

项目合同编号：25-58K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：运营隧道衬砌病害智能检测方法及结构韧性提升技术研究

承担单位：西安航空学院

项目负责人：李杰

通讯邮编、地址：陕西省西安市西二环 259 号，邮编 710077

传真、电话：13201401138

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

项目合同编号：25-58K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：运营隧道衬砌病害智能检测方法及结构韧性提升技术研究

承担单位：西安航空学院

项目负责人：李杰

通讯邮编、地址：陕西省西安市西二环 259 号，邮编 710077

传真、电话：13201401138

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

本项目以提升检测效率、保障结构安全和延寿增韧为根本目标，拟对“运营隧道衬砌结构病害高效智能检测表征方法及服役韧性提升技术”开展研究。研究中采用理论分析、数值模拟、现场测试和室内实验相结合的方法，按照“**基础认知-方法研发-工程验证**”的**实施思路**，针对隧道数字化养护与维修控制智能化程度低、病害处治维修效果不佳的现有情况，围绕衬砌病害智能检测、分级评价与靶向修复技术路径，主要开展以下三方面研究：

(1) 运营隧道多源衬砌病害分布规律与图像特征分析

对运营隧道衬砌结构病害进行统计、归类和汇总，研究衬砌内空洞、脱空、厚度不足、局部强度不均以及表面裂缝、渗漏水等多类型病害在不同形态、尺度及空间位置条件下的分布规律与响应特征，并采用视觉处理方法探明复杂背景条件下识别质量影响机理；基于 FDTD 开展不同缺陷类型、尺度、埋深及介质参数条件下的地质雷达正演模拟，提取时延、振幅、频谱及异常形态等波形特征，结合图像识别得到的纹理、边缘、灰度分布和病害轮廓等像素特征，研究雷达波形特征与图像像素特征的联合表达与互补机制，明确不同病害场景下两类特征的适用边界与融合方式，为多源病害高精度识别提供基础。

(2) 基于深度学习技术的多源衬砌病害高效检测表征方法

采用可变形卷积网络、端到端变换解码器和加权平均等算法对传统目标检测模型进行融合改进，以实现衬砌弧形断面的快速拼接与病害的高效识别；针对污渍、灯光不均、渗水痕迹、手写标记等

复杂背景干扰，通过注意力机制和多尺度特征融合技术对语义分割算法进行改进，面向表观裂缝长度、宽度、渗漏水分布范围及内部缺陷轮廓特征等定量指标提出精准表征与分级信息提取方法，形成可服务于病害分级评价与维修参数确定的定量信息输出；同时，依托不同运营隧道环境、不同病害类型及不同背景条件下的现场样本，开展模型在跨隧道、跨场景和跨病害条件下的测试验证，系统评估算法在识别精度、定位误差、拼接质量、鲁棒性与泛化能力等方面的适应性。

(3) 基于多源衬砌病害定位分级评价的靶向性注浆修复机制

依托实体工程开展多源病害智能检测感知定位验证，并对衬砌病害发展程度进行分级评估。分级评估主要考虑病害类型、空间范围、尺度参数、结构影响及处治紧迫性，与《公路隧道养护技术规范》侧重总体技术状况判定不同，本项目更强调面向整治决策的精细化评价。针对重点病害区段，在智能检测基础上结合必要的复核勘察手段进一步查明病害范围、深度及成因，并据此确定注浆范围、方式及施工参数，研发压密注浆与渗透注浆耦合方法，定量优化注浆工艺参数；同时，融合深度学习、高光谱图像和现场检测技术，构建注浆后结构韧性提升效果评价体系，形成“检测识别—分级评价—靶向注浆—效果评估”的一体化技术路径。

2. 技术关键

面向运营隧道衬砌多源病害识别与处治需求，项目的技术关键主要体现在三个方面：一是复杂背景下表观病害与隐蔽病害的多源协同感知与精准定位，解决裂缝、渗漏水及空洞、脱空、厚度不足等病害识别难、定位难的问题；二是面向整治决策的病害发展程度精细化分级评价，打通检测结果向处治范围、处治方式和参数优化

转化的技术链条；三是基于检测—评价结果的靶向性注浆修复及修复后结构韧性提升效果量化评估，实现病害处治的针对化、参数化和可验证化。

3. 依托工程（依托工作）

本项目依托陕西交通控股集团有限公司白泉分公司管理运营的店子沟隧道和石泉隧道开展研究。两座隧道均为双向四车道分离式高速公路特长隧道，设计时速 80 km/h。其中，店子沟隧道下行线（石泉—白河方向）中心桩号 K86+593，隧道长度 3693 m；石泉隧道下行线（石泉—白河方向）中心桩号 K285+407，隧道长度 4949 m。

在长期运营过程中，两隧道均出现不同程度的衬砌开裂、空洞及局部掉块等结构病害，已具备实施病害检测与注浆修复的工程条件，适合作为隧道衬砌病害靶向性注浆修复技术的依托工程。



(a) 店子沟隧道石泉端洞门照



(b) 店子沟隧道白河端洞门照



(c) 石泉隧道石泉端洞门照



(d) 石泉隧道白河端洞门照

图 1 依托隧道工程照

本项目拟重点解决以下技术难点和问题：一是运营隧道衬砌表

观裂缝、渗漏水与内部空洞、脱空、厚度不足等多源病害并存条件下，复杂背景干扰强、病害信息离散，导致识别精度和空间定位准确性不足的问题；二是多源检测结果向病害发展程度判定和整治决策转化不充分，现有方法难以准确支撑病害范围确定、处治方式选择及施工参数优化的问题；三是衬砌病害整治过程中注浆等处治措施针对性不足、参数确定较依赖经验，且修复后结构韧性提升效果缺乏量化评价依据的问题。项目将围绕多源病害精准感知定位、精细化分级评价、靶向性修复参数优化及修复效果评估等关键环节开展研究，为运营隧道病害科学整治提供技术支撑。

二、考核指标

1.预期目标

(1) 数字化整合隧道多源衬砌病害检测信息，构建运营隧道衬砌病害智能检测与定量表征方法体系，实现表观病害与隐蔽病害的精准识别、空间定位与分级评价。其中，表观病害定位主要包括裂缝、渗漏水等病害的空间位置、分布范围及形态参数识别，隐蔽病害定位主要包括空洞、脱空、厚度不足及局部强度不均等病害的里程位置、环向分布、埋深范围及缺陷轮廓识别。

(2) 攻破衬砌病害处治过程中病害定位不清、参数依赖经验等问题，建立基于病害定位与分级评价结果的靶向性注浆修复方法；

(3) 建立深度学习与高光谱图像联合驱动的衬砌结构韧性提升评价方法，形成面向运营隧道病害修复效果评估与养护决策支撑的技术体系。

项目实施后，预期可在运营隧道衬砌多源病害智能检测与靶向处治协同技术方面填补**省内相关研究与工程应用空白**，并为后续行业推广应用及技术标准完善提供支撑。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

本项目拟形成运营隧道衬砌多源病害智能检测、分级评价与靶向修复技术方法。在技术指标方面，项目成果可服务于运营隧道定期检测与专项检测需求，实现对衬砌内部空洞及表观裂缝等典型病害的快速识别与精准定位，病害识别准确度预计提升约**5%~10%**；同时，可提高检测结果的一致性与稳定性，为隧道养护决策提供更加客观的数据支撑。在经济指标方面，项目提出的靶向性注浆修复机制可有效减少注浆范围不清和施工参数依赖经验带来的材料浪费

与重复施工，有助于缩短维修周期、降低病害处治综合成本，并减小养护施工对交通运行的影响。在工程效果方面，注浆修复后衬砌结构的整体性与密实性将得到改善，有利于延缓病害发展，提高结构服役韧性与耐久性能。

3.经济和社会效益

项目完成后，可形成面向运营隧道衬砌多源病害的智能检测、分级评价与靶向修复技术体系，有助于提高病害识别与定位的准确性、增强检测结果对整治方案制定的支撑能力，并提升病害处治的针对性和实施效果。在经济效益方面，项目成果可减少隧道病害整治过程中因范围判断不准、参数选择不合理带来的材料浪费、重复施工和工期延长，降低综合养护维修成本，减小养护作业对交通运行的影响。在社会效益方面，项目有助于提升运营隧道结构安全保障水平和养护管理精细化水平，降低病害发展带来的运营风险，保障隧道通行安全与服务能力；同时，可为类似运营隧道病害检测、维修加固及养护决策提供技术参考，具有较好的推广应用价值。

4.成果提供形式

(1)形成基于病害定位分级评价的靶向性注浆修复实验方法及工艺参数优化方案 1 套；

(2)形成项目技术研究报告 1 份；

(3)发表学术论文 1~3 篇（其中中文核心期刊论文不少于 1 篇，并注明：依托陕西省交通科技项目及项目编号），申请相关专利 1~2 项。

4. 其他考核指标

项目实施过程中，注重技术骨干培养与团队能力提升，培养青

年技术骨干和工程技术人员不少于 3 人；围绕运营隧道衬砌病害智能检测、分级评价与靶向整治等内容，组织或参加技术交流活动不少于 1 次；结合项目研究进展、阶段性成果及工程应用成效，通过行业平台、学校官网、主流媒体或专业公众号等开展宣传报道不少于 3 次；同步形成阶段性成果总结、技术交流材料和宣传资料，提升项目成果的行业影响力与社会关注度。

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	1. 开展文献调研、现场踏勘和依托工程资料收集，制定调查与采样方案；2. 完成典型病害样本采集，建立图像与雷达基础数据库；3. 开展地质雷达正演模拟，分析典型病害响应特征；4. 初步完成弧形断面拼接与病害识别模型构建，提交阶段报告。
2027	1. 优化多源病害识别与定位算法，开展复杂背景和不同病害条件下验证；2. 依托工程实施智能检测与重点病害复核勘察；3. 开展病害发展程度分级评价研究，形成阶段成果；4. 完成压密注浆与渗透注浆参数优化，提交年度总结和验证资料。
2028	1. 完成依托工程修复效果跟踪与结构韧性评价分析；2. 汇总检测、试验和工程验证数据，形成研究总报告；3. 完成技术方案、论文专利及成果整理；4. 提交结题验收材料，完成项目总结、技术交流和成果归档。

四、项目经费

项目总经费：39.90 万元

交通运输厅补助：19.9 万元

自筹资金：20.00 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	34	17
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	22	11
(4) 材料支出	5	3.5
(5) 测试化验实验加工支出	8	3
(6) 燃料及动力支出	0	0
(7) 差旅支出	6	3
(8) 会议支出	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	2	1
(11) 其他支出	1	0.5
3. 劳务费	12	6
(12) 劳务性支出	8	4
(13) 咨询专家支出	4	2
(二) 间接费用	5.9	2.9
4. 管理费	3	1.5
5. 绩效支出	2.9	1.4
合 计	39.9	19.9

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	1
		（1）授权发明专利	0
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	0
		2.软件著作权授权数（项）	0
		3.发表论文（篇）	1~3
		（1）其中 SCI 索引收录数	0
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其他	1~3
		4.著作（部）	0
		5.制订标准数（项）	0
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	1
	其他成果	1.填补技术空白数	0
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	0
		2.获奖项数	0
		（1）国家奖项	0
		（2）部、省奖项	0
		（3）地市级奖项	0
		3.其他科技成果产出	0
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	0
		（3）新材料	0
		（4）新装备（装置）	0
		（5）平台/基地/示范点	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	0
		(1) 小试	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1. 引进高层次人才	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（%）	0
		3. 孵化科技型企业（个）	0
		4. 转化科技成果（个）	0
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	0
		2. 新增销售（万元）	0
		3. 新增出口创汇（万美元）	0
		4. 新增利润（万元）	0
	社会效益	1. 新增税收（万元）	0
		2. 新增就业人数	0
		3. 就业培训（人次）	0
		4. 带动农民增收（万元）	0
		5. 培训和指导科技服务（人次）	0
		6. 新增产业带动情况	0
		7. 技术集成示范（项）	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	无		

六、承担单位或研究人员分工

本项目由**西安航空学院**牵头组织实施，负责项目总体方案设计、研究任务统筹、关键技术路线把控、项目协调管理及成果汇总凝练，重点承担运营隧道衬砌多源病害智能检测、分级评价方法构建及项目总体技术管理等工作。**陕西省交通规划设计研究院有限公司**依托其在公路隧道勘察设计与工程技术服务方面的基础，重点承担依托工程技术需求分析、现场调查与检测方案优化、病害整治方案衔接及工程应用技术支撑等工作。**陕西交通控股集团有限公司白泉分公司**依托运营管理与养护实践条件，重点承担依托隧道现场协调、病害基础资料提供、现场检测与工程验证配合、修复实施条件保障及成果应用示范等工作。**长安大学**依托其在隧道工程与道路基础设施领域的科研优势，重点承担地质雷达正演模拟、多源检测信息融合分析、病害发展程度评价、靶向修复机理及修复效果评估等研究工作。项目负责人负责总体技术统筹与关键问题把关，各单位研究骨干围绕现场调查、数据分析、算法研究、试验验证、工程应用和成果总结等任务分工协作，共同推进项目实施。

