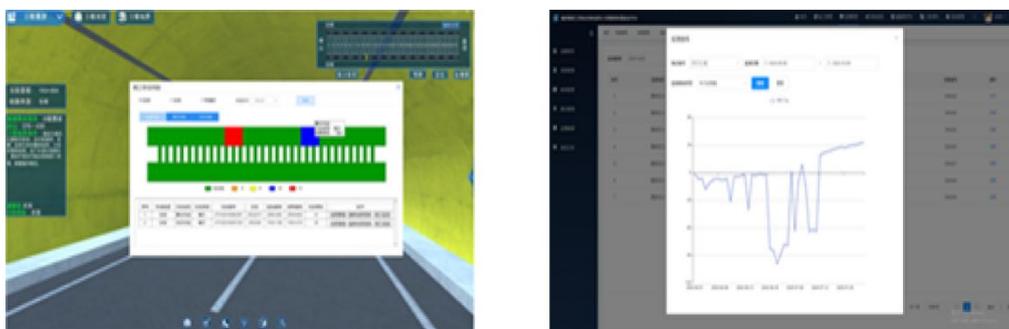


图 2.15 基础设施信集成管控平台

2.2.2 研究团队基础

陕西高速公路工程试验检测有限公司是陕西交控集团下属的高新技术企业。公司前身系 1987 年组建于陕西三原的西安至三原一级公路监理工程师中心试验室，是我国第一家按 FIDIC 模式设立的公路工程试验室。2004 年 1 月，正式注册成立具有独立法人资格的有限公司，注册资本 5000 万元。公司现有员工 800+ 人，其中：交通运输部及省级各类专家 10 余人，各类专业技术人员 380 余人。公司有秦创原科学家+工程师队伍 1 支，博士团队 2 支，获批交通运输部卫星技术行业应用研发中心（参建）、陕西省企业技术中心、陕西省智慧交通产业中试基地、西安市交通土建结构安全监测技术中心、道路桥隧智慧监测省级高校工程研究中心（参建），入选陕西省省属重点科技型企业、陕西省 DCM 数据管理成熟度贯标试点企业，获评陕西省“专精特新”中小企业。公司主营业务包括公路、铁路、建筑、市政和水利工程试验检测、监测及评估；智能监测感知设备研发生

产，基础设施数字化及监测系统集成；公路新材料、新技术、新工艺研发、生产和应用。公司拥有交通部公路工程综合甲级、桥隧专项和机电专项检验检测机构资质、中国合格评定国家认可委员会颁发的实验室认可证书，以及市政工程和铁路行业的相关资质），公路养护安全运维新技术(包括结构与设施设备监测，环境监测及修复等)，智慧交通(包括基础设施信息数字化方向、卫星技术在交通行业应用方向)建设。近3年，在研科研项目16项其中1项科研成果进入交通运输部重点科技成果推广库:公司获得国家科技进步二等奖1项，陕西省科技进步二等奖1项;陕西交通运输科学技术二等奖和三等奖各1项;取得软件著作权17项、新型实用专利6项，7项发明专利正在实审公示阶段;主持编写陕西省地方标准(规范)4项，涵盖公路、桥梁、隧道的项目建设及运营养护管理，填补了国家和行业规范的空白。公司申请获批了陕西省级企业技术中心，西安市工程技术研发中心。

陕西交控科技发展集团股份有限公司深耕公路交通行业60余年，下辖陕西省交通规划设计研究院有限公司、陕西高速公路工程试验检测有限公司等8家子公司。主要从事交通科研、综合规划、勘察设计、监理咨询、试验检测、机电工程智慧交通、交通新材料等业务。拥有省部级以上科研平台14个,各类学科带头人、行业专家27人，硕博研究生778人，正高级职称78人，副高级职称799人。具有各类资质160项,其中甲级资质35项、一级资质6项，承担省部级重点课题200余项，获得省部级以上各类荣誉71项，业绩遍及全国各省市。

交通运输部科学研究院（以下简称“交科院”）成立于1960年11月17日，为交通运输部直属的综合性科研事业单位，主要面向政府主管部门、交通运输行业开展基础性、前瞻性、公益性研究以及技术咨询、服务工作。交通运输部科学研究院下设标准与计量研究中心、交通发展研究中心、综合运输研究中心等11个二级研究机构，在交通运输发展战略规划、政策法规、标准等方面的研究成果被政府部门大量采用；在信息化、环保安全、低碳交通、公路工程、低空经济等领域的尖端技术得到市场的广泛应用；在行业科技交流、成果推广、检测认证等科技服务领域作出了重要贡献。交科院共有获得各类专业资格的人员654人次，其中，咨询工程师（投资）82人、交通运输企业安全生产标准化评审员51人、具有科技查新上岗证书人员4人、具有信息安全保障人员认证证书27人等。全院共有1名国家级有突出贡献的中青年专家、7名享受国务院政府特殊津贴专家

(其中 4 人研究领域为交通标准制修订、交通运输规划与管理、交通发展战略和政策)、1 人入选国家级“新世纪百千万人才工程”、1 人入选交通运输部“新世纪十百千人才工程”、14 名交通青年科技英才; 94 人次在全国、部及地方标准化技术委员会和学会协会等专业社团兼职, 292 人次入选国家、部级公路、水运、信息和环保等技术领域专家库, 其中 10 人入选国家科学技术奖励评审专家库。

中国地质大学(北京)是一所以地质、资源、工程、环境为主要特色的研究型大学, 是国内外地球科学研究的重要基地, 也是国内偶发性灾害研究的最有影响力的单位之一, 我国工程地质专业的发源地之一。学校现有中国科学院院士 11 人, 中国工程院院士 2 人, 国家级百千万人才工程 9 人, 国家杰出青年科学基金获得者 15 人, “长江学者”特聘教授 4 人, 国家级教学名师奖获得者 1 人, 全国优秀教师 2 人, 国家“万人计划”教学名师 2 人, 全国高校黄大年式教学团队 1 个, 国家级教学团队 1 个, 国家优秀青年科学基金获得者 16 人, 青年“长江学者”4 人。学校拥有地质学、地质资源与地质工程、土木工程等与本任务密切相关的学科体系, 其中“地质学”和“地质资源与地质工程”2 个学科入选国家“双一流”建设学科, 连续多轮全国学科评估获得 A+, 地球科学和工程学 2 个学科领域进入 ESI 排名世界前 1%。在重大工程偶发性灾害理论、地质过程与成矿作用、超深钻探和极地研究等领域特色鲜明, 优势明显, 并取得了一系列重要成果, 在 Nature、Science 等国际顶级期刊上发表了多篇论文。近五年, 获得国家级科技奖 1 项, 省部级科技奖 24 项。2021 年, 国家自然科学基金获批 118 项。

(1) 实验室平台条件: 申请人所在单位拥有国家重点实验室、国家工程研究中心、国家科技资源共享服务平台、国家国际科技合作基地, 教育部重点实验室、教育部工程研究中心、自然资源部重点实验室、自然资源部工程技术创新中心、水利部重点实验室、北京市重点实验室等高端科研平台 19 个, 为本任务的科学研究提供有力支撑。中国地质大学(北京)拥有国家重点实验室、国家工程研究中心、国家科技资源共享服务平台、国家国际科技合作基地, 教育部重点实验室、教育部工程研究中心、自然资源部重点实验室、自然资源部工程技术创新中心、水利部重点实验室、北京市重点实验室等高端科研平台 19 个, 为本任务的科学研究提供有力支撑。拥有先进的大型科研设备, 与本任务密切相关的大型地球物理探测设备 5 套、大型地质力学模型实验设备 1 套、大型地形测量与变形

监测设备 3 套、大型岩土体物理力学性质测试设备 15 套。本任务依托这些大型设备主要开展工程地质勘察、室内岩土体物理力学实验、地质力学模型试验。此外,实验室配备有正版 ANSYS、MIDAS、FLAC3D、3DEC、PFC、GMS、COMSOL Multiphysics 等多款数值计算软件及多台高性能数值计算工作站,本项目研究将依托这些硬件条件,充分开展高速公路突发偶发性灾害“空-天-地”协同智慧预警关键技术与装备研发所必须的试验研究、数值计算及程序开发等工作,确保高速公路病害水文地质与工程地质勘察信息分析、室内岩土体物理力学实验、地质力学模型试验等相关试验的顺利进行。

(2) 科研团队条件:工程技术学院组建了以孙友宏院士、彭建兵院士为首席科学家,以薛翊国教授等中青年拔尖人才为学术带头人的地质安全研究院,并筹建了自然资源部重大工程地质安全风险防控工程技术创新中心。研究团队近年来参与或承担了国家“973”计划课题、国家自然科学基金重大项目、重点项目、优秀青年基金项目、国家重点研发计划、面上基金项目等等科研项目 100 余项,成果应用于 50 余项重大工程。在重大工程地质安全理论、偶发性灾害形成机理、预测与评价、地质环境保护等科研方面取得了一系列创新性成果,产生了显著的经济和社会效益。近年来研究团队在《Engineering Geology》、《Tunneling and Underground Space Technology》、《Rock Mechanics and Rock Engineering》、《Construction and Building Materials》等国内外权威学术期刊上发表高水平代表性学术论文 500 余篇,授权国家发明专利 200 余项,获得其中国家科技进步二等奖,山东省科技进步一等奖、三等奖,中国岩石力学与工程学会科技进步一等奖,国家能源科技进步二等奖,湖北省科技进步二等奖,中国水电工程顾问集团公司科技进步一等奖等国家级、省部级科技奖励 14 项,为本课题开展奠定了良好的研究基础。

综上,无论从研究平台、实验室条件、仪器设备和分析软件等硬件设施,还是从以往研究积累,本课题已完全具备了实施研究方案所需的工作条件。

2.3 参考文献

- [1] 王瑛,林齐根,史培军.中国偶发性灾害伤亡事件的空间格局及影响因素[J].地理学报,2017,72(05):906-917.
- [2] 章诗芳,王玉芬,贾蓓,等.中国 2005-2016 年偶发性灾害的时空变化及影响因素分析[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1567-1574.
- [3] 李华威,万庆.小流域山洪灾害危险性分析之降雨指标选取的初步研究[J].地球信息科学

- 学报,2017,19(3):425-435.
- [4] Terzaghi K. Mechanism of landslides[C]. In S-Paige(ed) Application of Geology to Engineering Practice. Geological Society of America, Berkeley, 1950: 83-123.
- [5] 雷祥义. 泾阳南塬黄土滑坡与引水灌溉的关系[J].工程地质学报, 1994, 3(1): 56-64.
- [6] 许强, 彭大雷, 元星等. 2015 年 4.29 甘肃黑方台党川 2 滑坡基本特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(02):167-180.
- [7] 张茂省, 李同录.黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(04): 530-540.
- [8] 李俊峰,张小趁,刘红岩,等.突发偶发性灾害中应急数值模拟技术应用浅析[J].工程地质学报,2016,24(04):569-577.
- [9] 严克丽,梁风,史文兵,等.多期次崩塌灾害的数值模拟研究[J].自然灾害学报,2022,31(06):248-260.
- [10] 尚慧,倪万魁,罗东海.宁南山区泥石流灾害危险性量化评价研究[J].西安科技大学学报,2017,37(01):63-70.
- [11] 张平平,何书,李滨.江西丘陵山区公路偶发性灾害危险性评价多耦合模型对比研究[J].中国偶发性灾害与防治学报,2024,35(04):135-145.
- [12] 刘晓.公路隧道智能检测系统设计与实现[J].机械设计与制造,2018,(08):66-68.
- [13] 任翼宏.高速公路路基路面无损检测技术分析[J].交通建设与管理,2023,(05):135-137.
- [14] 胡少峰.高精度无损检测技术在高速公路桥梁施工中的应用[J].中阿科技论坛,2024,(10):79-83.
- [15] 杨美群,邹友泉,刘静.探地雷达在高速公路路面隐性病害检测的应用[J].公路,2022,67(08):86-91.
- [16] Jana S, Thangam S, Kishore, A, et al. Transfer learning based deep convolutional neural network model for pavement crack detection from images[J]. International Journal of Nonlinear Analysis and Applications,2022,13(1):1209-1233
- [17] Feng C, Liu M Y, Kao C C, et al. Deep active learning for civil infrastructure defect detection and classification [C]. ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering, ASCE: 2017.
- [18] Eisenbach M, Stricker R, Seichter D, et al. How to get pavement distress detection ready for deeplearning a systematic approach [C]. 2017 International Joint Conference on Neural Networks, IEEE, 2017.
- [19] Song L, Wang X. Faster Region Convolutional Neural Network for Automated Pavement Distress Detection [J]. Road Materials and Pavement Design, 2019(10):1-19.
- [20] 沙爱民,童峥,高杰.基于卷积神经网络的路表病害识别与测量[J].中国公路学报, 2018,31(1): 1-10.
- [21] 王晓东. 城市道路地下病害体安全预警系统建设方案[J]. 中国煤炭地质, 2018,30(S1): 129-135.
- [22] 刘尧军,赵玉成,冯怀平.路基沉降监测方法应用研究[J].公路交通科技,2004(01):33-34+50
- [23] 刘观仕,孔令伟,丁锋,顾建武.高速公路扩建工程软基拓宽的沉降监测与分析[J].岩土力学,2007(02):331-335.
- [24] 蒋兴银.铁路软土地基处理方法合理选择试验研究[J].铁道勘察,2010,36(02):22-26.
- [25] 赵梦雪,刘国林,王志伟.济宁地区高速公路沉降监测与分析[J].测绘科学,2017,42(11):135-140+153.
- [26] 何倩,范洪冬,段晓晔,杜森,高晓雄,三维激光扫描与 DInSAR 联合监测矿区地表动态沉降

