

项目合同编号：25-72K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：道路裂缝智能化修复关键技术（合同包 1）

承担单位：陕西交控市政路桥集团有限公司

项目负责人：张宏江

通讯邮编、地址：雁塔区太白南路 9 号

传真、电话：029-87831632

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：25-72K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：道路裂缝智能化修复关键技术（合同包 1）

承担单位：陕西交控市政路桥集团有限公司

项目负责人：张宏江

通讯邮编、地址：雁塔区太白南路 9 号

传真、电话：029-87831632

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

针对路面裂缝目标特征微弱细长、特征信息易淹没、路径跟踪控制难鲁棒、供料修复难精确的问题，结合道路智能化养护中提升路面裂缝修复能力的迫切需求，开展道路裂缝智能化修复关键技术研究。本项目从复杂背景下裂缝信息自动提取和多尺度裂缝路径实时跟踪控制两方面着手，重点开展裂缝自动识别与信息自动化提取研究、基于视频流的裂缝实时跟踪技术研究、基于机械臂的视觉伺服控制平台研究、灌缝材料精准供料控制系统研究、智能化修复综合成套技术研究。

(1) 裂缝自动识别与信息自动化提取

针对嵌入式移动设备获取视频图像路面裂缝形态分布多变、纹理信息细微复杂导致裂缝信息提取困难的问题，拟结合嵌入式移动设备获取视频图像在多角度、不同高度下的裂缝目标特征的多元差异和共性表征，研究视角、尺度和旋转不变特征联合的表示方法，通过在不同特征感知分支间生成多元特征信息的一致性监督学习，设计基于对比学习的多元特征解耦方法，探索嵌入式移动设备获取视频图像路面裂缝目标自动识别研究。

针对强光、阴影、夜间、水渍、杂物、运动模糊等复杂干扰叠加等因素导致嵌入式移动设备获取视频图像路面裂缝目标的信噪比小、纹理/细节信息弱和目标与背景对比度低的局限性，利用裂缝目标的微弱细长特性，拟研究一种裂缝目标局部信息对比度增强的方

法，提升裂缝目标的局部对比度并抑制复杂背景和噪声。同时，利用边界感知空间注意模块与边界感知通道注意模块捕捉细节特征信息，构建裂缝分割注意力边界感知融合机制，将裂缝边界和上下文特征与两个不同模块分割和集成，实现较为稳健的路面裂缝信息提取。

(2) 基于视频流的裂缝实时跟踪技术

针对路面裂缝视频流识别分割模型参数量大、计算复杂、部署困难的瓶颈，设计在嵌入式移动设备等资源受限的环境下实现高效计算的网路结构，提高网络轻量化后模型的性能。在算法层面，针对目前的网络轻量化力度较粗问题，采用细粒度的网络通道剪枝方法。同时，克服难以捕捉到视频图像上下文依赖，提出一种上下文学习蒸馏方法来建模嵌入式移动设备获取视频图像间的依赖，从而使得网络能够捕捉到更加丰富的路面裂缝分割轨迹结构化信息。

针对微弱细长的路面裂缝路径跟踪，提出了视觉跟踪移动机器人平台的整体框架，其中平台是通过滑动转向运动学建模设计的。构建了一个视觉实时跟踪系统，以确保在保持较小计算能力的同时，具有较强的路面裂缝轨迹信息提取能力。提出基于交叉熵的自适应模糊控制方法，引入交叉熵优化算法在线调整比例积分微分（PID）参数，设计隶属度函数对控制器的输入和输出进行模糊推理，保障移动机器人自主运动。设计适用于非结构化路面裂缝路径跟踪控制的神经网络参数优化算法，实现高鲁棒裂缝实时跟踪。

(3) 基于机械臂的视觉伺服控制平台

针对多连通复杂裂缝修复作业轨迹规划的研究需求，开发基于视觉的路面裂缝修复路径自动规划算法，设计搭建基于机械臂的路面裂缝修复伺服控制平台，研究视觉系统与机械臂的融合控制方法，并将裂缝修复路径规划算法与机械臂末端机构运动轨迹控制相结合，针对不同类型的裂缝分布形态，设计基于视觉和机械臂的路面裂缝修复系统总体框架。

针对裂缝检测和分割的结果，进行裂缝骨架提取，并完成裂缝轨迹、数量、长度等裂缝信息提取算法的设计；根据裂缝分布形态和轨迹特点，对裂缝修复路径规划问题进行了数学模型建立，通过对交叉裂缝进行分割将其转化为独立裂缝，基于最小权完美匹配方法进行最优路径求解，并通过实例验证路径规划方法的可行性。通过 D-H 参数法对机械臂进行了运动学建模，获取机械臂末端机构坐标系与图像像素坐标系之间的转换关系，实现机械臂与视觉系统的结合并满足实际裂缝修复精度要求。

（4）灌缝材料精准供料控制系统以及智能化修复综合成套技术

构建了融合运动学建模与先进控制算法（如自适应模糊 PID、MPC 及 LQR）的路面裂缝修复体系，通过解算移动机器人线角速度规律，实现了底盘位姿误差、修补轨迹宽度及供料速度的动态协同。系统自主集成轮式机器人、边缘计算、RTK 定位及多源感知设备，在梯形加速与拐点零速等约束条件下，确保了修复末端与底盘运动的稳定性和鲁棒性，从而在理论与实践层面优化修补参数，实现亚毫米级的路径跟踪与精细化供料。

针对智能化修复需求，该技术整合了高精度图像识别、自动化灌缝工艺及大数据决策支持，涵盖从路面清理、精准充填到养护评价的全流程自动化作业。系统统筹考虑交通流组织与施工安全，实时调整修复计划并记录过程数据，在显著降低人力成本、减少资源浪费的同时，全面提升了路面养护的作业效率与修复一致性，为保障道路资产全生命周期的可持续性提供了成套智能化解决方案。

2、技术关键

本项目拟解决的关键技术问题是：如何解决道路养护中路面裂缝跟踪与修复呈现的路面裂缝目标特征微弱细长、特征信息易淹没、路径跟踪控制难鲁棒的等难题，并进一步提升嵌入式移动设备获取视频图像路面裂缝跟踪与修复性能。具体地：

(1) 复杂环境路面裂缝跟踪下目标精准实时分割提取

构建针对强光、阴影、夜间、水渍、杂物、运动模糊等复杂干扰场景路面裂缝视频图像数据库，提出一种路面裂缝目标局部信息对比度增强的方法，解决复杂道路场景下裂缝目标与背景对比度低的问题。通过利用边界感知空间注意模块与边界感知通道注意模块捕捉细节特征信息，设计裂缝分割注意力边界感知融合方法，实现裂缝边界和上下文特征与两个不同模块分割和集成。提出一种上下文学习整理方法来建模嵌入式移动设备获取视频图像间的依赖，从而使得网络能够捕捉到更加丰富的路面裂缝分割结构化信息，实现精准的路面裂缝实时分割提取。

(2) 多尺度路面裂缝修复下自主运动鲁棒控制

突破嵌入式移动设备获取视频图像路面裂缝形态分布多变、纹理信息细微复杂导致裂缝路径跟踪控制难鲁棒的技术壁垒，结合嵌入式移动设备获取视频图像裂缝目标的多元特征表示，设计基于对比学习的特征解耦框架，强化不同视角、高度下裂缝全局和局部特征有效提取，探索有效提高路面裂缝特征表示的判别力和泛化能力。构建路面裂缝跟踪控制的运动学模型，提出基于交叉熵的自适应模糊控制方法，引入交叉熵优化算法在线调整比例积分微分（PID）参数，设计隶属度函数对控制器的输入和输出进行模糊推理，保障移动机器人自主运动。设计适用于非结构化路面裂缝路径的神经网络参数优化算法，有效地提高了裂缝路径跟踪控制的鲁棒性。

3. 依托工程（依托工作）

G70 福银高速西安至陕鄂界段安全韧性提升工程路线起自西安市蓝田县三里镇席家河，经商洛市商州区、山阳县，止于商洛市山阳县漫川关(陕鄂界)，全长 157.48 公里:建设内容主要包含路基路面、桥涵、隧道、交通工程及沿线设施等公路安全韧性提升内容和制度体系建设。其中路线工点 1 处(双幅)实施路基改桥、路基路面工点 120 处、桥梁工点 223 座(单幅)、隧道工点 24 座(双洞)、交通安全设施提升路段 118.7 公里，同步完善安全风险管控制度体系。

二、考核指标

1.预期目标

本项目围绕“道路裂缝智能化修复关键技术”这一核心目标，面向在役道路养护工程中裂缝检测与修复自动化、智能化水平不足的问题，依托陕西交控市政路桥集团有限公司实际养护工程与长安大学科研平台，通过理论研究、算法开发、系统集成与工程示范相结合的方式，形成可工程应用的智能化修复成套技术。项目预期达到以下目标：

（1）技术目标

构建基于多目视觉与视频流分析的路面裂缝自动识别与实时跟踪方法，实现复杂工况（强光、阴影、水渍、交通干扰等）下裂缝目标的稳定识别与连续追踪；

- 形成面向复杂裂缝形态的修复路径规划与控制方法，实现裂缝修复路径的自动生成与动态调整；
- 建立基于机械臂的视觉伺服控制与灌缝材料精准供料控制技术，实现裂缝修复过程中位置、速度与供料参数的协同控制；
- 形成道路裂缝智能化修复综合成套技术，支撑智能化、自动化裂缝修复作业。

（2）性能指标目标

- 裂缝像素级实时追踪识别精度不低于 90%；
- 裂缝信息自动提取与修复作业效率较传统人工方式提升 10% 以上；

- 灌缝材料供料修复过程稳定、连续，修复效果满足要求。

(3) 工程应用目标

- 完成道路裂缝智能化灌缝技术算法 1 套；

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

(1) 技术指标

- 裂缝像素级实时追踪识别精度不低于 90%；
- 裂缝信息自动提取与修复作业效率较传统人工方式提升 10%

以上；

- 灌缝材料供料过程稳定、连续，修复效果满足要求。

(2) 经济指标

- 降低养护成本：通过自动化检测与修复，减少人工参与强度，降低人工成本；

- 提高作业效率：裂缝识别与修复作业效率提升 10%以上，缩短施工工期，减少养护作业对交通运行的影响；

- 延长道路使用寿命：通过及时、精准的裂缝修复，延缓路面病害发展，减少后期结构性维修投入，降低道路全寿命周期养护成本；

- 推广应用潜力大：成果可在高速公路、市政道路、机场跑道等多类型路面养护工程中应用，具备良好的产业化和市场推广前景。

3.经济和社会效益

(1) 经济效益分析

本项目形成的道路裂缝智能化修复关键技术及样机系统，可在

道路日常养护与大中修工程中推广应用，具有显著的经济效益：

- 降低养护成本：通过自动化检测与修复，减少人工参与强度，降低人工成本；

- 提高作业效率：裂缝识别与修复作业效率提升 10%以上，缩短施工工期，减少养护作业对交通运行的影响；

- 延长道路使用寿命：通过及时、精准的裂缝修复，延缓路面病害发展，减少后期结构性维修投入，降低道路全寿命周期养护成本；

- 推广应用潜力大：成果可在高速公路、市政道路、机场跑道等多类型路面养护工程中应用，具备良好的产业化和市场推广前景。

（2）社会效益分析

- 提升道路运行安全性：裂缝修复质量和一致性提高，有效降低路面病害引发的交通安全风险；

- 改善养护作业环境：减少人工高强度、危险性作业，推动道路养护作业向智能化、机械化转型；

- 支撑智慧交通建设：项目成果与交通数字化、智能化发展方向高度契合，为智慧公路和智慧养护提供技术支撑；

- 示范引领作用明显：通过示范工程应用，为省内道路养护单位推广智能化修复技术提供样板。

4.成果提供形式

项目实施期间形成的研究成果以“技术成果+工程成果+知识产权与学术成果”为主，具体包括以下内容和形式：

（1）技术与工程成果

- 道路裂缝智能化修复关键技术体系：包括裂缝自动识别与信息提取、视频流裂缝实时跟踪、裂缝修复路径规划、机械臂视觉伺服控制、灌缝材料精准供料控制等核心技术；

- 裂缝自动灌缝技术算法 1 套；

- 项目研究报告：包括中期研究报告、结题研究报告及相关技术总结材料。

（2）知识产权与学术成果

- 学术论文：发表与本项目研究成果密切相关的学术论文不少于 1 篇，其中至少为《中文核心期刊要目总览》收录论文，论文发表注明“依托陕西交通科技项目及项目编号”；

- 专利成果：申报发明专利不少于 1 项（进入实质审查阶段），围绕裂缝识别算法、修复路径规划、智能修复装备等关键技术；

（3）标准与技术文件成果

- 形成适用于道路养护工程的技术应用说明、操作流程或指导性文件。

（4）人才与团队成果

- 在项目实施过程中培养研究生和工程技术骨干不少于 10 人；
- 形成稳定的道路裂缝智能检测与修复技术研究与工程应用团队。

5. 其他考核指标

- 技术交流与行业推广：项目实施期间，开展不少于 1 次针对

自动填缝机器人前沿技术的内部交流，邀请行业专家共同探讨智慧公路养护装备的发展趋势，提升项目在省内交通领域的知名度。

- 多维宣传报道：通过合作单位官网、微信公众号或相关行业媒体，开展不少于 3 次宣传报道。内容重点围绕“数字化养护”、“机器人作业示范”及“校企合作新模式”等主题进行多渠道展示，塑造智慧养护的技术品牌形象。

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）
2026.03 ~ 2027.03	1. 2026 年第 2 季度：开展国内外裂缝修复技术及设备调研，确定实验设备（机械臂、传感器、嵌入式计算单元）；依托陕西交控养护路段，采集多工况（强光、阴影、水渍）下的路面裂缝视频/图像数据；制定数据标注标准，构建路面裂缝专用数据集。 • 量化程度：完成实验设备参数报告 1 份；采集图像数据不少于 3000 张；完成数据标注 2000 张。 • 阶段性成果：《国内外技术调研报告》、初步裂缝数据集。 2. 2026 年第 3 季度：研发基于对比学习的多元特征解耦算法，解决复杂背景下裂缝提取难题；设计轻量化视频流分割网络及上下文蒸馏方法，在嵌入式设备上初步部署测试；开发裂缝局部对比度增强算法。 • 量化程度：算法在测试集上的识别精度达到 85% 以上；完成核心算法代码初步编写。 • 阶段性成果：裂缝识别与提取初版算法。 3. 2026 年第 4 季度：搭建移动机器人底盘与机械臂集成的实验平台；建立机械臂 D-H 运动学模型及手

	眼标定，实现坐标系转换；研发灌缝材料精准供料控制系统，建立流量与速度的耦合运动学模型。 • 量化程度：完成实验算法测试。 • 阶段性成果：视觉伺服控制实验测试算法、申请发明专利 1 项。 4. 2027 年第 1 季度：将视觉识别、路径规划与机械臂控制系统进行集成；在实验室内模拟裂缝环境，开展全流程跟随与模拟修复测试；优化交叉熵自适应模糊 PID 控制算法，提升系统响应速度。 • 量化程度：室内模拟环境下裂缝跟踪成功率>90%。 • 阶段性成果：《年度研究进展报告》。
2027.04 ~ 2028.03	1. 2027 年第 2 季度：针对交叉、网状裂缝，研发基于最小权完美匹配的路径规划算法；将实验设备移至封闭试验路段进行调试，优化移动底盘与机械臂的协同控制；解决室外光照变化对识别算法的干扰问题。 • 量化程度：室外环境下跟踪识别精度不低于 90%。 • 阶段性成果：复杂裂缝修复路径规划算法 1 套、申请发明专利 1 项。 2. 2027 年第 3 季度：依托陕西交控市政路桥集团养护工程，开展实地裂缝修复测试；重点调试灌缝材

	料供给速度与机械臂移动速度的匹配性，确保填缝饱满；收集现场数据，迭代优化模型参数。 • 量化程度：算法完成度达 70%。 • 阶段性成果：《中期研究报告》、发表高水平论文 1 篇。 3. 2027 年第 4 季度：评估作业效率、质量及成本；编制道路裂缝智能化修复技术指南草案。 • 量化程度：作业效率较人工提升 10%以上。 • 阶段性成果：申请发明专利 1 项。 4. 2028 年第 1 季度：整理项目技术资料、财务决算及相关支撑材料；撰写项目研究总报告和工作报告；组织科技成果评价，完成项目验收及成果归档。 • 量化程度：完成全部考核指标（专利 2 项、论文 1 篇）；经费执行率 100%。 • 阶段性成果：《项目结题研究报告》、项目验收证书、智能灌缝技术算法。
--	---