七、项目参加人员表

项目承担单位：西安航空学院							
参与单位（排序）：陕西省交通规划设计研究院有限公司；陕西交通控股集团有限公司白泉分公司；长安大学							
项目负责人							
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作	签名
1	李杰	1977-12-13	西安航空学院	正高级/副院长	隧道工程	总体安排	
主要研究人员（注：一般项目不超过 15 人）							
2	徐磊	1977-09-10	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	隧道工程	现场管控与组织	
3	王琪	1973-05-18	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	副高级	隧道工程	总体方案设计	
4	王志丰	1986-08-12	长安大学	正高级	隧道工程	总体方案设计	

5	张国庆	1978-10-01	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	隧道工程	方案推进与协调	张国庆
6	杨洋	1986-06-25	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	副高级	隧道工程	方案推进与协调	杨洋
7	庞江波	1980-10-21	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	副高级	隧道工程	方案推进与协调	庞江波
8	郭昱辰	1992-10-08	西安航空学院	中级	隧道工程	技术负责	郭昱辰
9	苏皓	1993-10-10	西安航空学院	中级	隧道工程	技术负责	苏皓
10	王思琦	1992-03-08	西安航空学院	中级	隧道工程	理论分析	王思琦
11	卢攀	1990-06-15	西安航空学院	中级	环境工程	理论分析	卢攀
12	李妍	1992-07-30	西安航空学院	中级	能源工程	理论分析	李妍
13	刘勇	1996-06-22	长安大学	助理级	隧道工程	模型试验	刘勇
14	王煜轩	1996-12-17	长安大学	助理级	隧道工程	现场测试	王煜轩
15	王二博	1995-03-17	长安大学	助理级	隧道工程	现场测试	王二博

八、信息表

项目合同编号		25-58K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部		
项目名称		运营隧道衬砌病害智能检测方法 & 结构韧性提升技术研究								
项目实施所在地		陕西省		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月				
总 经 费		39.9 万元		厅 拨		19.9 万元				
第一承担单位	单位名称	西安航空学院								
	所在地	陕西省西安市					代码	/		
	通讯地址	陕西省西安市西二环 259 号					邮编	710077		
	单位性质	(1) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	1		
参与单位	序号	单 位 名 称								
	1	陕西省交通规划设计研究院有限公司								
	2	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司								
	3	长安大学								
项目负责人		姓 名	李杰		性别 (2) 1.男 2.女		出生年份	1977		
		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	13201401138		电子邮箱		22436440@qq.com			
项目联系人		姓名	郭昱辰			性别		男		
		联系电话	13572992565			电子邮箱		2019021079@chd.edu.cn		
项目组人数		15	高级	7	中级	5	初级	3	其他	
主要研究内容 (100 字以内)		面向运营隧道衬砌裂缝、渗漏水、空洞、脱空等多源病害,开展智能检测、精准定位、分级评价与靶向修复研究,构建检测—评价—整治—效果评估一体化技术体系,并依托工程开展验证。								
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、F	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他							

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

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

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

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

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

6.合同正本一式 10 份，甲方单位伍份，承担单位 5 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：

西安航空学院

单位负责人：（签字） 2020 年 3 月 27 日

项目负责人：（签字） （公 章）

电 话：

财务负责人：（签字）

账 户 名：西安航空学院

开户银行：中国工商银行股份有限公司西安土门支行

账 号：3700021809089111359

陕西交通科技项目科研诚信 承诺书

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



项目承担单位：（盖章）

项目负责人：李生

年 月 日

项目编号：25-58K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：运营隧道衬砌病害智能检测方法及结构韧性提升技术研究

申请单位：西安航空学院

联系人：李杰

电 话：13201401138

陕西省交通运输厅制

2025 年 12 月

运营隧道衬砌病害智能检测方法及结构 韧性提升技术研究

一、项目研究的背景和必要性

21 世纪是地下空间开发利用的世纪，大量城市地铁、山岭隧道和综合管廊等地下工程正在建设^[1]。山岭隧道常作为铁路和公路交通网中的控制性工程发挥重要作用。截至 2024 年末，全国公路隧道总数达 28,724 处、运营里程约 3,259.66 万延米，其中特长隧道 2,261 处、长隧道 8,047 处，全年新增隧道 1,427 处、236.48 万延米^[2]。隧道保有量和建设量的持续增长使得我国已成为世界上隧道工程数量最多、运营里程最长、修建速度最快的隧道强国^[3]。

长期运营隧道受复杂地质条件、施工质量不规范、材料性能劣化及环境荷载长期耦合作用影响，常在服役过程中出现衬砌内部缺陷、表面裂缝和渗漏水等多源病害。其中，二次衬砌厚度偏差、混凝土振捣不密实、施工缝及变形缝处理不当、背后回填不密实、防排水体系局部失效及后期维修施工不规范等问题，均可能诱发或加剧衬砌厚度不足、局部强度不均、脱空空洞、裂缝扩展和渗漏水发展等病害，并进一步影响后续补强处理措施的针对性与实施效果。若不能从病害形成机理及其与施工质量之间的关联关系出发开展检测评价与处治方案设计，容易导致维修范围确定不准、补强方式选择不合理及修复效果离散性较大等问题。为此，许多研究人员力求通过理论分析、数值

模拟、现场实验和模型试验等方法建立衬砌损伤度、服役状态、可靠性和安全性能演化评价方法以指导病害处治加固方案的决策。虽然既有研究成果能在一定程度上指导隧道运维决策,但与基础设施智慧化养护发展方向有所偏差。因此,亟需明确以提升隧道病害检测效率和服役安全水平为目标,构建面向运营期隧道的数字化、智能化养护技术体系。基于快速发展的现代科技手段,以“隧道工程数字化养护”为核心对精准、快速、可用性强的多源衬砌病害检测识别定位与定量表征关键方法开展研究;同时要以病害智能感知与表征定量评价方法研究成果为基础开展衬砌服役韧性提升技术相关研究以牵引病害处理加固技术体系向科学、经济、绿色方向发展。本项目围绕运营期公路隧道衬砌多源病害的智能感知与靶向修复需求,系统开展病害检测识别、定量表征与修复机制研究,形成可服务于工程实际的技术方案。

科学技术的飞速发展也为隧道衬砌病害检测方法进步奠定了基础。行业内人员也逐渐从低效的定期人工巡检方式转变为以地质雷达扫描、红外线探测、多光谱分析和空间激光扫描等方式为载体的智慧检测方法。然而,目前所能采用的智能巡检方法在很大程度上仍需依赖人为主观判断和手工标记,从而带来检测时间长、准确率低和漏检率高等问题,难以满足未来隧道衬砌定期巡检的实际需求。以深度学习、图像处理和计算机视觉等理论为基础的研究方法为智能化发展提供途径。黄宏伟教授^[4-6]针对盾构隧道高频多发的渗漏水 and 裂缝病害,以深度学习方法为基础建立了高精度、高效率的隧道复杂环境下病害定量检测算法,研究了多病害对隧道结构安全性能的影响,并实现了

病害演化发展的预测；吉林大学李静教授所指导博士生熊洪强^[7]基于生成对抗网络和探地雷达技术实现了衬砌内部缺陷病害的快速检测；深圳大学李清泉院士所指导博士生廖江海^[8]针对裂缝、变形等表观病害建立了快速自动化检测方法。以上研究虽然表明隧道建设理念已由“建设为主”向“建养并重”的智能化检测、科学养护转变，但现有公路隧道多源病害检测体系智能化程度低，工作效率慢，多源病害精准定量表征与处理加固方法发展滞后，与隧道智慧维护需求不匹配，亟需通过计算机、大数据等科技手段强化隧道数字化养护与维修管控，提升整体结构服役韧性，保障行车运营安全。

因此，在以提升公路隧道病害检测效率、保障衬砌结构安全和延寿增韧为根本目标的研究过程中，探索运营隧道多源衬砌病害分布规律与图像特征，研发多源衬砌病害精准、快速、轻量化的检测与定量表征算法，建立基于多源衬砌病害定位分级评价的靶向性注浆修复机制，形成面向运营期隧道病害智能检测、分级评价、维修决策与修复效果评估的技术路径，为隧道数字化养护与维修控制奠定理论基础，相关成果可直接服务于既有公路隧道的日常巡检、病害评估、病害处治与养护决策，具有良好的工程推广应用前景。项目实施有助于降低隧道养护成本、减少交通运营干扰、提升交通基础设施安全保障能力，对支撑交通基础设施高质量发展 and 国民经济稳定运行具有重要意义。

二、前期科研及工作基础

1.对项目领域国内外（省内外）研究现状，研究水平和发展趋势的分析和评价（应进行查新分析，主要分析本项目的技术领域发展状

况和水平，有那些技术尚未解决，需要这次攻克的技术难点）

衬砌结构的安全状态直接关系到隧道工程的运营安全和服役年限。交通运输部颁布的《公路隧道养护技术规范 JTG H12-2015》^[9]和住房和城乡建设部制定的《城市轨道交通隧道结构养护技术标准 CJJT 289-2018》^[10]均明确指出，衬砌裂缝、渗漏水、脱空空洞等病害形式及其发展程度是隧道结构安全的重要表征，也是运营期隧道周期性检测与养护决策中的重点关注对象。在实际运营隧道中，衬砌病害类型多样、分布离散，且表观病害与内部结构性缺陷往往相互耦合，仅依赖单一检测手段或人工经验难以全面、客观反映衬砌真实服役状态。因此，如何实现多源衬砌病害的高效检测、精准识别与可靠定位，如何以衬砌内部空洞等结构性缺陷为重点开展病害定量化与分级评价，并进一步为病害处治与结构韧性提升提供科学依据，已成为隧道养护领域亟需解决的关键问题。

在此背景下，随着多学科交叉融合的发展，以深度学习、计算机视觉和智能感知为代表的现代信息技术逐步引入隧道衬砌病害检测与评价研究中，在表观裂缝自动识别、内部缺陷信息提取及服役状态分析等方面展现出良好的应用潜力，成为隧道衬砌病害检测与智慧养护的重要发展方向。总体来看，国外相关研究起步较早，在隧道衬砌表观病害自动识别、GPR 辅助内部缺陷解译以及检测数据与数值分析协同方面已形成一定研究基础，部分研究已由单一病害识别转向多源感知融合与定量表达；国内近年来在裂缝检测、雷达图像识别和局部工程应用方面发展较快，已具备较好的算法研究与现场检测基础，

但在复杂运营环境下多类型病害协同识别、厚度不足与强度不均等隐蔽病害检测机理、检测结果驱动的分级评价及处治参数反演等方面仍相对薄弱。总体上看，现阶段尚缺乏面向运营隧道、贯通“多源检测—定量表征—分级评价—靶向修复—韧性提升”的系统研究框架，相关分析评价基础资料仍需结合典型运营隧道检测数据、现场病害样本和工程验证资料进一步充实完善。

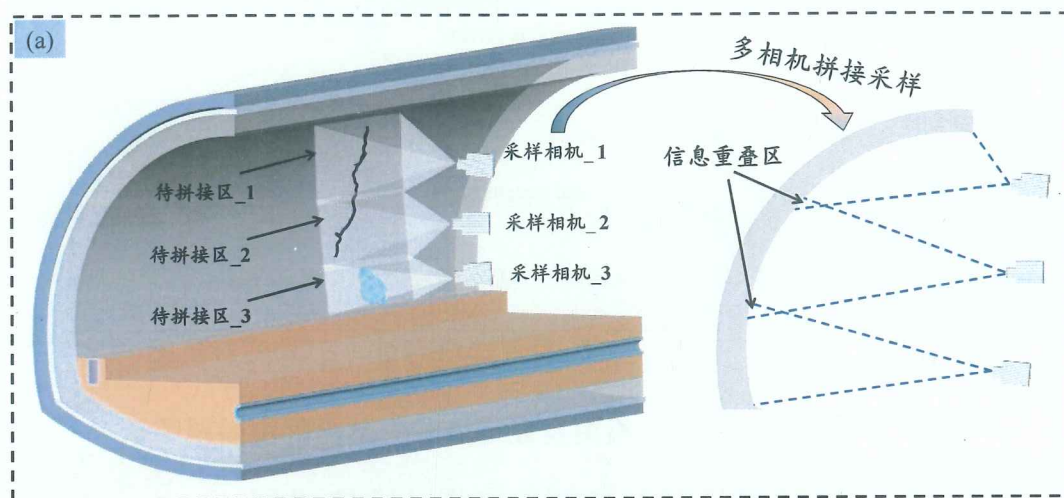
1.1 隧道衬砌表观病害识别与定量表征研究进展

裂缝是隧道衬砌结构中最为常见、且对结构服役状态表征意义最为直接的表观病害形式，渗漏水多作为裂缝及衬砌内部缺陷的伴生病害出现。现阶段，隧道衬砌表观病害检测方法主要包括人工接触式检测和**设备非接触式检测**两类。人工巡检通常借助裂缝宽度比对卡、裂缝测宽仪和塞尺等工具，并结合人工经验完成病害判定，该类方法受主观因素影响较大，检测效率偏低且漏检风险较高。设备非接触式检测方法则包括探地雷达、激光扫描、超声波检测、光纤或光线传感检测以及基于图像处理的检测技术等。其中，探地雷达检测对雷达波传播条件和现场环境要求较高；激光扫描需依赖高性能计算设备对大规模点云数据进行处理；超声波检测的探测深度通常适用于浅层或局部表观缺陷检测，工程应用场景存在一定局限性。相比之下，基于图像处理的检测方法为隧道衬砌表观病害识别提供了更加直观和高效的技术路径。近年来，随着深度学习技术的快速发展，其在隧道裂缝等表观病害自动识别中的应用逐渐增多，为提升检测效率和识别精度提供了有力支撑。深度学习作为机器学习的重要分支，其核心思想是通