- 方法町.煤矿安全.2017.48(12):70-73+77.
- [27] 张飞,张建坤,曹伍富.三维激光扫描技术在道路沉降监测中的应用探讨[J].工程勘察,2019.47(05):53-57.
- [28] 赵立都,陈波,刘国强,吴逸飞,周银,杨宇鹏,郭形,韩达光,基于地面三维激光扫描的高速公路沉陷量自动提取与分析研究 I1.重庆交通大学学报(自然科学版).2020.39(08):14-19.
- [29] Toshihiro Asakura , Yoshiyuki Kojima. Tunnel maintenance in Japan[J].Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, (18): 161 -168.
- [30] M.A.Meguid.The effect of erosion voids on existing tunnel linings[J].Tunnelling and Underground Space Technology.2009,24,(3):278~286.
- [31] 潘洪科, 杨林德, 黄慷.公路隧道偏压效应与衬砌裂缝的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(18): 3311-3315.
- [32] 叶飞, 何川, 夏永旭.公路隧道衬砌裂缝的跟踪监测与分析研究[J]. 土木工程学报, 2010(07): 97-104.
- [33] 刘勇, 宋玉香.浅埋偏压连拱隧道开裂原因及防治措施[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2006(02): 5-9.
- [34] 孙洋, 李书强, 左昌群等.软岩公路隧道群二衬开裂机理分析[J]. 施工技术, 2014(11): 76-79.
- [35] Housner G W, Bergman L A, Caughey T K, etc.al. Structural Control: Past, Present, and Future[J] Journal of Engineering Mechanics, 1997(9):887-971.
- [36] 胡益铸,李尚,飞云江跨海特大桥安全监测及巡检系统设计[J]公路交通技术.2014(04):105-109.
- [37] 赵建虎,王爱学,精密海洋测量与数据处理技术及其应用进展[J] 海洋测绘.2015.35(6):1-7
- [38] 王俊伟,谢海周.温州市大门大桥健康监测系统的设计与应用[J].公路,2016,61(10):125-128.
- [39] 郭建光,殷鹏程.昌赣客专赣州赣江特大桥健康监测系统设计[J].世界桥梁,2020,48(S1):73-79
- [40] 王翔,潘中明,王波基于雷达的斜拉索索力非接触遥测技术研究[J]世界桥梁,2019,47(03):49-53.
- [41] Hiroyasu H, Kazuo I. Development of Dam Inspection Underwater Robot[J]. Journal of Robotics,Net working and Artificial Life,2019,6(1):18.
- [42] 马晔,邹露鹏,张理轻.无人机加载光学摄像及红外成像系统对海上特大桥塔索质量检测的运用技术[J].公路交通科技,2018,35(08):89-93+105.
- [43] Morgenthal G. Hallermann N, Kersten J, et al. Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges. Automation in Construction. 2019.97.77-95.
- [44] 勾红叶,杨彪,华辉,谢蕊,刘畅,刘雨,蒲黔辉.桥梁信息化及智能桥梁 2019 年度研究进展[J]土木与环境工程学报(中英文),2020,42(05):14-27.
- [45] 周建庭,赵亚字,何沁,张平,张洪.基于磁记忆的镀锌钢绞线腐蚀检测试验[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(01):81-89.
- [46] 凌建明,张玉,满立,等.公路边坡智能化监测体系研究进展[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(07):2118-2136.
- [47] 胡丽敏.边坡失稳的简易监测法[J].有色矿山,1994,(06):12-17.
- [48] 焦泽珍,李静涛,焦步青.基于智能全站仪的矿区边坡监测三维可视化方法[J].露天采矿技术,2015,(10):12-14+18.DOI:10.13235/j.cnki.ltcn.2015.10.004.
- [49] 马福义.鹤岗矿区工业广场“空天地”变形监测与预警系统研究[D].中国矿业大学(北

- 京),2019.
- [50] 程俊, 孙良.边坡稳定性监测在山区高速公路施工中的应用 JJ.公路,2019,64(7):5
- [51] 郭永建, 王少飞, 李文杰.应力监测在公路岩质边坡中的应用研究[J].岩土力学,2013,34(05):1397-1402
- [52] 王德咏, 周红星, 梁小丛.高速公路岩质边坡锚索应力监测及预警: 2017 年全国锚固与注浆技术学术研讨会暨广东省第一届锚固与注浆技术学术研讨会 C],中国广东广州,2017.
- [53] 郭永建, 谢永利, 牛富生.公路岩质边坡应力监测离心模型试验与应用 J.同济大学学报(自然科学版),2013.41(11):1697-1701.
- [54] 王钰轲, 薛玉洁, 宋迎宾, 等.强降雨致洪因素下渗流对高速公路路基稳定性的影响[J].河南科学,2024,42(01):137-146.
- [55] Tiranti, D., Mallen, L., Nicolò, G., 2023. Rockfall hazard estimation and related applications for a preliminary risk assessment at regional scale: an example from northwestern Italian Alps. LANDSLIDES, 20(8):1691-1704.
- [56] 范晓雷, 李怀忠, 雒永刚, 等.基于“感、传、智、用”全业务链的智能地质灾害监测预警系统的工程应用[J].卫星应用,2020,(06):46-54.
- [57] 杜洋. 固西高速公路边坡安全智能监测预警解决方案 [J]. 中国交通信息化,2022,(11):149-151.
- [58] 殷文彦, 李冠. 基于多源数据山区地质灾害监测预警应用研究 [J/OL]. 北京测绘,1-6[2024-10-08].
- [59] 赵晶. 地质灾害监测预警管理平台建设研究 [J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(03):114-116+119.
- [60] Lv, Z., Liu, T., Kong, X., Shi, C., Benediktsson, J., 2020. Landslide inventory mapping with bitemporal aerial remote sensing images based on the dual-path fully convolutional network. IEEE J. Selected Topic Appl. Earth Observ. Remote Sens. 13, 4575–4584.
- [61] Wang, J., Xiao, Z., Liu, C., Zhao, D., Yao, Z., 2019a. Deep learning for picking seismic arrival times. J. Geophys. Res. Solid Earth 124, 6612–6624.
- [62] 朱合华, 吴江斌. 管线三维可视化建模[J]. 地下空间与工程学报, 2005, (01):30-33.
- [63] 朱良峰, 潘信, 吴信才. 三维地质建模及可视化系统的设计与开发[J]. 岩土力学, 2006, (05):828-832.
- [64] 徐卫亚, 孟永东, 田斌, 谈小龙, 刘大文, 复杂岩质高边坡三维地质建模及虚拟现实可视化[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, (12):2385-2397.
- [65] 刘大安, 杨志法, 柯天河等, 综合地质信息系统及其应用研究[J]. 岩土工程学报 2000,22(2):182-185.
- [66] 李青元, 朱小弟, 曹代勇, 三维地质模型的数据模型研究[J]. 中国煤田地质, 2000(1):57-61.
- [67] 毛善军, 煤矿地理信息系统数据模型的研究[J]. 测绘学报, 1998, (4):331-337.
- [68] 王笑海, 基于三维拓扑格网结构 GIS 地层模型研究[D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 1999.
- [69] 梁桂兰, 徐卫亚等, 边坡工程监测信息可视化分析系统研发及应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(3):849-853.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

3.1.1 高速公路线性工程偶发性灾害致灾模式及灾变机理

陕西省位于中国南北地质衔接与东西地质转变的枢纽区，大地构造复杂，地壳分异明显，构造形变强烈，新构造活动活跃。其地域分异显著，孕灾模式各异。其中，陕北黄土高原水土流失严重，典型灾害为崩塌、滑坡、泥石流；关中平原地层松散，典型灾害为地面沉降、地裂缝；陕南秦巴山区地形陡峭、构造活跃，强降雨下动力灾害显著，而这些区域性灾害易对省内高速公路这类线性工程造成偶发性威胁。

本研究将基于 G5 京昆高速，G65 包茂高速等局部重点路段，对偶发性灾害的时空分布规律、成灾模式、演化过程、致灾机理和危险性评价指标，明确灾害的触发条件、发展过程、破坏形式等，通过构建公路线性工程偶发性灾害全要素系统调查技术，形成高速公路线性工程偶发性灾害风险“一张图”。

3.1.2 高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备研发

研发高速公路基础病害“空-地”协同全天候高精度智能巡检装备，建立声-电磁融合快速智能探测技术，探明高速公路基础病害发育规律，构建高速公路道路运行状态诊断与病害智慧预警技术，实现高速公路基础设施病害的智慧感知与及时预警，并拟构建一个以小型车辆为承载平台的 AI 巡检及应急通信保障系统，同时集成材料中多技术模块，形成“巡检 - 通信 - 决策”一体化能力。

3.1.3 高速公路基础设施（路-桥-隧-坡）智能监测关键技术与装备研发

结合无人机搭载激光雷达和地面雷达技术，以及多种轻量化传感监测技术，开展桥隧坡病害快速识别与定位研究，实现对基础设施的动态监测与数据采集，构建病害监测与评估系统。基于低空遥感及地面雷达研究路基病害快速识别与定位技术，提出路基病害精确监测关键技术，开发轻量化数据采集及传输系统，实现路基病害数据的实时、远程、高效传输；对高速公路桥梁结构异常变形、隧道空间变形和边坡失稳等问题实现集成感知与监测。开发新一代基于物联网的结构安全监测技术、通讯技术及相关设备，重点研制基于激光、图像测量和多普勒微变形雷达原理的结构动态变形及裂缝监测设备、基于新型的固体阵列扫描式光敏成像的微光 AI 摄像头设备、基于飞秒技术的新一代光纤光栅系列传感器、基于 5G 通讯和卫星传输的联合数据通讯技术，研制用于高危边坡尤其是隧道洞口的基于物联网的高边坡崩塌监测传感器、基于北斗、光电技术的新一代振动倾计位移一体化变形监测设备等。

3.1.4 高速公路基础设施多源异构数字化自动管控平台

基于人工智能算法，明确高速公路偶发性灾害应急协调等级划分模式，构建偶发性灾害与应急处理措施映射关系模型；研究多源异构数据深度挖掘方法，构建多源异构数据跨尺度映射关系，基于人工智能建立搭建多模态神经网络模型，开发多源大数据深度融合算法；建立高速公路偶发性灾害动态数据信息库，提出偶发性灾害预警关键参数组合，建立高速公路多参数融合预警模型；整合不同尺度预警关键参数和实时感知数据，构建数字孪生数据库，形成高速公路基础设施灾害预警数字孪生底座；基于多源异构数据，开发软性组合管控模块及硬阻断紧急处置技术，构建多源异构“通感一体化”自动管控平台。

3.2 主要研究内容及实施方案

本研究旨在全面提升公路线性工程对偶发性灾害的防控能力，通过系统化、智能化的技术手段，实现对陕西地区高速公路典型偶发性灾害的有效监测、预警及应急处置。研究内容覆盖了高速公路基础设施偶发性灾害致灾模式及灾变机理，偶发性灾害智能感知，全天候高精度智能巡检技术与装备，（路-桥-隧-坡）智能监测关键技术与装备，以及综合决策预警平台等多个方面。

3.2.1 高速公路线性工程偶发性灾害致灾模式及灾变机理

3.2.1.1 高速公路线性工程偶发性灾害空间分异致灾模式

（1）研究方法

基于 G5 京昆高速，G65 包茂高速等局部重点路段，通过对陕北黄土高原、关中平原及陕南山地进行分区，系统整合地质、地形、气象及历史灾害等多源数据，利用 GIS 空间分析与数理统计，重点揭示不同孕灾环境下关键致灾因素（如坡形、岩性）与诱发因素（如降雨、冻融）的交互作用机制及灾害空间分异规律，进而归纳提炼不同区域灾害的致灾模式。

（2）技术路线

系统集成遥感影像、数字高程模型、地质图、构造图、长序列气象水文数据、详细路网与工程设计资料以及历史灾害详录，并通过空间配准与标准化处理，在 GIS 平台中建立统一的时空属性数据库，为空间关联分析奠定坚实基础；综合运用 GIS 空间叠加分析与统计模型，首先分单元进行灾害发育规律统计，明确各单元灾害多发区、优势灾种（重点类型）及其空间聚集特征。在点位尺度上，分

区定量甄别关键背景因子与差异化气候诱发因子（如陕北的降雨峰值强度、陕南的累积降雨量、关中地区的冻融日循环次数）的耦合控制作用。基于前述分区定量分析结果，归纳提炼具有明确区域标识的“孕灾环境组合-触发条件-破坏过程-工程影响”概念模型，例如“陕北黄土梁峁区短时强降雨诱发型浅层黄土滑坡-淤埋路基模式”、“陕南秦巴山区长历时降雨激发型岩质崩塌-击穿路面模式”以及“关中台塬区冻融循环弱化型路基失稳-不均匀沉降模式”等，并细化描述其典型破坏形式与交通中断时长等影响特征。

3.2.1.2 高速公路线性工程偶发性灾害致灾机理

（1）研究方法

以前期分区致灾模式研究为基础，选取各单元典型灾害案例，综合运用现场调研、理论建模与数值模拟相结合的方法，分区分类系统探究多因素耦合作用下公路线性工程的偶发性灾害机理。通过现场调研与数据采集，获取地质、环境及灾害案例的真实数据，依托文献研究梳理既有成果，明确关键致灾因子及其相互作用的理论框架；构建分区敏感性评价模型，识别不同区域的主导致灾因子组合；采用数值模拟手段，建立基于各单元典型地质模型与气候驱动场景的多场耦合模型，动态模拟区域特异性气候过程与岩土体相互作用下的灾害触发与发展全过程，揭示其具有区域代表性的灾变机制。

（2）技术路线

系统获取地理空间数据、地质勘察资料、长期气象观测序列、地震活动记录以及详实的历史灾害案例库，为后续分析构建可靠的数据基础。通过 GIS 与机器学习算法，分区量化各因子权重，明确三大单元主导致灾因子序次的差异。在理论分析基础上，针对不同单元的典型灾害模式，构建相应的精细化数值模型。例如，对陕北黄土滑坡，建立考虑黄土垂直节理与非饱和渗流的流固耦合模型，模拟短时强降雨下斜坡稳定性演化；对关中地区，建立水-热-力耦合模型，模拟冻融循环对路基土体强度的累积弱化效应；对陕南岩质崩塌，建立考虑岩体结构面与裂隙水压力的离散元模型，模拟长历时降雨下危岩体的失稳过程。通过模拟与案例、监测数据对比反演，分区验证和阐明灾害物理力学机制，最终形成基于机理的、分区域灾害危险性区划图。

3.2.1.3 高速公路线性工程偶发性灾害风险“一张图”

(1) 研究方法

以“空-天-地”多源灾害调查技术手段为基础，融合陕西省自然灾害普查、偶发性灾害风险评价等方法，研究多源异构数据融合和尺度转换方法，构建公路线性工程偶发性灾害全要素系统调查技术。研制一套满足高速公路线性工程偶发性灾害危险性评价需求的灾害风险多要素图集编制技术，形成综合表达工程分布、灾害特征与风险等级分区等多要素的高速公路线性工程偶发性灾害风险“一张图”。