四、项目经费

项目总经费：	99.96 万元
交通运输厅补助：	19.96 万元
工程配套研究经费：	20.0 万元
自筹资金：	50.0 万元
其他经费：	10.0 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	99.96	19.96
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	73.0	13.0
(4) 材料支出	25.0	0
(5) 测试化验实验加工支出	30.0	0
(6) 燃料及动力支出	0.0	0
(7) 差旅支出	4.0	4.0
(8) 会议支出	3.0	3.0
(9) 国际合作与交流支出	3.0	3.0
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	3.0	3.0
(11) 其他支出	5.0	0
3. 劳务费	11.96	6.96
(12) 劳务性支出	9.96	4.96
(13) 咨询专家支出	2.0	2.0
(二) 间接费用	15.0	0
4. 管理费	10.0	0
5. 绩效支出	5.0	0
合 计	99.96	19.96

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）	2
		（1）授权发明专利	1
		（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
		（1）其中 SCI 索引收录数	0
		（2）其中 EI 索引收录数	1
		（3）其他	0
		4.著作（部）	0
		5.制订标准数（项）	1
		（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	1
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	1
		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. 研发开发情况	
		(1) 小试	/
		(2) 中试（样品样机）	/
		(3) 小批量	/
		(4) 规模化生产	/
	人才引进	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	4
		(1) 博士、博士后	1
		(2) 硕士	3
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	8
		4. 是否设立科研助理岗位	是
	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）	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	4
		3. 就业培训（人次）	10
		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	项目推动道路养护由传统人工模式向智能化、机械化方向升级，促进道路养护装备制造及技术服务相关产业发展
		7. 技术集成示范（项）	1

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	/
		(2) 中试（样品样机）	/
		(3) 小批量	/
		(4) 规模化生产	/
	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	4
		(1) 博士、博士后	1
		(2) 硕士	3
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	8
		4. 是否设立科研助理岗位	是
	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）	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	4
		3. 就业培训（人次）	10
		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	项目推动道路养护由传统人工模式向智能化、机械化方向升级，促进道路养护装备制造及技术服务相关产业发展
		7. 技术集成示范（项）	1

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		8. 建立示范基地（亩数）	0
		9. 节约资源能源	通过精准识别与定量修复，减少材料浪费和重复施工，有效降低养护材料和能源消耗
		10. 环保效益	项目减少道路养护过程中粉尘、噪声及材料浪费，降低对交通环境和周边生态的影响，具有良好的环保效益
其他需要说明的情况	无		

六、承担单位或研究人员分工

1. 陕西交控市政路桥集团有限公司

- 总体统筹与管理：作为项目牵头单位，负责项目的总体组织、协调与执行管理，把握项目进度与方向，确保项目按期完成。
 - 工程依托与示范应用：负责落实项目所需的依托工程，提供实际道路养护场景进行测试；负责在陕西交通控股集团有限公司运营管理分公司负责的关中养护段进行成果的示范应用。
 - 数据支撑与算法辅助：负责道路养护基础数据的分析与整理工作；参与裂缝信息自动化提取的研究工作，结合工程实际需求优化算法逻辑。
 - 成果应用：享有项目形成的样机使用权，负责将技术成果转化
- 为实际养护生产力。

2. 长安大学

- 核心技术研发：负责项目的总体技术方案设计及核心算法攻关，由杨旭担任技术总负责。具体涵盖：开展基于视频流的裂缝实时跟踪技术研究，以及针对复杂裂缝的修复路径规划算法设计；负责基于机械臂的视觉伺服控制平台搭建，以及灌缝材料精准供料控制系统的研发。
- 系统集成与样机试制：负责智能化修复综合成套技术的研发与系统集成，完成基于自动寻迹和机械臂自动控制的裂缝自动填缝样机的试制。
- 理论成果与人才培养：负责项目相关的理论分析、数学模型建

立，以及项目报告编写、高水平论文发表、专利申请和研究生/工程技术骨干的培养工作。

七、项目参加人员表

项目承担单位：陕西交控市政路桥集团有限公司						
参与单位（排序）：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	在项目中所担任具体工作
1	张宏江	1975-06-08	陕西交控市政路桥集团有限公司	副高级	道路工程（路面）	项目负责人
主要研究人员						
2	杨旭	1988-01-13	长安大学	正高级	道路工程（路面）	技术总负责
3	吴迪	1992-08-23	陕西交控市政路桥集团有限公司	中级	交通工程（安全设施）	数据分析整理
4	鹿小恩	1973-01-03	陕西交控市政路桥集团有限公司	中级	公路工程	数据审核
5	杨耀	1996-09-19	陕西交控市政路桥集团有限公司	中级	机电工程	资料整理

6	李翔宇	1995-12-14	陕西交控市政路桥集团有限公司	中级	机电工程	文献收集	李翔宇
7	刘玉	1979-08-22	长安大学	副高级	交通工程(安全设施)	技术协助负责人	刘玉
8	杜金鹏	1989-07-16	陕西交控市政路桥集团有限公司	中级	道路工程(路面)	裂缝信息自动化提取	杜金鹏
9	周博	1991-06-25	长安大学	中级	道路工程(路面)	裂缝实时跟踪	周博
10	张建奇	1992-07-01	长安大学	助理级	道路工程(路面)	机械臂视觉伺服、供料控制	张建奇
11	常家瑞	2000-02-21	长安大学	助理级	道路工程(路面)	综合成套技术	常家瑞
12	刘文博	1999-02-06	长安大学	助理级	道路工程(路面)	报告编写、数据整理	刘文博
13	陈亿学	2002-03-09	长安大学	助理级	道路工程(路面)	复杂裂缝修复路径规划	陈亿学
14	范泰博	1998-05-21	长安大学	助理级	道路工程(路面)	项目协调与执行经理	范泰博

八、信息表

项目合同编号		25-72K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部	
项目名称		道路裂缝智能化修复关键技术（合同包 1）							
项目实施所在地		陕西西安		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月			
总 经 费		99.96 万元		厅 拨		19.96 万元			
第一承担单位	单位名称	陕西交控市政路桥集团有限公司							
	所在地	陕西省西咸新区沣东新城阿房宫高速收费站 向东 100 米、昆左线以南					代码	610100000 000	
	通讯地址	雁塔区太白南路 9 号					邮编	710065	
	单位性质	(3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	31	
参与单位	序号	单 位 名 称							
	1	长安大学							
	2								
	3								
项目负责人	姓 名	张宏江		性别 (1) 1.男 2.女			出生年份	1976-05-15	
	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	13992826663			电子邮箱		1074256116@qq.com		
项目联系人	姓名	杨旭			性别		男		
	联系电话	16605128056			电子邮箱		yang.xu@chd.edu.cn		
项目组人数	11	高级	3	中级	3	初级	0	其他	5
主要研究内容 (100 字以内)	本项目旨在提升路面裂缝修复能力，解决裂缝特征微弱细长、信息易淹没等问题。项目从裂缝信息自动提取和裂缝路径实时跟踪控制两方面入手，重点研究裂缝自动识别、视频流裂缝跟踪、机械臂视觉伺服控制、精准供料控制和智能化修复技术。								
成果属性	D	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他							
成果形式	A、B	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他							

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

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

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

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

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

6.合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：

陕西省交通运输厅

负责人：（签字）



2026年3月24日

联系人：（签字）

张喆

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）

陕西交控市政路桥集团有限公司

单位负责人：（签字）

张宏仁



2026年3月24日

项目负责人：（签字）

张宏仁

（公章）

电 话： 029-87831690

财务负责人：（签字） 贾燕君

账 户 名：陕西交控市政路桥集团有限公司

开户银行：中国农业银行西安兴庆路支行

账 号：26135101040023099

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：

（签字）

2026年3月27日

项目编号：25-72K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：道路裂缝智能化修复关键技术
(合同包 1)

申请单位：陕西交控市政路桥集团有限公司（盖
章）

联系人：张津苡

电 话：15630801276



陕西省交通运输厅制

2026 年 03 月

目录

项目研究的背景和必要性 3

前期科研及工作基础 4

1 路面裂缝特征与动态识别与三维信息提取 4

2 路面裂缝自动化修复路径规划 6

3 路面裂缝诱导跟踪与自动修复研究现状 8

4 研究现状分析 10

5 前期研究积累 11

参考文献： 11

三、 实施方案 14

1. 拟解决的关键问题 14

2. 主要研究内容及实施方案 16

四、 项目承担单位及参加单位概况 27

1. 单位概况 27

2. 技术力量及人员构成 27

3. 各自承担的主要工作 28

4. 项目主要负责人情况 30

五、 项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件 31

1. 依托工程（工作）概况 31

2. 投资来源 32

3. 工程进度与项目科研进度的配合 32

4. 组织管理形式 32

六、 项目经费估算及资金筹措情况 34

1. 设备费 34

2. 业务费 36

3. 劳务费 40

4. 间接费用 41

七、 项目绩效指标 41

八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益 44

1. 项目预期目标（项目的考核目标） 44

2. 提交的研究成果及其形式 45

3.经济、社会、环境效益分析	45
九、 其它需要说明的问题	46
十、 申请单位意见	46

应用技术、信息化类及软科学类

编写主要内容

一、项目研究的背景和必要性

我国目前道路基础设施体量巨大，涵盖了广泛的区域和多样的路况，养护需求也随之显得尤为强烈。然而，现阶段的公路养护智能化水平总体上仍然偏低，亟待提升。这不仅影响了养护工作的效率和质量，还可能对交通安全和经济发展带来隐患。为提升智能化养护水平，《交通强国建设纲要》以及《交通运输部关于推进公路数字化转型加快智慧公路建设发展的意见》均对公路养护提出了高标准的要求。明确提出“推进公路养护装备智能化升级”，强调“提升路况检测及养护施工自动化智能化水平”的必要性。

根据国内外研究现状的分析，相较于欧美同行，我国在路面病害智能检测、智慧养护施工技术以及自动化养护施工装备等方面的发展仍明显滞后。欧美国家在这些领域的技术成熟度较高，已经形成了较为完善的智能检测与养护体系，能够高效应对路面病害问题，提高道路养护的整体效率和安全性。路面病害检测和修复是道路养护的基础性工作，提高病害检测与修复的自动化水平，能对整个道路养护的智能化发展起到牵引作用。目前，智能养护施工技术的应用在我国也相对滞后，传统的养护施工方式依赖人工操作，工序繁琐且效率较低。欧美国家的养护施工装备已在智能化、自动化方面取得了显著进展，例如，应用机器人技术进行路面修复、采用智能管理系统优化施工流程等。这些先进的技术和设备不仅提高了施工的精度和安全性，也有效缩短了施工周期，降低了人力成本。为了实现道路养护的智能化，必须加快相关技术的研发与推广，同时促进行业内的技术交流与合作。随着智能化技术的不断进步，路面病害的智能检测与修复技术不仅适用于道路养护，亦可推广到其他交通基础设施领域，如桥梁、隧道、机场等，实现更大范围内的智能养护。这一转变不仅有助于提升我国交通基础设施的维护水平，还将为我国从交通大国向交通强国的转变提供积极的推动作用。本项目定位为前瞻性技术储备研究。针对目前养护作业中人工作业强度大、危险性高、质量不稳的痛点，拟通过人工智能技术的深度应用，旨在利用人工智能技术在裂缝

精细识别、跟踪、智能灌缝方面的优势，解决以往人工难以量化的病害深度感知、灌缝自动化程度低问题，为后续全省公路数字化转型提供关键技术支撑。

路面病害自动化检测与修复背后的难点是病害形态特征的实时精确分析，世界范围内，路面病害自动化检测与修复存在一些技术瓶颈：1）路面病害特征差异显著难以精确表征；2）复杂道路场景下路面病害目标信息微弱难以实时检测分析；3）养护施工时养护装备与病害体之间的紧密联动；4）自动化养护装备的动态运动精确控制。本项目面向国家在役道路基础设施养护延寿的重大需求并解决路面自动化检测与养护施工智能化问题，力求突破以上技术瓶颈，为我国交通基础设施的可持续发展提供强有力的支持。

二、前期科研及工作基础

路面裂缝的智能化修复是延长路面使用寿命的有效方法，一直以来是道路养护行业的研究热点。国内外路面裂缝修复研究取得了一定成果，包括裂缝灌缝胶、裂缝灌缝平台、裂缝识别与分割算法等[1-4]。然而，之前的众多方法因为设备、技术、成本的制约并没有广泛应用。因此，需要进一步研究如何将工人从繁重危险的修复作业中解放出来，并减少对正常交通流的影响，路面裂缝自动修复仍然是一项极具挑战性的任务。

基于机器视觉的裂缝修补方法的研究已经开展了多年，如美国的 CMU-UT 场地样机、ARMM 原型机、APCS 原型机和 ACSTM 样机等。由试验样机的发展历程可以看出，裂缝修补过程中仍然采用人工干预下的人机交互方法，其中，行车检测、停车过程和修补路径规划均涉及人机交互，自动化水平较低。

基于自主移动设备的开发研究多集中于道路监测巡检领域，鲜少应用于路面裂缝修复场景。Yang 等[5]全面总结了 AGV 和 AMR 在土木工程中的识别跟踪技术的研究进展后指出，随着 AGV/AMR 技术的发展，将该技术应用于土木工程领域的病害修复是一个研究趋势，AGV/AMR 的识别精度和算法处理速度是需要研究的两个主要问题，无人施工和智能病害修复仍然存在挑战，研究基于自主移动设备的运动视觉识别与控制对路面裂缝智能化修复具有重大意义。

1.路面裂缝静态与动态识别与三维信息提取

路面裂缝的自动化识别始终是道路信息化建设与自动化建养关注的重要议题之一。道路设施服役环境复杂，表层病害的评估易受到外部环境因素干扰，且

路面裂缝具有多特征、多目标与纹理形态多样等特性,给病害的自动化实时识别提出了更高的挑战[6]。得益于计算机技术的飞速发展,基于路面图像预处理与增强的视觉算法和基于路面裂缝与破损目标分割的深度学习算法逐渐成为了主流解决方案[7,8]。

基于路面图像预处理与增强的视觉算法又称预处理算法,是使用传统视觉图像处理方法对原始数据进行图像转化、图像增强、纹理提取与分割等的检测算法。预处理算法应用广泛,具有算法成本低,对原始数据质量要求不高,以及检测速度快的特点。但是高级语义特征提取能力差,其有赖于研究人员对于裂缝特征的认知与研究水平[9]。Cao等[10]提出了一种基于三维边缘分割与数字孪生数据的路面裂缝检测方法,以增强裂缝的边界信息,同时保持了裂缝的细节信息。但是在噪音的稳定性方面,仍有较大改进空间。Huyan等[11]开发了基于三维路面图像的PSP优化的双相裂缝检测方法,不需要其它预处理程序的额外操作,所提出的方法具有更高的时间效率,同时考虑了车辆振动对于原始三维数据的影响。潘宁等[12]使用激光雷达获取道路三维数据,保障了三维数据的精准性与实时性,给出了车辆轨迹和特征聚类的路面特征提取和分割算法与区域语义信息病害三维特征的提取方法。

基于路面裂缝与破损目标分割的图像深度学习算法,是卷积神经网络利用大体量数据集以监督的方式通过卷积运算提取和学习图像特征的方法。Hou等[13]提出了一种基于深度学习的路面裂缝模式的分类方法,针对路面裂缝的特征水平,比较了广泛使用的 AlexNet、ResNet 和 SE-NET 网络,优化了参数结构,一定程度上提高了病害识别的准确性。Yang等[3]提出了一种基于深度学习的裂缝双步识别方法,对路面裂缝进行先识别再分割,有效提升了裂缝识别的准确率和效率。Fei等[14]提出了高效深层网络 CrackNet-V,用于在三维沥青路面图像上进行像素级裂缝检测。使用校正激活函数,增加网络深度的同时,减少了参数数量,对微细裂缝的提取效果较好。但是于减少了卷积核尺寸,网络对于大尺度裂缝的识别效果不佳。Guo等[15]提出了 Crack Transformer 新型语义分割框架。该模型在处理具有阴影或树叶的密集裂缝区域时表现较好,在识别纵向尺度较长裂缝和浅裂缝方面也具有较好的效果。但是其计算效率较低,难以实现实时识别。陆健等[16]考虑路面三维图像中裂缝像素级邻域特征,利用 PCCNet 模型结合裂