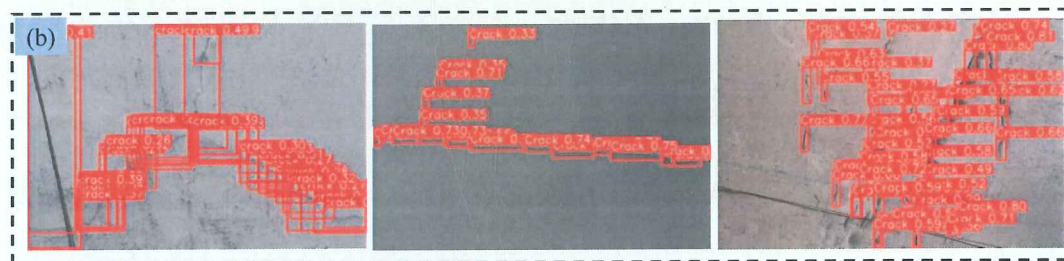
过模拟人脑神经网络结构实现复杂特征的自动学习与模式识别。当前应用于裂缝视觉检测的深度学习目标检测算法主要包括以 R-CNN 系列为代表的两阶段目标检测器^[11,12]，以及以 YOLO 系列^[13]、SSD 算法^[14]为代表的单阶段目标检测器和端到端目标检测算法 DETR^[15-17]。相关研究表明，基于深度学习的衬砌病害图像检测技术能够以裂缝等典型表观病害为主要对象，实现较为稳定的自动识别与分类，在一定程度上满足工程应用对检测精度和效率的要求。

然而，从工程应用角度看，现有基于图像的衬砌裂缝检测研究仍面临若干关键问题。首先，隧道衬砌检测成像面多为弧形结构，通常需要多相机协同工作才能完成全幅信息采集（见图 1.a），现有研究中针对图像智能配准与融合拼接的系统性方法仍相对不足；其次，裂缝病害具有尺度小、形态不规则、分布密集且易重叠等特点，加之隧道内昏暗灯光、渗水痕迹及手写标记等复杂背景干扰，使得检测模型在精度、速度、参数量及轻量化方面面临较大挑战（见图 1.b）。针对上述问题，有研究尝试引入可变形卷积网络等非常规采样策略以提升模型对复杂环境和细小目标的适应能力（见图 1.c 和图 1.d），但在工程稳定性和泛化能力方面仍有待进一步验证。此外，裂缝宽度、长度、渗漏水分布面积以及病害位置、范围、形态、尺度与分级信息等，是隧道养护与运维决策的重要依据，现有研究多侧重裂缝等表观病害的检测与定位，对多源病害定量信息提取、图像像素尺度向工程实体尺度的转换及分级评价方法关注不足，病害定量表征结果与工程实际之间仍存在一定差距。上述问题在一定程度上制约了基于图像的

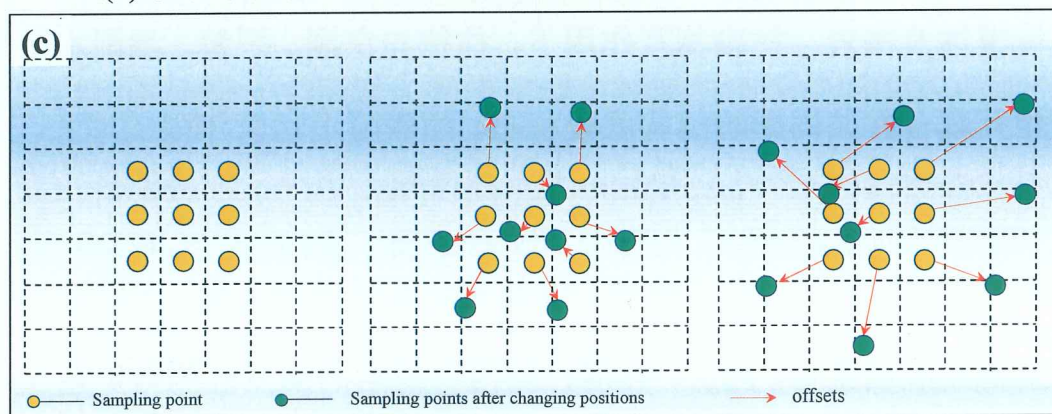
衬砌表面病害检测技术在运营隧道中的规模化应用,有必要在现有研究基础上进一步开展针对性研究。



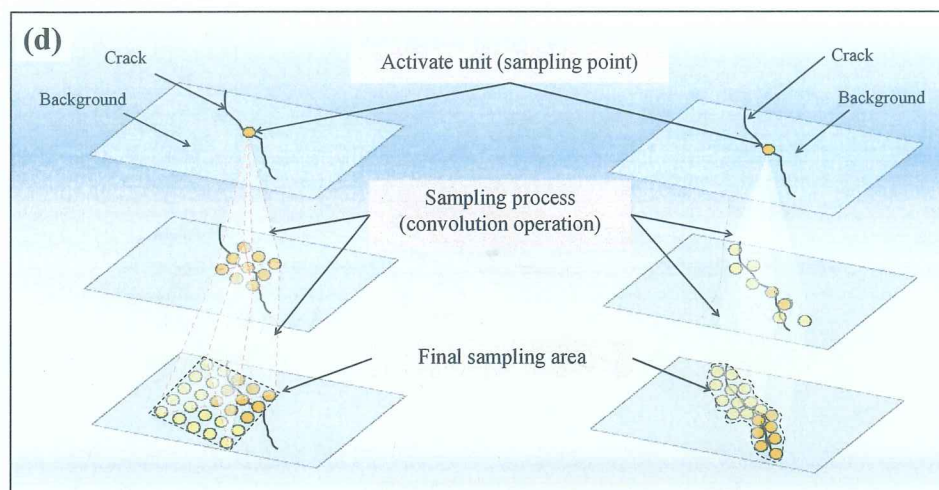
(a) 多相机耦合采样及拼接示意图



(b) 受性状随机, 标注密集易重叠因素影响下裂缝检测图特征



(c) 可变形卷积网络采样示意图



(d) 常规卷积、可变形卷积网络在裂缝采样中差异对比图

图 1 衬砌表面病害智能检测及表征方法中亟需解决问题图示

1.2 隧道衬砌内部缺陷检测与多源信息量化研究进展

衬砌内部空洞、脱空、不密实、厚度不足及局部强度不均等隐蔽性缺陷，均是影响隧道结构安全与服役寿命的重要病害类型。其中，厚度不足易导致局部承载储备下降和受力集中，强度不均则会引起衬砌介质参数离散、局部刚度突变及损伤演化加快，二者在长期荷载、环境侵蚀及围岩—衬砌相互作用下，往往与空洞、裂缝、渗漏水等病害相互耦合并共同影响结构服役状态。随着隧道运营年限的增长，此类内部缺陷可能在长期荷载、环境侵蚀及围岩—衬砌相互作用下逐步累积并演化，进而引发衬砌受力性能劣化甚至局部失稳，对隧道运营安全构成潜在威胁。因此，开展衬砌内部缺陷的高效检测与定量表征研究，是提升隧道结构安全水平和实现预防性养护的重要基础。

目前，冲击回波法、红外热成像、三维激光扫描、机器视觉以及探地雷达（Ground Penetrating Radar, GPR）等无损检测方法已被用于隧道衬砌内部缺陷探测，其适用范围、技术优势及局限性对比如表 1 所示。

表 1 隧道衬砌隐蔽缺陷无损方法介绍

方法名称	应用领域	优势	局限性
冲击回波法	缺陷检测、均匀性评估	效率高、结果可靠	信号衰减大、耦合要求高
红外热成像	裂缝检测、缺陷评估	结果可靠、无接触	无法完成深层检测、 作业环境要求较高
三维激光扫描	变形检测、缺陷评估	高效点云重构	仅适用于表面检测
机器视觉法	表面裂缝、渗漏水	无接触、自动化	对环境光和背景敏感、 仅适用于表面检测
探地雷达 (GPR)	隐蔽缺陷检测、钢筋位置 估算、注浆层厚度检测	检测速度快、分辨 率高、操作简单	数据解释人员要求高

其中, GPR 通过发射高频电磁脉冲并接收反射信号获取结构内部介质变化信息, 具有探测深度大、检测效率高、分辨率较高及工程适应性强等优势, 已逐渐成为隧道衬砌内部缺陷检测的主要技术手段。围绕探地雷达在隧道工程中的应用, 国内外学者开展了大量研究。任思永等通过引入瞬时属性分析与自适应衰减补偿模型, 并结合逆时偏移技术, 有效提升了复杂围岩条件下雷达成像分辨率和检测精度^[18]; 胡荣明等采用 YOLOv7 目标检测算法, 对探地雷达 B-Scan 图像的自动解译进行了探索, 初步实现了衬砌内部缺陷的智能识别^[19]; 朱兆荣等通过模型试验与现场试验相结合的方式, 验证了探地雷达在铁路隧道衬砌空洞探测中的工程适用性^[20]。上述研究表明, 探地雷达在衬砌内部缺陷检测方面具有良好的工程可行性, 但其检测结果对雷达波形解释和人工经验仍具有一定依赖性。近年来, 随着深度学习技术的快速发展, 部分研究开始将卷积神经网络和目标检测算法引入探地雷达数据解译过程, 通过对雷达图像中异常反射特征的自动识别, 提高内部缺陷检测的效率和稳定性^[21-23]。然而, 从工程应用角度看, 隧道内部环境复杂、衬砌内钢筋网密集、电磁波传播路径多变等因素,

使雷达波形响应具有较强的不确定性；同时，现有深度学习模型多依赖有限的现场标注数据进行训练，其不同隧道条件下的泛化能力和工程稳定性仍有待进一步提升^[24-26]。为系统揭示不同缺陷形态、尺寸及空间位置对雷达响应特征的影响规律，部分研究基于时域有限差分（FDTD）方法，利用 gprMax 数值模拟软件开展衬砌内部缺陷雷达波正演分析，为雷达波形特征的解释提供参考基准^[22]。通过对不同缺陷工况下 A-Scan 和 B-Scan 波形特征的对比分析，可为现场探地雷达检测结果的判读提供理论支撑（见图 2）。相关研究表明，探地雷达正演模拟与现场检测在缺陷存在性判断和空间定位方面具有较好一致性，但在缺陷形状、尺度及分布范围等定量信息表达方面仍存在不足。