(2) 技术路线

基于“空-天-地”一体化调查技术，整合遥感影像、地质灾害普查数据、现场监测信息等多源异构数据。通过数据融合与尺度转换方法，解决不同来源、不同分辨率数据之间的协同问题，实现从区域到工程尺度的信息衔接，为全要素调查提供统一、连续的数据基础。结合陕西省自然灾害普查成果，开展典型路段现场调查，验证遥感解译与模型分析结果的准确性。该方法能直接获取灾害特征、工程状况等第一手资料，提高数据可靠性与评价模型的实用性。系统梳理灾害风险评价理论与方法，将前期研究揭示的各单元主导灾害类型、关键致灾因子权重、气候触发阈值等知识，植入到灾害危险性评价模型中，构建分区校正的风险评价模型。基于上述方法与模型，研制多要素风险图集编制技术，生成的“一张图”核心图层应包括：①基于地理单元和机理模型的灾害危险性分区图；②高速公路沿线灾害重点类型（崩塌、滑坡、泥石流等）分布图；③关键气候致灾因子（如不同重现期降雨强度、冻融强度）空间分布图；④综合风险等级分区图。该图集将直观呈现“灾害在哪（空间分异）、主要是什么（重点类型）、什么条件下易发生（气候影响）、风险高低如何”，为精准防灾提供决策支持。

3.2.2 高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备研发

3.2.2.1 高速公路基础设施病害“声-电-磁”高精度融合快速探测技术

(1) 研究方法

基于三维激光雷达（LiDAR）成像系统对路面高精度测距扫描，获取关键点云数据，结合高分辨率全画幅传感器系统，对道路路面病害问题进行精确检测与识别；采用探地雷达和弹性波快速探测技术，获取高精度多物理场地质信息，构建精细化地质体三维透视模型，形成道路病害三维立体透视与全景实时成像技术；

结合机器视觉方法，实现道路病害检测工作的自动化和智能化，建立高速公路基础病害声-电-磁高精度融合快速智能探测技术体系。

（2）技术路线

本技术路线旨在构建一套针对高速公路路面与路基结构的‘空-地-内’一体化融合探测体系。通过搭载三维激光雷达、高分辨率相机、探地雷达及弹性波传感器的移动平台，在 GNSS/IMU 组合导航系统提供的统一时空基准下，同步采集道路表观与地下的多物理场原始数据。对各源数据进行独立的预处理与特征提取：对激光雷达点云进行去噪、配准与分割，提取路面三维几何形变特征；对光学图像进行增强与分割，提取裂缝、修补等纹理信息；对探地雷达数据进行滤波、增益调整与反褶积处理，提取介电异常与反射层位信息；对弹性波数据进行频谱与速度分析，提取波速、衰减等弹性参数。

将预处理后的地表激光雷达点云生成高精度数字表面模型，作为空间参考基准，实现地表特征与地下探测数据的垂直关联与精确配准。在此基础上，建立基于探地雷达电磁参数与弹性波力学参数的正演模型，采用联合反演算法（如约束反演或数据同化）进行跨物理场反演，求解地下介质的介电常数与弹性模量等关键参数，从而提高对脱空、松散、含水等病害体的识别精度与分辨率。最后，将融合反演得到的多物理场属性数据，插值重建到统一的三维体素网格中，并利用三维可视化引擎实现地表纹理模型与地下多物理场属性模型的透明化、分层融合显示，形成直观的“道路透视”效果，完整展示病害体的三维空间形态与物性特征。

为支撑智能化分析，构建涵盖裂缝、坑槽、脱空等多种病害类型的“图像-点云-地球物理信号-三维模型”多模态样本数据库。在智能识别阶段，采用深度卷积神经网络（如 Faster R-CNN, U-Net 等）对高分辨率图像和点云衍生特征图进行训练，实现表观病害的自动分类、定位与量化。同时，开发混合深度学习模型（如 3D CNN、图神经网络等），直接对融合后的多物理场三维数据体进行端到端的特征学习与模式识别，建立从复杂物理场信号到内部病害类型与边界的智能映射。此外，利用多任务学习或知识图谱技术，挖掘表观特征与地下异常之间的内在关联规则，从而提升对病害成因与发展趋势的综合诊断能力。

3.2.2.2 高速公路基础病害空-地协同全天候高精度智能巡检装备研发

（1）研究方法

基于车载为主、无人机为辅的协同搭载模块化技术，研发可分别适配于路面快速移动探测车和无人机的平台化传感模块。通过车-机协同，实现对全线路面表观的全覆盖巡查以及对重点路段（如疑似病害区、高填深挖路段）路基内部的精细化探测，构成立体巡检能力；研发三维激光雷达成像系统、高分辨率全画幅传感器系统和探地雷达及弹性波快速探测系统，实现对公路路面状态与路基隐患的空-地协同全路段全要素高精度探测，形成高速公路基础设施病害空-地协同全天候高精度智能巡检装备体系。

（2）技术路线

针对高分辨率全画幅传感模块，将结合光学仿真与实地标定，优化光学设计与稳定平台，并集成多光谱成像能力以增强病害特征。对于三维激光雷达成像模块，重点研究基于多线束激光雷达与 SLAM（即时定位与地图构建）技术的动态点云采集与实时拼接算法，确保移动扫描的精度与效率。探地雷达与弹性波探测模块，则通过多频天线阵列设计与弹性波一体化激收技术，并结合先进的信号处理与层析成像算法，实现对道路内部结构及隐蔽病害的高效探测。所有模块均采用标准化机械接口与数据协议，确保其在车载与机载平台间的快速互换与集成。

将基于路网信息与任务优先级，开发动态任务规划算法，智能分配无人机（广域、快速）与探测车（重点、精细）的巡检区域，实现全路段无盲区覆盖。为解决空-地数据的时空统一问题，将融合高精度组合导航（GPS/IMU）与 UWB（超宽带）定位技术，并采用特征匹配（如图像 SIFT 特征、点云 ICP 算法）进行自动配准。通过开发基于卡尔曼滤波及深度学习框架的多源数据融合模型，将可见光影像、激光点云、地质雷达波等异构数据进行对齐与集成，构建道路基础设施的“空-地一体化”三维全要素数字模型。利用融合后的统一数据模型，构建包含路面裂缝、结构变形、内部缺陷等多类病害的样本库。研究深度学习算法（如卷积神经网络与 Transformer 的混合模型），对融合数据进行端到端的自动分析与病害识别，实现从数据到知识的智能升华，形成高速公路基础设施病害空-地协同全天候高精度智能巡检装备体系。

3.2.2.3 高速公路道路运营状态智能诊断及预测

（1）研究方法

构建多传感器融合系统，采集全要素感知数据，开发道路运行状态诊断模型及自动诊断程序，实现实时精准监测；运用深度学习技术融合多源异构信息，建立病害识别与状态评估的非线性模型，提升数据处理与挖掘能力；建立智慧预警系统，实现道路病害演化智能预测与综合评价。

（2）技术路线

通过系统工程方法，设计并集成车载/机载移动测量平台，协同布置高清视觉传感器、三维激光雷达、高精度定位与惯性导航单元等，形成互补的感知阵列。关键技术在于攻克多传感器硬件同步触发、时空基准统一（通过联合标定与紧耦合算法）以及多模态数据（二维图像、三维点云、时空轨迹）的精确配准与融合，从而构建起一个能够实时、同步采集道路表面纹理、几何形变、空间位置等全要素信息的高质量数据基底，为上层模型提供可靠输入。

针对道路病害识别，设计并训练基于深度学习的多模态融合神经网络（如双流网络、跨模态注意力网络），该模型能够同时处理图像的颜色纹理信息和点云的几何结构信息，显著提升在复杂光照、积水等干扰环境下对裂缝、坑槽、剥落等病害的检测精度与鲁棒性。同时，基于融合数据提取的量化指标（如平整度、车辙深度、病害密度），构建非线性机器学习模型（如梯度提升决策树或深度神经网络），实现对道路运行状态（如路面状况指数 PCI）的综合、精细化评估，完成从原始数据到结构化语义认知的转化。

通过整合历史多次巡检数据，构建道路状态与病害的时空序列数据集。引入时空图神经网络或时序 Transformer 等先进模型，该模型不仅能够学习单一病害点自身的时间演化规律，还能捕捉路网空间中相邻区域病害发展的相互影响。此外，模型将耦合交通荷载数据、气象环境信息等多源外部因素，实现对关键病害发展速率与道路性能退化趋势的智能预测。基于预测结果，研究将建立多阈值、多等级的智慧预警规则引擎，并开发集成 GIS 可视化、养护优先级分析与报告自动生成功能的决策支持平台，最终形成“监测-诊断-预测-预警-决策”的完整应用闭环。

3.2.3 高速公路基础设施（路-桥-隧-坡）智能监测关键技术与装备研发

3.2.3.1 高速公路路基病害轻量化智能监测关键技术

（1）研究方法

为提升路基结构在荷载与环境作用下的性能保持与快速恢复能力,研究基于无人机低空遥感与地面高精度雷达的路基病害快速识别与定位技术,实现路基裂缝、沉降等病害的高精度、大范围监测;开发轻量化的数据采集与传输系统,结合物联网与 5G、北斗短报文、卫星通信技术,实现路基病害数据的实时、远程、高效传输。最终形成服务于路基预防性养护与快速修复决策的智能监测技术体系,为提升路基韧性提供数据与模型支撑。

(2) 技术路线

针对大范围快速普查需求,研究基于无人机平台的低空遥感技术,通过获取高分辨率正射影像与激光点云数据,生成三维实景模型与数字高程模型,用于地表病害的初步筛查;针对重点区域或疑似病害点,融合地面高精度雷达(如三维激光扫描仪、探地雷达)进行高精度的详查与浅层内部探测,实现裂缝宽度、沉降量及内部空洞的精准量化。

为实现监测数据的实时汇聚与远程传输,开发轻量化的边缘智能采集与多模融合传输系统。设计低功耗、多接口的嵌入式采集终端,并嵌入轻量化 AI 推理引擎,实现数据的本地预处理与压缩。集成 5G、北斗短报文及低轨卫星通信的多模传输终端,确保在任何环境下病害报警信息与核心数据都能实时、可靠回传至云端平台。最后,通过系统集成与工程验证,完成多源信息融合与决策支持平台的开发。

3.2.3.2 高速公路桥梁结构群轻量化智能监测关键技术

(1) 研究方法

结合高速检测公司现有激光位移计、静力水准仪、倾角计、裂缝计等智能终端设备,获取桥梁结构形变信息,迭代升级高速公路桥梁结构形变监测设备;应用北斗短报文、4G 既有光纤保障监测数据可靠传输;基于无人机搭载空气耦合与遥感技术开展高速公路桥梁结构航空探测,通过探地雷达和弹性波方法开展高速公路桥梁结构地面探测;依托数据采集设备、自动控制、网络传输与通信技术,实现对高速公路桥梁结构形变的智能感知与定期监测,形成高速公路桥梁结构群轻量化智能监测关键技术。

(2) 技术路线

通过对现有监测设备集成研发的方式,迭代升级轻量化的高速公路桥梁结构

监测设备；并通过北斗短报文、4G 等研发在多种情况下稳定传输数据的通信方案，保证监测数据正确及时的上传。通过集成无人机搭载空气耦合雷达与遥感设备，研究自动化任务规划与遥感数据处理算法，实现桥梁宏观形变与表观病害的快速巡查；同时，系统应用探地雷达与弹性波方法，形成标准化的桥面与结构内部无损检测流程。研究多源探测数据的时空配准与融合方法，将航空探测的面状信息与地面探测的点状深度信息相结合，生成桥梁结构健康状况的综合诊断图谱。

基于上述多源、海量的监测数据，建立结构形变智能感知与预警模型。通过构建标准化的多源异构数据库，并利用机器学习方法从时序数据中提取关键特征，研究结构响应与荷载、环境之间的映射关系，建立基于正常状态学习与多级阈值判定的智能预警算法。最终，通过系统集成与工程验证，将迭代设备、传输网络、探测平台与智能算法整合于一体化的软件系统中，并在典型桥梁群开展长期示范应用，从监测精度、系统稳定性、预警效能及经济性等多维度进行评估与优化，从而形成一套可复制、可推广的轻量化智能监测整体解决方案。

3.2.3.3 高速公路隧道群结构智能监测关键技术

(1) 研究方法

通过分析陕西公路隧道的历年病害数据，总结其类型、分布与成因，评估对结构长期性能的影响；研发基于分布式光纤的隧道变形在线监测方法与智能辨识模型；建立融合多源数据的隧道服役性能评价体系与动态仿真技术，提出基于应力特征的性能分级标准，并利用 BIM 技术实现结构应力与安全状态的精细化呈现；最终构建一套完整的高速公路隧道群结构长期健康监测与健康管理体系。

(2) 技术路线

通过系统收集与标准化处理陕西不同地质区段及运营年限的代表性隧道历史检查数据，构建结构化病害数据库。运用统计分析与空间信息技术，揭示裂缝、渗漏等病害的分布规律，并关联地质、水文、结构及时间等多维因素，明晰其主要成因。进而，结合力学理论推断典型病害对结构长期承载能力与稳定性的衰减路径，为监测与评价提供理论依据。研发基于分布式光纤的隧道变形智能感知方法。针对长距离隧道环境的监测需求，优化分布式光纤传感网络布设方案。核心在于构建数据与模型双驱动的智能辨识模型：融合隧道变形先验力学知识，利用机器学习算法，建立从光纤实时采集的连续应变场、温度场数据到隧道全断面三

维空间变形场的智能反演模型，实现结构变形的高分辨率、整体性精准感知。

建立多源数据融合的服役性能动态评价体系。整合光纤监测数据、人工巡检与车载检测等多源异构信息，构建以应力分布特征为核心的综合性能指标体系。通过数值模拟与历史数据验证，制定基于应力水平与安全系数的服役性能分级标准。并开发与实时监测数据联动的快速力学仿真技术，动态演算与可视化展示结构内部应力重分布过程，实现性能状态的实时仿真评估。集成 BIM 技术构建隧道群长期健康监测体系。将实时监测数据、性能评价结果与动态仿真应力云图集成至隧道 BIM 模型中，实现结构安全状态的精细化、三维可视化表征，形成“数字孪生”雏形。在此基础上，设计涵盖“感知、传输、数据、模型、应用”全链条的隧道群监测系统架构，制定基于性能等级的多级预警与养护决策流程，最终形成一套可感知、可诊断、可预警、可管控的长期健康智能监测与管理体系。

3.2.3.4 高速公路边坡失稳协同监测关键技术与预警装备研发

(1) 研究方法

通过升级 GNSS，振动倾角一体化设备，振动倾角墩梁位移一体化设备, AI 摄像头等地面监测设备并布设于关键点位，构建高速公路边坡地面集成感知体系；融合 InSAR、无人机雷达、北斗高精定位、5G 与 AI 智能分析等多源技术，搭建“空-天-地”协同监测平台，实现边坡稳定性多维度感知；进一步集成爆闪、通讯、照明、广播等装置，形成边坡失稳监测预警装备系统，全面提升边坡风险预警与响应能力。