缝高程检查方法对路面裂缝三维轮廓进行检测,所提出的方法在抑制噪声和检测细小裂缝方面具有更强的鲁棒性。Yang 等[17]建立了立体视觉与深度学习相融合的路面病害像素级识别框架,实现了路表形貌多维重构与病害特征增强,提升了复杂场景下路表病害识别的精度和鲁棒性。面向路表全域病害检测场景,Yang 等[18]提出了基于无人机立体摄影和动态目标遮挡优化的路面全场景三维重建算法,实现了动态交通干扰下路面全域病害数据的高效采集。

近年来,伴随着智慧交通的发展需求,对于病害检测识别的实时性要求更高,尤其是视频流数据,存在数据量大、特征信息丰富等特点,基于视频流的深度学习算法,可以有效地解决视频流数据容量大、信息复杂与算力成本高的问题,在路面裂缝实时跟踪与修复领域有较好的应用前景。Ding 等[19]提出了一个光流和语义分割联合学习方案。语义分割为光流和遮挡估计提供了更丰富的语义信息,而非遮挡的光流保证了语义分割的像素级别的时序一致性。该算法方案不仅可以利用视频中的所有图像帧信息,实现精度保障,而且在测试阶段不增加额外的计算量,保障了算法的高效性。Xu 等[20]使用关键帧动态选取的策略来获取关键帧信息,使用使期待自信得分来定义图像区域间的差异以实现有选择的关键帧特征提取工作,以加快检测速度,避免信息提取的重复操作。Li 等[21]构架了用于快速准确场景解析的 SFNet 的特征金字塔对齐网络,来学习相邻帧的特征图之间的语义流信息,并将高级特征高效地传递到高分辨率帧信息之中,实现特征的帧间传递工作。

2.路面裂缝自动化修复路径规划

路面裂缝修复路径规划是对裂缝修复设备在运动过程中运动点的加速度、速度、位移的规划。设备所走过的路径长度可分为两个部分:一是裂缝长度之和;二是设备从起点行走第一条裂缝的端点、一次灌缝后行走下一条裂缝以及完成灌缝后返回出发点所走过的距离之和,称之为冗余距离。显然,一定区域内裂缝的总长度是固定的,要想使得总距离最短,需尽可能减少冗余距离。称冗余距离最短的路径为最优路径。

为了代替人工完成路面裂缝修复路径的规划,提高裂缝修复设备的自动化程度, Kim 等[22]开发了一种机器视觉辅助的贪心路径规划算法,并应用于 ARMM 裂缝修复设备上,该算法基于贪心策略,其核心思想是,在解决一个问题时,不

考虑每一个步骤对全局的影响，而总是在当前情况下选择使得下一步最优的方案。由此推进，得到的最终解不一定是最优的，但算法运行的时间非常短，求解的效率非常高。然而现实中的裂缝情况更为复杂，较为复杂的裂缝会有超过百万条的路径，贪心路径规划算法对于较为复杂的裂缝很难有效生成最优解。

APCS 裂缝修复设备的现场测试中，道路图像上的裂缝最多在 8 到 9 之间（通常在 1 到 4 之间）。这样的结果表明，理论上可以检查一定范围内的所有轨迹，因此，有可能开发出一种始终保证最优结果的最优轨迹规划算法。Yoo 等[23]对裂缝修复路径规划问题进行了深度剖析，认为其根本原理是找出可以将所有裂缝连接起来的最优路径，这与一个经典组合优化问题—TSP 问题（Travelling Salesman Problem）相似。在此基础上，开发了一种最优路径算法，该算法的实质是以树形结构将所有可能的路径列出，并从中找出最优路径。当裂缝数量较少时，这种算法能够有效找出最优路径，但当裂缝数量增多，裂缝形状更加复杂时，这种最优路径算法的求解效率会降低很多。

白正涵等[24]对比了贪心路径规划算法和最优路径规划算法的性能，并在两种算法的基础上提出了一种改进型贪心路径规划方法，在减小算法计算时间方面，解决了最优路径规划算法裂缝条数越多耗时越长的问题；在减小冗余路径误差方面，解决了贪心路径规划算法裂缝条数越多误差越大的问题，实验结果表明，新提出的算法在冗余路径的距离和计算时间成本均处于一个适中的状态。

针对 TSP 问题，有很多经典算法，如模拟退火算法[25, 26]、蚁群算法[27, 28]等，Feng 等[29]基于模拟退火算法开发了一种裂缝修复路径规划方法，并将其应用在 OCCSM 裂缝修复设备上。模拟退火算法是一种启发式算法，其原理是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性，在搜索到一个局部最优解时可以一定的概率跳出，避免陷入局部最优，从而在全局范围内搜索到一个较优的路径。该算法可以在一定的计算时间内得到近似最优解，但其计算结果的好坏与人工参数设置有很大关系，面对多种形态交织的裂缝分布场景，若参数设置不当，计算的结果容易产生较大偏差。

庞炜辰等[30]对路面裂缝的形态进行研究，并将其分为三类—横、纵向裂缝，构成连通图的裂缝及构成一般非连通图的裂缝，针对每种形态的裂缝各设计了一套算法，较为全面的覆盖了包含交叉裂缝在内的多种裂缝形态的修复路径规划问

题,并通过实验验证了三种算法的可行性。

3.路面裂缝寻迹跟踪与自动修复研究现状

早期修复平台为半自动化灌缝设备,灌缝机在 X-Y 水平工作台框架内移动,该框架与地面平行,限制灌缝机在框架区域内移动。Haas 等[31]开发了一个裂缝密封的实验室原型;然而,它的完整性和稳定性均欠佳。Velinsky 等[32]开发了一种路面裂缝检测和密封系统的现场原型,该系统分为两个系统来密封不同类型的裂缝,但该系统由于复杂和昂贵而没有广泛应用。Kim 等[33]开发了一种半自动道路养护机,运行结果表明 X-Y 平台存在作业面积有限、速度慢、机动性差、影响交通安全等缺点,且仍需要人工检测。

进入 21 世纪后,灌缝设备向着自动化方向发展。Lee 等[34]设计出一种人工远程操作路面裂缝灌缝设备(APCS),开发了一种由噪声消除、裂缝网络映射与建模等模块所组成的机器视觉算法。Hargadon 等[35]开发了一种传输槽纵向裂缝密封机(TTLS),该平台能够对纵向裂缝进行有效灌缝,然而其操作范围有限,无法覆盖车道的宽度。DAVIS 等[36]开发了新一代自动灌缝车(Sealzall),通过在汽车底盘前部加装经过改造的灌缝枪来满足灌缝需求,Yoo 等[37]开发了一种带有伸缩机械手(ACSTM)的自动裂缝密封机,但其需要人工远程操作,并没有实现真正意义上的自动化修复。

近年来随着机器视觉、传感器融合、3D 打印等技术的发展应用,路面裂缝修复的自动化程度有所提升。Zhu 等[38]开发了一种用于裂缝密封的机械手系统,并用于室内仿真实验,机械手固定在支架上且移动范围有限,Yang 等[39]设计了一种利用改进的 3D 打印机和计算机视觉实现的路面裂缝自动修复平台实验室样机,该设备在带有裂缝的混凝土路面板样本进行了测试,存在沥青密封剂的飞溅和过度填充现象,修复路径规划与 3D 打印机控制协同鲁棒性需进一步提升。Awuah 等[40]设计了一款小型 3D 打印喷嘴设备来修补实验室沥青混凝土裂缝,确定了影响灌缝的主要因素是沥青的流量、温度和速度。

裂缝自动修复的重要难点之一是对裂缝精确寻迹跟踪,自主移动设备由于具有更好的机动性和灵活性,它可以在更大的工作空间内完成一些更为复杂的工作任务,能够给裂缝自动修复提供一定的思路。目前主要有反步控制,滑模控制,自适应控制,自抗扰控制,神经网络控制等方法,结合多种控制方法来设计轨迹

跟踪控制器是一个主要研究方向。

Deremetz 等[41]通过一种反步控制策略,根据方位和位置条件以生成合适的路径跟随,模拟仿真四轮机器人沿着路径进行控制的问题,尚无法适应室外环境。Chen 等[42]设计了弯曲路径下的转向控制律的运动学模型反步控制与李雅普诺夫稳定性理论,提高了路径跟踪的收敛性,误差超调量更小,验证了沿直线、方形和圆形路径的跟踪,不同轨迹的适用性水平有限。

Sun 等[43]提出了一种鲁棒非奇异终端滑模控制方案来解决路径跟踪问题,所提出的控制策略针对不同运动提升了鲁棒性,但存在位置误差累积,跟踪时会触发更多抖动。田智予等[44]提出了一种考虑移动设备前端万向轮摩擦扰动及其质心与几何中心不重合的轨迹跟踪控制方法,构造出一种基于积分滑模思想的力矩控制器以保证速度追踪,并在圆形轨迹上进行测试,同时滑模变结构控制系统中常见的抖振现象尚需进一步克服。

Luo 等利用自适应控制技术提出了一种新的鲁棒控制算法来逼近系统的不确定性,补偿在正弦轨迹仿真下未知死区输入的不利影响,适用性有限。梁艺潇等[45]将多模型自适应理论引入运动控制中建立了汽车动力学模型和车辆-路径联合模型,进一步平衡路径跟踪控制中精确性与鲁棒性,由于不同路面模型的不确定性,模型的去噪抗扰性能还需提升。

Li 等[46]提出了一种新的可变增益自抗扰控制方法,改善了四轮机动车辆的轨迹跟踪控制的瞬态性能和稳定性,并实验了圆轨迹、正弦轨迹和方波轨迹场景,尚不适用实际路面裂缝轨迹。王立玲等[47]针对输入扰动和参数变化,提出了一种基于自抗扰思想的跟踪控制策略,提高了误差收敛速度,该方法尚处于仿真阶段。

Liu 等[48]提出了一种基于物联网和神经网络的运动动态控制模型,所提出的模型预测的精度得到了提高,然而神经网络控制需要计算量大,导致控制器的实时性较差。Li 等[49]提出了一种基于神经网络的滑动建模跟踪控制方案,提高了路径跟踪质量,还需优化运动约束条件和室外路面复杂场景下的自主控制性能。马东等[50]采用带有参数自适应的 RBF 神经网络对跟踪模型中的参数不确定性进行了前馈补偿,提高了跟踪速度,并在直线和双扭线轨迹进行仿真,尚未考虑实际环境的不确定性扰动。

4.研究现状分析

综合国内外研究现状分析,围绕裂缝自动化修复的研究已经有一定的研究成果,但在三个核心关键点上的研究仍然存在较大技术瓶颈。裂缝自动修复设备方面,国外已经发展到样机验证阶段,但离成熟性应用尚有较长距离,国内目前仍然在实验室研究阶段。

在裂缝自动识别方面,虽然针对路面裂缝的高精度识别研究较多,但主要是基于图像数据,无法满足基于实时移动的裂缝实时修复需求;相较于传统的图像识别网络,视频识别可以实时识别出路面裂缝信息,但其具有信息量高度冗余的特点,在搭建训练网络的过程中需要构建更庞大的视频识别数据库。这都将影响视频识别的速度、精度与测试成本。同时大体量的数据流处理,也对嵌入式识别设备的算力与模型计算速度提出更高要求。视频识别算法在道路领域融合模型较少,对网络的修改与参数调教也提出较高要求。

在裂缝修复规划方面,目前针对路面裂缝修复路径规划方面的研究相对较少,现有有限的裂缝修复路径规划算法多适用于形态较为简单的裂缝分布情况,对于存在交叉裂缝等较为复杂的情景难以生成较为有效的修复路径。

在裂缝寻迹跟踪方面,现有较多的算法针对其他应用场景下的寻迹跟踪,但是其轨迹的复杂及不规则程度没有路面裂缝严重,专门针对裂缝修复寻迹跟踪的研究很少,并且由于裂缝的细长型特征,需要达到毫米甚至亚毫米级别的跟踪精度要求,基于现有控制策略的自动寻迹系统无法满足路面裂缝寻迹跟踪中的精度要求。

综合国内外研究现状,(1)由于作业环境存在光照、阴影、变形、杂物等外部扰动,路面裂缝修复的识别、控制、供料精度和鲁棒性受到挑战,自动化程度有待于进一步提升。(2)对于存在多条交叉裂缝的复杂场景难以生成较为有效的修复路径,提高裂缝修复路径规划算法的适应性仍具挑战。(3)针对路面裂缝识别模型体量大、环境复杂等特点,裂缝识别的实时性、移动端可部署性与跟踪的精确性较低,面向道路养护领域基于自主移动设备的识别跟踪一体化方法研究亟待突破。

综上所述,本研究计划以下三个方面寻求突破:1)构建基于多目立体视觉感知的路面裂缝视频流分析模型,实时提取裂缝几何和坐标信息,实现裂缝的多

维信息全谱化输出；2）针对复杂路面状况建立裂缝修复路径的综合规划算法模型，结合机械臂的运动特征和控制方法，提高复杂裂缝的修复路径规划效率和稳定性；3）研究裂缝修复动态寻迹控制并基于裂缝几何信息变化的控制修正调校，实现精准跟踪和修复过程中供料精准控制。

5.前期研究积累

针对上述国内外研究现状，项目团队已开展了大量的先导性研究。目前已成功开发出室内路面病害采集系统，掌握了机械臂末端与工业相机的六轴手眼标定技术。算法层面，在 PyTorch 框架下完成的 ViT-S2T 网络初步训练已使边缘提取精度达到毫米级，为本项目奠定了坚实基础。

参考文献:

- [1] CAO L, YANG C, DONG Z, et al. Aging mechanism of hot-poured sealants for asphalt pavement under natural environmental exposure [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(2): 197-206.
- [2] ELSEIFI M A, BAEK J, DHAKAL N. Review of modelling crack initiation and propagation in flexible pavements using the finite element method [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19(3): 251-63.
- [3] LIU J, YANG X, LAU S, et al. Automated pavement crack detection and segmentation based on two-step convolutional neural network [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35(11): 1291-305.
- [4] KIM Y S, YOO H S, LEE J H, et al. Chronological development history of X-Y table based pavement crack sealers and research findings for practical use in the field [J]. Automation in Construction, 2009, 18(5): 513-24.
- [5] ZHANG J, YANG X, WANG W, et al. Automated guided vehicles and autonomous mobile robots for recognition and tracking in civil engineering [J]. Automation in Construction, 2023, 146: 104699.
- [6] KHERADMANDI N, MEHRANFAR V. A critical review and comparative study on image segmentation-based techniques for pavement crack detection [J]. Construction and Building Materials, 2022, 321:
- [7] 徐志刚, 车艳丽, 李金龙, et al. 路面破损图像自动处理技术研究进展 [J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(01): 172-90.
- [8] YANG X, GUAN J, DING L, et al. Research and applications of artificial neural network in pavement engineering: A state-of-the-art review [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2021, 8(6): 1000-21.
- [9] 冉蓉, 徐兴华, 邱少华, et al. 基于深度卷积神经网络的裂纹检测方法综述 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(09): 23-35.
- [10] CAO T, WANG Y, LIU S. Pavement Crack Detection Based on 3D Edge Representation and Data Communication With Digital Twins [J]. IEEE

- Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022: 1-10.
- [11] JU H, LI W, TIGHE S, et al. Three-dimensional pavement crack detection based on primary surface profile innovation optimized dual-phase computing [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 89:
 - [12] 潘宁, 杜豫川, 岳劲松, et al. 基于点云数据的道路变形类病害自动化检测方法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(03): 399-408.
 - [13] HOU Y, LIU S, CAO D, et al. A Deep Learning Method for Pavement Crack Identification Based on Limited Field Images [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(11): 22156-65.
 - [14] FEI Y, WANG K C P, ZHANG A, et al. Pixel-Level Cracking Detection on 3D Asphalt Pavement Images Through Deep-Learning- Based CrackNet-V [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(1): 273-84.
 - [15] GUO F, QIAN Y, LIU J, et al. Pavement crack detection based on transformer network [J]. Automation in Construction, 2023, 145:
 - [16] 郎洪, 温添, 陆键, et al. 基于深度学习的三维路面裂缝类病害检测方法 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(01): 53-60.
 - [17] GUAN J, YANG X, DING L, et al. Automated pixel-level pavement distress detection based on stereo vision and deep learning [J]. Automation in Construction, 2021, 129: 103788.
 - [18] GUAN J, YANG X, LEE V C S, et al. Full field-of-view pavement stereo reconstruction under dynamic traffic conditions: Incorporating height-adaptive vehicle detection and multi-view occlusion optimization [J]. Automation in Construction, 2022, 144: 104615.
 - [19] DING M, WANG Z, ZHOU B, et al. Every Frame Counts: Joint Learning of Video Segmentation and Optical Flow [C]. 34th AAAI Conference on Artificial Intelligence / 32nd Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference / 10th AAAI Symposium on Educational Advances in Artificial Intelligence, 2020.
 - [20] XU Y-S, FU T-J, YANG H-K, et al. Dynamic Video Segmentation Network [C]. 31st IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018.
 - [21] XIANGTAI L, ANSHENG Y, ZHEN Z, et al. Semantic Flow for Fast and Accurate Scene Parsing [M]. 2020.
 - [22] KIM Y-S, HAAS C T, GREER R. Path Planning for Machine Vision Assisted, Teleoperated Pavement Crack Sealer [J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(2): 137-43.
 - [23] YOO H-S, KIM Y. Development of an Optimal Trajectory Planning Algorithm for Automated Pavement Crack Sealer [J]. Journal of Construction Engineering and Project Management, 2012, 2:
 - [24] 白正涵. 机器视觉辅助的路面裂缝路径规划方法研究与实现 [D]. 郑州大学, 2020.
 - [25] 陶重犇, 雷祝兵, 李春光, et al. 基于改进模拟退火算法的搬运机器人路径规划 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(07): 182-5.
 - [26] 赵炳巍, 贾峰, 曹岩, et al. 基于模拟退火算法的人工势场法路径规划研究

- [J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(04): 746-52.
- [27] 陈丹凤、雷昊、刘俊朗, et al. 基于强化蚁群算法的机器人路径规划研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2022: 1-8.
- [28] 张志军、董学平、甘敏. 基于优化蚁群算法的 AGV 路径规划研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(07): 914-9+24.
- [29] FENG X, MATHURIN R, VELINSKY S A. Practical, Interactive, and Object-Oriented Machine Vision for Highway Crack Sealing [J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(6): 451-9.
- [30] 庞炜辰. 路面裂缝自动化灌缝路径规划研究 [D]. 吉林大学, 2022.
- [31] HAAS C, HENDRICKSON C, MCNEIL S, et al. A field prototype of a robotic pavement crack sealing system [C]. Proceedings of the 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), Tokyo, Japan, 1992.
- [32] VELINSKY S A. Technical Report/New Innovations. Heavy vehicle system for automated pavement crack sealing [J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 1993, 1(1): 114-28.
- [33] KIM Y-S, HUSBANDS J K, HAAS C T, et al. A Productivity Model for Performance Evaluation of the UT Automated Road Maintenance Machine [C]. ISARC proceedings of the 15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 1998.
- [34] LEE J-H, YOO H-S, KIM Y-S, et al. The development of a machine vision-assisted, teleoperated pavement crack sealer [J]. Automation in Construction, 2006, 15(5): 616-26.
- [35] HARGADON A, OLSON E, WOODALL B, et al. Transfer Tank Longitudinal Crack Sealer Business Development Case [J]. 2006:
- [36] DAVIS. Sealzall - automated high production crack sealing [J]. Advanced Highway Maintenance and Construction Technology, 2011, 95616: 19-26.
- [37] YOO H-S, KIM Y-S. Development of a crack recognition algorithm from non-routed pavement images using artificial neural network and binary logistic regression [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(4): 1151-62.
- [38] ZHU G, FAN Z, CHEN W, et al. Design and Implementation of a Manipulator System for Roadway Crack Sealing [C]. 2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2019.
- [39] LIU J, YANG X, WANG X, et al. A laboratory prototype of automatic pavement crack sealing based on a modified 3D printer [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(9): 2969-80.
- [40] AWUAH F K A, GARCIA-HERNÁNDEZ A. Machine-filling of cracks in asphalt concrete [J]. Automation in Construction, 2022, 141: 104463.
- [41] DEREMETZ M, LENAIN R, COUVENT A, et al. Path tracking of a four-wheel steering mobile robot: a robust off-road parallel steering strategy [M]. 2017.
- [42] CHEN Y, LI N, ZENG W, et al. Curved Path Following Controller for 4W

- Skid-Steering Mobile Robots Using Backstepping [J]. Ieee Access, 2022, 10: 66072-82.
- [43] SUN Z, XIE H, ZHENG J, et al. Path-following control of Mecanum-wheels omnidirectional mobile robots using nonsingular terminal sliding mode [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147:
- [44] 田智予, 刘晓平, 王刚, et al. 考虑万向轮扭转角扰动轮式移动机器人轨迹跟踪 [J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(01): 94-101.
- [45] 梁艺潇, 李以农, KHAJEPOUR A, et al. 基于多模型自适应方法的智能汽车路径跟踪控制 [J]. 重庆大学学报, 2022: 1-18.
- [46] LI S, ZHANG J, ZHAO K, et al. Trajectory tracking control for four-mecanum-wheel mobile vehicle: A variable gain active disturbance rejection control approach [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2022, 32(4): 1990-2006.
- [47] 王立玲, 董力元, 马东, et al. 滑动与打滑条件下的轮式移动机器人自抗扰跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37(02): 431-8.
- [48] LIU Q, CONG Q. Kinematic and dynamic control model of wheeled mobile robot under internet of things and neural network [J]. Journal of Supercomputing, 2022, 78(6): 8678-707.
- [49] LI J, WU Q, WANG J, et al. Neural networks-based sliding mode tracking control for the four wheel-legged robot under uncertain interaction [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2021, 31(9): 4306-23.
- [50] 马东, 董力元, 王立玲, et al. 移动机器人 RBF 神经网络自适应 PD 跟踪控制 [J]. 控制工程, 2020, 27(12): 2092-8.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题

本项目研究对象明确界定为沥青路面预防性养护阶段的表面病害, 重点聚焦于陕西省高速公路及国省干线中典型的半刚性基层沥青路面裂缝。根据成因与形态特征, 本研究将裂缝细化为两类: 一是针对陕西陕北及关中地区昼夜温差大、冬季严寒特点产生的横向温缩裂缝, 此类裂缝受垂直于裂缝壁的张拉力作用, 是视觉识别与路径规划的核心对象; 二是受重载车辆反复荷载导致的纵向疲劳裂缝及初期网裂, 其受平行于裂缝壁的剪切力影响, 其演化规律是智能寻迹研究的关键。

在技术边界与工艺适应性方面, 本项目为确保智能化修复的工程实效, 限定修复的裂缝宽度范围在 2mm-20mm 之间。针对 2mm 以下的微细裂缝, 视觉系统仅利用其亚毫米级感知能力执行数字化识别与记录, 不执行物理灌缝以避免材料

溢出；而对于 2mm-20mm 的标准裂缝，则采用聚合物改性沥青密封胶。通过建立“裂缝三维体积-机械臂移动速度-泵送压力”的非线性映射模型，本研究旨在攻克非稳态基座下的高频动态响应难题，实现材料与裂缝空间的精准填充，达到预期的技术储备与工程验证目标。

本项目针对陕西省高速公路及国省干线养护作业中面临的复杂路况与高精度自动化需求，拟重点突破以下制约裂缝修复质量与效率的三大核心技术瓶颈：

（1）复杂动态光照与强噪声背景下的裂缝像素级特征“保真”提取难题

在实际养护场景中，路面环境呈现极度非结构化特征。一方面，沥青路面老化、油污侵蚀、修补痕迹以及路面标线等构成了极低信噪比的背景纹理；另一方面，作业环境涵盖高架桥下阴影、隧道出入口明暗突变以及夜间人造光源干扰，导致传统基于阈值或边缘梯度的图像处理算法极易失效。关键难点在于：如何在微细裂缝（宽度 $<2\text{mm}$ ）与粗糙沥青颗粒纹理极度相似的情况下，实现裂缝特征的完整提取；以及如何在长距离检测中，利用全局上下文信息修复因遮挡或模糊导致的裂缝“断裂”现象，构建出具备毫米级精度且拓扑结构完整的裂缝数字模型，是本项目感知识别层面首要解决的问题。

（2）移动基座扰动下的机械臂高频动态响应与微米级“稳态”跟踪难题

车载机械臂在执行修复作业时，面临着“宏-微”耦合运动的复杂约束。移动底盘（工程车辆）受路面平整度及悬挂系统影响，会产生低频随机振动与姿态漂移；而机械臂需在这一非稳定基座上执行高频、高精度的轨迹跟踪。关键难点在于：如何建立包含基座扰动的多体动力学模型，并设计具备强鲁棒性的非线性控制器（如 LQR 或自适应 PID），在毫秒级时间内补偿基座姿态变化带来的末端误差；同时，解决视觉传感器（眼）与末端执行器（手）在多坐标系映射中的时空不同步问题，克服液压或伺服系统的响应滞后，实现“所见即所得”的亚毫米级动态寻迹，是控制层面的核心挑战。

（3）变截面裂缝填充中的材料流变特性与供料流量“适配”控制难题

裂缝的物理形态在宽度和深度上呈现连续变化的特征，而传统的定流量灌缝模式必然导致“缝宽溢胶、缝窄欠饱”的质量通病。关键难点在于：如何构建密封胶材料在不同温度、压力下的流变学模型，建立“裂缝三维体积-机械臂移动速度-泵送压力”之间的非线性映射关系；并在作业过程中，根据实时感知的裂缝宽深

变化、毫秒级动态调节出料流量，解决高粘度流体控制中的非线性与大滞后问题，实现修复材料与裂缝空间的完美无缝填充，是工艺层面的关键技术壁垒。

2. 主要研究内容及实施方案

根据项目总体目标，本项目将研究内容分解如下。

内容一：裂缝自动识别与信息自动化提取

旨在赋予修复装备“慧眼”，通过多源异构视觉硬件与先进深度学习算法的深度融合，实现对路面病害的精准量化感知。

(1) 车载多源异构高保真图像采集硬件系统构建

双层视觉架构搭建：构建“全局感知+局部引导”的视觉系统。在车辆尾部高位部署工业级面阵相机，配合广角镜头覆盖单车道全宽，负责获取宏观路面图像以进行裂缝拓扑分析；在机械臂末端集成 Intel RealSense D405 高精度 RGB-D 深度相机，利用其亚毫米级（0.1mm）深度测量能力，在近距离（10-40cm）实时获取裂缝的三维点云数据。

主动式光度立体增强：针对光照干扰，设计基于光度立体学原理的主动照明系统。采用低角度侧向掠射光源，利用裂缝凹槽产生的阴影效应物理增强对比度；设计硬件同步触发电路，实现 LED 频闪与相机曝光的微秒级对齐，消除车辆行驶造成的运动模糊，确保源头数据的高信噪比。

(2) 基于 ViT-S2T Transformer 架构的全局裂缝特征提取

长距离依赖建模：引入 Vision Transformer (ViT) 架构，设计 ViT-S2T 分割网络。利用 Self-Attention（自注意力）机制替代传统 CNN 的局部卷积，计算全图像素间的关联权重，从而在特征提取阶段捕捉裂缝的长距离上下文依赖，解决长裂缝因局部遮挡或模糊而产生的“断裂”漏检问题。

多尺度特征融合：设计 Transformer 特征提取模块 (TFEM) 与不连贯分割掩膜模块 (ISM)。TFEM 负责提取全局语义信息（判断哪里有裂缝），ISM 通过级联上采样融合高分辨率的浅层纹理特征（确定裂缝边缘），输出初步的二值化分割掩膜。

损失函数优化：针对裂缝像素占比极少（正负样本极度不平衡）的问题，构建包含二元交叉熵 (BCE)、IoU 及 CIoU 的复合损失函数，强化网络对细长几何形态的敏感度。

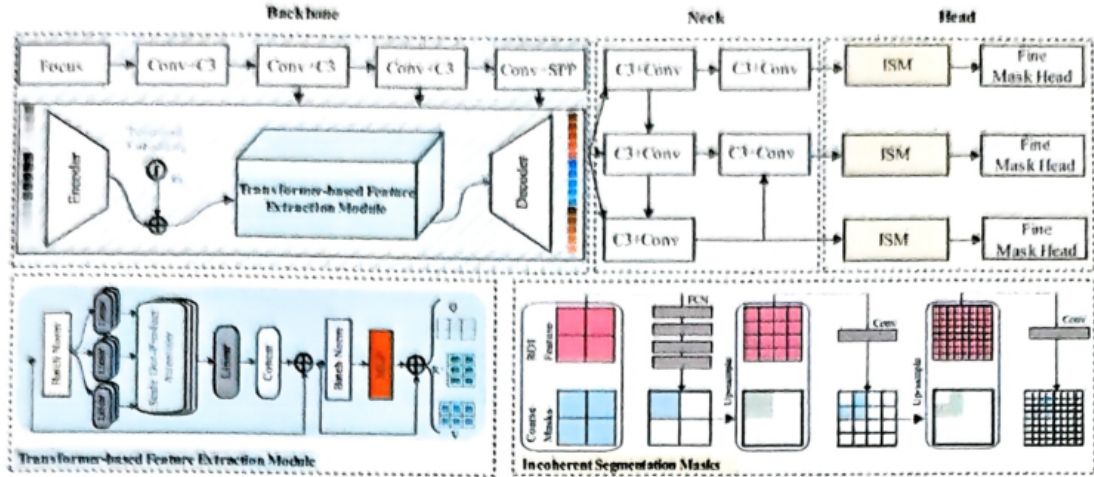


图 1 ViT-S2T Transformer 架构图

(3) 基于离散扩散模型的裂缝边缘精细化重构

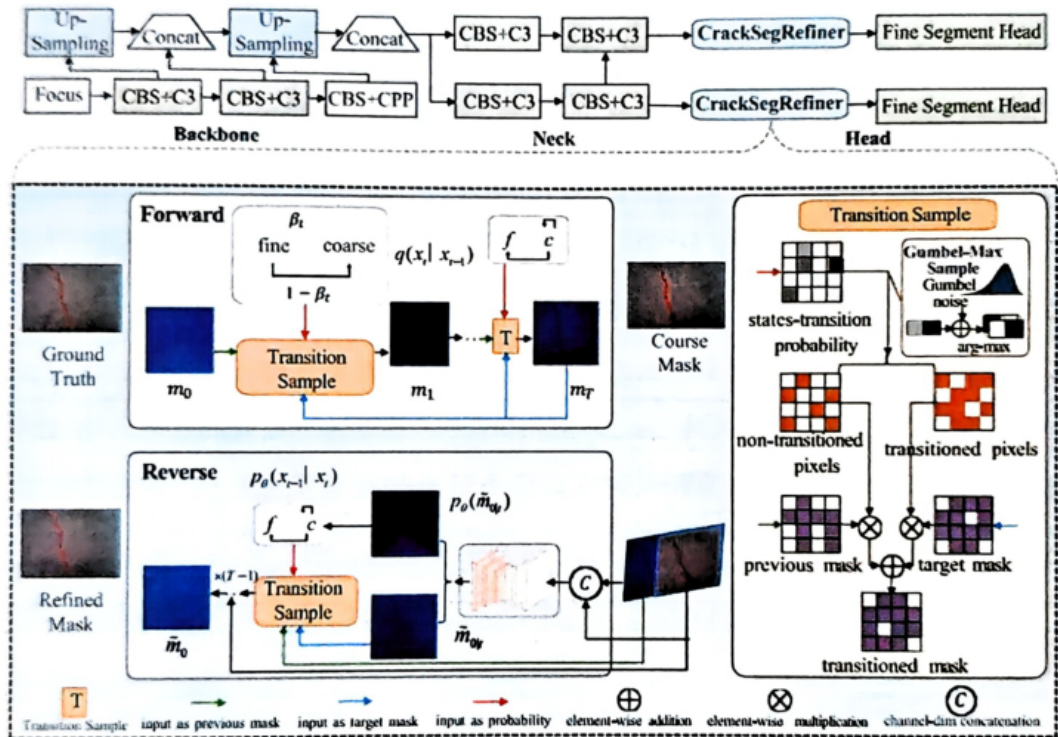


图 2 CrackSegRefiner 的扩散网络架构

生成式去噪精修：针对初步分割结果边缘粗糙的问题，引入去噪扩散概率模型（DDPM），构建 CrackSegRefiner 精炼网络。该网络不直接预测掩膜，而是学习从“噪声掩膜”恢复“真值掩膜”的逆过程。