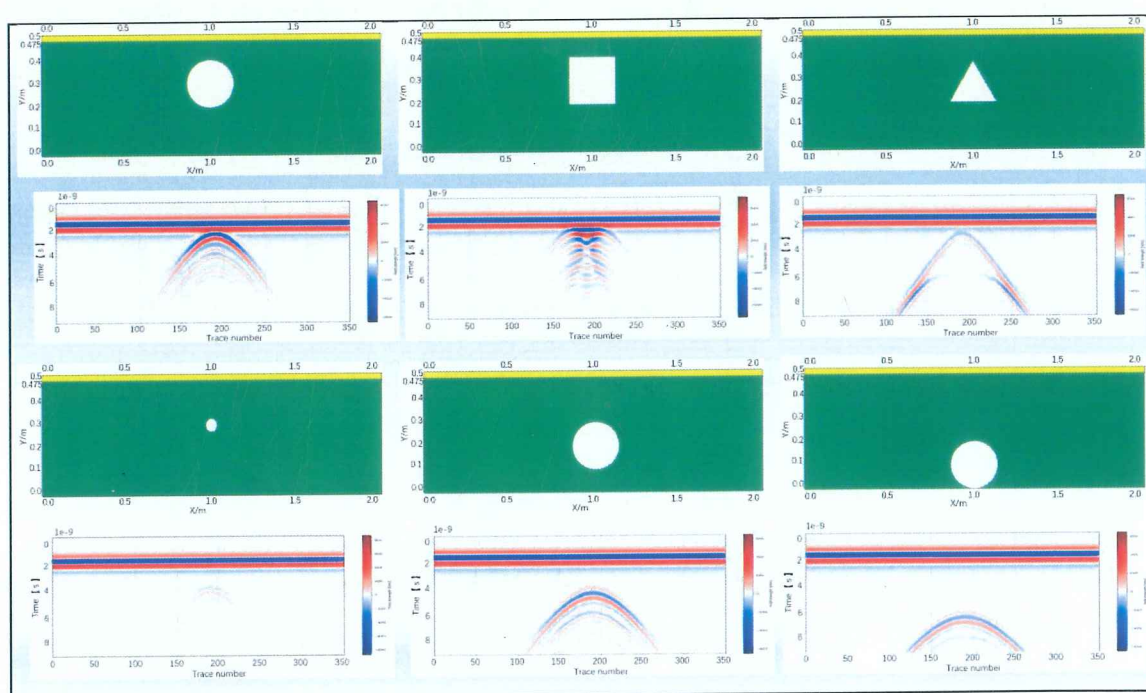


图 2 不同性状衬砌内部缺陷影响下雷达波形正演图示

因此，近年来研究重点逐步由“缺陷检测与定位”向“缺陷分割与定量表征”方向拓展。通过引入注意力机制和多尺度特征融合策略，

对语义分割或实例分割算法进行改进,可实现对衬砌内部缺陷轮廓的精细化提取,为缺陷尺度量化、病害分级评价及后续处治方案设计提供基础数据支撑。总体来看,现有研究为隧道衬砌内部缺陷的智能检测提供了重要技术基础,但在复杂工程环境下的稳定性、定量表征精度以及与病害处治措施之间的有效衔接方面仍有待进一步深入研究。

1.3 隧道衬砌服役状态评价与病害处治及韧性提升研究进展

隧道衬砌结构的服役状态直接决定在役隧道的整体安全水平和有效服役年限,是隧道运营管理和养护决策的重要依据。为科学评估隧道结构服役状态,国内外学者围绕结构健全度、结构损伤度和结构可靠度等指标体系,先后提出了多种服役状态评价方法,并在部分工程中得到应用。然而,现有评价方法多依赖人工调查结果或宏观指标,缺乏与衬砌病害智能检测结果之间的有效耦合,难以充分反映衬砌多源病害的空间分布特征及其对结构性能的综合影响。

随着隧道病害检测技术由人工巡检向多源智能感知方向发展,如何将衬砌表观病害与内部缺陷的检测定位结果、定量表征信息有效引入服役状态评价过程,成为当前研究的重要方向。相关研究表明,基于病害类型、发展程度及空间分布特征对衬砌结构进行分级评价,有助于识别结构性能退化的关键部位,为后续养护与加固决策提供更具针对性的依据。然而,现有研究多停留在评价指标构建层面,尚未形成以多源病害智能感知结果为驱动的系统化评价流程。在隧道病害处治方面,现阶段工程实践中常用的治理手段主要包括结构补强法、拆除重建法和注浆加固法等。结构补强法通常通过涂覆防水层或采用高

强材料对衬砌表面裂缝及孔隙进行封堵，能够在一定程度上改善衬砌表层性能，但对衬砌背后空洞、不密实等深层次缺陷的治理效果有限；拆除重建法适用于病害严重区域，虽然加固效果显著，但施工周期长、对交通运行影响较大，工程适用性受限。相比之下，注浆加固法通过向围岩或衬砌背后注入浆液，填补空洞、改善围岩—衬砌共同受力条件，在隧道病害治理中应用较为广泛。然而，传统注浆加固方法多依赖施工经验确定注浆范围和工艺参数，缺乏对衬砌内部缺陷位置、形态及规模的定量认知，注浆扩散机理和加固效果评价体系尚不完善，施工过程中易出现跑浆、串浆等问题，不仅影响加固效果，还可能造成材料浪费和环境扰动。因此，如何将衬砌多源病害检测结果与病害处治过程有机衔接，实现注浆修复的精准化和靶向化，是当前隧道病害治理领域亟需突破的关键技术难点。在此背景下，近年来部分研究开始探索基于病害检测结果的分级处治思路，通过将病害发展程度与加固措施相匹配，提高维修加固的针对性和有效性。但总体来看，现有研究在多源病害定位分级评价方法、注浆工艺参数优化及修复效果量化评价等方面仍存在不足，尚未形成完善的技术体系。

针对上述问题，本项目拟提出基于多源衬砌病害定位分级评价的靶向性注浆修复机制，通过融合衬砌表观病害与内部缺陷的智能检测结果，对衬砌病害发展程度进行分级评价，并据此开展压密注浆与渗透注浆相结合的靶向性修复研究；进一步通过优化注浆工艺参数与施工时序，提升注浆修复效果的可控性和稳定性；同时，构建靶向性注浆修复后衬砌结构服役性能与韧性提升的综合评价体系，为隧道病害

科学处治和结构安全长期保障提供技术支撑。

1.4 现阶段研究中存在的不足

综合前文所述,当前公路隧道衬砌病害检测与处治研究及工程应用中主要存在以下三点不足之处:

(1) 隧道衬砌病害检测整体智能化水平偏低,检测结果对人工经验依赖较强。

现阶段隧道衬砌病害检测仍以人工巡检和单一检测手段为主,病害识别与判读过程主观性强,检测效率和结果一致性难以保障,尤其在衬砌内部空洞等隐蔽性缺陷检测中,难以满足隧道运营条件下快速、精准检测的实际需求。

(2) 衬砌病害信息获取与表达方式相对粗放,多源病害定量表征能力不足。

现有研究和工程应用中,对衬砌裂缝、空洞等病害的识别多停留在定性或半定量层面,对病害规模、形态及空间分布特征的精细化描述不足,多源检测信息之间缺乏有效融合,难以为衬砌服役状态评价提供可靠的数据支撑。

(3) 病害检测结果与处治加固措施之间衔接不紧密,靶向性处治效果有待提升。

当前隧道衬砌病害处治措施多依赖经验确定,缺乏以病害精准定位和定量评价结果为依据的技术支撑。现有智能检测方法更多适用于日常巡检和病害初步识别,在服务整治方案制定时,尚需结合针对性的复核勘察与精细化分级评价;同时,现有病害评价方法与《公路隧

道养护技术规范》中技术状况值划分之间衔接不足，导致检测结果向处治范围确定、方法比选和参数优化转化的支撑能力仍有待提高。特别是在注浆加固应用中，对衬砌内部空洞等缺陷的针对性不足，处治效果稳定性和可控性有待进一步提升。

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

2.1 前期科研基础

（1）科研基础

项目负责人先后参与了多项国家自然科学基金项目，以及秦岭终南山特长隧道、陕鄂界隧道等多个重大隧道工程的设计、咨询及相关科技服务工作，熟悉项目实施过程中各环节的工作内容，积累了较为系统的专业知识和工程实践经验，在隧道衬砌病害识别、结构安全分析及工程处治等方面形成了较为稳定的研究方向和技术积累，已具备完成本项目所需的理论分析、智能算法改进、现场试验及模型试验等综合研究能力。项目负责人在隧道病害智能识别及加固处治方面起步较早，已围绕隧道表面裂缝图像特征、识别准确度影响机理及目标检测算法优化等方面开展了系统研究，并取得了阶段性成果。项目负责人已在国内外重要学术期刊和学术会议上发表相关论文 9 篇，申请国家专利 3 项，主编专著 1 部，参编专著 5 部，获陕西省科学技术进步奖二等奖、陕西高等学校科学技术研究优秀成果特等奖、中国公路学会科学技术奖三等奖等多个奖项。

（2）理论基础

深度学习、图像处理和计算机视觉等理论与技术的快速发展，为本项目开展隧道衬砌病害智能识别与定量表征研究提供了坚实的理论支撑；目标检测模型的持续迭代更新以及计算机算力水平的提升，为衬砌内部缺陷与表观病害的高效智能检测奠定了良好的实验基础；基于深度学习驱动的探地雷达（GPR）技术，为衬砌内部缺陷的溯源、定位及量化表征提供了有效手段；融合深度学习方法、高光谱图像信息及现场开挖验证的联合研究思路，将为靶向性注浆病害处治效果及结构服役韧性提升评价体系的构建提供理论依据。

（3）前期相关研究工作

申请人及项目团队在隧道病害智能检测识别、定量表征及处治加固等方面已开展了持续研究。依托陕西省交通运输厅课题“公路隧道二衬混凝土裂缝形成演化机理及预防技术研究（22-09K）”，系统研究了二次衬砌混凝土开裂机理、公路隧道二次衬砌混凝土裂缝预防技术、施工阶段裂缝控制方法以及高耐久性混凝土智能化跟踪监测技术；同时，采用可变形卷积神经网络与解码器结构对主流目标检测算法 YOLOv8 进行融合改进，提出了衬砌表观裂缝高效检测模型（算法框架见图 3、图 4），并在《图学学报》和《中国安全生产科学技术》期刊发表相关论文 2 篇。

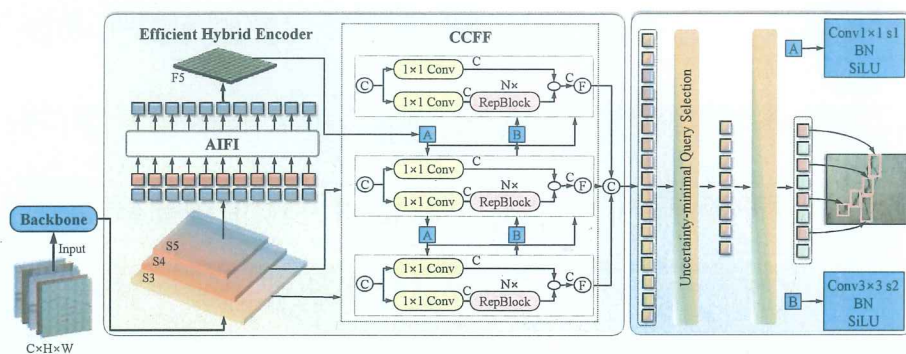


图 3 RT-DETR 模型结构图 (解码器技术图示)

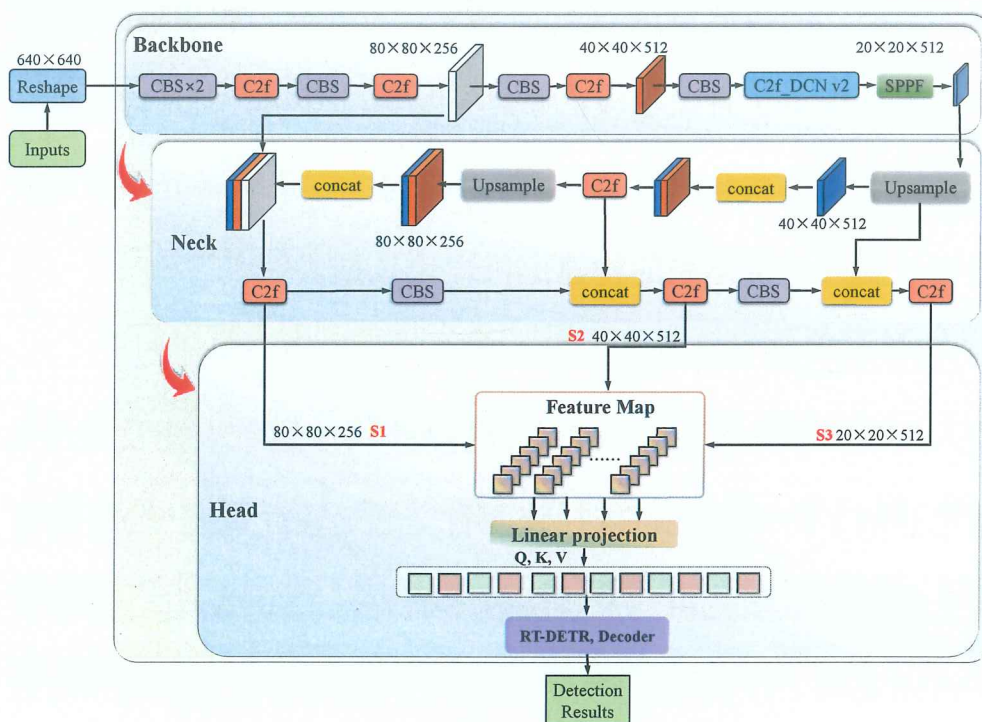


图 4 表观裂缝高效检测网络结构示意图

在隧道病害处治与加固研究方面，课题组依托陕西省交通厅课题“公路隧道喷射混凝土套拱加固技术研究（16-25K）”已对喷射混凝土套拱结构受力特性、喷射混凝土套拱结构力学模型、喷射混凝土套拱加固施工关键技术和喷射混凝土套拱加固检测评价体系开展研究；提出面向衬砌病害修复的喷射混凝土套拱施工工艺（见下图5），并成功发表论文5篇，其中行业内顶刊 *Journal of Cleaner Production* 1篇（项目申请人为通讯作者）。