(2) 技术路线

基于地质力学分析与历史灾害数据，在边坡关键易发位置科学部署迭代升级后的 GNSS、振动倾角位移一体化设备，振动倾角墩梁位移一体化设备和 AI 摄像头等地面传感设备，形成高精度地面监测网。同步规划 InSAR 卫星遥感时序观测与无人机机载雷达的定期/应急巡检，并集成北斗高精定位与 5G 传输技术，从而构建一个覆盖“空、天、地”三个维度的立体化、实时化数据采集体系。研发多源数据融合与智能分析模型作为核心技术引擎。建立统一时空基准，对获取的异构数据进行标准化清洗与校正。利用机器学习与深度学习算法，从位移、形变、应力、环境等多维度数据中提取特征，并通过数据融合模型进行交叉验证与综合分析，生成综合稳定性评价指标。进而，开发基于 AI 的智能预警模型，实

现从实时异常识别到失稳趋势预测的跃升。

研发并集成爆闪灯、高音喇叭、通讯中继等终端设备，设计其与监测平台的通信协议及联动控制逻辑。依据风险评估等级，制定差异化、层级化的预警信号触发策略，并通过实验室与现场测试，确保预警信息发布链路的可靠性与时效性。研发集数据管理、智能分析、可视化与预警发布于一体的“空-天-地”协同监测软件平台。选择典型边坡路段开展示范应用，进行长期运行与对比分析，利用实测数据持续优化算法模型与预警阈值，最终形成可复制、可推广的成套技术装备与解决方案。

3.2.4 高速公路基础设施多源异构数字化自动管控平台

3.2.4.1 基于人工智能的“空-天-地”多源大数据深度融合分析

(1) 研究方法

以“空-天-地”多源异构监测数据为基础，研究多源数据深度挖掘方法，提取多源异构数据关键特征，构建“空-天-地”多源异构数据跨尺度映射关系；基于深度学习算法，提出多模态神经网络模型，针对不同数据类型的特性，优化模型架构，以提高分析精度和鲁棒性；利用人工智能，研究数据级、特征级、决策级三级融合方法，开发多源大数据深度融合分析算法，实现信息的互补与增强。

(2) 技术路线

本研究将在“空-天-地”多源数据整合分析框架下，系统探究从数据处理到智能决策的关键技术。研究将以多源数据的深度对齐与标准化为基础，运用几何校正、辐射归一化及自监督特征学习等方法，提取各类数据的关键信息，并重点探索融合物理机制与神经网络注意力模型的跨尺度关联方法，以构建从地面测量到遥感观测的定量映射关系。在此基础上，将面向影像、点云、序列等异构模态，设计定制化的深度编码网络，并通过跨模态交互模块与元学习训练策略，构建鲁棒高效的多模态分析模型。进一步，将贯穿数据、特征与决策三个层级，系统性研发融合算法：包括基于生成对抗网络的原始数据互补增强、基于图模型与自适应加权的特征级融合，以及引入可解释性推理的决策级集成方法，最终形成一套完整的、可实现信息互补与认知增强的智能分析技术体系，并在典型应用场景中验证其效能。

3.2.4.2 高速公路基础设施灾害多参数融合预测模型

（1）研究方法

结合高速公路基础设施灾害调研的案例，探究动态样本数据库的构建方法，实现最新的偶发性灾害案例的自主更新与补充，建立高速公路偶发性灾害动态数据信息库；基于多源大数据深度融合分析算法，研究不同参数之间的相关性和互补性，提出偶发性灾害预警关键参数组合的挖掘方法；以偶发性灾害动态信息数据库为基础，研究高速公路基础设施灾害动态预测方法，结合 LSTM 时序预测算法，建立多参数融合预警模型，实现高速公路基础设施灾害风险动态预测。

（2）技术路线

本研究以高速公路偶发性灾害的预警预测为核心目标，采取从数据构建、机理分析到模型研发的递进路径展开。研究将立足真实灾害调研案例，探讨动态样本数据库的构建与更新机制，设计一套融合自动化采集与专家校验的数据入库流程，从而建立可持续扩充的高速公路偶发性灾害动态信息库。在此基础上，依托多源大数据深度融合分析方法，针对各类监测参数，如结构响应、气象条件、交通荷载等，系统剖析参数之间的关联模式与互补性，提出基于统计分析与机器学习的灾害敏感性关键参数组合挖掘方法。最后，以该动态数据库与关键参数体系为基础，重点研究适用于灾害时序演化特征的动态预测方法，通过融合长短期记忆网络（LSTM）与多参数耦合机制，构建一个能够综合反映灾害风险演变的多源信息融合预警模型，最终实现对高速公路基础设施灾害风险的动态、精准预测。

3.2.4.3 高速公路基础设施灾害预警数字孪生底座

（1）研究方法

研究高速公路基础设施不同灾害参数之间的相关性和互补性，探究灾害预警关键参数组合的挖掘方法，采用约束三角剖分理论，建立公路基础设施三维数字化预警模型，整合不同尺度预警关键参数和实时感知数据，构建数字孪生数据库，形成高速公路基础设施灾害预警数字孪生底座。

（2）技术路线

围绕高速公路基础设施灾害预警数字孪生底座的构建目标，本研究将首先基于不同灾害监测参数，如结构应力、环境腐蚀、交通荷载、地质位移等，系统分析参数之间的统计关联与功能互补性，运用相关性分析、主成分分析及因果推断等方法，筛选并确定用于预警的关键参数组合。在此基础上，引入约束三角剖分

理论，对公路基础设施进行精细化三维几何与拓扑重建，建立融合多物理场信息的数字化预警模型，实现从局部构件到整体路网的多尺度表达。进一步地，通过数据同化与接口集成技术，将实时传感数据、定期检测信息与上述多尺度预警关键参数动态接入模型，构建起时空同步的数字孪生数据库。最终，形成以“三维模型+实时数据+预警规则”为核心的高速公路基础设施灾害预警数字孪生底座，为风险动态仿真、预警决策与养护管理提供统一、可视化的数据基础与平台支撑。

3.2.4.4 高速公路路网灾变应急联动处置策略

(1) 研究方法

融合地质、气象等多源数据，运用智能算法挖掘关键预警因子并建立灾害-措施映射模型，提出隧道群应急资源优化调度方法与救援能力动态评估框架。在此基础上，设计基于 5G 与无线自组网的“空-天-地”一体化数据协同传输机制与平台架构，最终形成集成智能预警、决策支持与多级协同的应急联动技术解决方案。

(2) 技术路线

本研究聚焦高速公路路网灾变应急联动处置的关键技术，拟按以下方案系统推进。首先，将融合地质、气象、交通流等多源异构数据，运用机器学习与因果分析等智能算法，挖掘灾害演化的关键预警因子，并建立灾害场景与处置措施间的动态映射模型。其次，针对隧道群等关键节点，研究应急资源（人员、设备、物资）的优化调度模型与路径规划方法，并构建涵盖事前、事中、事后全过程的应急救援能力动态评估指标体系与仿真框架。进而，面向应急响应中的数据实时协同需求，研究基于 5G、北斗与无线自组网（Mesh）的“空-天-地”一体化异构网络融合传输机制，设计支持多级联动的开放式数据平台架构与接口规范。最终，通过集成智能预警、资源调度、决策支持与协同通信等核心模块，形成一套完整的、可服务于应急管理部的智能化应急联动技术解决方案原型。

3.2.4.5 高速公路基础设施多源异构“通感一体化”自动管控平台

(1) 研究方法

解决不同感知设备数据在标准、格式与接入方式上的异构性问题，重点研发统一的数据管理系统，实现多源数据的集成管理、融合分析与互补增强；综合运用大数据、人工智能、北斗定位及空间信息技术，对实时预警信息进行智能研判

并自动生成应急预案；建立与柔性组合系统的协同联动机制，研究基于硬阻断的紧急处置手段；结合 BIM+GIS 技术与实时监控、动态感知能力，构建自动化控制与反馈机制，最终形成多源异构“通感一体化”的自动管控平台，实现快速响应与智能处置。

（2）技术路线

本研究旨在构建一套集智能预警、应急联动与自动管控于一体的高速公路灾害应对体系。针对高速公路基础设施、环境与交通流等不同来源的监测数据存在标准不一、格式多样、接入方式各异的问题，研发统一的多源数据管理系统，实现对各类感知设备数据的集成接入、标准化治理与高效管理。在此基础上，综合运用大数据分析、人工智能、北斗高精度定位及空间信息技术，开展多源信息的深度融合与协同分析，支撑对灾害风险态势的实时研判与预警信息的智能生成。

基于上述多源数据的融合分析结果，构建灾害风险智能评估模型，实现对突发风险的动态感知、早期识别与趋势预测。进一步结合预案库与推理机制，研究面向不同灾害场景的应急预案自动生成技术，形成结构完整、可操作性强的应急处置方案，提升响应速度与决策科学性。

设计刚性控制与柔性引导相结合的应急联动体系，研究在紧急情况下基于“硬阻断”的快速处置手段，包括交通信号强制干预、路侧物理拦截设备联动控制等；同时，结合“柔性组合”系统，通过可变情报板、智能车载终端、移动应用等多渠道发布动态诱导信息，实现刚性拦截与柔性疏解的协同运作，提高应急处置效率与道路通行安全。

深度融合 BIM 与 GIS 技术，集成基础设施静态信息与实时监控、动态感知数据流，构建具备“感知—分析—决策—控制—反馈”全链条能力的“通感一体化”综合管控平台。该平台支持自动化指令下发、设备联动控制与处置效果动态评估，形成对高速公路突发风险的快速响应、协同处置与闭环管理能力，最终实现从风险预警到处置恢复的全程智能化管控。

3.3 技术路线

3.3.1 研究方案

本项目拟采用理论研究、技术研究、系统装备研发等方法开展研究。

3.3.1.1 理论研究

(1) 高速公路线性工程偶发性灾害空间分异致灾模式

深入探讨陕北黄土高原、关中平原和陕南山地等不同区域高速公路线性工程中偶发性灾害的分布特点，包括滑坡、泥石流、塌方和洪水等灾害类型。研究将利用遥感技术获取区域地形、植被及气象数据，结合 GIS（地理信息系统）进行空间分析，以识别高风险区域。同时，通过历史数据分析，明确这些灾害在各区域的发生频率和时效性，并探讨其演变模式与趋势。此外，研究将综合考虑气象水文（如降雨量、降水强度）、地形地貌（如坡度、坡形）和地质构造（如岩性、断层分布）等孕灾因素，系统揭示其对灾害的控制作用，特别关注坡形坡度和地层岩性等关键致灾因素的影响。数据收集将结合现场调查与历史灾害记录，利用统计分析软件进行处理，评估降雨、冻融等诱发因素对灾害发生的影响机制，并应用多元回归分析探讨不同因素之间的关系。最终，研究将通过模型建立与验证，形成陕西公路偶发性灾害的空间分异致灾模式。

(2) 高速公路线性工程偶发性灾害致灾机理

深入探讨坡度、岩性、降雨量、气温和地震强度等关键因素对高速公路线性工程偶发性灾害的致灾敏感性，明确各因素对灾害影响的程度和权重。通过定量分析，研究将利用统计分析软件和多元回归模型，揭示每个因素在灾害发生中的相对重要性，并重点研究不同致灾因素之间的相互作用，例如降雨量与地层岩性之间的耦合关系，以及冻雨与路面结冰的互馈作用。此外，研究将开展高速公路线性工程偶发性灾害的多场分布研究，结合遥感技术和地理信息系统（GIS），分析在多场耦合作用下的灾害发生机理。将进行数值模拟研究，运用有限元分析和流体动力学模型，结合理论分析与模拟结果，探讨在多因素相互作用下，山体崩塌、滑坡、泥石流及路面塌陷等灾害的灾变机理，深入分析灾害的触发条件、发展过程和破坏形式。

(3) 高速公路偶发性灾害应急协调机制

本研究将获取高速公路的地质、气象和水文等多源数据，重点运用非线性方法和人工智能算法，深入探讨偶发性灾害应急协调的关键评价因子和评价指标。在理论研究方面，将构建一个综合的评价框架，分析不同类型的偶发性灾害（如滑坡、泥石流、洪水等）的发生机制和影响因素，识别并评估降雨强度、土壤湿度、气温变化、地质特征和交通流量等关键因子在灾害发生中的作用。研究将运

用非线性回归和多元统计分析方法,以及机器学习模型如随机森林和支持向量机,建立灾害预测模型,以量化不同因子对灾害的影响程度并确定其权重。同时,将明确高速公路偶发性灾害应急协调的等级划分模式,提出多级预警触发阈值,指导不同级别的灾害响应。此外,研究还将探讨适用于不同预警等级的应急处理措施,建立偶发性灾害与应急处理措施的映射关系模型,最终形成一个现场-指挥部-专家的多级联动预警技术体系,以提升整体应急协调能力,为高速公路遭遇偶发性灾害时的应急管理提供科学指导与理论支持。

3.3.1.2 技术研究

(1) 高速公路线性工程偶发性灾害风险“一张图”

本研究将以“空-天-地”多源灾害调查技术手段为基础,融合陕西省自然灾害普查和偶发性灾害风险评价等方法,深入研究多源异构数据的融合与尺度转换方法,以构建公路线性工程偶发性灾害的全要素系统调查技术。首先,将利用遥感技术获取卫星影像和航空摄影数据,结合地面实测数据,确保数据的时效性和准确性。在数据处理方面,采用先进的数据融合算法,如多分辨率图像融合和深度学习技术,以实现不同来源和格式的数据协同处理。基于此,研究将开发一套满足高速公路线性工程偶发性灾害危险性评价需求的灾害风险多要素图集编制技术,整合地质、气象、水文等多种要素,通过建立标准化的数据模型,确保各要素之间的兼容性和可比性,并运用 GIS 技术对数据进行空间可视化,形成综合表达工程分布、灾害特征与风险等级分区的多要素图集。此外,研究将建立基于机器学习的风险评估模型,利用历史灾害数据进行训练,生成可预测的风险评估结果,最终形成一幅综合反映高速公路线性工程偶发性灾害风险的“一张图”。

(2) 高速公路基础设施病害“声-电-磁”高精度融合快速探测技术

本研究将基于三维激光雷达(LiDAR)成像系统对路面进行高精度测距扫描,以获取关键的点云数据,并结合高分辨率全画幅传感器系统,针对道路路面病害问题进行精确检测与识别。通过 LiDAR 技术,能够生成高密度、高精度的三维点云数据,捕捉路面微小的变化和缺陷。同时,研究将采用探地雷达(GPR)和弹性波快速探测技术,获取高精度的多物理场地质信息,构建精细化的地质体三维透视模型,并结合道路病害的三维立体透视与全景实时成像技术,形成精确的可视化展示。进一步地,研究将结合机器视觉方法,实现道路病害检测工作的自