离散状态转移：建立基于多项式分布的离散扩散过程，利用 Gumbel-Max 采样策略。以前级网络的粗糙掩膜为条件输入，通过多步迭代反向推断，逐步剔除边缘毛刺，填补微小空洞，生成边缘平滑、细节丰富的高置信度裂缝数字模型。

(4) 裂缝三维几何特征量化与骨架提取

骨架化与矢量化：采用改进的 Hilditch 细化算法，将宽窄不一的裂缝掩膜细化为单像素宽度的中心骨架线，作为机械臂路径规划的基础。

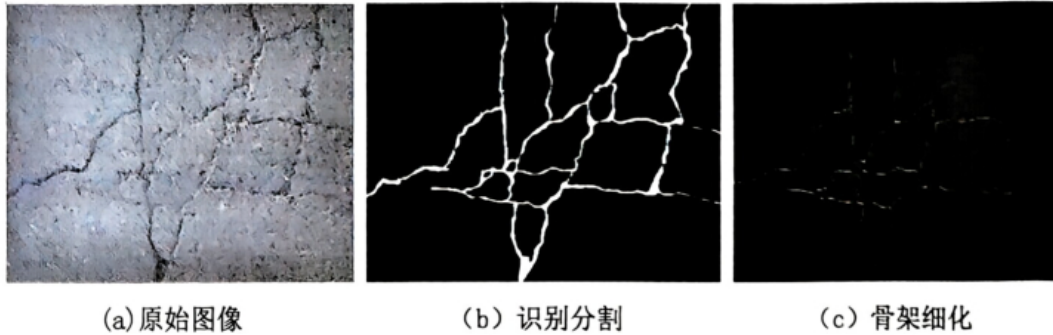


图 3 裂缝图像识别分割细化过程

深度信息融合：利用手眼标定矩阵，将 RGB 图像中的骨架映射至深度（Depth）空间。采用 RANSAC 算法拟合局部路面基准平面，通过差分计算获取裂缝的真实物理深度与宽度，为后续的变流量灌缝提供精确的体积参数。

内容二：基于视频流的裂缝实时跟踪技术

图像视觉伺服（IBVS）：设计基于图像的视觉伺服控制器，直接利用图像平面中裂缝骨架与视场中心的偏差（位置偏差与角度偏差）驱动机械臂运动，避免绝对坐标计算带来的累积误差。

LQR 最优控制：引入线性二次型调节器（LQR），构建包含跟踪误差项与能量消耗项的代价函数。通过求解代数黎卡提方程获得最优反馈增益矩阵，实现对机械臂关节力矩的精准调控。

自适应参数整定：结合极度学习机（ELM）或模糊逻辑，根据裂缝曲率及跟踪速度，在线动态调整 LQR 的权重矩阵（Q 和 R），在直线段追求高速度，在弯道段追求高精度，实现“刚柔并济”的拟人化控制。

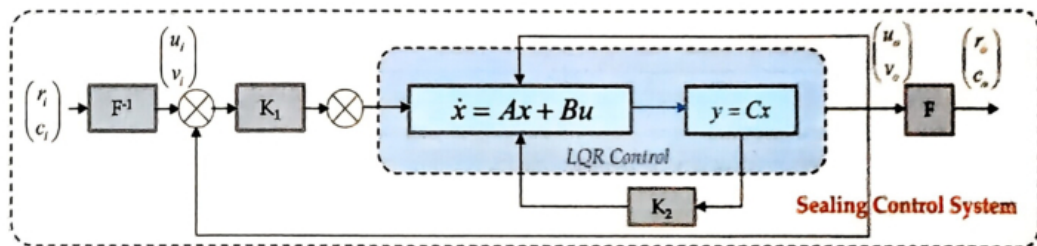


图 4 LQR 控制系统的原理框图

作业安全约束与逻辑自锁机制：针对边通车边作业的复杂环境，系统从物理

与逻辑两个维度保障作业安全。首先，在控制算法中设定严苛的机械臂运动包络区间，将机械臂的作业半径严格限制在养护车辆的安全宽度内，确保末端执行器在任何情况下均不会伸入相邻行车道。其次，建立跟踪状态实时自检逻辑：当视频流感知到的裂缝信号因强光遮挡、剧烈颠簸发生丢失或跟踪偏差超过阈值时，系统将毫秒级触发‘安全复位’指令，强制机械臂收回至初始待命位置并锁死，避免在动态交通干扰下产生误动作。通过配合现有的养护作业预警车及标准锥标防护，实现在不增加复杂感知硬件的前提下，确保自动化修复过程的本质安全。

内容三：基于机械臂的视觉伺服控制技术

本专题旨在构建装备的“大脑”与“小脑”，解决从视觉感知数据到机械臂物理运动指令的转化与执行问题，通过将自主移动底盘、多自由度机械臂与视觉感知模块进行深度耦合，实现从视觉识别到物理运动指令的闭环转化，攻克非稳态基座下的末端执行器高精度定位技术。

(1) 基于图论优化的多拓扑裂缝全局路径规划

图模型构建：将识别出的裂缝骨架抽象为加权无向图，定义裂缝端点与交叉点为“节点”，裂缝段为“边”。

遍历次序优化：针对网状、龟裂等复杂拓扑，将修复路径规划转化为广义旅行商问题（TSP）。拟采用基于固定邻域搜索的人工蜂群算法（FNS-ABC）或改进蚁群算法，以“最小化空驶路径”和“关节运动平滑”为目标函数，优化机械臂的作业次序与移动方向。

打断与重连机制：针对度数大于2的交叉节点，设计基于欧拉回路原理的路径重构算法，自动识别并打断交叉点，通过增加最小代价的虚拟边，将复杂网状结构转化为可连续遍历的半欧拉图。

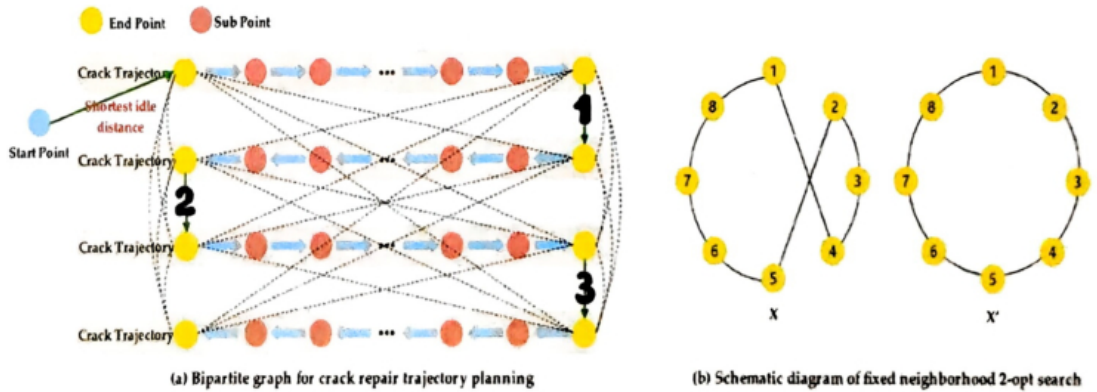


图 5 固定邻域搜索的人工蜂群算法（FNS-ABC）

(2) 移动操作机器人运动学建模与状态空间构建

多体运动学建模: 建立包含车辆基座、机械臂连杆及末端相机的统一运动学模型。利用改进 D-H 参数法描述机械臂运动, 推导包含基座扰动项的雅可比矩阵, 建立关节速度与末端笛卡尔速度的映射关系。

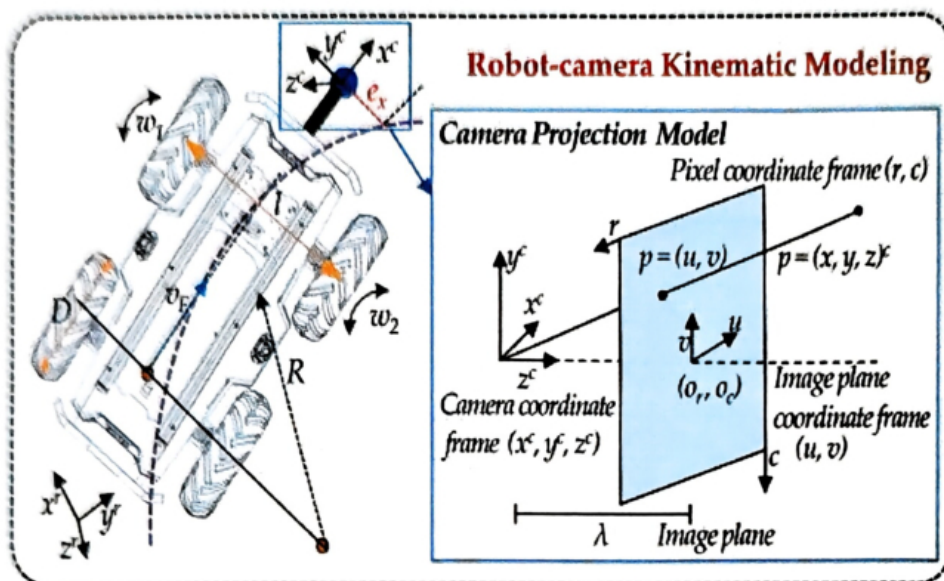


图 6 相机与移动底盘协同模型

坐标系映射解算: 实施高精度的手眼标定 (Hand-Eye Calibration), 求解相机至法兰盘的变换矩阵。建立“像素-相机-法兰-基座-世界”全链路坐标变换体系, 确保视觉坐标能无损转化为机器人控制指令。

基于 ROS 的多源数据融合与实时通讯架构: 系统中枢采用 ROS 作为软件集成平台, 利用其分布式节点通讯机制, 将感知节点 (相机)、规划节点 (路径)、控制节点 (机械臂) 与执行节点 (供料泵) 进行解耦。硬件层面采用 NVIDIA Jetson AGX Orin 作为边缘计算核心, 通过千兆以太网与 PLC 控制器进行高速通讯, 满足作业车在低速行进中的实时动态响应需求。

内容四: 灌缝材料精准供料控制系统以及智能化修复综合成套技术

本专题旨在打造装备的“执行末端”, 实现修复材料与裂缝空间的精准匹配, 并完成整机的系统集成。

(1) 密封胶热流变特性建模与供料控制算法

灌缝材料粘度-温度特性曲线与最佳施工窗口示意图

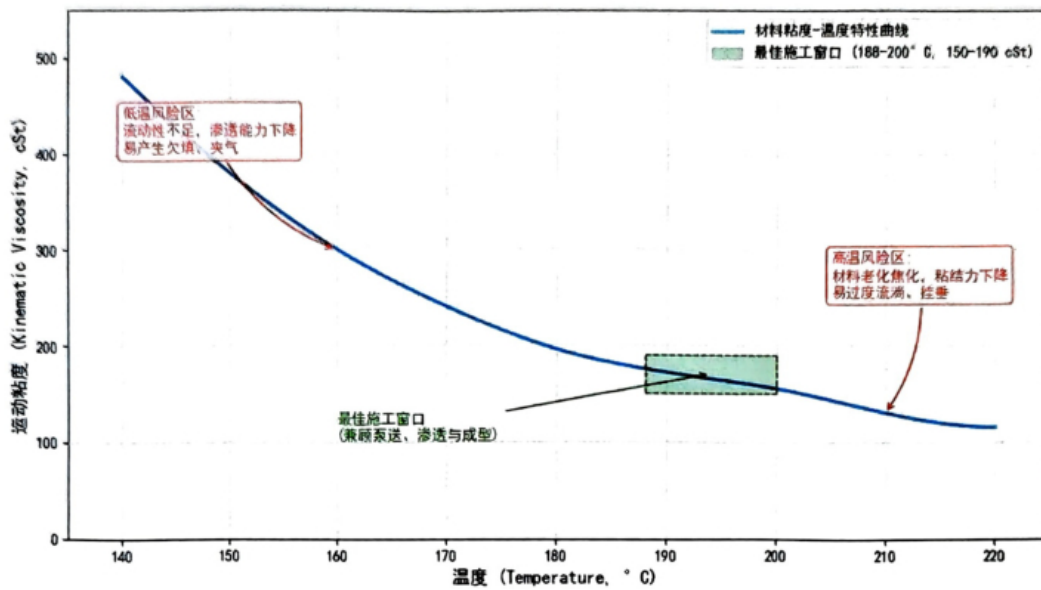


图 7 灌缝材料粘度-温度特性曲线与最佳施工窗口示意图

流变学建模：开展密封胶材料在不同温度（160℃-200℃）及剪切速率下的流变实验，建立粘度-温度-流速的本构方程。

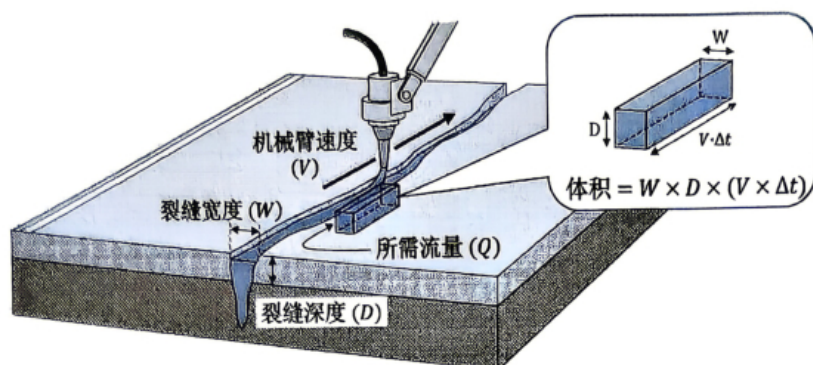
材料技术要求：为适应自动化泵送，密封胶需满足：170℃时表观粘度为2.0-5.0 Pa·s，具有优异的抗剪切稳定性，且弹性恢复率≥70%，确保修复后能适应路面温缩应力。

材料制取与温控：明确热熔型密封胶的融化与搅拌工艺，研制具备自动恒温功能的加热锅，控制偏差±2℃，防止材料因过热老化或温度过低导致阻塞。

多库适配：针对陕西常用的不同品牌及不同气候区的密封胶开展平行实验，建立包含粘度、稠度、冷却速度的多参数材料指纹库。

变流量控制策略：构建“随速随宽”的流量控制模型。输入实时检测的裂缝宽度、深度及机械臂末端移动速度，实时计算理论需胶量。

迟滞补偿：针对输料泵及液压系统的响应延迟，设计前馈补偿控制器。利用裂缝检测的前瞻信息，提前发送流量调节指令，抵消系统物理滞后，确保出料流量与裂缝容积的实时同步。



$$\text{所需流量 } Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \approx \text{裂缝宽度 } W \text{ (m)} \times \text{裂缝深度 } D \text{ (m)} \times \text{机械臂速度 } V \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

$$\text{泵转速 RPM} = k \times \text{所需流量 } Q$$

图 8 裂缝体积的深度信息估算示意图

(2) 多功能末端执行器设计与制造

集成化结构设计：研制集“吹扫清理、随动加热、精准灌注、刮平整形”于一体的轻量化末端执行器。

随动加热与整平：设计随动式热风加热模块，在灌注前对裂缝壁进行预热，提升材料粘结力；设计弹性刮板机构，在灌注后即时刮平余料，确保修复后的路面平整度（平整度偏差 $\leq 2\text{mm}$ ）。

(3) 成套装备系统集成与工程化验证

软硬件集成：基于 ROS（机器人操作系统）架构，集成视觉感知、路径规划、运动控制及供料控制四大子系统，实现多任务并行处理与毫秒级数据通讯。

实车改装与调试：选用国产国六底盘或电动底盘，完成发电机组、液压站、机械臂及视觉系统的物理集成与电磁兼容性（EMC）调试。

现场测试与迭代：依托陕西省内高速公路路段（如依托工程），开展实地测试。采集不同光照、路况下的作业数据，评估识别准确率、跟踪误差及灌缝质量，反向迭代优化算法模型，最终形成成熟的工程样机。