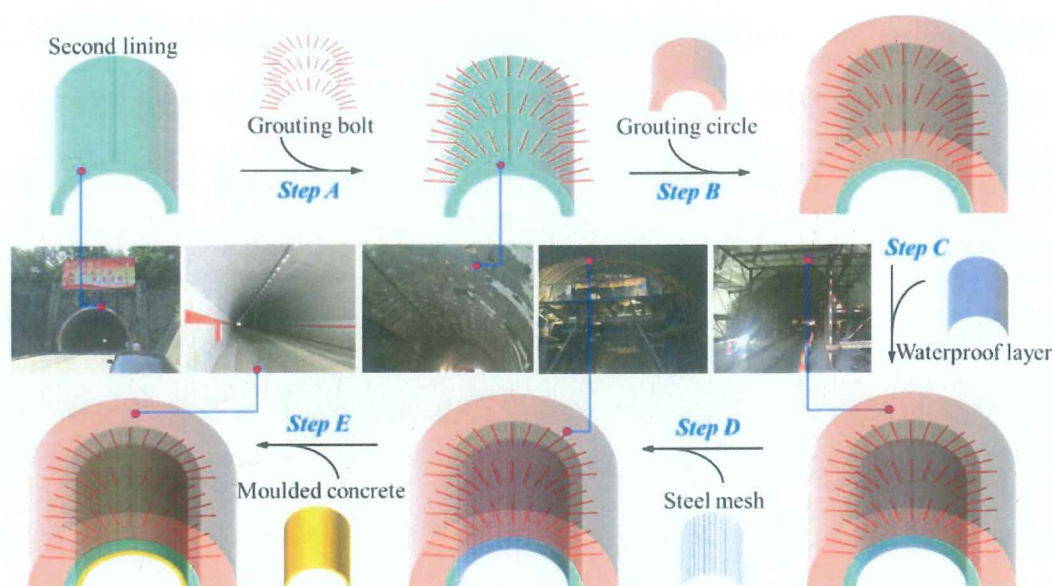


图 5 面向衬砌病害修复的喷射混凝土套拱施工工艺

在上述研究基础上，项目组还开展了较为系统的前期调研工作，对运营隧道衬砌结构病害形成机理、病害分类与定量特征、裂缝形成原因及演化规律等内容进行了初步研究，已初步构建了衬砌表面裂缝检测与分割模型，并开展了不同性状衬砌内部空洞条件下的雷达波正演模拟分析。上述研究作为本项目的进一步开展提供了直接可继承的研究基础，也表明项目组具备持续深入开展相关研究的能力。

2.2 现有工作条件

(1) 实验平台与试验条件

西安航空学院是经教育部批准设立的全日制普通本科高校，建有较为完善的科研与实验条件体系，具备开展工程结构分析、数值模拟、智能感知与工程验证等研究的综合能力。学校现有莲湖、阎良两个校区，教学科研仪器设备总值较高，建有数量充足的校内实验室和工程实践基地，可为工程技术类科研项目提供稳定的实验与计算环境支撑。

在科研平台建设方面，学校围绕工程系统运行、安全保障与信息感知等方向，建有飞行器多模态异构信息智能感知与处理技术陕西省

高校重点实验室、陕西省液压技术重点实验室以及特种泵系统技术国家地方联合工程研究中心等科研平台。其中,多模态信息感知与处理相关研究条件可为本项目开展多源病害信息融合、图像与信号智能识别算法研究提供技术基础;液压技术与泵系统相关研究条件可为隧道衬砌病害靶向注浆修复过程中浆液输送、压力控制及注浆机理分析提供工程支撑。同时,学校建有焓差实验室、人居环境实验室、能动综合实验室、仿真实验室、热工与流体力学实验室、给排水工程实验室、膜技术实验室及 BIM 仿真实验室等 20 余个专业实验室,形成了较为完整的实验与仿真支撑体系。相关实验条件可满足本项目在地质雷达正演模拟、病害检测算法验证、结构性能分析及工程技术方案比选等方面的研究需求,为运营隧道衬砌病害智能检测与靶向注浆修复技术研究提供可靠的实验与技术保障。

(2) 研究团队与协作条件

项目团队成员长期从事隧道工程、结构安全、病害检测及智能算法相关研究,在理论研究、工程实践和跨学科协同方面形成了较为稳定的研究团队结构。依托既有交通运输厅科研项目和工程咨询服务实践,项目组与相关工程建设及管理单位保持良好合作关系,具备开展现场检测、工程验证及成果推广应用的协作条件,为本项目顺利实施提供了可靠保障。

3.参考文献

- [1]. 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况 [J]. 隧道建设, 2010, 30 (04): 351-364.
- [2]. 周建强,韦征,王可心,等. 基于雷达机器人的隧道衬砌高效检测技术研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44 (08): 1686-1696.
- [3]. 洪开荣,冯欢欢. 中国公路隧道近 10 年的发展趋势与思考 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (12): 62-76.

- [4]. 薛亚东,高健,李宜城,等. 基于深度学习的地铁隧道衬砌病害检测模型优化 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47 (07): 137-146.
- [5]. 李庆桐,黄宏伟. 基于数字图像的盾构隧道衬砌裂缝病害诊断 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39 (08): 1658-1670.
- [6]. 黄宏伟,李庆桐. 基于深度学习的盾构隧道渗漏水病害图像识别 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (12): 2861-2871.
- [7]. 熊洪强. 基于生成对抗网络的探地雷达目标检测方法及应用研究[D]. 吉林大学, 2024.
- [8]. 廖江海. 隧道表观病害快速检测方法研究[D]. 深圳大学, 2020.
- [9]. 中华人民共和国交通运输部.公路隧道养护技术规范: JTG H12-2015[S].北京: 人民交通出版社,2015.
- [10]. 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通隧道结构养护技术标准: CJJT 289-2018[S].北京: 中国建筑工业出版社,2018.
- [11]. 阎光伟, 刘润泽, 焦润海, 等. 基于改进 Cascade RCNN 的输电线路防振锤脱落检测方法[J]. 图学学报, 2023, 44(5): 849-860.
- [12]. REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [13]. 胡欣, 胡帅, 马丽军, 等. 基于融合 MBAM 与 YOLOv5 的 PCB 缺陷检测方法[J]. 图学学报, 2024, 45(1): 47-55.
- [14]. LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot MultiBox detector[C]//The 14th European Conference on Computer Vision. Cham: Springer, 2016: 21-37.
- [15]. CARION N, MASSA F, SYNNAEVE G, et al. End-to-end object detection with transformers[C]//The 16th European Conference on Computer Vision. Cham: Springer, 2020: 213-229.
- [16]. ZHAO Y A, LV W Y, XU S L, et al. DETRs beat YOLOs on real-time object detection [EB/OL]. [2024-01-10]. <https://arxiv.org/abs/2304.08069>.
- [17]. ZHANG H, LI F, LIU S L, et al. DINO: DETR with improved DeNoising anchor boxes for end-to-end object detection [EB/OL]. [2024-01-10]. <http>

s://arxiv.org/abs/2203.03605.

- [18].任思永. 基于自适应衰减补偿模型的探地雷达偏移成像及应用研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44 (08): 1599-1608.
- [19].胡荣明,李鑫,竞霞,等. YOLOv7 在探地雷达 B-Scan 图像解译中的应用 [J]. 测绘通报, 2023, (08): 29-33.
- [20].朱兆荣,赵守全,秦欣,等. 探地雷达隧道衬砌空洞探测效果模型和现场实体试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44 (S1): 132-137.
- [21]. Yang S, Wang Z, Wang J, Cohn AG, Zhang J, Jiang P, et al. Defect segmentation: Mapping tunnel lining internal defects with ground penetrating radar data using a convolutional neural network[J]. Construction and Building Materials, 2022, 319: 125658.
- [22]. Liu P, Ding Z, Zhang W, Ren Z, Yang X. Using ground-penetrating radar and deep learning to rapidly detect voids and rebar defects in linings[J]. Sustainability, 2023, 15: 11855.
- [23]. Wang J, Zhang J, Cohn AG, Wang Z, Liu H, Kang W, et al. Arbitrarily-oriented tunnel lining defects detection from ground penetrating radar images using deep convolutional neural networks[J]. Automation in Construction, 2022, 133: 104044.
- [24]. Liu H, Yue Y, Lai S, Meng X, Du Y, Cui J, Spencer BF. Evaluation of the antenna parameters for inspection of hidden defects behind a reinforced shield tunnel using GPR[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 140: 105265.
- [25]. Huang J, Yang X, Zhou F, Li X, Zhou B, Lu S, et al. A deep learning framework based on improved self-supervised learning for ground-penetrating radar tunnel lining inspection[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2023, 39(6): 814-833.
- [26]. Fan Z. Defects recognition in on-site GPR images of mountain tunnel linings using YOLOv8N model[J]. Automation in Construction, 2025 (online first).

三、实施方案

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

（1）运营隧道衬砌病害智能化检测与定量表征问题

突破现阶段运营隧道衬砌病害检测依赖人工经验、检测效率低且定量能力不足的技术瓶颈，围绕衬砌内空洞及表面裂缝等典型病害，构建多源病害智能感知与检测技术体系，研究衬砌病害的分布规律与图像特征，建立基于深度学习的高效检测与定量表征方法，实现运营隧道衬砌病害的快速识别、精准定位与定量描述。

（2）基于病害精准定位与分级评价的靶向性修复技术问题

针对现有隧道衬砌病害处治过程中维修范围不清、注浆参数依赖经验、处治效果难以量化评估等问题，构建多源衬砌病害定位与分级评价方法，研发与病害等级相匹配的靶向性注浆修复技术，建立病害处治效果与结构服役性能提升的评价体系，实现隧道衬砌病害的精准处治和服役韧性提升。

围绕上述关键问题，项目创新性主要体现在以下两个方面：一是面向运营隧道衬砌表面病害与内部缺陷并存、人工巡检效率低且定量能力不足的问题，构建融合病害统计分析、图像处理、深度学习与雷达正演模拟的多源病害智能检测与定量表征方法，实现衬砌病害由传统经验识别向快速识别、精准定位与定量描述转变；二是针对运营隧道衬砌病害处治中维修范围不清、注浆参数依赖经验、修复效果缺乏量化评价的问题，建立基于病害精准定位与分级评价的靶向性修复技术体系，形成“检测识别-分级评价-靶向注浆-韧性评估”一体化技术路径，推动病害处治由经验驱动向定量驱动转变。

2. 主要研究内容及实施方案（根据研究目的和考核目标合理地

分解确定研究专题，突出重点，各专题研究内容要具体，避免交叉重复)

本项目以提升检测效率、保障结构安全和延寿增韧为根本目标，拟对“运营隧道衬砌结构病害高效智能检测表征方法及服役韧性提升技术”开展研究。研究中采用理论分析、数值模拟、现场测试和室内实验相结合的方法，按照“基础认知-方法研发-工程验证”的实施思路，针对隧道数字化养护与维修控制智能化程度低、病害处治维修效果不佳的现有情况，围绕衬砌病害智能检测、分级评价与靶向修复技术路径，主要开展以下三方面研究：

(1) 运营隧道多源衬砌病害分布规律与图像特征分析

对运营隧道衬砌结构病害进行统计、归类和汇总，研究衬砌内空洞、脱空、厚度不足、局部强度不均以及表观裂缝、渗漏水等多类型病害在不同形态、尺度及空间位置条件下的分布规律与响应特征，并采用视觉处理方法探明复杂背景条件下识别质量影响机理；基于FDTD开展不同缺陷类型、尺度、埋深及介质参数条件下的地质雷达正演模拟，提取时延、振幅、频谱及异常形态等波形特征，结合图像识别得到的纹理、边缘、灰度分布和病害轮廓等像素特征，研究雷达波形特征与图像像素特征的联合表达与互补机制，明确不同病害场景下两类特征的适用边界与融合方式，为多源病害高精度识别提供基础。

(2) 基于深度学习技术的多源衬砌病害高效检测表征方法

采用可变形卷积网络、端到端变换解码器和加权平均等算法对传统目标检测模型进行融合改进，以实现衬砌弧形断面的快速拼接与病害的高效识别；针对污渍、灯光不均、渗水痕迹、手写标记等复杂背景干扰，通过注意力机制和多尺度特征融合技术对语义分割算法进行

改进，面向表观裂缝长度、宽度、渗漏水分布范围及内部缺陷轮廓特征等定量指标提出精准表征与分级信息提取方法，形成可服务于病害分级评价与维修参数确定的定量信息输出；同时，依托不同运营隧道环境、不同病害类型及不同背景条件下的现场样本，开展模型在跨隧道、跨场景和跨病害条件下的测试验证，系统评估算法在识别精度、定位误差、拼接质量、鲁棒性与泛化能力等方面的适应性。