动化与智能化,应用计算机视觉算法和深度学习技术,自动识别和分类路面病害,如裂缝、坑洞和变形等,从而提高检测的效率和准确性。最终,研究将建立一套高速公路基础病害声-电-磁高精度融合快速智能探测技术体系。

按“表观-深层-融合”的探测逻辑推进技术实施:首先通过三维激光雷达成像系统对路面进行高精度测距扫描,同步结合高分辨率全画幅传感器采集路面图像数据,完成关键点云与图像数据的协同校准及预处理,为路面表观病害识别提供基础数据;其次采用探地雷达与弹性波快速探测技术,对道路地下及深层结构进行多物理场信息采集,通过数据反演与建模算法处理探测数据,构建精细化地质体三维透视模型,形成道路全结构的三维立体透视与全景成像能力;随后运用机器视觉方法,对预处理后的路面数据进行病害特征提取、分类与验证,优化自动化识别算法以提升智能识别精度;最后整合路面表观与地下结构的探测数据,建立声-电-磁多物理场信息的融合分析模型,通过数据互补与误差修正,形成高速公路基础病害的快速智能探测技术体系,实现对道路病害的全维度精准探测。

(3) 高速公路道路运营状态智能诊断及预测

本研究将构建多传感器融合系统,致力于采集全要素感知数据,以实现的道路运行状态的全面监测和诊断。该系统将整合来自不同传感器的数据,包括温度、湿度、交通流量、振动和声学信息,通过数据融合技术,确保信息的完整性与一致性。基于此,研究将开发道路运行状态诊断模型及自动诊断程序,利用实时数据输入,实现对道路状况的精准监测和快速反应。进一步地,研究将运用深度学习技术,融合多源异构信息,建立病害识别与状态评估的非线性模型,提升数据处理与挖掘能力。这一模型将通过大量历史数据进行训练,优化参数,增强对复杂病害模式的识别能力。此外,研究将建立智慧预警系统,实现对道路病害演化的智能预测与综合评价,通过分析历史病害演变数据和实时监测信息,为高效运维提供科学的决策支持。该系统将通过可视化界面向管理者提供实时反馈,确保在病害初期即能采取预防措施,从而提高道路的安全性和使用效率。

以“数据驱动-模型支撑-智能决策”为核心思路,按以下路径推进实施:首先从多传感器融合感知系统构建入手,结合道路场景特性筛选适配感知设备,依据路段运维需求优化布设方案,通过时间戳校准、数据清洗及多方法融合处理异构数据,构建全要素感知数据库,完成数据采集与预处理环节;其次基于融合数

据提取多维度关键特征，结合传统统计方法与机器学习技术训练状态诊断模型，开发具备数据接入、实时计算与可视化展示功能的自动诊断程序，实现道路运行状态的实时判定；随后采用深度学习技术，对路面图像与传感器时序数据进行分层融合，通过多分支神经网络提取病害特征，构建并优化非线性病害识别模型，同时通过样本扩充与模型轻量化处理，确保模型实时推理能力；最后基于历史病害与当前状态数据，构建病害演化预测模型与多维度综合评价体系，设定分级预警阈值并开发决策支持功能，形成“数据采集-状态诊断-病害识别-智慧预警-运维决策”的全流程闭环，为道路高效运维提供技术支撑。

(4) 高速公路基础设施（路-桥-隧-坡）轻量化智能监测关键技术体系

在路基健康监测方面，系统整合了无人机低空遥感进行大范围快速筛查，结合地面探地雷达实现病害精准定位，并布设分布式光纤传感网络，对路基内部的应变、温度等物理量进行连续在线监测。通过研发集成物联网、5G 高速网络、北斗短报文及卫星通信的轻量化数据采集与传输终端，有效解决了野外恶劣环境下监测数据实时、可靠、远程回传的难题。

对于桥梁结构安全，在充分利用现有激光位移计、静力水准仪等点式传感器的基础上，展开 AI 摄像头，振动倾角一体化设备，振动倾角墩梁位移一体化设备、雷达等设备研发，同时创新性地构建了“天-地”联合探测模式：利用无人机搭载空气耦合雷达进行非接触式航空快速扫描，同时在地面运用雷达和监测设备相结合的方法进行精细探查。通过自动控制与网络传输技术，将点、面监测数据融合，实现了对桥梁结构形变的智能化感知与定期评估，形成了适用于大范围桥梁群的轻量化监测关键技术。

在隧道长期健康管理领域，研究从分析历年病害数据、总结规律出发，研发了基于分布式光纤的隧道全断面变形实时监测方法与智能辨识算法。在此基础上，建立了融合结构响应、环境等多源数据的隧道服役性能动态评价体系与数值仿真模型，提出了基于应力状态的特征分级标准，并利用 BIM 技术进行三维可视化集成，直观呈现隧道结构的安全状态，形成了一套完整的隧道健康监测与管养决策系统。

针对边坡稳定性监测预警，通过在地面关键点位升级部署 GNSS 位移计、锚索计等设备，构建了高精度地面集成感知网络。同时，融合卫星 InSAR 大范围

形变监测、无人机激光雷达精细扫描、北斗高精度定位以及 5G 通信与 AI 智能分析技术，搭建了“空-天-地”协同的立体监测平台。该平台进一步集成了爆闪警示、应急通讯、照明和广播等装置，能够在风险发生时自动触发多级预警与现场响应，显著提升了边坡灾害的早期识别与应急处置能力。

本体系通过多源感知技术协同、智能传输网络保障与大数据分析平台支撑，实现了对公路关键基础设施状态的全天候、实时化、智能化监测，形成了从“数据智能采集”到“风险精准预警”再到“管养科学决策”的完整技术闭环，为提升公路网的整体服役安全与运维管理水平提供了系统性解决方案。

(5) 高速公路偶发性灾害“空-天-地”一体化多级联动应急预案方案

本研究将重点研究多模块数据传输机制，应用 5G 传输、基站传输和无线自组网（WSN）技术，搭建一个“空-天-地”一体化的偶发性灾害多级联动应急救援大数据平台。该平台将利用 5G 网络的高带宽和低延迟特性，实现实时数据传输，确保各类传感器、无人机和卫星等设备之间的数据高效流动。研究将构建涵盖“空-天-地”一体化智能搜救装备，如无人机搭载的热成像和光学传感器、地面移动通信终端和光纤传感网络，配合数据传输模块，实现灾害现场的全面监控与信息收集。同时，将制定各级负责部门之间的应急救援流程及标准化预案，构建以应急救援大数据平台为基础的多级联动机制，形成系统化的偶发性灾害多级联动应急救援框架。为支持决策过程，研究还将建立偶发性灾害智能辅助决策系统，集成人工智能算法对实时数据进行分析，提供灾害评估和资源调配的智能建议。此外，将健全全天候“空-天-地”一体化重点监控机制，利用卫星遥感数据与地面传感器数据的融合，实时监测灾害发展态势，并建立灾害预测模型。最终，研究将形成“空-天-地”一体化偶发性灾害多级辅助系统，为应急联动救援提供帮助。

3.3.1.3 系统装备研发

(1) 高速公路基础病害空-地协同全天候高精度智能巡检装备研发

基于三维激光雷达、高分辨率全画幅传感器、探地雷达及弹性波快速探测系统，开发车载 - 机载协同搭载模块化技术，融合无人机与车载巡检，实现两者互补联动。车载巡检覆盖普通路段与长距离道路，无人机高效扫描复杂区域道路外路基，形成空 - 地协同全路段全要素高精度探测能力，构建高速公路路面路

基病害全天候智能巡检装备。

(2) 高速公路基础设施监测预警关键装备研发

通过聚焦高速公路“空-天-地”一体化监测预警需求，开发新一代物联网结构安全监测与通讯技术及核心设备，支撑边坡灾害精准预警。重点研制基于激光、图像测量及多普勒微变形雷达原理的设备，实现桥隧、边坡动态变形毫米级捕捉与裂缝实时追踪；研发固体阵列扫描式光敏成像微光 AI 摄像头，突破低光照环境成像局限，结合 AI 算法自动识别灾害前兆。开发飞秒技术光纤光栅系列传感器，提升灵敏度与稳定性，精准采集多维度监测数据；攻关 5G-卫星联合通讯技术，构建“天地一体”传输网络，解决复杂地形数据实时回传与共享难题。专项研制高危边坡（含隧道洞口）物联网崩塌监测传感器，集成多参数监测模块适配复杂工况；研发北斗-光电一体化变形监测设备，同步监测核心变形参数，具备抗干扰、高精度特性，支撑监测调度与分级预警。

(3) 高速公路基础设施多源异构“通感一体化”自动管控平台

通过融合 BIM、GIS、传感器网络与物联网技术，实现对交通流量、天气、路面及桥梁结构状态等多源异构数据的全面采集与动态感知。平台将整合实时监测、历史档案与现场调查数据，构建可自主更新的高速公路灾害动态案例库，并利用数据清洗与关联规则挖掘、主成分分析（PCA）等技术，智能提取针对不同设施灾害预警的关键参数组合。针对海量、多格式的监测数据，设计严谨的数据处理与存储体系：在数据处理环节，通过研发专用解析模块与预处理方案，系统化解决数据遗漏、噪声与异常问题，确保数据质量；在数据存储环节，构建基于 Kafka、Spark、Hbase 等技术的分布式存储架构，实现数据的高可靠接收、高效转换与海量存储，形成平台的数字孪生基础数据库，为上层应用奠定坚实基础。

研发平台的核心智能分析引擎，该引擎包含两大支柱：一是基于多参数融合的灾害动态预测模型，以动态案例库为基础，利用长短期记忆网络（LSTM）等时序算法，耦合气象、荷载与结构响应等多源参数，训练能够捕捉非线性特征的预测模型，实现对路基失稳、边坡滑移等风险的超前动态预测；二是三维数字孪生预警与模拟底座，基于 BIM/GIS 与约束三角剖分等理论，构建融合地理空间、结构模型与实时感知数据的三维可视化环境，将预警关键参数与预测结果进行动态集成与可视化渲染，实现灾害风险从宏观分布到微观机理的“透明化”透视与

模拟分析。

基于智能分析引擎输出的风险等级与孪生底座的态势研判，平台最终构建集实时感知、智能诊断与自动管控于一体的闭环系统。一方面，基于精确力学模型、历史数据与实时预测结果，构建动态分级预警阈值，开发从单点报警到跨层级联动的完整流程，并结合多源数据实现基础设施健康度的量化评估；另一方面，利用机器学习对实时交通与环境数据进行研判，并依托数字孪生底座进行预案模拟，自动生成最优的调度指令与应急预案。平台通过智能情报板、短信推送、ETC联动及第三方导航共享等柔性通信模块，以及基于硬阻断的紧急处置技术，实现从风险预警到管控指令的智能发布与快速响应，从而形成“感知-预测-可视化-决策-控制”的完整能力闭环，全面提升高速公路系统的自动化管控水平与应急保障能力。

3.3.2 技术路线

本课题密切结合“高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控关键技术及装备研发”，针对“基础设施抗灾能力提升”和“应急管控”，采用“野外调查、理论分析、现场实验与工程验证”四种方法，开展高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控相应的关键技术研究，并进行关键装备系统研发，技术路线见图 3.1，模块协同流程见图 3.2。