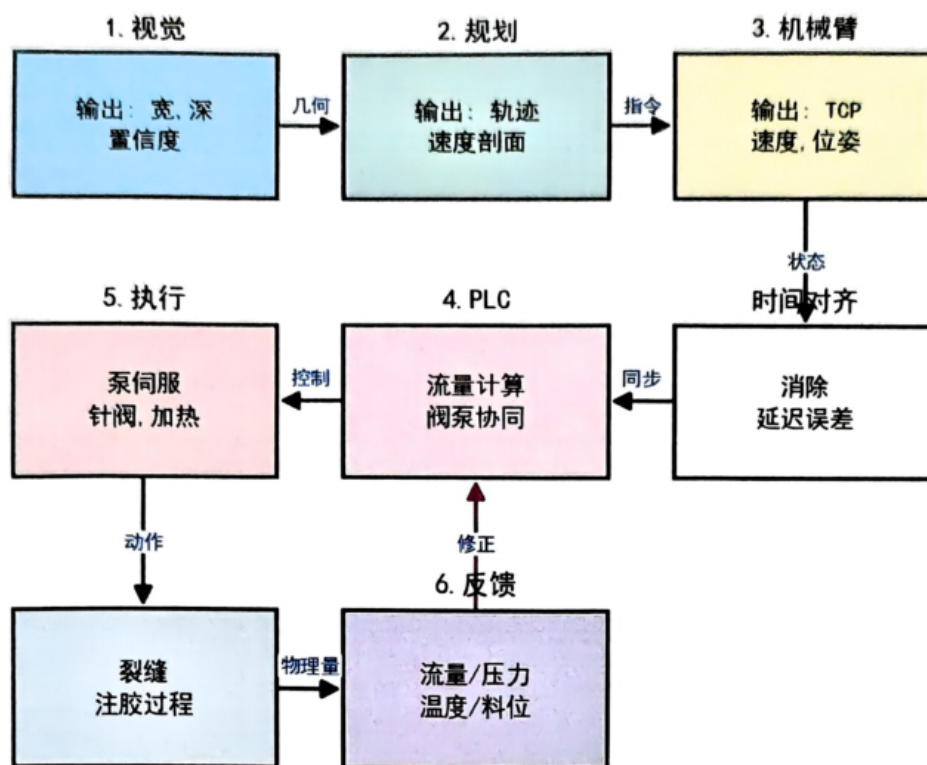


图 9 裂缝几何—机械臂运动—供喷料闭环控制系统框图

3. 技术路线

本项目遵循“理论机理分析—核心算法攻关—系统集成研制—工程实证迭代”的总体研发路径。将复杂的道路裂缝智能化修复系统解耦为“高保真感知”、“智能决策与控制”、

（1）总体技术架构设计方案

本项目拟构建基于 ROS 分布式架构的“车-臂-云”一体化技术体系。

物理层：采用“移动底盘+多自由度机械臂+末端执行器”的硬件拓扑。底盘负责宏观移动，机械臂负责微观操作，二者通过 CAN 总线实现运动学解耦与协同。

感知层：构建“全局工业相机+局部 RGB-D 深度相机”的双目异构视觉系统，数据经由万兆网口传输至车载边缘计算单元（NVIDIA Jetson AGX）。

算法层：部署基于 Docker 容器化的深度学习推理引擎，运行 ViT-S2T 特征提取网络、FNS-ABC 路径规划算法及 LQR 最优控制器。

交互层：开发基于 Qt 的上位机人机交互系统，实时显示裂缝三维点云、修复轨迹及作业状态，并具备异常人工接管功能。

（2）裂缝高精度感知与三维重构技术方案

数据采集与增强: 选取陕西省内典型沥青路面（如西汉高速、西商高速）进行不少于 500 公里的路面图像采集，涵盖晴天、阴天、隧道、桥梁阴影等多种光照条件。利用自研数据采集车，同步采集 RGB 图像与 LiDAR 点云数据。采用同态滤波与 Retinex 算法消除光照不均，利用双边滤波去除沥青颗粒噪声，构建“陕西省路面裂缝数据集”。

深度学习模型构建: 基于 PyTorch 框架搭建 ViT-S2T 网络。利用 Transformer 的 Self-Attention 机制处理全局上下文信息。引入生成式扩散模型作为后处理模块，通过正向加噪与反向去噪的迭代训练，学习裂缝边缘的高频细节分布，实现对粗糙分割掩膜的精细化修复。

三维量化方法: 利用 Tsai-Lenz 算法进行手眼标定，建立像素坐标系与世界坐标系的转换矩阵。基于 RGB-D 深度流，采用 RANSAC 算法拟合路面基准平面，通过深度差分法计算裂缝的体积参数（宽度、深度、截面积）。

（3）路径规划与运动控制技术方案

全局路径优化: 将裂缝像素骨架转化为无向加权图。针对多裂缝遍历问题，拟采用混合人工蜂群算法（FNS-ABC）。引入固定邻域搜索算子增强局部开发能力，以“机械臂关节行程最小”和“底盘移动距离最短”为双目标函数，求解全局最优遍历序列。

实时寻迹跟踪: 建立包含基座扰动的机械臂多体动力学模型。设计基于图像的视觉伺服（IBVS）控制律，直接利用图像特征偏差驱动机械臂。引入 LQR（线性二次型调节器），构建包含跟踪误差与能量消耗的代价函数。利用极度学习机（ELM）根据裂缝曲率在线调整 LQR 权重矩阵，解决非线性弯道跟踪滞后问题。

（4）材料流变特性与精准供料技术方案

室内试验: 使用动态剪切流变仪（DSR）、布氏旋转粘度计测试常用路面密封胶在不同温度（160°C-210°C）及不同剪切速率下的表观粘度，拟合 Arrhenius 粘度模型。

供料控制模型: 建立“流量-缝宽-速度”的耦合方程，针对液压泵送系统的响应滞后，设计前馈补偿环节，利用视觉系统的前瞻信息提前时刻发送流量调节指令。

末端机构研制: 设计包含“热风预热、随动灌注、弹性刮平”功能的集成化末

端，利用 SolidWorks 进行结构设计，利用 ANSYS Fluent 进行热流场仿真，优化出料流道设计。

4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目作为道路养护智能化转型的探索性研究，其成果主要形式为“原理样机”及“成套关键技术体系”。为了将科研成果转化为实际生产力，并最终服务于陕西交控集团的养护主业，拟定以下后续技术深化与应用衔接计划：

（1）从“样机验证”向“工程化产品”的迭代升级

本项目验收时交付的成果为具备核心功能的原理样机，侧重于算法的验证与核心工艺的跑通。在项目结题后，计划利用 1-2 年时间进行工程化技术改造：

硬件加固与环境适应性改造：针对陕西省内秦岭山区、陕北风沙区等恶劣养护环境，对样机的核心传感器（相机、雷达）及精密机械臂进行 IP65 级以上的防尘防水封装改造，增加抗震阻尼系统，确保装备在颠簸路面与扬尘环境下的平均无故障工作时间满足连续作业需求。

模块化与标准化设计：将视觉感知模块、供料控制模块进行模块化封装，使其不再局限于专用底盘，而是能够快速挂载于陕西交控现有的通用养护车辆上，降低后续推广的设备购置成本。

（2）与陕西交控“智慧养护”基建计划的深度融合

本项目成果将直接对接陕西交通控股集团运营管理分公司的养护业务需求，特别是关中养护段的实际作业场景：

试点示范与工法形成：在项目研究后期及结题后，选取典型的试验路段（如绕城高速、西汉高速等），开展小规模试点应用。通过实地作业数据，编制《路面裂缝自动化修复作业工法》及《设备操作维护手册》，为后续大规模列装奠定管理基础。

养护数据库接口打通：计划将裂缝识别过程中产生的高精度病害数据（位置、长度、宽度、深浅），通过 API 接口接入陕西交控现有的路面管理系统或数字养护平台，实现“修复一处病害，更新一处数据”，为预防性养护决策提供动态数据支撑。

（3）成果转化与多场景应用推广

基于本项目掌握的“微弱目标视觉识别”与“移动基座机械臂控制”核心技术，

裂缝可进一步拓展至其他基础设施维护领域:

技术迁移: 将裂缝识别与跟踪技术迁移至隧道衬砌裂缝检测、桥梁伸缩缝清理等场景, 形成“公路医生”系列化智能装备。

产学研用协同: 依托长安大学与陕西交控的合作平台, 联合申报后续的科技成果转化项目、推动样机的小批量试制。预期在未来 3-5 年内, 逐步替代传统的人工手持灌缝枪作业模式, 实现养护作业的“机器换人”, 显著降低养护工人的劳动强度与安全风险。

5. 有关技术经济指标

本项目本着“实事求是、留有余地、重点突破”的原则, 综合考虑现有技术瓶颈与工程实际环境, 制定以下技术与经济考核指标:

5.1 主要技术性能指标

(1) 能够有效识别沥青路面常见的横向裂缝、纵向裂缝及不规则裂缝。在正常作业光照条件下, 路面裂缝像素级实时追踪识别准确率 $\geq 90\%$ 。

(2) 自动化修复作业工效较传统人工灌缝提升 10% 以上。完成道路裂缝智能化灌缝技术算法 1 套。

5.2 技术经济指标

(1) 成本效益: 通过自动化检测与修复, 减少人工参与强度, 降低人工成本。

(2) 知识产权与学术产出: 申报国家发明专利 2 项, 重点保护视觉算法、控制策略及末端机构设计; 发表高水平学术论文 1 篇。

(3) 人才培养: 依托本项目研究, 培养道路工程、控制工程方向的研究生及企业工程技术骨干 ≥ 10 人, 提升团队在智能养护领域的创新能力。

(4) 适用条件与范围: 适用于高速公路、国省干线及市政道路的沥青路面预防性养护工程。适应环境温度 $-10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$, 可满足除雨雪、大雾等极端天气外的常规全天候作业需求。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

陕西交控市政路桥集团有限公司成立于 2021 年 2 月，按照省委、省政府重组整合省属交通企业的重大决策部署组建而成，是“第二大省属企业”——陕西交通控股集团有限公司所属的、具有独立法人资格的国有独资企业。市政路桥集团公司拥有权属企业 8 户，是公路工程施工总承包特级、工程设计公路行业甲级、交通建设公路工程监理甲级、市政公用工程施工总承包一级企业，具备建筑行业 100 项资质，注册资本金 20 亿元。业务涵盖工程总承包、规划设计管理、市政施工、普通机电设备安装、国内贸易代理、供应链管理服务、设备租赁、劳务服务（不含劳务派遣）、地质灾害治理服务、轨道交通工程机械及部件销售、安全评价、工程造价咨询、水运工程水利工程建设监理等。

长安大学是教育部直属、国家“双一流”建设高校，在道路工程、交通工程及智能交通领域具有雄厚的科研基础和显著的行业影响力。学校在道路病害检测、智能养护装备、机器视觉与自动控制等方向积累了丰富的研究成果，建有公路养护装备国家工程研究中心、道路施工技术与装备教育部重点实验室等科研平台。在本项目中，长安大学主要承担道路裂缝智能识别、路径规划、视觉伺服控制及关键算法研究等技术工作，为项目关键技术攻关、系统集成与成果形成提供技术支持。

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
张宏江	陕西交控市政路桥集团有限公司	男	1975-06-08	副高级	道路工程（路面）	项目负责人
杨旭	长安大学	男	1988-01-13	正高级	道路工程（路面）	技术总负责
吴迪	陕西交控市政路桥集团有限公司	男	1992-08-23	中级	交通工程（安全设施）	数据分析整理

鹿小恩	陕西交控市政路桥集团有限公司	男	1973-01-03	中级	公路工程	数据审核
杨耀	陕西交控市政路桥集团有限公司	男	1996-09-19	中级	机电工程	资料整理
李翔宇	陕西交控市政路桥集团有限公司	男	1995-12-14	中级	机电工程	文献收集
刘玉	长安大学	男	1979-08-22	副高级	交通工程(安全设施)	技术协助负责人
杜金鹏	陕西交控市政路桥集团有限公司	男	1989-07-16	中级	道路工程(路面)	裂缝信息自动化提取
周博	长安大学	男	1991-06-25	中级	道路工程(路面)	裂缝实时跟踪
张建奇	长安大学	男	1992-07-01	助理级	道路工程(路面)	机械臂视觉伺服、供料控制
常家瑞	长安大学	男	2000-02-21	助理级	道路工程(路面)	综合成套技术
刘文博	长安大学	男	1999-02-06	助理级	道路工程(路面)	报告编写、数据整理
陈亿学	长安大学	男	2002-02-09	助理级	道路工程(路面)	复杂裂缝修复路径规划
范泰博	长安大学	男	1998-05-21	助理级	道路工程(路面)	项目协调与执行经理

3. 各自承担的主要工作

张宏江（项目负责人）

主要承担工作：

作为项目负责人，全面负责项目的总体组织与实施工作。统筹项目研究目标与技术路线，负责项目总体方案设计、关键技术方向把控及阶段性成果审查；组

织协调陕西交控市政路桥集团有限公司与长安大学之间的产学研合作,保障项目进度、质量与经费规范使用;负责示范工程应用组织、成果转化及对外技术交流等工作。

杨旭(技术总负责人)

主要承担工作:

作为项目技术总负责人,负责项目核心技术方案的总体设计与技术决策。重点指导裂缝自动识别、视频流实时跟踪、路径规划与智能修复控制等关键技术研发;统筹各技术模块之间的协同与集成,解决项目实施过程中的重大技术问题;指导科研论文、专利及技术成果的凝练与输出。

吴迪(数据分析整理)

主要承担工作:

负责项目全过程数据管理与分析工作,包括路面裂缝图像与视频数据的采集整理、标注结果统计分析、实验数据汇总与对比评估;参与示范应用数据的整理与效果评估,为算法优化和工程应用提供数据支撑。

刘玉(技术协助负责人)

主要承担工作:

协助技术总负责人开展项目技术管理与实施协调工作;重点参与交通工程与安全设施相关技术方案论证,配合完成裂缝修复系统在实际道路环境下的适应性分析;参与项目阶段性技术成果评估及示范应用技术支持。

杜金鹏(裂缝信息自动化提取)

主要承担工作:

负责路面裂缝信息自动化提取相关研究工作;参与裂缝识别与分割算法设计与实现,重点开展复杂环境下裂缝几何信息、位置坐标等关键特征的自动提取方法研究;配合完成裂缝数据集构建与算法性能验证。

周博(裂缝实时跟踪)

主要承担工作:

负责基于视频流的裂缝实时跟踪技术研究;参与轻量化裂缝跟踪模型构建、跟踪算法实现与性能优化;开展裂缝路径连续性分析与实时跟踪实验,支撑裂缝修复过程中的动态寻迹控制。

张建奇（机械臂视觉伺服、供料控制）

主要承担工作：

负责机械臂视觉伺服控制及灌缝材料精准供料控制相关研究；参与机械臂运动学建模、视觉坐标与机械臂坐标映射关系建立；研究修复末端供料速度与裂缝宽度、运动速度之间的控制策略，提升修复精度与稳定性。

常家瑞（综合成套技术）

主要承担工作：

参与道路裂缝智能化修复综合成套技术的集成与实现；协助完成裂缝识别、路径规划、机械臂控制、供料系统等模块的系统集成与联调；参与智能修复装备整体方案优化与示范应用实施。

刘文博（报告编写、数据整理）

主要承担工作：

负责项目研究过程中技术资料、阶段性报告及总结报告的编写工作；参与实验数据整理、图表绘制及成果汇总；协助完成项目申报材料、阶段检查材料及成果汇编等文档工作。

陈亿学（复杂裂缝修复路径规划）

主要承担工作：

负责复杂裂缝修复路径规划算法研究；针对多裂缝、交叉裂缝等复杂场景，开展修复路径建模与优化算法设计；参与路径规划与机械臂运动控制协同验证，提升复杂裂缝修复效率与可靠性。

范泰博（项目协调与执行经理）

主要承担工作：

负责项目日常协调与执行管理工作；协助项目负责人进行进度控制、任务分解与人员协调；组织项目会议、对接校企双方沟通，跟踪项目实施情况，保障研究任务按计划推进。

4. 项目主要负责人情况

张宏江，男，1975年生，副高级工程师，现就职于陕西交控市政路桥集团有限公司，长期从事道路工程与路面养护领域的技术研究与工程管理工作。在道路养护工程实施、路面病害处治及新技术应用等方面具有丰富的实践经验，主持

和参与多项省部级及行业科研与工程项目。

在本项目中,张宏江作为项目负责人,全面负责项目的组织实施与统筹管理,协调产学研合作,推进关键技术研发、工程示范及成果应用,确保项目研究目标和考核指标按期高质量完成。

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

本项目依托于 G70 福银高速西安至陕鄂界段安全韧性提升工程路线起自西安市蓝田县三里镇席家河,经商洛市商州区、山阳县,止于商洛市山阳县漫川关(陕鄂界),全长 157.48 公里;建设内容主要包含路基路面、桥涵、隧道、交通工程及沿线设施等公路安全韧性提升内容和制度体系建设。其中路线工点 1 处(双幅)实施路基改桥、路基路面工点 120 处、桥梁工点 223 座(单幅)、隧道工点 24 座(双洞)、交通安全设施提升路段 118.7 公里,同步完善安全风险管控制度体系。