（3）基于多源衬砌病害定位分级评价的靶向性注浆修复机制

依托实体工程开展多源病害智能检测感知定位验证，并对衬砌病害发展程度进行分级评估。分级评估主要考虑病害类型、空间范围、尺度参数、结构影响及处治紧迫性，与《公路隧道养护技术规范》侧重总体技术状况判定不同，本项目更强调面向整治决策的精细化评价。针对重点病害区段，在智能检测基础上结合必要的复核勘察手段进一步查明病害范围、深度及成因，并据此确定注浆范围、方式及施工参数，研发压密注浆与渗透注浆耦合方法，定量优化注浆工艺参数；同时，融合深度学习、高光谱图像和现场检测技术，构建注浆后结构韧性提升效果评价体系，形成“检测识别—分级评价—靶向注浆—效果评估”的一体化技术路径。

3. 技术路线（包括研究技术方案和工作流程两部分。研究技术方案：应清楚表达拟运用的理论和方法，如调查研究，要表述调查的对象、范围、数量和调查材料（数据），取得的方法及手段；室内外试验，要拟定出试验的种类、规模、数量及相应的方案；理论研究与分析，要提出分析依据的理论和拟采用的分析方法，明确有否创新或改进的内容，要做到思路清晰，技术可行，能全面包括研究全过程的各个环节；研究工作流程反映各项研究工作之间的顺序和相互关系，

可用树状框图表达)

3.1 研究技术方案

为了合理安排研究内容的开展并顺利完成既定研究计划,以申请人为核心的项目团队围绕隧道衬砌病害智能检测、定量表征及靶向处治目标,构建了以多源感知、智能分析与工程验证相结合的研究技术方案。研究中主要采用文献调研、现场调查、gprMax 数值模拟、深度学习、图像处理、计算机视觉、模型试验和现场测试等研究方法。项目以现有隧道检测设备和现场采集系统为基础,重点围绕检测数据预处理、特征提取、图像识别、雷达波形解译及多源信息融合定位方法开展研究,形成面向表观病害与隐蔽病害的智能感知定位技术路线。

首先,详细调研国内外有关隧道衬砌病害检测、定量表征及维修加固的文献,再对陕西省内运营隧道病害进行充分的现场调查,获取不同缺陷形态、尺寸、空间位置及复杂背景条件下用于开展分布规律和图像特征研究的基础数据;同时,通过 FDTD 方法的 gprMax 数值模拟软件对不同性状衬砌内部缺陷影响下的雷达波形图进行数值模拟,建立典型病害条件下雷达响应与缺陷参数之间的对应关系;结合深度学习图像识别方法提取表观病害的纹理、边缘及轮廓特征,研究雷达波形特征与图像像素特征在病害检测中的分工与互补关系,构建面向不同病害类型的多源信息融合识别机制,实现内部缺陷物理响应信息与表观病害视觉信息的协同判识。通过以上研究,解决多源衬砌病害分布规律、响应特征及多源融合识别机制不清的问题。

其次,结合深度学习、图像处理和计算机视觉技术,完成隧道衬砌弧形成像面拼接算法研究,该算法能实现多相机冗余信息剔除与整幅图像拼接;借助可变形卷积网络、解码器技术对 YOLOv8 目标检

测算法进行融合改进以提升检测算法的准度、速度和轻量化性能；基于注意力机制和多尺度特征融合技术搭建病害分割算法，并对获得的病害位置、范围、形态、尺度及分级信息进行表征；通过以上研究将解决如何搭建多源衬砌病害高效检测识别与定量表征优化模型这一问题，并为后续病害分级评价和维修参数确定提供定量依据。

最后，进行“基于多源衬砌病害定位分级评价的靶向性注浆修复机制”研究，依托店子沟隧道和石泉隧道等实体工程开展多源病害智能检测感知定位案例验证，并对衬砌病害发展程度开展分级评估；以前期检测定位与分级评价结果为依据，支撑注浆范围确定、注浆方式选择和施工参数优化，针对不同分级结果研发衬砌压密注浆和渗透注浆耦合实验方法，通过模型试验定量优选注浆工艺及浆液注入时间等施工参数；且融合深度学习、高光谱图像和现场开挖检测技术对靶向性注浆后结构韧性提升有效性建立评价体系。

3.2 工作流程

本项目形成了“病害认知-方法研发-工程验证-效果评价”的整体工作流程，其各研究环节之间的逻辑关系与实施顺序如图 6 所示。

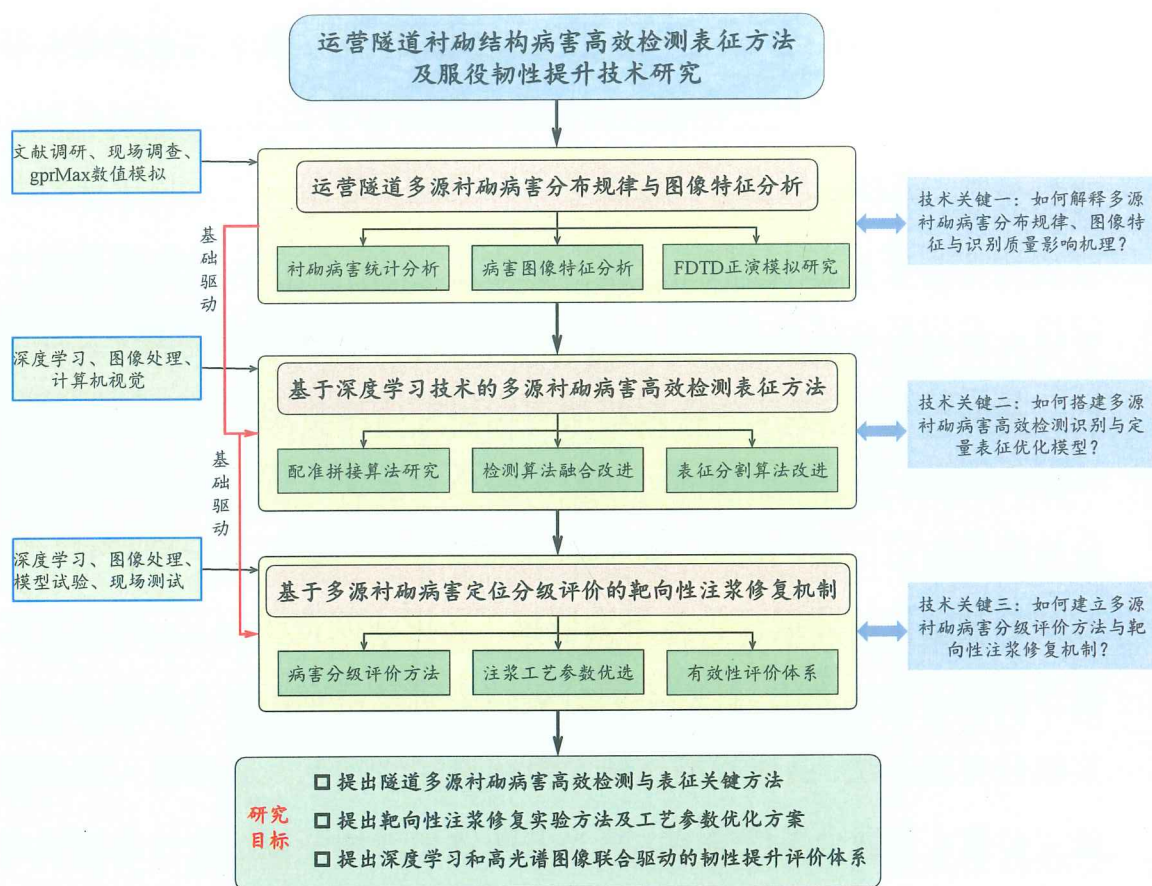


图 6 项目整体实施流程及主要措施

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

截至 2024 年末，全国公路隧道总数达 28,724 处、运营里程约 3,259.66 万延米，其中特长隧道 2,261 处、长隧道 8,047 处，全年新增隧道 1,427 处、236.48 万延米，公路隧道总体规模持续扩大，运营维护任务不断加重，对隧道衬砌病害检测与养护技术提出了更高要求。与此同时，国家持续推进交通基础设施数字化、智能化建设，为新型检测技术和智能养护模式的应用创造了良好条件。在此背景下，本项目构建的多源衬砌病害智能检测、定量表征与分级评价方法，可服务于运营隧道定期检测与专项检查流程，实现对衬砌内部空洞、表面裂缝、渗漏水等典型病害的高效识别与精准定位，为运营管理部门

提供科学、可量化的病害信息支撑。进一步地，该技术体系可与无人机等低空智能装备相结合，适用于复杂、长距离隧道环境下的快速巡检与信息采集，拓展隧道病害检测在低空经济场景中的应用模式。结合靶向性注浆修复机制，本项目成果可为隧道病害维修加固提供定量依据与优化方案，在既有隧道养护、结构加固及数字化运维平台建设中具有良好的工程适用性和推广潜力，体现出较高的技术成熟度和满足行业实际需求的能力。同时，项目成果可为运营隧道排水系统检查验收、日常定期检查及疏通养护等工程实践提供病害识别与处治依据，进一步增强对隧道全寿命养护管理的技术支撑作用。

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

（1）提升运营隧道衬砌病害检测效率与精度

针对现阶段隧道衬砌病害检测以人工巡检为主、效率偏低且主观性较强的问题，本项目形成的多源衬砌病害智能检测与定量表征技术，可服务于运营隧道定期检测与专项检测需求，实现对衬砌内部空洞及表面裂缝等典型病害的快速识别与精准定位。与传统人工检测方式相比，该技术能够明显缩短检测作业周期，提高检测结果的一致性与稳定性；在满足现行规范要求的前提下，可实现对表面裂缝、渗漏水等表面病害的精细定位，并提升对空洞、脱空等内部缺陷的识别与空间定位可靠性；在典型运营隧道场景下，形成面向表面病害和隐蔽病害的分层检测精度评价指标，为工程应用中的检测效果验收提供依据。

(2) 降低隧道病害处治综合成本并提升维修效果

基于多源衬砌病害检测结果与分级评价方法,本项目提出的靶向性注浆修复机制可有效避免传统维修过程中注浆范围不清、施工参数依赖经验等问题,实现病害处治的精准化和针对性。该修复方法有助于减少不必要的材料消耗和重复施工,缩短维修周期,降低施工过程对交通运行的影响;同时,注浆修复后衬砌结构的整体性与密实性得到改善,有利于延缓病害发展,提高隧道结构的服役韧性与耐久性能。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

西安航空学院是一所以航空工程为特色、以应用型人才培养和工程技术服务为导向的省属本科高校,长期服务国家航空工业发展、低空经济建设及区域重点产业需求,在航空工程、能源动力、工程建设与运行保障等领域形成了较为稳定的学科基础和技术积累。学校紧密对接航空制造、运输航空和通用航空发展方向,积极推动人工智能、信息技术与工程技术的交叉融合,在工程系统运行、安全保障及智能化应用等方面具备较好的研究与实践基础。

本项目依托单位为西安航空学院航空材料与新能源学院。学院现设有材料成型及控制工程、材料科学与工程、复合材料与工程、建筑环境与能源应用工程、能源与动力工程、新能源材料与器件等6个本科专业,其中材料成型及控制工程、建筑环境与能源应用工程专业为陕西省一流本科专业建设点,材料科学与工程、能源与动力工程为校级一流专业,复合材料与工程和新能源材料与器件专业为陕西省紧缺专业,形成了材料、能源与工程技术交叉融合的学科布局,可为本项目开展隧道衬砌病害检测、结构分析、材料表征与工程修复研究提供多学科支撑。学院建有陕西省高等学校重点实验室1个、陕西省高校

工程研究中心 1 个、校级研究平台 2 个、实验研究中心 1 个，具备较好的科研平台条件与实验研究基础。近年来，学院累计获批国家自然科学基金面上项目 5 项、青年项目 10 项，地市厅局级以上及其他项目 140 余项，签订横向项目合作协议 160 余项，发表核心及以上学术论文 530 余篇，获批中国发明专利 130 余项、实用新型专利 90 余项，获得教育部科学技术奖、陕西省科学技术奖等省部级及厅局级科研奖励 12 项，具备较强的科研组织能力、工程技术研发能力和成果转化基础。依托上述专业基础、科研平台和实验条件，学院能够为本项目在数值模拟、智能识别、模型试验、工程参数测试及相关技术验证等方面提供可靠支撑。

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
李杰	西安航空学院	女	1977-12-13	正高级	隧道工程	总体安排
徐 磊	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1977-09-10	副高级	隧道工程	现场管控与组织
王琪	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	男	1973-05-18	副高级	隧道工程	总体方案设计
王志丰	长安大学	男	1986-08-12	正高级	隧道工程	总体方案设计
张国庆	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1978-10-01	副高级	隧道工程	方案推进与协调
杨洋	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	男	1986-06-25	副高级	隧道工程	方案推进与协调
庞江波	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	男	1980-10-21	副高级	隧道工程	方案推进与协调