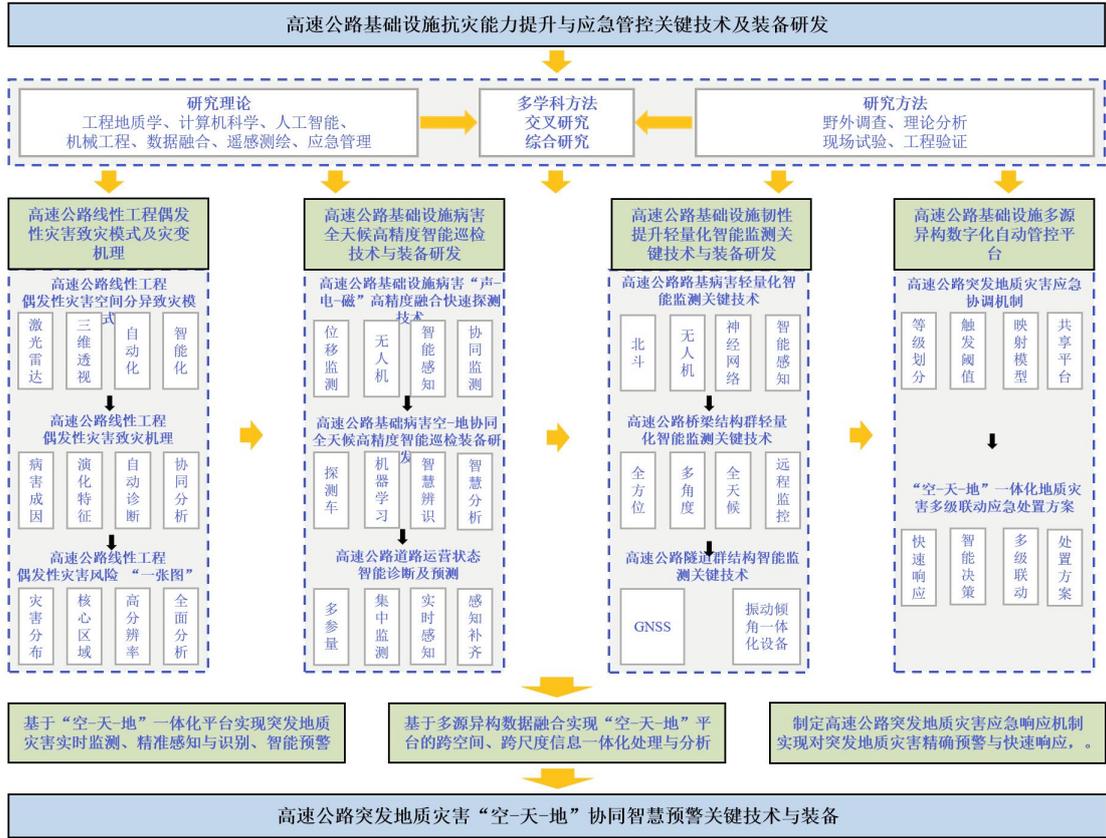


图 3.1 技术路线图

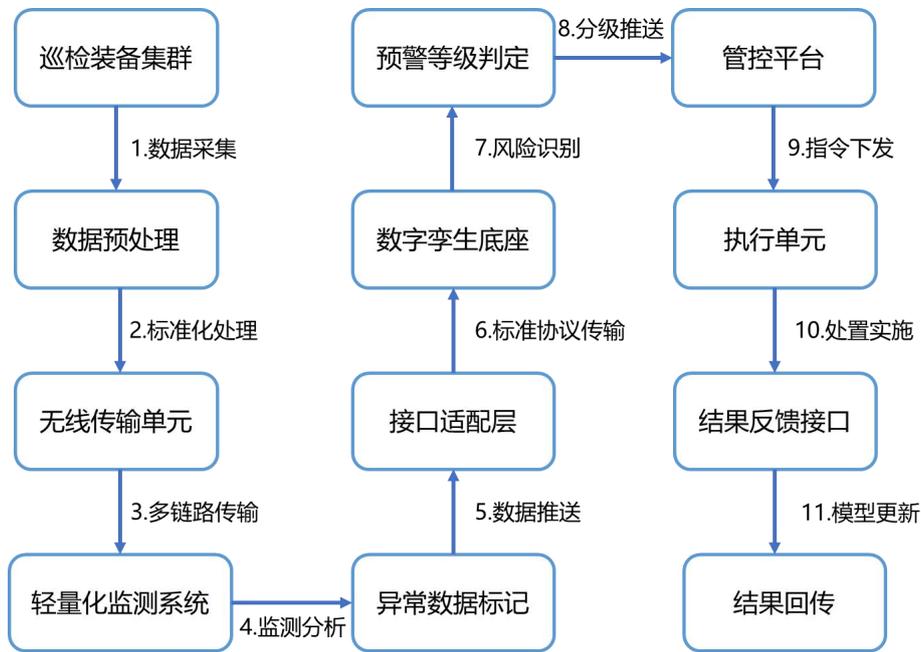


图 3.2 模块协同流程图

3.4 创新点

(1) 研究陕南、陕北、关中不同区域的高速公路线性工程偶发性灾害分布特点，建立陕西公路偶发性灾害空间分异致灾模式，揭示线性工程偶发性灾害致

灾机理，构建高速公路线性工程偶发性灾害风险“一张图”。

(2) 研制高速公路路面路基病害高精度立体巡检装备与通感一体的智慧监测装备，提出高速公路路面路基病害“声-电-磁”高精度融合智能探测方法，实现高速公路道路运营状态智能诊断及预测。

(3) 通过分析高速公路基础设施（路-桥-隧-坡）病害成因及演化特征，提出高速公路路基、桥梁结构群、隧道群结构、边坡不同监测方法组合，提出轻量化智能监测关键技术，研发智能监测装备系统，实现高速公路基础设施（路-桥-隧-坡）韧性提升。

(4)、基于人工智能算法，实现多源异构大数据深度挖掘，建立高速公路基础设施灾害多参数融合预测模型，并结合 BIM、GIS 及数字孪生技术，开发高速公路基础设施多源异构“通感一体化”自动管控平台，实现快速响应与智能处置。

3.5 后续技术改造或基本建设计划的衔接

项目研发成果设备以公司自主攻克智慧交通核心技术为根本支撑，深度依托陕西省智慧交通产业中试基地的中试验证能力与陕西交控智慧交通产业孵化加速器的产业孵化资源，重点开展智能巡检设备与轻量化智能监测设备的规模化研发及市场化产业化推广。市场化推广时，优先聚焦陕西省内市场，依托陕西交控的行业资源开展试点部署，配套提供设备安装与运维服务；后续逐步拓展全国市场，通过行业展会、技术交流会展示设备应用案例，同时推出灵活合作模式（如设备租赁结合数据服务）降低客户合作门槛，推动产品落地应用。

设备研发全过程贯穿“核心技术自主可控”原则，各传感设备及相关平台由公司研发团队研发；同时，针对设备研发形成的技术创新点，已系统布局发明专利、计算机软件著作权，构建了完整的自主知识产权保护体系，从技术源头规避外部技术壁垒与依赖风险，确保产品技术属性的自主性与独占性。

此次产业化推广不仅聚焦于产品的量产落地与市场应用，更以“支撑自主产业生态”为核心目标——通过自主技术向实体产品的转化，进一步完善公司在智慧交通装备领域的自主产业链条，强化“核心技术研发 - 自主产品转化 - 产业价值变现”的闭环能力，推动公司从技术研发型向“技术 + 产业”双驱动型发展转型，巩固在智慧交通细分领域的自主产业竞争优势。

3.6 有关技术经济指标

3.6.1 技术指标

(1) 高速公路线性工程偶发性灾害致灾模式及灾变机理：明确 3 类典型偶发性灾害的致灾因子体系，揭示各灾害类型的灾变演化路径，有效提升致灾因子识别准确率；建立灾变机理数值模拟模型，提升灾害发生概率预测精度，为后续防控提供理论支撑。

(2) 高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备研发：研发的智能巡检装备具备雨雪雾等复杂天气适应能力和全天候有效巡检能力；针对高速公路基础设施典型病害，实现表面病害识别准确率提升 10%；相比传统人工显著提高巡检效率。

(3) 高速公路基础设施（路-桥-隧-坡）智能监测关键技术与装备研发：研发的智能监测装备集成不少于 3 种监测功能；针对桥、隧、坡不同结构，监测精度达到领先水平；装备支持低功耗运行，数据无线传输稳定，可以实现监测数据实时采集与异常反馈。

(4) 高速公路基础设施多源异构数字化自动管控平台：实现雷达、图像、传感器监测数据等 5 类多源异构数据的融合处理；平台具备基础设施全生命周期信息管理功能；支持病害识别、状态评估、风险预警全流程处理，预警准确率显著提升，平台运行稳定。

3.6.2 经济指标

本项目在外省市场复制推广阶段，计划通过技术成果转化、销售与技术服务一体化输出，实现累计营业收入 300-500 万元的核心经济目标。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

陕西高速公路工程试验检测有限公司是陕西交控集团下属的高新技术企业。公司前身系 1987 年组建于陕西三原的西安至三原一级公路监理工程师中心试验室，是我国第一家按 FIDIC 模式设立的公路工程试验室。2004 年 1 月，正式注册成立具有独立法人资格的有限公司，注册资本 5000 万元。公司现有员工 800+ 人，其中：交通运输部及省级各类专家 10 余人，各类专业技术人员 380 余人。公司有秦创原科学家+工程师队伍 1 支，博士团队 2 支，获批交通运输部卫星技

术行业应用研发中心（参建）、陕西省企业技术中心、陕西省智慧交通产业中试基地、西安市交通土建结构安全监测技术中心、道路桥隧智慧监测省级高校工程研究中心（参建），入选陕西省省属重点科技型企业、陕西省 DCMM 数据管理成熟度贯标试点企业，获评陕西省“专精特新”中小企业。公司主营业务包括公路、铁路、建筑、市政和水利工程检验检测、监测及评估；智能监测感知设备研发生产，基础设施数字化及监测系统集成；公路新材料、新技术、新工艺研发、生产和应用。公司拥有交通部公路工程综合甲级、桥隧专项和机电专项检验检测机构资质、中国合格评定国家认可委员会颁发的实验室认可证书，以及市政工程和铁路行业的相关资质），公路养护安全运维新技术(包括结构与设施设备监测，环境监测及修复等)，智慧交通(包括基础设施信息数字化方向、卫星技术在交通行业应用方向)建设。近 3 年，在研科研项目 16 项其中 1 项科研成果进入交通运输部重点科技成果推广库；公司获得国家科技进步二等奖 1 项，陕西省科技进步二等奖 1 项；陕西交通运输科学技术二等奖和三等奖各 1 项；取得软件著作权 17 项、新型实用专利 6 项，7 项发明专利正在实审公示阶段；主持编写陕西省地方标准(规范)4 项，涵盖公路、桥梁、隧道的项目建设及运营养护管理，填补了国家和行业规范的空白。公司申请获批了陕西省级企业技术中心，西安市工程技术研发中心。

陕西交控科技发展集团股份有限公司深耕公路交通行业 60 余年，下辖陕西省交通规划设计研究院有限公司、陕西高速公路工程检验检测有限公司等 8 家子公司。主要从事交通科研、综合规划、勘察设计、监理咨询、检验检测、机电工程智慧交通、交通新材料等业务。拥有省部级以上科研平台 14 个，各类学科带头人、行业专家 27 人，硕博研究生 778 人，正高级职称 78 人，副高级职称 799 人。具有各类资质 160 项，其中甲级资质 35 项、一级资质 6 项，承担省部级重点课题 200 余项，获得省部级以上各类荣誉 71 项，业绩遍及全国各省市。

交通运输部科学研究院（以下简称“交科院”）成立于 1960 年 11 月 17 日，为交通运输部直属的综合性科研事业单位，主要面向政府主管部门、交通运输行业开展基础性、前瞻性、公益性研究以及技术咨询、服务工作。交通运输部科学研究院下设标准与计量研究中心、交通发展研究中心、综合运输研究中心等 11 个二级研究机构，在交通运输发展战略规划、政策法规、标准等方面的研究成果被政府部门大量采用；在信息化、环保安全、低碳交通、公路工程、低空经济等

领域的尖端技术得到市场的广泛应用；在行业科技交流、成果推广、检测认证等科技服务领域作出了重要贡献。交科院共有获得各类专业资格的人员 654 人次，其中，咨询工程师（投资）82 人、交通运输企业安全生产标准化评审员 51 人、具有科技查新上岗证书人员 4 人、具有信息安全保障人员认证证书 27 人等。全院共有 1 名国家级有突出贡献的中青年专家、7 名享受国务院政府特殊津贴专家（其中 4 人研究领域为交通标准制修订、交通运输规划与管理、交通发展战略和政策）、1 人入选国家级“新世纪百千万人才工程”、1 人入选交通运输部“新世纪十百千人才工程”、14 名交通青年科技英才；94 人次在全国、部及地方标准化技术委员会和学会协会等专业社团兼职，292 人次入选国家、部级公路、水运、信息和环保等技术领域专家库，其中 10 人入选国家科学技术奖励评审专家库。

中国地质大学（北京）是一所以地质、资源、工程、环境为主要特色的研究型大学，是国内外地球科学研究的重要基地，也是国内偶发性灾害研究的最有影响力的单位之一，我国工程地质专业的发源地之一。学校现有中国科学院院士 11 人，中国工程院院士 2 人，国家级百千万人才工程 9 人，国家杰出青年科学基金获得者 15 人，“长江学者”特聘教授 4 人，国家级教学名师奖获得者 1 人，全国优秀教师 2 人，国家“万人计划”教学名师 2 人，全国高校黄大年式教学团队 1 个，国家级教学团队 1 个，国家优秀青年科学基金获得者 16 人，青年“长江学者”4 人。学校拥有地质学、地质资源与地质工程、土木工程等与本任务密切相关的学科体系，其中“地质学”和“地质资源与地质工程”2 个学科入选国家“双一流”建设学科，连续多轮全国学科评估获得 A+，地球科学和工程学 2 个学科领域进入 ESI 排名世界前 1%。在重大工程偶发性灾害理论、地质过程与成矿作用、超深钻探和极地研究等领域特色鲜明，优势明显，并取得了一系列重要成果，在 Nature、Science 等国际顶级期刊上发表了多篇论文。近五年，获得国家级科技奖 1 项，省部级科技奖 24 项。2021 年，国家自然科学基金获批 118 项。

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
王晨	陕西高速公路工程试验检测有限公司	男	51	高级工程师	道路工程	项目总负责人

熊 鹰	陕西交控科技发展集团 股份有限公司	男	56	高级工 程师	电子信息 工程	项目统筹
邵永军	陕西高速公路工程试验 检测有限公司	男	48	高级工 程师	桥梁工程	项目技术负责人
任晓辉	陕西高速公路工程试验 检测有限公司	男	44	高级工 程师	桥梁工程	项目技术负责人
刘 波	陕西高速公路工程试验 检测有限公司	男	38	高级工 程师	电子信息 工程	系统规划
马 新	交通运输部科学研究院	男	51	研究员	道路工程	项目技术负责人
薛翊国	中国地质大学（北京）	男	49	教授	地质工程	项目技术负责人
尉青青	陕西高速公路工程试验 检测有限公司	女	33	中级工 程师	交通信息 工程及控 制	理论研究
张鑫	陕西高速公路工程试验 检测有限公司	女	34	中级工 程师	信息化	软件开发
赵杉盟	陕西高速公路工程试验 检测有限公司	男	32	中级工 程师	交通信息 工程及控 制	框架设计
董舒萌	陕西高速公路工程试验 检测有限公司	女	26	中级工 程师	应用统计	数据挖掘
白斌	陕西高速公路工程试验 检测有限公司	男	25	中级工 程师	集成电路 工程	算法研发
毛新越	陕西高速公路工程试验 检测有限公司	男	24	中级工 程师	通信工程	软件研发

高苗	陕西交控数字科技有限公司	女	25	中级工程师	软件工程	软件研发
王珮沅	陕西交控数字科技有限公司	女	23	助理工程师	计算机科学与技术	软件开发
常江铭	陕西交控数字科技有限公司	男	30	助理工程师	电子科学与技术	软件开发
庄杰	陕西交控数字科技有限公司	男	24	助理工程师	计算机科学与技术	软件开发
屈敏杰	陕西交控数字科技有限公司	女	25	中级工程师	大数据技术与工程	软件开发
申亚博	陕西交控数字科技有限公司	男	31	助理工程师	软件工程	软件开发
李勇锟	陕西交控数字科技有限公司	男	23	助理工程师	测控技术与仪器	软件开发
高林	陕西交控数字科技有限公司	男	30	助理工程师	电气工程及其自动化	装备研发
高轲	陕西交控数字科技有限公司	男	32	助理工程师	计算机科学与技术	软件研发
王海荣	陕西高速公路工程试验检测有限公司	男	34	助理工程师	结构工程	结构设计
王显光	交通运输部科学研究院	男	48	研究员	道路工程	理论研究
张宇	交通运输部科学研究院	女	48	研究员	道路工程	测试分析
周紫君	交通运输部科学研究院	女	45	副研究员	道路工程	理论研究

张彬	中国地质大学（北京）	男	49	教授	岩土工程	理论分析
徐能雄	中国地质大学（北京）	男	53	教授	岩土工程	理论研究
孔凡猛	中国地质大学（北京）	男	34	讲师	偶发性灾害机理与防治	理论研究
艾岩	中国地质大学（北京）	男	28	博士生	土木工程	风险分级
渠敬凯	中国地质大学（北京）	男	26	博士生	地质资源与地质工程	风险绘制
段进睿	中国地质大学（北京）	男	24	博士生	地质资源与地质工程	统计分析
王建宁	中国地质大学（北京）	男	33	博士生	土木工程	装备研发
李嶷	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	31	工程师	交通工程	BIM 咨询
李明	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	42	高级工程师	隧道工程	BIM 咨询