依托工程规模较大,养护内容涵盖路面日常巡查、病害检测、裂缝处治及路用功能恢复等多项作业,涉及横向裂缝、纵向裂缝、网状裂缝及交叉裂缝等多种典型路面病害类型。养护路段普遍存在光照条件变化大、阴影干扰明显、路表污染及交通干扰频繁等复杂作业环境,对裂缝识别精度、修复路径规划合理性以及施工控制稳定性提出了较高技术要求。

在工程技术特点方面,依托工程以在役道路不停交通或半封闭条件下养护作业为主,施工窗口期短,对施工安全性、作业效率和修复质量要求高;同时,传统人工裂缝处治方式劳动强度大、作业效率低、质量稳定性不足,亟需通过智能化、自动化技术手段提升道路养护作业水平。

本项目将在上述实际养护工程条件下,围绕道路裂缝检测与修复的关键业务工作,开展裂缝信息自动识别与提取、复杂裂缝修复路径规划、裂缝实时跟踪控制、机械臂视觉伺服及灌缝材料精准供料等关键技术研究,并在项目执行期内依托在役养护工程路段开展示范应用与综合验证。通过在真实工程环境中的持续验证与应用,检验道路裂缝智能化修复关键技术的适应性、稳定性和工程实用性,为后续规模化推广提供工程经验和技术支撑。

2. 投资来源

依托工程投资来源于陕西交通控股集团有限公司。

3. 工程进度与项目科研进度的配合

本项目坚持“科研依托工程、工程验证科研”的实施思路，将道路裂缝智能化修复关键技术研究与实际养护工程进度紧密结合，形成科研与工程同步推进、相互支撑的协同实施机制。

在项目实施过程中，依托陕西交控市政路桥集团有限公司组织实施的高速公路及市政道路日常养护工程，以及陕西交通控股集团有限公司运营管理分公司在项目执行期内实施的养护工程施工标段，结合道路养护年度计划和施工组织安排，合理匹配科研阶段任务，确保科研工作与工程进度协同推进。

在工程实施前期，结合养护工程日常巡查和病害排查工作，系统开展路面裂缝图像与视频数据的采集、整理与标注，构建真实工程环境下的裂缝数据集，为裂缝自动识别、信息提取及实时跟踪算法研究提供可靠的数据支撑。

在工程实施中期，结合养护工程中裂缝集中处治和专项维修作业时段，将科研阶段形成的裂缝自动识别、复杂裂缝修复路径规划、裂缝实时跟踪控制等关键技术逐步嵌入实际作业流程中，开展现场测试与对比验证，并根据工程应用反馈持续进行参数优化和技术完善，实现科研成果在真实工况下的迭代提升。

在工程实施后期，依托在役养护工程示范路段，对形成的裂缝智能化修复综合成套技术和样机系统开展连续应用和综合效果评估，重点分析其运行稳定性、施工效率和修复质量表现，总结科研成果在工程应用中的技术优势和适用条件，形成可复制、可推广的技术模式，为后续规模化应用和成果转化奠定工程基础。

通过上述协同实施方式，实现科研进度与工程进度的动态匹配和有机衔接，确保项目研究成果来源于工程实践、验证于工程现场、服务于工程应用，充分发挥科研成果对实际道路养护工程的技术支撑作用。

4. 组织管理形式

(1) 严格按本项目各项研究内容和研究计划目标组织实施。

(2) 项目由第一负责单位和第一负责人全面负责管理，并以合同形式明确各方的分工协作、经费拨付、考核目标和责任要求等具体内容；

(3) 每季度定期召开项目工作会议，检查前阶段的具体工作、研究进展和
实施深度，讨论解决研究过程中的各项技术问题和其他事宜，布置后阶段的工作
重点和具体要求。对不能按时、保质完成研究任务的人员及时予以更换。

(4) 对本项目的重点阶段性目标和成果进行重点考核和督促，以确保项目
总体研究目标的实现。

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	19.96	合 计	99.96	19.96	80.0
工程配套研究经费	20.0	1.设备费	0.0	0.0	0.0
单位自筹	50.0	（1）购置设备费	0.0	0.0	0.0
其他经费	10.0	（2）设备改造与租赁费	0.0	0.0	0.0
		2.业务费	73.0	13.0	40.0
		（1）材料费	25.0	0.0	25.0
		（2）测试化验实验加工费	30.0	0.0	30.0
		（3）燃料动力费	0.0	0.0	0.0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	10.0	10.0	0.0
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	3.0	3.0	0.0
		（6）其他费用	5.0	0.0	5.0
		3.劳务费	11.96	6.96	5.0
		（1）专家咨询费	2.0	2.0	0.0
		（2）聘用人员劳务费	5.0	0.0	5.0
		（3）其他劳务费	4.96	4.96	0.0
		（二）间接费用	15.0	0.0	15.0
		4.管理费	10.0	0.0	10.0
		5.绩效支出	5.0	0.0	5.0

预算明细说明

1. 设备费

(1) 购置设备费

本项经费用于项目实施过程中购置专用仪器设备，共计 0.0 万元，其中，使用斤拨经费 0.0 万元。

序号	名称	单位	数量	总经费 (万元)	其中：斤拨 经费（万 元）
1					
2					
费用合计					

注意：对上表中应纳入政府采购的相关设备，已实行政府采购（行政事业单位适用）；对其中符合固定资产管理条件的，已作为项目单位固定资产进行了管理。

(2) 试制设备费

本项经费用于项目实施过程中试制专用仪器设备，共计 0.0 万元，其中，使用斤拨经费 0.0 万元。

序号	项目	总经费 (万元)	其中：斤拨 经费（万 元）
1			
2			
费用合计			

(3) 设备改造与租赁费

本项经费用于项目实施过程中对现有仪器设备进行升级改造以及租赁外单位仪器设备，共计 0.0 万元，其中，使用斤拨经费 0.0 万元。

序号	项目	总经费 (万元)	其中，斤 拨经费 (万元)
1			
2			

序号	项目	总经费 (万元)	其中, 厅 拨经费 (万元)
费用合计			

2.业务费

(4) 材料支出

本项经费用于项目实施过程中消耗的各种原材料、辅助材料等低值易耗品的采购及运输、装卸、整理等费用, 共计 25.0 万元, 其中, 使用厅拨经费 0.0 万元。

序号	材料名称	数量/单位	总经费 (万元)	其中: 厅 拨经费 (万元)
1	路面裂缝图像与视频采集辅助材料(存储介质、线缆、防护组件等)	1 批	2.0	0.0
2	裂缝智能识别与跟踪实验用标定板及标识材料	2 套	1.0	0.0
3	灌缝材料试验用密封材料及辅助耗材	1 批	6.0	0.0
4	机械臂及移动机器人试验用通用消耗件(紧固件、连接件)	1 批	2.5	0.0
5	现场试验用安全防护及施工辅助材料	1 批	2.5	0.0
6	算法训练与测试用数据整理、标注及实验辅助材料	1 项	3.0	0.0
7	裂缝清理与预处理耗材(清洗剂、刷具、抹布、压缩空气罐/除尘耗材等)	1 批	2.0	0.0
8	灌缝末端易耗件与维护耗材(喷嘴/刮板/过滤网、耐高温密封圈、保温棉等)	1 批	1.5	0.0
9	外场供电与连接辅材(电源、电源线、插排、防水接头、扎带、线缆固定件等)	1 批	2.0	0.0
10	现场标识与交通组织耗材(警示带、反光贴、临时标识牌耗材、锥桶/路锥反光套等)	1 批	1.0	0.0

序号	材料名称	数量/单位	总经费 (万元)	其中：斤 拨经费 (万元)
11	试验样品封存与运输包装耗材（包装箱、防震材料、标签、封条等）	1 批	0.5	0.0
12	数据备份与交付存储介质（移动硬盘/U 盘/光盘等）	1 批	1.0	0.0
费用合计			25.0	0.0

（5）测试化验实验加工支出

本项经费用于项目实施过程中支付给外单位（包括项目承担单位内部独立经济核算单位）的检验、测试、化验、实验及加工等费用，共计 35.0 万元，其中，使用斤拨经费 0.0 万元。

序号	测试化验实验加工项目	实施单位	总经费 (万元)	其中：斤拨 经费（万 元）
1	路面裂缝图像与视频数据采集及整理测试	长安大学道路检测中心	6.0	0.0
2	裂缝自动识别与分割算法性能测试与验证	长安大学相关实验平台（独立核算）	5.0	0.0
3	裂缝实时跟踪与路径规划算法对比试验	长安大学相关实验平台（独立核算）	4.5	0.0
4	机械臂裂缝修复路径执行精度与稳定性测试	长安大学机械与控制实验平台	4.5	0.0
5	灌缝材料供料精度与修复效果实验测试	陕西交控市政路桥集团有限公司试验平台	4.0	0.0
6	依托工程现场示范段综合测试与效果评估	陕西交控市政路桥集团有限公司	3.5	0.0
7	裂缝识别与修复系统多工况对比与重复性验证试验	长安大学相关实验平台（独立核算）	1.5	0.0

8	智能修复系统连续作业 稳定性与可靠性测试	陕西交控市政路桥 集团有限公司试验 平台	1.0	0.0
费用合计			30.0	0.0

(6) 燃料及动力支出

本项经费用于项目实施过程中相关大型仪器设备、专用科学装置等运行发生的可以单独计量的水、电、气、燃料消耗费用等，共计 0.0 万元，其中，使用斤拨经费 0.0 万元。

序号	项目	总经费 (万元)	其中，斤拨 经费（万 元）
1			
2			
.....			
费用合计			

(7) 差旅支出

本项经费用于项目实施过程中开展科学实验（试验）、科学考察、业务调研、学术交流等所发生的外埠差旅费、市内交通费用等，共计 5.0 万元，其中，使用斤拨经费 5.0 万元。

序号	时间、人数、地点、任务	总经费 (万元)	其中，斤拨 经费（万 元）
1	2026 - 2027 年，6 人次，陕西省内依托工程路段；开展裂缝图像采集、现场试验与技术验证	1.5	1.5
2	2026 年，4 人次，陕西省内典型养护工程段；开展裂缝智能修复示范应用与效果评	1.0	1.0
3	2026 - 2027 年，6 人次，国内高校及科研机构；开展学术交流与技术调研	1.5	1.5

4	2027-2028 年，4 人次，陕西省内：参加项目阶段检查、验收及成果交流	1.0	1.0
费用合计		5.0	5.0

(8) 会议支出

本项经费用于可行性研究评审、研究大纲评审、项目验收及相关研讨会，共计 5.0 万元，其中，使用厅拨经费 5.0 万元。

序号	会议名称	总经费 (万元)	其中，厅拨 经费(万
1	可行性研究评审	0.8	0.8
2	研究大纲(实施方案)评审	0.8	0.8
3	中期咨询会	1.0	1.0
4	技术研讨、交流会	1.2	1.2
5	成果验收鉴定会	1.2	1.2
费用合计		5.0	5.0

(9) 国际合作与交流支出

本项经费用于项目实施过程中项目研究人员出国及外国专家来华工作的费用，共计 0.0 万元，其中，使用厅拨经费 0.0 万元。

序号	时间、人数、地点、任务	总经费 (万元)	其中：厅拨 经费(万 元)
1			
2			
.....			
费用合计			

(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/印刷支出

本项经费用于项目实施过程中，需要支付的出版费、资料费、印刷费、翻译费、专用软件购买费、数据购买和调查费、文献检索费、专业通信费、专利申请及其他知识产权事务等，共计 3.0 万元，其中，使用厅拨经费 3.0 万元。

序号	项目	总经费 (万元)	其中, 厅拨 经费 (万 元)
1	项目研究成果论文出版费	1.2	1.2
2	项目相关技术标准、文献资料及文献检索 费	0.4	0.4
3	项目阶段性报告、中期检查及验收材料印 、 刷费	0.6	0.6
4	发明专利及软件著作权申请相关事务费	0.8	0.8
费用合计		3.0	3.0

(11) 其他支出

指在项目研究过程中发生的除上述费用之外的其他业务费支出。

序号	项目	总经费 (万元)	其中, 厅 拨经费 (万元)
1	项目实施过程中相关技术服务及支撑费用	1.5	0.0
2	项目现场试验与示范应用协调及保障费用	1.2	0.0
3	项目研究所需临时性技术协作及辅助支出	1.5	0.0
4	项目成果整理、展示相关辅助费用	0.8	0.0
费用合计		5.0	0.0

3. 劳务费

(12) 劳务性支出

本项经费主要用于项目实施过程中支付给参与项目的研究生、博士后、访问学者和项目聘用的研究人员、科研助理及辅助人员等的劳务性支出，共计 9.96 万元，其中，使用厅拨经费 4.96 万元。

序号	时间、人数、事由	总经费 (万元)	其中, 厅 拨经费 (万元)
1	2026 年，研究生 6 人次；承担裂缝图像数 据整理、标注及算法训练等工作	4.5	4.5

2	2027 年，研究生 4 人次；参与裂缝实时跟踪、路径规划与模型验证	2.96	0.46
3	2026 - 2028 年，科研助理 2 人次；承担实验组织、数据汇总及技术支撑工作	2.5	0.0
费用合计		9.96	4.96

（13）咨询专家支出

本项经费主要用于项目实施过程中支付给临时聘请的咨询专家的费用。

序号	时间、人数、事由	总经费 (万元)	其中，厅 拨经费 (万元)
1	2026 年，5 人次；开展项目关键技术方案论证与实施路径咨询	1.0	1.0
2	2027 年，5 人次；开展项目成果评估与验收技术咨询	1.0	1.0
费用合计		2.0	2.0

4.间接费用

（14）管理费

本项经费用于项目实施过程中项目承担单位为项目研究提供的现有仪器设备及房屋占用，日常水、电、气、暖等消耗，以及有关管理费用的补助支出。共计 10.0 万元，其中，使用厅拨经费 0.0 万元。

（15）绩效支出

本项经费用于项目承担单位为项目研究激励科研人员的绩效支出。共计 5.0 万元，其中，使用厅拨经费 0.0 万元。

七、项目绩效指标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1、专利授权数（项）	2
		（1）授权发明专利	1
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	0

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		2、软件著作权授权数（项）	0
		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	1
		（3）其它	0
		4、著作（部）	0
		5、制订标准数（项）	1
		（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	1
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	1
		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
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	
		（1）小试	/
		（2）中试（样品样机）	/
		（3）小批量	/
		（4）规模化生产	/
	人才引育	1、引进高层次人才	0

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2、培养高层次人才	4
		(1) 博士、博士后	1
		(2) 硕士	3
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	8
		4、是否设立科研助理岗位	是
	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）	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	4
		3、就业培训（人次）	10
		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	项目推动道路养护由传统人工模式向智能化、机械化方向升级，促进道路养护装备制造及技术服务相关产业发展
		7、技术集成示范（项）	1
		8、建立示范基地（亩数）	0
		9、节约资源能源	通过精准识别与定量修复，减少材料浪费和重复施工，有效降低养护材料和能源消耗

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		10、环保效益	项目减少道路养护过程中粉尘、噪声及材料浪费，降低对交通环境和周边生态的影响，具有良好的环保效益
其他需要说明的情况	无		

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

1.项目预期目标（项目的考核目标）

本项目围绕“道路裂缝智能化修复关键技术”这一核心目标，面向在役道路养护工程中裂缝检测与修复自动化、智能化水平不足的问题，依托陕西交控市政路桥集团有限公司实际养护工程与长安大学科研平台，通过理论研究、算法开发、系统集成与工程示范相结合的方式，形成可工程应用的智能化修复成套技术。项目预期达到以下目标：