郭昱辰	西安航空学院	男	1992-10-31	中级	隧道工程	技术负责
苏皓	西安航空学院	男	1993-10-09	中级	隧道工程	模型试验
王思琦	西安航空学院	男	1992-03-08	中级	隧道工程	理论分析
刘晓宁	西安航空学院	女	1976-09-25	副高级	隧道工程	技术负责
方向青	西安航空学院	女	1987-07-03	副高级	隧道工程	技术负责
潘峰	西安航空学院	男	1984-06-12	副高级	隧道工程	理论分析
张炜	西安航空学院	男	1989-02-20	中级	隧道工程	理论分析
赵静	西安航空学院	女	1992-02-28	中级	道路工程 (路线)	理论分析
卢攀	西安航空学院	男	1990-06-15	中级	隧道工程	模型试验
申慧渊	西安航空学院	男	1986-05-06	中级	隧道工程	现场调研
何文博	西安航空学院	男	1984-05-20	中级	隧道工程	现场调研
李妍	西安航空学院	女	1992-07-30	中级	道路工程 (路面)	现场调研
刘勇	长安大学	男	1996-06-22	助理级	隧道工程	模型试验
王煜轩	长安大学	男	1996-12-17	助理级	隧道工程	模型试验
王二博	长安大学	男	1995-03-17	助理级	隧道工程	现场测试
周黎伟	长安大学	男	1999-05-11	助理级	隧道工程	现场测试
史广余	长安大学	男	2000-08-26	助理级	隧道工程	现场测试
侯小龙	长安大学	男	2001-06-20	助理级	隧道工程	现场测试
李星凯	长安大学	男	1999-12-12	助理级	隧道工程	现场测试

3. 各自承担的主要工作

(1) 西安航空学院

作为项目牵头单位，负责项目总体组织与技术统筹，开展运营隧道衬砌病害智能检测方法、定量表征与结构韧性提升关键技术研究；承担相关理论分析、模型试验与室内试验工作，形成核心技术成果，并负责技术总结、成果凝练及技术报告撰写。

(2) 陕西省交通规划设计研究院有限公司

依托丰富的工程设计与技术咨询经验，参与隧道衬砌病害检测与处治总体技术方案设计，配合开展工程适用性分析与技术路线论证；协助推进技术方案在依托工程中的实施与优化，并参与阶段性成果评估与技术交流工作。

(3) 陕西交通控股集团有限公司白泉分公司

作为依托工程管理单位，负责提供店子沟隧道和石泉隧道的工程条件与基础资料，配合开展现场调查、病害检测及工程验证工作；参与衬砌病害处治方案实施与效果评估，保障科研工作与实际工程紧密结合。

(4) 长安大学

依托隧道工程领域的科研优势，参与隧道衬砌病害机理分析与关键技术研究，协助开展模型试验与理论分析工作；为病害检测方法和结构韧性提升技术提供理论支撑与技术咨询。

4. 项目主要负责人情况

李杰，女，航空材料与新能源学院副院长，教授级高工、硕导，注册咨询工程师，全国交通运输部劳动模范，陕西省公路学会第七届理事会理事，陕西交控集团特邀专家，青岛交建集团有限公司技术顾问；近年来主持及参与各类国家自然科学基金项目、省部级及厅局级科研课题 10 余项，发表学术论文 10 余篇（其中 SCI 论文 3 篇，EI

论文 3 篇，中文核心论文 6 篇），授权专利 12 项（发明专利 3 项，实用新型 8 项，软件著作权 2 项），主编论著 1 部，参编 3 部，曾获陕西科学技术进步奖二等奖、陕西高等学校科学技术研究优秀成果特等奖、中国公路学会科学技术奖三等奖等多个奖项。

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（明确依托工程的规模、位置、点位或段位、工程技术特点等；依托实际工作要明确业务工作具体内容）

本项目依托陕西交通控股集团有限公司白泉分公司管理运营的店子沟隧道和石泉隧道开展研究。两座隧道均为双向四车道分离式高速公路特长隧道，设计时速 80 km/h。其中，店子沟隧道下行线（石泉—白河方向）中心桩号 K86+593，隧道长度 3693 m；石泉隧道下行线（石泉—白河方向）中心桩号 K285+407，隧道长度 4949 m。

在长期运营过程中，两隧道均出现不同程度的衬砌开裂、空洞及局部掉块等结构病害，已具备实施病害检测与注浆修复的工程条件，适合作为隧道衬砌病害靶向性注浆修复技术的依托工程。



(a) 店子沟隧道石泉端洞门照



(b) 店子沟隧道白河端洞门照



(c) 石泉隧道石泉端洞门照



(d) 石泉隧道白河端洞门照

图 7 依托隧道工程照

2. 投资来源

本项目科研经费主要由省交通运输厅专项科研经费予以支持,厅拨经费为 19.9 万元;依托工程配套研究经费为 20 万元,用于支撑现场检测、工程验证及相关试验工作。工程配套经费与科研专项经费分别管理、独立使用,在保障工程正常实施的前提下,同步开展相关科研验证工作。

3. 工程进度与项目科研进度的配合(科研与实际工程如何紧密结合)

3.1 工程进度配合

(1) 明确工程需求与研究重点

在项目启动阶段,结合依托工程中隧道衬砌病害检测与处治的实际需求,由工程管理与科研团队共同梳理关键技术问题,明确研究重点和技术目标,确保科研工作紧密服务于工程实施。

(2) 建立工程—科研协同沟通机制

在工程实施过程中,科研人员与工程技术人员保持常态化沟通,通过现场交流和技术讨论,及时反馈病害检测结果、施工情况及关键技术问题,保障研究工作与工程实际同步推进。

(3) 按工程实施节点推进研究工作

科研任务按照工程检测、处治和效果评估等实施节点进行安排,在工程不同阶段开展相应的技术研究与验证工作,使研究成果在工程实施过程中得到同步检验。

(4) 应用成熟技术开展工程验证

在工程实施中,结合前期研究和已有技术积累,将成熟可靠的检测与分析方法引入依托工程,通过工程实践验证其适用性,并根据工程反馈进行针对性优化。

（5）依托工程开展测试与效果验证

围绕依托工程实际施工与运营条件，开展现场检测、参数对比与效果评估，对病害识别与修复效果进行验证，确保相关技术满足工程应用要求。

（6）总结工程应用经验与技术成果

在工程实施完成后，对依托工程中的技术应用效果进行系统总结，提炼可推广的技术经验和实施要点，为类似工程的病害检测与处治提供参考。

3.2 进度计划安排

第1阶段：2026年3月-2026年8月。开展国内外文献调研与典型运营隧道现场调查，系统收集衬砌裂缝、渗漏水、空洞、脱空、厚度不足及强度不均等病害资料，梳理多源性病害类型、分布特征及其与施工质量不规范之间的关联关系，建立基础样本数据库。阶段成果为：形成文献调研报告、现场调查资料及多类型病害基础数据库。

第2阶段：2026年9月-2027年3月。开展不同缺陷类型、尺度、埋深及介质参数条件下的地质雷达正演模拟研究，揭示厚度不足、强度不均等病害的雷达波异常响应机理；同步开展衬砌弧形成像拼接、多源病害识别与定量表征算法研究，完成模型初步构建与训练。阶段成果为：形成雷达正演分析结果、病害识别模型初版及阶段研究报告。

第3阶段：2027年4月-2027年9月。依托典型运营隧道开展多源病害检测、识别与定位验证，分析复杂背景、不同病害类型及不同隧道环境下模型的适应性与泛化能力；在此基础上建立病害分级评价方法，并开展靶向性注浆修复模型试验与参数优化研究。阶段成果为：形成病害分级评价方法、识别验证结果及注浆参数优化阶段成果。

第4阶段：2027年10月-2028年3月。开展现场工程验证与修复效果跟踪评价，建立靶向注浆修复后结构韧性提升的量化评价体

系，系统总结研究成果，完成研究报告、论文、专利及相关技术资料编制。阶段成果为：形成综合研究报告、技术方案、示范应用总结及论文专利等成果。

3.3 风险分析与应对措施

（1）算法研发风险。由于隧道现场光照不均、污渍遮挡、渗漏痕迹复杂及病害样本不均衡，可能导致模型训练效果不稳定、识别精度波动较大。应对措施：通过补充多场景样本、开展数据增强、引入多源特征融合与交叉验证机制，提高模型鲁棒性与泛化能力。

（2）现场试验风险。运营隧道检测受交通组织、作业窗口、现场环境及设备布设条件限制，可能影响检测进度和数据完整性。应对措施：提前协调依托工程作业计划，细化检测组织方案，采用分时段、分区段实施方式，并设置补充采样和重复检测机制。

（3）工程验证风险。靶向注浆修复效果受病害复杂性、施工工艺及现场条件影响，可能出现修复效果离散或局部不达预期。应对措施：依托前期检测与分级评价结果优化注浆参数，先开展室内试验与小范围验证，再逐步推广至现场工程应用。

（4）实施进度风险。若阶段性任务推进滞后，可能影响总体进度安排。应对措施：建立阶段检查与动态调整机制，对关键节点实行过程跟踪和问题会商，必要时及时优化技术路线和任务分工。

4. 组织管理形式

本项目设立 1 位总体负责人和 3 位专项负责人。总体负责人负责项目总体策划与统筹管理，协调科研与工程实施进度，确保研究目标和技术路线的顺利实施；3 位专项负责人分别负责公路隧道病害智能检测与分析、靶向性注浆修复技术研究以及现场试验与工程验证等专项工作，按照分工协同推进项目实施。

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	19.9	合 计	39.9	19.9	20
工程配套研究经费	20	1.设备费	0	0	0
单位自筹	0	（1）购置设备费	0	0	0
其他经费	0	（2）设备改造与租赁费	0	0	0
		2.业务费	22	11	11
		（1）材料费	5	3.5	1.5
		（2）测试化验实验加工费	8	3	5
		（3）燃料动力费	0	0	0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	6	3	3
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	1	1	1
		（6）其他费用	1	0.5	0.5
		3.劳务费	12	6	6
		（1）专家咨询费	4	2	2
		（2）聘用人员劳务费	7	3	4
		（3）其他劳务费	1	1	0
		（二）间接费用	5.9	2.9	3
		4.管理费	3	1.5	1.5
		5.绩效支出	2.9	1.4	1.5

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。

七、项目绩效指标

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

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

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益（对应合同中的考核指标）

1.项目预期目标（项目的考核目标）

（1）数字化整合隧道多源衬砌病害检测信息，构建运营隧道衬砌病害智能检测与定量表征方法体系，实现表观病害与隐蔽病害的精准识别、空间定位与分级评价。其中，表观病害定位主要包括裂缝、渗漏水等病害的空间位置、分布范围及形态参数识别，隐蔽病害定位主要包括空洞、脱空、厚度不足及局部强度不均等病害的里程位置、环向分布、埋深范围及缺陷轮廓识别。

（2）攻破衬砌病害处治过程中病害定位不清、参数依赖经验等问题，建立基于病害定位与分级评价结果的靶向性注浆修复方法；

（3）建立深度学习与高光谱图像联合驱动的衬砌结构韧性提升评价方法，形成面向运营隧道病害修复效果评估与养护决策支撑的技术体系。

2.提交的研究成果及其形式

（1）形成基于病害定位分级评价的靶向性注浆修复实验方法及工艺参数优化方案 1 套；

（2）形成项目技术研究报告 1 份；

（3）发表学术论文 1~3 篇（其中中文核心期刊论文不少于 1 篇，并注明：依托陕西省交通科技项目及项目编号），申请相关专利 1~2 项。

3.经济、社会、环境效益分析（包括生产能力扩大、市场占有率的提高、成本减低、缩短工期、增加利税以及推广应用前景等，要做

到量化有据、实事求是)

本项目研究成果在经济、社会和环境效益方面具有明确的推广价值。在经济效益方面,通过多源衬砌病害智能检测与定量表征方法的应用,病害识别准确度预计提升约 5%~10%,可有效减少漏检和误判带来的重复检测与返修作业,提升隧道养护工作的整体效率。在社会效益方面,项目成果有助于提高运营隧道病害巡检的智能化和精细化水平,为养护管理部门提供更加可靠的技术支撑,提升隧道结构安全性和运营可靠性。在环境效益方面,研究提出的靶向性修复理念能够减少不必要的施工扰动和资源消耗,符合绿色养护和低碳交通的发展方向。总体来看,本项目成果具备良好的工程适用性和推广前景,可在我省及西部地区运营隧道养护工程中发挥积极作用。

九、其它需要说明的问题

十、申请单位意见

本项目依托工程为运营期公路隧道店子沟隧道和石泉隧道,配套研究经费已落实。

西安航空学院 (公章)

单位负责人: (签字)