4.3 各自承担的主要工作

本课题由陕西高速公路工程试验检测有限公司作为第一承担单位牵头，陕西交控科技发展集团股份有限公司、交通运输部科学研究院、中国地质大学（北京）等单位具体承担。各个参研单位立足于自身发展特色，发挥科研主力军作用，根据各单位在公路技术领域的强项，加强与企业、高效联合，理论联系实际，推进“产学研用”深度融合，把高校融入企业的技术创新体系中，通过与企业的合作，不断推动自主创新，研发核心技术，服务国家重大工程。

陕西高速公路工程试验检测有限公司负责立项申报、招投标、总体协调等工作，负责项目组织实施，把控项目技术路线和实施进度，统筹项目阶段性成果汇总工作。总体把控项目实际进度，开展项目实地调研，提出系统完善的高速公路突发偶发性灾害应急协调机制与联动处置对策，主导高速公路基础设施病害全天候高精度智能巡检技术与装备研发，重点研制基于激光、图像测量和多普勒微变形雷达原理的结构动态变形及裂缝监测设备、基于 5G 通讯和卫星传输的联合数据通讯技术，研制用于高危边坡尤其是隧道洞口的基于物联网的高边坡崩塌监测传感器、基于北斗、光电技术的新一代振动倾计位移一体化变形监测设备。构建“空-天-地”一体化偶发性灾害多级联动应急救援体系，建立高速公路基础设施灾害多参数融合预测模型，构建多源异构“通感一体化”自动管控平台。

陕西交控科技发展集团股份有限公司进行总体统筹规划与项目管理。

交通运输部科学研究院负责整体政策把控、技术导向，开展遥感数据融合应用研究，形成高速公路桥梁结构群跨塌“天-地”立体协同监测体系，搭建基于高速公路的遥感预警应用系统，实现灾害监测预警、应急处置。

中国地质大学（北京）负责研究陕西不同区域的高速公路线性工程偶发性灾害分布特点，建立陕西公路偶发性灾害空间分异致灾模式，构建高速公路线性工程偶发性灾害风险“一张图”，提出高速公路基础病害“声-电-磁”高精度融合智能探测方法，实现高速公路道路运营状态智能诊断及预测。

陕西交控数字科技有限公司负责设备研发及算法研究与平台开发工作。

陕西省交通规划设计研究院有限公司负责 BIM 相关专业技术开发及指导。

4.4 项目主要负责人情况

王晨，1974 年 7 月生，中共党员，博士，高级工程师，主持陕西省五大交通强国之一“秦岭隧道安全防控体系”、交控集团在役公路桥梁群轻量化监测预警系统、陕西省公路结构群（长大桥）监测预警系统、高速公路（桥隧坡）安全监测预警及应急管控系统等 10 余项，2008 年 6 月被中华人民共和国交通运输部、共青团中央授予“2007 年度全国交通行业青年岗位能手”；2009 年 1 月被集团公司评为“2008 年度先进工作者”；2009 年 1 月被陕西省高速集团公司评为“2008 年度优秀共产党员”；2019 年 11 月被中国交通企业管理协会评为“2019 年度全国交通运输核心价值观先进践行者”，拥有知识产权 10 余项。

邵永军，1977年3月生，2003年7月毕业于西安科技大学结构工程专业，硕士研究生，正高级工程师。现任陕西交控集团高速检测公司党委书记、董事长。兼任中国公路学会养护与管理分会理事、中国交通企业管理协会绿色智慧交通分会专家，东南大学、西安建筑科技大学、西安工业大学硕士生校外指导教师，西安市军民两用土木工程测试技术与毁损重点实验室学术委员会委员，陕西省交通运输厅、青海省交通运输厅、西安市科技局的科研项目评审专家。主持参与省国资委、交通厅省级科研项目12项；主持完成省地方标准1项，参编完成行业标准1项、地方标准3项、团体标准2项；发表高质量论文10余篇，得到行业内人员好评和较高频次引用，授权专利22项，其中发明专利6项，实用新型专利11项，外观专利5项。成果获得陕西省科学技术进步二等奖、中国交通运输协会科学技术奖二等奖、中国公路建设行业协会科学技术奖一等奖，陕西省交通运输科学技术一等奖1项、二等奖2项、三等奖1项等十余项；获得“陕西交通运输科技创新青年英才”、陕西省“五一劳动奖章”等荣誉。主导完成了陕西高速星辰科技公司组建，将科研成果产业化，是交通行业信息化的积极践行者。带领团队申请并获批国内首个智慧交通产业中试基地、陕西省级企业技术中心、西安市级工程技术研究中心，参建部行业研发中心。

马新，男，1971年生，博士，交通运输部科学研究院标准与计量研究中心副总工/标准化政策首席研究员。公路工程专家，交通运输科技项目专家库、中国博士后基金评审专家库、教育部硕博学位论文评审专家库专家。中国公路学会养护与管理分会理事，中国技术市场协会标准化专家委员会副主任，中国技术市场协会交通运输委员会副秘书长，《建筑材料学报》特约审稿专家。主要研究方向为低碳环保新型路面材料研发、耐久性路面结构设计、路面预防性养护技术及装备、公路工程试验检测技术及公路工程标准规范。重要科研成果有：重载交通条件下路面结构与材料技术指标、设计参数、混合料组成设计方法；低碳、环保、安全沥青铺装材料；长大隧道安全环保型铺面设计及施工技术；路面常温快速养护材料、工艺及相关技术标准。先后主持及参与国家自然科学基金项目、教育部博士学科点基金项目各1项；主持交通运输部重大科技专项“多孔沥青路面养护技术及装备研发”、交通运输部建设科技项目“超长海底隧道环保安全沥青铺装关键技术研究”、“高温多雨地区高速公路水损害防治与沥青路面预防性养护技

术研究”、重庆市交通科技项目“重庆地区沥青路面科学性维护关键技术研究”、安徽省交通科技项目“公路长隧道抗滑明色环保型沥青铺面关键技术及施工工艺研究”、吉林省交通科技项目“季节冻土区新型毛细导水土工材料抑制路基冻融破坏技术研究”等省部级科研项目 30 余项，多项研究成果达到国际领先水平。作为专家参与了《公路工程集料试验规程》等多项交通行业规范的技术审查工作，主持了《港珠澳大桥施工技术指南》等 300 余项行业学会团体标准的技术审查工作。获省部级科技进步特等奖、一等奖、二等奖。

薛翊国，男，1976 年生，山东郓城人，博士，教授，博士生导师，国家优秀青年基金获得者，英国工程与技术学会会士（IET Fellow），山东省杰出青年基金获得者，山东青年五四奖章获得者，山东省优秀研究生指导教师，山东大学“我心目中的好导师”，连续四年获评山东大学土建与水利学院“十佳导师”，首批“黄大年式教师团队”核心成员，“国家基金委创新群体”核心成员。近年来，先后主持国家优秀青年基金“岩土力学与岩土工程”、国家基金重大项目课题“红层灾变地质基因与界面效应的孕灾规律”，国家面上基金“核磁共振与瞬变电磁联合反演成像及其预报隧道突水灾害方法研究”和“深长隧道突水岩体破裂多尺度结构演化机理及渗流-电磁耦合效应研究”，以及川藏铁路、厦门海沧海底隧道、黄岛国家石油储备地下水封储油洞库、青岛胶州湾海底隧道、渝昆高铁等 40 余项国家重大工程科研项目。作为核心学术骨干参加国家 973 计划课题 3 项、国家 863 项目 1 项、国家自然科学基金创新研究群体项目 1 项、国家自然科学基金重大项目 1 项。在领域顶级期刊共发表学术论文 212 篇，第一及通讯作者 SCI/EI 论文 120 篇（SCI 收录 104 篇），代表性论文《China starts the world's hardest “Sky-High Road” project: Challenges and countermeasures for Sichuan-Tibet railway》发表于《The Innovation》（期刊影响因子 32.1），《高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究》获 2011 年中国百篇最具影响国内学术论文奖（被引用 383 次），《川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题》入选 2021 年领跑者 5000-中国顶尖学术论文（被引用 255 次）。授权国家发明专利 199 项（102 项排名第一）、软件著作权 30 余项。研究成果成功应用于 30 余项国家重大工程，如青岛胶州湾海底隧道（长度 7800 米，中国第一，世界第三长公路海底隧道），锦屏二级水电站（世界公认的高压岩溶裂隙水重大难题工程），黄岛国家石油储

备地下水封储油洞库（中国第一座 300 万方大型地下油库），湖北沪蓉西高速公路沿线隧道，青岛地铁工程，新成昆铁路工程，郑万高铁工程，厦门海沧海底隧道，新疆**引水隧洞工程，川藏铁路康定 2 号隧道等。作为主要参与者获国家、省部级等科技奖励 10 项，其中国家科技进步二等奖 1 项，山东省科技进步一等奖 2 项、三等奖 1 项，中国岩石力学与工程学会科技进步一等奖 2 项，国家能源科技进步二等奖 1 项，湖北省科技进步二等奖 1 项，中国水电工程顾问集团公司科技进步一等奖 1 项，中国发明协会创业创新一等奖 1 项。

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（工作）概况

根据陕西省交通运输厅关于印发《全省在役干线公路涉河桥梁隐患排查治理专项工作方案》的通知:关于印发《进一步提升高速公路防灾抗灾能力设计回溯工作方案》的通知(陕交函(2024)1086 号):关于进一步加强高速公路监测预警提升防灾抗灾能力的通知。结合承灾体普查和设计回溯成果文件选取风险工点。以 G5 京昆高速，G65 包茂高速等多条高速公路为依托工程，开展本项目研究。

5.2 投资来源

厅拨加单位自筹。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

本项目研究将紧密结合依托工程的实际进度，确保科研工作与工程实践同步推进。具体配合方式如下：

前期调研与设计阶段：在工程前期调研和设计阶段，科研团队将参与设计评审和技术方案讨论，深入了解工程特点和难点，为后续研究工作奠定基础。

现场研究开展：在现场工作开展阶段，科研团队将与业主单位紧密合作，结合实际施工进度，开展现场数据采集、监测和分析工作。例如，针对隧道施工中的围岩稳定性问题，科研团队将同步进行现场监测和数值模拟分析，提出优化施工方案的建议。

成果应用与验收阶段：在研究报告验收阶段，科研团队将总结研究成果，形成技术报告和应用方案，为工程验收提供技术支持。同时，通过与施工单位和监理单位的合作，确保科研成果能够实际应用于工程实践中，提升工程质量和施工效率。

通过以上方式，本项目将实现科研与工程实践的紧密结合，确保研究成果既具有理论深度，又具备实际应用价值。

5.4 组织管理形式

为保障项目的顺利组织实施，本项目将采取科学有效的内部组织管理方式。

(1) 建立项目责任制度，实行分级管理模式

建立严格的项目责任制，明确项目总目标、进展计划、经费预算、项目实施过程中的部门联动的相关重大举措及各子课题的研究目标、经费预算等。实行分级管理模式，保障不同研究单位之间协同创新，严格分工，充分发挥细化责任切实加强资源整合和协同攻关。项目负责人全面负责和管理项目的总体组织协调工作，落实项目各项任务。各参与单位协调各课题的研究工作、课题协调工作，保证课题按计划有序进展。

(2) 成立项目监管专项工作组，监督审查项目开展情况

成立由项目负责人、课题负责人与专题负责人构成的“重点技术，重点讨论”项目监管工作组，负责项目整体进度推进，督促质量控制和责任落实。具体工作内容包括：检查监督各课题进展，定期组织召开课题进展汇报会汇总、报告项目执行情况；推动课题间多方式的联络交流，协助解决项目执行期的各类问题，加强信息共享；制定各阶段的总体目标和实施计划。

(3) 实行专家咨询和课题负责制，全面落实研究工作

建立专家咨询机制，为项目和课题负责人做出决策提供建议，发挥专家在顶层设计和技术指导方面的作用，确保项目的准确性。建立各课题负责单位和参与单位骨干成员组成的课题工作组，全面落实各项任务的研究工作。课题工作组具体组织、落实课题的研究和应用示范工作，定期向项目监管专项工作组提交进展总结报告项目执行情况和项目执行中出现的重大问题。

六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科目	估算数	科目	总经费	厅补经费	其他经费

省交通运输厅 补助	49.808	合 计	800	49.808	750.192
工程配套研究 经费	0	1.设备费	435	25	410
单位自筹	750.192	(1) 购置设备费	120	10	110
其他经费	0	(2) 设备改造与租赁费	315	15	300
		2.业务费	150	12	138
		(1) 材料费	35	3	32
		(2) 测试化验实验加工费	15	2	13
		(3) 燃料动力费	10	1	9
		(4) 差旅费/会议费/国际合作与 交流费	60	4	56
		(5) 出版/文献/信息传播/知识产 权事费	20	1	19
		(6) 其他费用	10	1	9
		3.劳务费	70	3	67
		(1) 专家咨询费	40	2	38
		(2) 聘用人员劳务费	20	0.8	19.2
		(3) 其他劳务费	10	0.2	9.8
		(二) 间接费用	145	9.808	135.192
		4.管理费	120	6	114
		5.绩效支出	25	3.808	21.192

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）	3
		(1) 授权发明专利	3
		(2) 实用新型	0

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(3) 外观设计	0
		2、软件著作权授权数(项)	5
		3、发表论文(篇)	1
		(1) 其中SCI索引收录数	0
		(2) 其中EI索引收录数	0
		(3) 其它	1
		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	0
	其他成果	1、填补技术空白数	3
		(1) 国际	0
		(2) 国家	0
		(3) 省级	3
		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	2
		(1) 新工艺(或新方法模式)	0
		(2) 新产品(含农业新品种)	1
		(3) 新材料	0
		(4) 新装备(装置)	1
(5) 平台/基地/示范点	0		
(6) 中试线	0		
(7) 生产线	0		
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	是
		(4) 规模化生产	否

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值	
	人才引育	1、引进高层次人才	0	
		(1) 博士、博士后	0	
		(2) 硕士	0	
		2、培养高层次人才	0	
		(1) 博士、博士后	0	
		(2) 硕士	0	
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	0	
		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（%）	80	
		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）	1000	
		2、新增销售（万元）	200	
		3、新增出口创汇（万美元）	0	
		4、新增利润（万元）	100	
	社会效益	1、新增税收（万元）	50	
		2、新增就业人数	5	
		3、就业培训（人次）	5	
		4、带动农民增收（万元）	0	
		5、培训和指导科技服务（人次）	10	
		6、新增产业带动情况	0	
		7、技术集成示范（项）	0	
		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