（1）技术目标

构建基于多目视觉与视频流分析的路面裂缝自动识别与实时跟踪方法，实现复杂工况（强光、阴影、水渍、交通干扰等）下裂缝目标的稳定识别与连续追踪；

形成面向复杂裂缝形态的修复路径规划与控制方法，实现裂缝修复路径的自动生成与动态调整；

建立基于机械臂的视觉伺服控制与灌缝材料精准供料控制技术，实现裂缝修复过程中位置、速度与供料参数的协同控制；

形成道路裂缝智能化修复综合成套技术，支撑智能化、自动化裂缝修复作业。

（2）性能指标目标

裂缝像素级实时追踪识别精度不低于 90%；

裂缝信息自动提取与修复作业效率较传统人工方式提升 10%以上；

灌缝材料供料过程稳定、连续，修复效果要求。

（3）工程应用目标

完成道路裂缝智能化灌缝技术算法 1 套；

2.提交的研究成果及其形式

项目实施期间形成的研究成果以“技术成果+工程成果+知识产权与学术成果”为主，具体包括以下内容和形式：

(1) 技术与工程成果

道路裂缝智能化修复关键技术体系：包括裂缝自动识别与信息提取、视频流裂缝实时跟踪、裂缝修复路径规划、机械臂视觉伺服控制、灌缝材料精准供料控制等核心技术；

完成道路裂缝智能化灌缝技术算法 1 套；

项目研究报告：包括中期研究报告、结题研究报告及相关技术总结材料。

(2) 知识产权与学术成果

学术论文：发表与本项目研究成果密切相关的学术论文不少于 1 篇，其中至少为《中文核心期刊要目总览》收录论文，论文发表注明“依托陕西交通科技项目及项目编号”；

专利成果：申报发明专利不少于 1 项（进入实质审查阶段），围绕裂缝识别算法、修复路径规划、智能修复装备等关键技术；

(3) 标准与技术文件成果

形成适用于道路养护工程的技术应用说明、操作流程或指导性文件。

(4) 人才与团队成果

在项目实施过程中培养研究生和工程技术骨干不少于 10 人；

形成稳定的道路裂缝智能检测与修复技术研究与工程应用团队。

3.经济、社会、环境效益分析

(1) 经济效益分析

本项目形成的道路裂缝智能化修复关键技术及样机系统，可在道路日常养护与大中修工程中推广应用，具有显著的经济效益：

降低养护成本：通过自动化检测与修复，减少人工参与强度，降低人工成本；

提高作业效率：裂缝识别与修复作业效率提升 10%以上，缩短施工工期，减少养护作业对交通运行的影响；

延长道路使用寿命：通过及时、精准的裂缝修复，延缓路面病害发展，减少后期结构性维修投入，降低道路全寿命周期养护成本；

推广应用潜力大：成果可在高速公路、市政道路、机场跑道等多类型路面养护工程中的应用，具备良好的产业化和市场推广前景。

（2）社会效益分析

提升道路运行安全性：裂缝修复质量和一致性提高，有效降低路面病害引发的交通安全风险；

改善养护作业环境：减少人工高强度、危险性作业，推动道路养护作业向智能化、机械化转型；

支撑智慧交通建设：项目成果与交通数字化、智能化发展方向高度契合，为智慧公路和智慧养护提供技术支持；

示范引领作用明显：通过示范工程应用，为省内道路养护单位推广智能化修复技术提供样板。

（3）环境效益分析

减少资源浪费：精准识别与定量修复减少过度灌缝和材料浪费；

降低碳排放与环境扰动：缩短施工时间、减少重复作业，降低养护施工过程中的能源消耗和环境影响；

促进绿色养护模式：推动道路养护由“被动维修”向“主动、精准、绿色养护”转变，符合交通行业绿色低碳发展方向。

九、其它需要说明的问题

无

十、申请单位意见

本项目依托工程为 G70 福银高速西安至陕鄂界段安全韧性提升工程，本单位已将本项目列入年度预算计划，全力保障配套经费落实。

(公章)

单位负责人：(签字)

2026 年 3 月 28 日



道路裂缝智能化修复关键技术 大纲评审意见

2026年3月10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“道路裂缝智能化修复关键技术”（项目编号：25-72K）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容全面，研究目标明确，技术路线可行。

二、项目研究人员组成合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，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、预期成果基本覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架基本契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

1.进一步明确研究对象，细化材料、工艺技术要求，提升研究的针对性。

2.建议凝练标志性成果，合理制定考核指标。

主任委员：



2026年3月10日

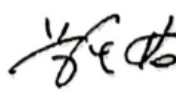
专家审查意见表

项目名称	道路裂缝智能化修复关键技术				
专家姓名	景宏君	职务/职称	教授	专业	公路工程
专家单位	西安科技大学			联系电话	13689101111

评审意见

道路裂缝修复技术近年来越来越受到重视。本项目基于相关研究现状，深入开展研究，立项必要，研究大纲内容详实。建议如下：

1. 裂缝成因、分类、力学模型应完善；
2. 裂缝修复材料应明确；
3. 是否有机械装备的研发？应明确！
4. 技术性能指标能否实现？其依据？
5. 项目绩效指标能否实现？应明确其考核方式一致。

评审专家（签字）： 

2026 年 3 月 10 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	道路裂缝智能化修复关键技术				
专家姓名	卢海	职务/职称	教授	专业	道路工程
专家单位	清华大学			联系电话	13087515538

评审意见

本项目开展道路裂缝病害智能识别修复技术研究，项目研究紧扣行业前沿，具有较好的科学性和应用价值。本项目研究内容明确，技术路线清晰，方案合理，前期研究基础较好，同意通过专家评审。

建议：

1. 应以智能识别修复技术对裂缝材料的技术要求，以适应不同路面裂缝的需求；
2. 应以智能识别修复技术的路面裂缝修复效果的技术指标。

评审专家（签字）：



2026年3月10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	道路裂缝智能化修复关键技术				
专家姓名	张海波	职务/职称	正高	专业	道路工程
专家单位	西安公路研究院有限公司		联系电话	13994550151	

评审意见

项目针对道路裂缝病害,进行智能化修复关键技术研究,具有创新性和实用性

建议

1. 研究背景中突出道路裂缝智能修复的必要性
2. 限定智能修复的裂缝形式和形式,突出智能识别裂缝等级的技术
3. 补充现有研究基础,增加设备研发费用预算.

评审专家(签字):

张海晨

2026 年 3 月 10 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	道路裂缝智能化修复关键技术				
专家姓名	吴传海	职务/职称	总工/教高	专 业	道路工程
专家单位	广东华路交通科技有限公司			联系电话	13822141956

评 审 意 见

一、本项目针对路面病害自动化检测与修复背后的难点问题，开展路面自动化检测与养护施工智能化技术研究，力求突破以上技术瓶颈，为我国交通基础设施的可持续发展提供强有力的支持，研究工作具有一定必要性，大纲编写较为合理，方案实施具有可行性。

二、人工智能的应用不一定非要替代人，但可以帮助人类解决以往难于的问题，建议进一步挖掘人工智能在裂缝类型识别、处治方案决策方面的优势。

三、道路裂缝养护基本是边通车边作业，基于视频流的裂缝实时跟踪技术研究需要考虑养护自动作业安全问题。

四、灌缝材料精准供料和智能化修复技术的关键灌缝材料及其工艺，建议针对不同类型的灌缝材料分别开展研究。

评审专家（签字）：



2026 年 3 月 10 日
(本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸)

专家审查意见表 (25-72K)

项目名称	道路裂缝智能化修复关键技术 (合同包 1)				
专家姓名	王松根	职务/职称	研究员	专 业	公路工程
专家单位	原山东省交通厅公路局			联系电话	13488700091

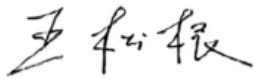
评 审 意 见

本项目针对陕西省高速公路及国省干线养护作业中面临的复杂路况与高精度自动化需求，开展了道路裂缝智能化修复关键技术研究。

提出的裂缝自动识别与信息自动化提取、基于视频流的裂缝实时跟踪技术、基于机械臂的视觉伺服控制平台和灌缝材料精准供料控制系统以及智能化修复综合成套技术等研究内容，具有一定的创新性。提交的研究大纲，研究内容较全面、技术路线和实施方案基本可行，项目承担单位和研究团队人员组成可满足项目研究要求，并有一定工作基础，依托工程和研究经费已落实，基本具备开展项目研究的条件。

同意该项目研究大纲通过评审。
建议：

- 1. 本项目研究技术含量较高，也较超前。目前国内外相关技术还都处于研究阶段，据工程应用还有一定距离。可做为技术储备项目开展相关研究。
- 2. 进一步明确研究对象。裂缝及修复技术种类很多，有横向和纵向裂缝、有自下而上和自上而下裂缝，有单条和多条不规则裂缝，从程度上分还有细裂缝和宽裂缝，从成因上可分温缩型裂缝和剪应力裂缝等；修补材料上有热有冷、工艺上有灌有贴。需明确该项目研究是针对那一种裂缝、材料和工艺。
- 3. 由于是技术储备型项目，其考核指标应留有余地，否则实现不了，很难验收。
如：裂缝像素级实时追踪识别精度不低于90%；裂缝信息自动提取与修复作业效率较传统人工方式提升50%以上；机械臂裂缝修复过程中，修复路径横向平均偏差控制在2 mm 以内，纵向连续性达到100%等指标需慎重考虑。

评审专家（签字）：

2026 年 03 月 10 日

(本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸)

道路裂缝智能化修复关键技术 (项目编号: 25-72K)

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	弥海晨	西安公路研究院 有限公司	公路工程	道路工程	正高工	弥海晨
2	委员	王振军	长安大学	道路工程	道路工程材料	教授	王振军
3	委员	景宏君	西安科技大学	道路工程	道路工程材料	教授	景宏君
4	委员	王松根	山东省公路局	公路工程	道路工程	正高工	王松根
5	委员	吴传海	广东华路交通科技 有限公司	道路工程	道路工程	正高工	吴传海

专家意见处理表

项目名称：道路裂缝智能化修复关键技术（合同包 1）（项目编号：25-72K_）

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	弥海晨	1.研究背景中突出道路裂缝智能修复的必要性。2.限定智能修复的裂缝大小和形式，突出智能识别裂缝深度的技术。3.补充现在研究基础，增加设备研发费用预算。	1. 强化背景必要性：结合《交通强国建设纲要》和数字 化转型要求，补充我国在智能化养护设备领域与欧美国家 差距分析，强调“机器换人”在提升养护精度与安全性方面 的迫切性。 2. 限定范围与突出深度技术：在实施方案中明确研究对 象为宽度 2mm 以上的沥青路面裂缝；同时详细阐述了利 用 Intel RealSense D405 高精度 RGB-D 相机实现毫米级深 度测量的技术细节。 3. 完善基础与预算：补充团队在修复平台和视觉识别算 法方面的研究成果；将单位自筹资金重点向硬件采集系统与 机械臂样机研发倾斜。
2	王振军	1.细化智能化修复对灌缝材料的技术要求，以适应不同路面灌封的 需求。2.细化智能化修复的路面灌缝修复成交的技术指标。	1. 细化材料技术要求：补充密封材料耐高温特性建模 要求，明确材料需具备高粘接力、良好的剪切速率适应性， 以匹配变流量供料系统的压力输出。 2. 细化修复技术指标：新增修复后路面材料填充率≥90%
3	景宏君	1.裂缝成因、分类、受力类型应给出；2.裂缝修复材料的制取；3. 是否有机械设备的研发，应明确。4.技术提供指标能否实现，其依 据。5.项目绩效指标能否实现；应与招标文件成果技术形成一致。	1. 完善裂缝机理：在背景部分补充沥青路面温缩型、剪 应力型裂缝的成因分析，并根据拓扑结构将其分为纵向、 纵向、网状及交叉裂缝。

			2. 材料研究：明确利用动态剪切流变仪（DSR）对常用密封胶进行性能标定，而非新材料合成，侧重于材料与工艺的适配性。 3. 明确设备研发：无设备研发。 4. 指标实现依据：补充基于现有 VIT-S2T 网络测试数据和机械臂 LQR 控制仿真结果作为指标设定的科学依据。 5. 指标一致性：重新核对并统一了“七、项目绩效指标”与招标文件的产出要求。	2. 材料研究：明确利用动态剪切流变仪（DSR）对常用密封胶进行性能标定，而非新材料合成，侧重于材料与工艺的适配性。 3. 明确设备研发：无设备研发。 4. 指标实现依据：补充基于现有 VIT-S2T 网络测试数据和机械臂 LQR 控制仿真结果作为指标设定的科学依据。 5. 指标一致性：重新核对并统一了“七、项目绩效指标”与招标文件的产出要求。
4	王松根	1. 本项目研究技术含量较高，也较超前。目前国内外相关技术还处于研究阶段，据工程应用还有一定距离。可做为技术储备项目开展相关研究。2. 进一步明确研究对象。裂缝及修复技术种类很多，有横向和纵向裂缝、有自上而下和自上而下裂缝，有单条和多条不规则裂缝，从程度上分还有细裂缝和宽裂缝，从成因上可分温缩型裂缝和剪应力裂缝等；修补材料上有热有冷、工艺上有灌有贴。需明确该项目研究是针对那一种裂缝、材料和工艺。3. 由于是技术储备型项目，其考核指标应留有余地，否则实现不了，很难验收。如：裂缝像素级实时追踪识别精度不低于 90%；裂缝信息自动提取与修复作业效率较传统人工方式提升 50%以上；机械臂裂缝修复过程中，修复路径横向平均偏差控制在 2mm 以内，纵向连续性达到 100%等指标需谨慎考虑。	1. 项目定位：接受专家建议，明确本项目处于“原理样机验证”阶段，主要任务是攻克核心算法与工艺跑通，作为未来智能化养护的技术储备。 2. 明确研究对象：明确研究对象为沥青路面裂缝，材料采用热熔型灌缝密封胶，工艺采用压力灌注及弹性刮平整形一体化工艺。 3. 调整并优化考核指标：对指标进行科学修正，将“实时追踪识别准确率”设定为$\geq 90\%$；将“工效提升”设定为 10%以上。	2. 材料研究：明确利用动态剪切流变仪（DSR）对常用密封胶进行性能标定，而非新材料合成，侧重于材料与工艺的适配性。 3. 明确设备研发：无设备研发。 4. 指标实现依据：补充基于现有 VIT-S2T 网络测试数据和机械臂 LQR 控制仿真结果作为指标设定的科学依据。 5. 指标一致性：重新核对并统一了“七、项目绩效指标”与招标文件的产出要求。
5	吴传海	1. 人工智能的应用不一定非要替代人，但可以帮助人类解决以往难以的问题，建议进一步挖掘人工智能在裂缝类型识别、处治方案决策方面的优势。2. 道路裂缝养护基本是边通车边作业，基于视频流的裂缝实时跟踪技术研究需要考虑养护自动化作业安全问题。3. 灌缝材料精准供料和智能化修复技术的关键灌缝材料及其工艺，建议针对不同类型的灌缝材料分别开展研究。	1. 强化 AI 决策优势：本项目通过将人工智能技术深度融入“精准感知”与“路径解算”过程，实现从数据量化到作业逻辑的辅助决策；感知层面利用 Transformer 架构实现裂缝宽、深及截面积的毫秒级高精度量化，解决人工肉眼判定误差大的难题，为精准灌缝提供数据支撑；执行层面则将决策能力具象化为路径规划算法，针对复杂网裂自	1. 强化 AI 决策优势：本项目通过将人工智能技术深度融入“精准感知”与“路径解算”过程，实现从数据量化到作业逻辑的辅助决策；感知层面利用 Transformer 架构实现裂缝宽、深及截面积的毫秒级高精度量化，解决人工肉眼判定误差大的难题，为精准灌缝提供数据支撑；执行层面则将决策能力具象化为路径规划算法，针对复杂网裂自

		动生成最优修复时序与行走轨迹。这种模式成功将感性的人工经验判断转化为理性的算法最优决策,在不增加功能模块的前提下,显著提升了施工精准度并有效降低了操作人员认知负荷。 2. 安全保障措施:在作业安全性保障方面,本项目充分考虑边通车边作业的复杂工况,通过物理约束与软件逻辑的双重机制确保系统安全。系统通过程序设定严苛的机械臂作业包络区间,将末端执行器的运动轨迹严格限制在维护车辆的投影宽度范围内,从根源上杜绝了机械臂对相邻车道社会车辆的物理干扰。同时,实时跟踪系统内置了‘逻辑自锁’功能,当感知系统因光照剧变或遮挡导致裂缝信号丢失、或跟踪偏差超过预设的安全阈值时,ROS 系统将立即执行毫秒级复位指令,引导机械臂迅速缩回至安全初始位并锁死。这种基于物理界限与状态自检的安全保障策略,能够在不增加额外外部感知硬件的前提下,配合标准养护作业防护体系,确保自动化修复过程的本质安全与可靠性。 3. 扩展材料适应性:明确研究将涵盖常用不同品牌、型号的密封胶,建立多参数材料库,以提升供料控制算法(迟滞补偿)对不同物理特性材料的泛化能力。
--	--	---

大纲评审委员会专家(签字): 张海波

项目负责人(签字): 王广