宋永平

年 月 日

一、附相关证明材料，包括成果鉴定证书、专利证书、获奖证书、应用实例证明、相关资质部门出具的技术性能、产品质量检测报告等。



陕西高等学校科学技术研究优秀成果 证 书

成果名称：公路隧道结构服役性能智能评价方法与
注浆增韧关键技术

认定等级：二等

完 成 人：王志丰 高启栋 李 杰 杨文杰 任 锐
王亚琼 苏臣宏 刘平录 辛韞潇 陈龙龙
刘 勇

完成单位：长安大学
西安公路研究院有限公司
西安航空学院
汉中市公路局





中国公路学会科学技术奖 证书

为表彰中国公路学会科学技术奖获得者，特颁发此证书。

项目名称：在役公路隧道衬砌结构健康评价
理论与成套加固技术及其应用

奖励等级：二等

获奖者：王志丰



2020年12月31日

证书号：B20-2-049-002

二、大纲评审意见

运营隧道衬砌病害智能检测方法 及结构韧性提升 技术研究大纲评审意见

2026年3月18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“运营隧道衬砌病害智能检测方法及结构韧性提升技术研究”（项目编号：25-58K）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、项目研究内容基本全面，项目研究目标明确，技术路线可行。

二、项目研究人员组成合理，前期研究基础扎实，依托工程落实，经费预算符合规定，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.进一步细化科研计划安排，增强阶段任务衔接性。
- 2.结合研究内容完善预期成果量化，提高成果呈现的针对性。

主任委员： 年虎

2026年3月18日

三、专家个人审查意见表

专家审查意见表

项目名称	运营隧道衬砌病害智能检测方法 & 结构韧性提升技术研究				
专家姓名	韦虎	职务/职称	正高级工程师	专 业	隧道与地下工程
专家单位	陕西省交通规划设计研究院有限公司			联系电话	13909260723

评 审 意 见

该项目大纲紧扣运营隧道数字化养护需求，以“智能检测 — 定量表征 — 靶向修复”为主线，技术路径清晰，创新点突出，研究内容具体，兼具理论深度与工程实用价值，整体符合科研项目大纲要求，同意通过大纲评审。

意见与建议：

1. 建议进一步明确地质雷达正演模拟与深度学习图像识别的融合机制，界定雷达波形特征与图像像素特征的互补边界，提升多源信息融合的精度。

2. 针对衬砌弧形断面成像拼接、复杂背景（如污渍、灯光）下的病害识别难点，补充算法在不同隧道环境、不同病害类型下的验证方案，确保模型泛化能力。

3. 补充靶向性注浆修复后结构韧性提升的量化评价指标（如承载力提升率、裂缝闭合度等），明确与现有养护规范的衔接，增强修复效果评估的科学性。

评审专家（签字）： 

2026 年 3 月 18 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	运营隧道衬砌病害智能检测方法及结构韧性提升技术研究				
专家姓名	李宗华	职务/职称	正高工	专 业	交通运输
专家单位	陕西西韩城际铁路有限公司			联系电话	15029929222

评 审 意 见

本课题系统开展隧道衬砌病害检测识别、定量表征与修复机制技术研究，形成可服务于工程实际的技术方案，该技术对公路隧道的日常巡检、病害评估、病害处治与养护决策具有良好的工程应用前景。该研究成果有助于降低隧道养护成本、减少交通运营干扰、提升交通基础设施安全保障能力具有一定的意义，研究的必要性强。课题组前期调研比较充分，工作基础较扎实，研究内容较全面，技术路线基本清晰，研究方案基本合理可行。研究人员结构合理，依托工程结合紧密，计划进度安排基本合理。

建议：

- 1、完善隧道衬砌厚度不足、强度不均病害类型及检测机理研究内容；
- 2、进一步收集整理该领域国内外研究现状、研究水平以及分析评价基础资料；
- 3、补充多源性病害形成机理和补强处理措施与施工质量不规范的关联性分析；
- 4、细化研究项目进度计划安排。

评审专家（签字）：



2026年3月18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	运营隧道衬砌病害智能检测方法 & 结构韧性提升技术研究（项目编号：25-58K）				
专家姓名	卜东平	职务/职称	正高级工程师	专 业	土木工程
专家单位	中铁一局集团有限公司			联系电话	18991319680

评 审 意 见

一、总体评价

项目研究方向契合交通强国中智慧交通、养护技术发展要求，大纲框架较完整，明确依托工程与研究团队，技术路线具备一定可行性，经费预算基本合规，综合评定为基本合格。

二、存在主要问题

1. 研究目标及考核指标未量化，仅定性描述病害识别、定位等目标，无识别精度、定位误差、检测效率等核心技术量化指标，不符合可考核、可验收要求；
2. 缺失风险分析与应对措施模块，未分析算法研发、现场试验、工程验证等环节的技术、实施风险及应对方案，违反大纲完整性要求；
3. 未单独明确科研诚信承诺，未体现数据真实、成果原创要求及科研诚信责任追究措施；
4. 成果转化与推广方案笼统，未明确具体转化模式、意向应用单位及分阶段推广路径，未界定知识产权归属与收益分配；
5. 进度节点与监督可追溯性不足，无具体阶段进度安排、交付物及数据、经费、成果的追溯机制，未制定执行偏差整改预案；
6. 预期成果交付形式未细化，未明确技术方案、研究报告的具体交付形式及成果技术水平。

评审专家（签字）： 

2026 年 3 月 18 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	运营隧道衬砌病害智能检测方法及结构韧性提升技术研究				
专家姓名	王明年	职务/职称	教授	专 业	隧道工程
专家单位	西南交通大学			联系电话	13808029798

评 审 意 见

一、总体评价
项目研究内容全面，思路清晰，方法正确。达到了评审要求。

二、建议

1. 智能检测方法一般比较适应于日常巡检，但在确定整治方案时，还需要更详细勘察方法？
2. 隧道病害整治方法很多，除了注浆以外，是否还要考虑不同条件下的其它整治方法？

评审专家（签字）：

2026年3月18日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	25-58K 运营隧道衬砌病害智能检测方法及结构韧性提升技术研究				
专家姓名	许崇帮	职务/职称	正高	专 业	隧道工程
专家单位	交通运输部公路科学研究院			联系电话	15120081075
评 审 意 见 项目研究目标明确，研究内容设置恰当，技术路线基本可行。主要问题与建议： （1）进一步阐述多源病害智能检测感知定位的内容及精度，是表观病害定位还是隐蔽病害的定位；明确项目解决感知定位问题是通过检测设备技术还是通过对检测数据处理的算法实现？ （2）进一步明确衬砌病害发展程度分级评估内容，及其与现有公路隧道养护技术规范中衬砌病害技术状况值划分的区别。 评审专家（签字）： 2026 年 3 月 18 日 （本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）					

运营隧道衬砌病害智能检测方法 & 结构韧性提升技术研究 (项目编号: 25-58K)

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	韦虎	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	桥梁 工程	隧道与地下 工程	正高工	韦虎
2	委员	李宗华	陕西西韩城际 铁路集团公司	交通运输	公路工程	正高工	李宗华
3	委员	卜东平	中铁一局集团有限公司	土木工程	土木工程	正高工	卜东平
4	委员	许崇帮	交通运输部公路 科学研究院	隧道工程	隧道工程	正高工	网上评审
5	委员	王明年	西南交通大学	隧道工程	隧道工程	教授	网上评审

五、专家意见处理表

专 家 意 见 处 理 表

项目名称：运营隧道衬砌病害智能检测方法 & 结构韧性提升技术研究（项目编号：25-58K）

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	韦虎	1. 建议进一步明确地质雷达正演模拟与深度学习图像识别的融合机制，界定雷达波形特征与图像像素特征的互补边界，提升多源信息融合精度； 2. 针对衬砌弧形断面成像拼接、复杂背景下病害识别难点，补充算法在不同隧道环境、不同病害类型下的验证方案，确保模型泛化能力； 3. 补充靶向性注浆修复后结构韧性提升的量化评价指标，并明确与现有养护规范的衔接。	已采纳并修改。①在“主要研究内容及实施方案”和“研究技术方案”中补充了地质雷达正演模拟与深度学习图像识别的融合机制，明确了雷达波形特征与图像像素特征在不同病害识别中的分工、互补关系及融合思路；②补充了复杂背景条件下弧形断面成像拼接与病害识别的验证方案，增加了不同隧道环境、不同病害类型和不同背景干扰条件下的模型测试与对比验证内容，以提升算法泛化能力；③在靶向性注浆修复研究部分补充了修复后结构韧性提升效果评价内容，增加了承载力改善、裂缝闭合、缺陷填充完整性、渗漏控制效果及结构协调性等评价表述，并明确与《公路隧道养护技术规范》等现行规范相衔接。
2	李宗华	1. 完善隧道衬砌厚度不足、强度不均病害类型及检测机理研究内容； 2. 进一步收集整理该领域国内外研究现状、研究水平以及分析评价基础资料； 3. 补充多源性病害形成机理和补强处理措施与施工质量不规范的关联性分析； 4. 细化研究项目进度计划安排。	已采纳并修改。①在“国内外研究现状”和“主要研究内容”部分补充了厚度不足、局部强度不均等隐蔽病害类型，并完善了相应雷达响应机理与检测特征表述；②对国内外研究现状重新梳理，补充了多源病害智能识别、内部缺陷检测、病害评价与修复等方面的研究进展、水平分析及不足；③在“现阶段研究中存在的不足”和“主要研究内容”中增加了多源病害形成机理与施工质量不规范之间关联性的分析，强化了病害成因—检测评价—处治方案之间的逻辑衔接；④新增并细化了“进度计划安排”内容，按照 2026 年 3 月至 2028 年 3 月项目周期分阶段明确了调查、模拟、算法研究、工程验证和成果凝练等任务及阶段性成果。

3	卜东平	1. 研究目标及考核指标未量化；2. 缺失风险分析与应对措施模块； 3. 未单独明确科研诚信承诺； 4. 成果转化与推广方案笼统； 5. 进度节点与监督可追溯性不足； 6. 预期成果交付形式未细化。	已基本采纳并修改。①将原“项目预期目标（项目考核目标）”由定性表述调整为定性与定量结合表述，补充了病害识别、定位、评价、修复与示范验证等考核要求；②新增“风险分析与应对措施”内容，围绕算法研发、现场试验、工程验证及实施进度等环节补充了主要风险与应对方案；③新增“科研诚信承诺”内容，明确数据真实、过程规范、成果原创及责任落实要求；④补充“成果转化与推广方案”，明确依托工程示范、技术方案形成、专利/软著申请和后续推广应用路径，并对知识产权归属作原则性说明；⑤新增“阶段监督与追溯机制”，明确阶段成果、原始数据、经费使用与任务完成的对应关系及偏差整改要求；⑥对“预期成果”进行细化，明确研究报告、技术方案、评价方法、示范应用及知识产权成果等具体交付形式。
4	王明年	1. 智能检测方法一般更适用于日常巡检，在确定整治方案时，还需结合更详细的勘察方法； 2. 隧道病害整治方法较多，除注浆外，是否还应考虑不同条件下的其他整治方法。	已采纳并修改。①在“基于多源衬砌病害定位分级评价的靶向性注浆修复机制”部分补充了“智能检测—重点病害复核勘察—整治方案确定”的技术链条，明确对于拟实施整治的重点病害区段，在智能检测识别和初步定位基础上，需结合地质雷达精细扫测及必要的钻孔、内窥、局部开挖等复核勘察手段，进一步查明病害范围、深度及成因；②在保持项目以靶向性注浆修复为主线的基础上，补充了裂缝封闭、防排水修复、局部补强等其他常用整治措施的适用性分析，明确不同病害类型、病害等级及成因条件下各类处治方法的适用场景和技术边界。
5	许崇帮	1. 进一步阐述多源病害智能检测感知定位的内容及精度，是表观病害定位还是隐蔽病害定位；明确项目解决感知定位问题是通过检测设备技术还是通过检测数据处理算法实现； 2. 进一步明确衬砌病害发展程度分级评估内容，以及与现有《公路隧道养护技术规范》中衬砌病害技术状况值划分的区别。	已采纳并修改。①在“项目预期目标（项目考核目标）”和“研究技术方案”中，明确了项目针对裂缝、渗漏水等表观病害以及空洞、脱空、厚度不足等隐蔽病害开展感知定位研究，并补充说明项目主要依托现有检测设备获取数据，重点解决检测数据预处理、特征提取、智能识别及多源融合定位算法问题，不以新型检测设备研发为主；②在“基于多源衬砌病害定位分级评价的靶向性注浆修复机制”部分，细化了病害发展程度分级评估的内容，明确其主要包括病害类型、空间范围、尺度参数、结构影响及处治需求等方面，并补充说明该分级评价方法更侧重服务整治决策和参数优化，与现行规范中面向总体技术状况判定的技术状况值划分形成衔接与区分。

大纲评审委员会专家（签字）： 牛虎

项目负责人（签字）： 李生