8.1 项目预期目标

(1) 明确陕西不同区域高速公路偶发性灾害致灾模式与灾变机理；完成 G5

京昆高速、G65 包茂高速等重点路段多要素（工程分布、灾害特征、风险等级分区）融合的偶发性灾害风险“一张图”。

（2）研发出基于“声 - 电 - 磁”的高精度融合快速探测技术及 AI 智能化病害快速巡检装备；实现路面裂缝、桥隧结构局部破损等常见病害的快速识别与定位，构建完成病害数据采集与分析系统。

（3）研究桥隧坡病害快速识别定位及基础设施动态监测关键技术；研制激光 / 图像测量类变形监测设备、微光 AI 摄像头、飞秒技术光纤光栅传感器、5G - 卫星联合通讯设备、高危边坡及隧道洞口崩塌监测传感器、北斗 - 光电振动倾计位移一体化设备等；构建完成基础设施病害监测与评估系统。

（4）建立高速公路偶发性灾害预警模型及应急响应等级划分标准；研发多源异构数据深度挖掘方法，搭建多源数据融合分析平台及“通感一体化”自动管控平台；建成偶发性灾害动态数据信息库，实现基础设施运行状态动态监控与风险预警

8.2 提交的研究成果及其形式

有形交付物：

（1）《高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控关键技术及装备研发》报告 1 份；

（2）高速公路偶发性灾害危险等级量化评价方法 1 套；

（3）公路地质多致灾要素融合的监测预警模型 1 套；

（4）高速公路智慧巡检装备 1 套；

（5）高速公路病害监测装备 1 套；

（6）高速公路多源信息一体化感知防控平台 1 个。

无形交付物：

（1）知识产权：申请国家发明专利 3 件，申请软件著作权 5 项；

（2）论文著作：在中文核心及以上期刊发表论文，不少于 1 篇；

8.3 经济、社会、环境效益分析

（1）经济效益分析

本项目研究成果可增强区域安全性，有利于监控和预防公路沿线偶发性灾害，降低偶发性灾害对公路及周边基础设施造成的直接损失，节省修复和重建费用；

本项目通过理论研究、技术研发和应用示范，在实现公路偶发性灾害及基础设施通感一体化感知防控的同时，还有望创造可观的经济效益。通过灾害预警，提升公路安全性，减少因偶发性灾害导致的交通中断频率，提高道路通行能力，减少因偶发性灾害导致的公路维护成本。此外，相关研究成果还可用于山区地带城镇建设、旅游开发、管线工程等项目的防灾减灾，尽可能地减少由于偶发性灾害引起的经济损失、灾害治理费用和灾害引起的区域经济损失。

(2) 社会效益分析

本项目顺利实施后将有助于提升陕西省公路偶发性灾害及基础设施安全防控等级和抗灾能力，尽可能地消除极端气候、地形地貌差异背景下公路沿线的地质隐患。研究成果将显著提升高速公路桥梁结构劣化预警效能和应急处置能力，减少因灾害导致的人员伤亡和财产损失，提高公众出行的安全感；研究成果将推动边坡监测的可持续发展，为区域经济的协调发展提供有力支撑；研究成果可以有效地调配救援资源和力量，提高应急响应、救援处置效率，大幅度减少灾害对社会的影响；将为政府提供科学的决策依据，有助于提升政府在应对突发事件和灾害方面的治理能力，增强政府的公信力和执行力。

(3) 环境效益分析

通过本项目成果的初步应用示范，进一步验证、优化和完善公路偶发性灾害感知、预警、应急救援、决策管控的技术方法体系后，不仅可以实现陕西省内的一系列示范应用和全域推广，还有望在我国的其他地区进行应用推广。进一步地，项目研究成果将全面提高陕西省公路偶发性灾害快速感知能力、监测预警能力和应急处治能力，降低重特大事故风险，最大限度减少和避免群死群伤事件发生，为高速公路安全运营提供科学的理论依据和技术保障，具有重大的工程实用价值和广阔的应用前景。

(4) 产业推广计划

短期（1-2年）：聚焦陕西省内依托工程试点应用，形成装备标准化适配方案。

中期（3-5年）：针对不同地域灾害特点，制定装备参数调整手册，拓展全国市场。

长期：搭建装备租赁 + 数据服务的商业化模式，联合上下游企业建立产业链协同机制。

九、其它需要说明的问题

无

十、申请单位意见

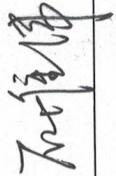
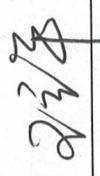
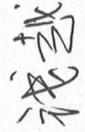


单位负责人:

2025年2月17日

高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管理关键技术研发(项目编号: 25-08K)

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	杨云峰	陕西交通职业技术学院	交通运输规划与管理	交通运输规划与管理	三级教授 / 正高级工程师	
2	委员	石雄伟	西安公路研究院有限公司	桥梁工程	桥梁	正高工	
3	委员	王立平	陕西省交通运行监测中心	计算机科学	交通信息化	高工	
4	委员	王松根	山东省公路局	公路工程	公路工程	研究员	
5	委员	钱越	交通运输部公路科学研究所 院智能中心	交通工程	智能交通	正高工	

高速公路基础设施抗灾能力提升 与应急管控关键技术及装备研发 大纲评审意见

2025年12月5日，陕西省交通运输厅在西安主持召开“高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控关键技术及装备研发”（项目编号25-08K）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、项目面向高速公路基础设施监测技术及装备迭代升级需求，开展“空-天-地”多源协同监测技术、AI驱动的危害预警模型、智慧巡检和监测装备、多源异构数字化自动管控平台等相关研究，对解决快速感知偶发性灾害，提升灾害监测预警、应急处置与抗灾能力具有现实意义。

二、研究内容全面，研究目标明确，技术路线可行。

三、研究人员组成合理，前期工作基础扎实，试验设备齐全，依托工程落实，经费预算符合要求，具备开展研究工作的条件。

四、预期成果覆盖研究目标。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

1. 进一步聚焦灾害多发区域，科学研判、确定监测重

点。

2. 加强巡检和监测设备的集成创新。
3. 突出多源异构数字化自动管控平台研发和建设。

主任委员： 

2025年12月5日

专家审查意见表

项目名称	高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控关键技术及装备研发				
专家姓名	杨云峰	职务/职称	交通运输规划与管理	专业	交通运输规划与管理
专家单位	陕西交通技术职业学院			联系电话	17795956688

评审意见

陕西地形地貌多样、地理地质复杂，高速公路受其影响的偶发灾害时有发生。该课题聚焦由此致灾的模式、时空分布规律、机理分析、危险性评价等，研发高精度智能巡检技术及装备、轻量化智能监测技术及装备，并研制多源异构数字化自动管控平台，实现监控预警一体化，对提高公路基础设施抗灾能力具有重要意义。拟定的研究大纲合理，同意通过评审。

建议：1. 结合陕西不同地理单元特点，梳理高速公路受灾机理、分布规律等，明确灾害多发区、重点类型等；
2. 强化智能巡检、监测技术与设备的集成创新；
3. 灾害等级划分与应急响应条件方式应注意对接符合国家标准、法规、技术要求等。

评审专家（签字）：



2025 年 12 月 5 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	高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控关键技术及装备研发				
专家姓名	王松根	职务/职称	研究员	专业	公路工程
专家单位	山东省公路局			联系电话	13709210365

评审意见

本项目针对山东省高速公路基础设施抗灾能力和应急管控的需求，开展“山东省高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控关键技术及装备研发”课题研究，课题提交的研究大纲内容齐全，技术路线可行。

同意该课题研究大纲通过评审。

建议：

1. 进一步梳理研究内容与研究题目的关联。
2. 重点突出山东省多源信息一体化感知决策平台的研发和建设。
3. 进一步明确考核内容及指标。

评审专家（签字）：

2025年12月5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	高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控关键技术及装备研发				
专家姓名	石雄伟	职务/职称	正高工	专业	桥梁工程
专家单位	西安公路研究院有限公司			联系电话	13571912680

评审意见

项目组对研究内容形成了一定的研究基础，技术路线基本可行，1.是构成基本合理。

1. 界定3.2.2章节基础设施所涵盖的范围。
2. 内容涉及致灾模式、检测巡检、诊断检测、智能监测的设备研发等内容，适当突出重点内容；
3. 明确针对性提升监测研究范围；
4. 研发设备种类比较多，适当突出有亮点的设备；
5. 检查项目绩效指标。

评审专家（签字）：

石雄伟

2025年12月5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	高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控关键技术及装备研发				
专家姓名	钱越	职务/职称	正高工	专业	智能交通
专家单位	交通运输部公路科学研究院智能中心			联系电话	13709210365

评审意见

13681372282

总体意见:

1. 项目符合当前国家政策和十五五规划要求, 数智化发展.

研究很有必要.

2. 研究内容非常丰富. 3个理论研究+11个技术研发+3系统装备.

2年内完成这么系统的工作, 工作量很大.

3. 研究成果实用性很强, 需求很大, 如应急指挥车.

4. 团队组成合理, 技术路线可行.

建议:

1. 目标报奖, 突出创新点, 与已有工作基础的不同之处, 也是未来

市场竞争力的宣传点.

2. 成果=应用验证要有.

3. 内容进一步聚焦, 突出重点, 比如平台集成建设研究.

评审专家(签字): 钱越

2025年12月5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	高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管控关键技术及装备研发				
专家姓名	王立平	职务/职称	高工	专业	交通信息化
专家单位	陕西省交通运行监测中心			联系电话	18991956056

评审意见

项目基于陕西地灾灾害机理开展抗灾能力提升与应急相关关键技术及装备研发,针对性强,对提升公路监测预警与应急管控能力具有重要意义。研究内容充实,思路清晰,技术路线可行,同意研究大纲通过评审。

建议:

1. 地灾灾害机理研究中能结合气候影响条件。
2. 多源大数据深度融合分析数据管控平台,融合不同感知设备、多种形式的数据,标准不同、格式不同、接入方式不同,研究中注重数据的整合、协同分析,不同数据之间融合分析、互相补充。
3. 量化技术指标及成果中研发设备的性能指标。
4. 加强多单位组成研究团队的管理,保障研究工作顺利完成。

评审专家(签字):

王立平

2025年12月5日

(本意见入档,应填写工整,纸面不敷,可另加纸)

专家意见处理表

项目名称：高速公路基础设施抗灾能力提升与应急管理关键技术及装备研发 (项目编号： 25-08X)

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	杨云峰	<ol style="list-style-type: none"> 结合陕西不同地理单元特点, 梳理高速公路受灾机理、分布规律, 明确灾害多发区、重点类型; 强化智能巡检、监测技术与设备的集成创新; 灾害等级划分与应急响应条件方式应注意对接符合国家相关法规、技术要求; 	<ol style="list-style-type: none"> 已修改。在修改后的 3.2.1.1 中, 明确划分陕北、关中、陕南三大地理单元, 并分别阐述其灾害类型与空间分异规律, 突出了“灾害多发区”和“重点类型”。 已修改。在 3.2.2 与 3.2.3 中, 进一步描述技术路线, 强调装备集成与智能分析模型的融合。 已修改。在 3.2.4.4 和 3.2.4.5 中, 明确提出“符合国家相关法规和技术要求的应急响应条件与方式”, 并在平台设计中强调调标准化与合规性。
2	王立平	<ol style="list-style-type: none"> 地质灾害机理研究中结合气候影响条件; 多源大数据深度融合分析类统管控平台, 融合不同感知设备、多种形式的数, 标准不同、格式不同、接入方式不同, 研究中注重数据的管系统、协同分析, 不同数据之间融合分析、互相补充; 量化技术指标及成果中突出设备的性能指标; 加强多单位组成研发团队的管理, 保障研究工作顺利完成; 	<ol style="list-style-type: none"> 已修改。在 3.2.1.2 中, 新增“降雨-岩性软化、冻雨-路面结冰互反馈机制”等气候耦合机理分析, 并在数值模拟中引入多场耦合模型。 已修改。在 3.2.4.1 和 3.2.4.5 中, 新增了“多源异构数据跨尺度映射关系”“统一数据管理系统”“异构数据标准化清洗与校正”等内容, 强调数据融合与协同分析。 已修改。3.6.1 技术指标中增加量化指标
3	钱越	<ol style="list-style-type: none"> 目标报奖, 突出创新点, 与已有工作基础的不同之处, 也是未来市场竞争的宣传点 成果应用验证要有 内容进一步聚焦, 突出重点, 比如平台建 	<ol style="list-style-type: none"> 已修改。在 3.4 创新点中, 已列出 4 条创新点。 已修改。在 3.2.3.4、3.2.4.5 等技术路线中, 新增“示范应用”“工程验证”“现场测试”等环节, 强调成果的实践验证。

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应, 详细说明修改情况)
		设备及研究	<p>3. 已修改。在3.2.4中, 将“多源异构数字化自动管控平台”作为独立章节, 并细化为5个子课题, 突出平台建设的核心地位。</p>
4	石雄伟	<ol style="list-style-type: none"> 1. 界定3.2.2章节基础设施所涵盖的范围 2. 内容涉及救灾模式、检测巡检、诊断检测、智能监测和设备研发等内容, 应考虑重点内容 3. 明确韧性提升的研究范围 4. 研究设备种类比较多, 适当突出有特色的设备 5. 核查项目绩效指标 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 已修改。在修改后的3.2.2研究内容中明确表示了巡检范围主要是路面、路基。 2. 已修改。在3.2中结构调整更清晰, 分为致灾机理、巡检装备、监测技术、管控平台四大板块, 重点突出“智能监测”与“平台研发”。 3. 已修改。去除不合适的韧性相关内容, 突出设备监测功能。 4. 已修改。在3.3.1.3中, 重点列出了“智能巡检装备”“监测预警关键装备”“通感一体化管控平台”三类特色装备, 并详细说明其功能与集成方式。 5. 已修改。3.6.1技术指标中增加量化指标
5	王松根	<ol style="list-style-type: none"> 1. 进一步梳理研究内容与研究题目关联 2. 重点突出多源信息一体化感知与管控平台的研发 3. 进一步明确各部分内容及指标 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 已修改。整个3.2部分结构更清晰, 四大板块均紧扣“抗灾能力提升”与“应急管控”两大主题, 与研究题目高度契合。 2. 已修改。3.2.4详细阐述了“多源异构数字化自动管控平台”的五个子课题, 突出了一体化感知、融合分析、智能预警与应急联动。 3. 已修改。各章节研究方法与技术路线更具体, 指标更清晰

项目负责人(签字):

