

项目合同编号：25-57K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究

承担单位：西安工业大学

项目负责人：邸若海

通讯邮编、地址：陕西省西安市未央区学府中路 2 号，710021

传真、电话：029-86173341

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

本项目基于自建连续道路数据集和公开数据集展开，研究连续道路图像拼接方法、道路图像自动化损伤目标检测理论、损伤区域像素级形态特征提取机制、连续道路图像损伤综合评价方法。综合应用上述研究成果，形成一套连续道路损伤检测与智能评估流程。

2. 技术关键

(1) 连续道路图像序列化拼接算法研究

研究连续道路图像的序列化拼接算法，通过像素特征点提取和匹配，去除冗余信息，提升病害检测效率。结合采集参数建立数据库。

(2) 海量连续道路损伤图像检测算法研究

设计基于上下文增强和特征细化的特征金字塔复合神经网络，自动检测横向裂缝、纵向裂缝、块状裂缝、龟裂和坑槽等病害，生成边界框标定病害位置和尺寸大小。

(3) 海量连续道路图像损伤量化表征算法研究

设计高可信表征模型，利用混合特征增强、多池融合编码和跨层自适应特征融合解码，提取损伤形态特征，实现道路病害边界信息的量化提取。

(4) 连续道路图像损伤综合评价研究

依据道路宽度和病害区域比例，计算病害真实尺寸，调整路面破损率指标。开展连续道路图像损伤综合评价研究。

3. 依托工程（依托工作）

本项目旨在实现连续道路病害检测与评价，解决现有检测方法精度较低问题，提高道路病害检测准确率，项目以 G65 包茂高速陕西境内西安至镇安段运营公路和 G2211 长延高速陕西境内延安至延川段运营公路为依托工程，作为项目的主要的数据采集和研究成果验证场地。

二、考核指标

1.预期目标

(1) 开发一套连续道路损伤检测与智能评估系统，完成连续道路图像的拼接、病害检测、病害边界分割、损伤综合评价研究；

(2) 在多个数据集上获得连续道路病害检测精度不低于 90% 和连续道路病害量化精度不低于 90%。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

(1) 实现连续道路图像的导入、拼接、病害检测等功能，支持人工复查、结果导出等功能；

(2) 建立连续道路病害数据库，数量不少于 1000 张。

3.经济和社会效益

1) 连续图像不低于 5 张；

2) 涵盖横向、纵向、龟裂、块状裂缝等四种病害类型；

3) 连续道路病害检测精度不低于 90%（基于目标检测数据，计算检出率）；

4) 连续道路病害量化精度不低于 90%（基于图像分割数据，计算边界检出率）。

4.成果提供形式

(1) 理论成果：开展连续道路图像采集与拼接、道路图像自动化损伤目标检测、损伤区域像素级形态特征提取、道路损伤尺寸提取研究，形成一套连续道路损伤检测与智能评估系统；

(2) 论著成果：发表学术论文 3 篇，其中 EI/SCI 索引 3 篇；

(3) 技术成果：申请发明专利 2 项，授权软件著作权 1 项；

(4) 人才培养成果：协助培养硕士 2 名；

(5) 技术报告：技术方案报告 1 份；系统设计报告 1 份；系统用户手册 1 份；系统研制总结报告 1 份。

4. 其他考核指标

开展宣传报道 3 次，技术交流 1 次。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2026 年 第一季度	1. 资料收集，制定系统整体方案，完成系统功能模块划分，完成系统搭建； 2. 收集连续道路图像，建立病害数据库。
2026 年 第二季度	1. 开展连续道路拼接算法研究； 2. 参加 1 次国内外学术交流； 3. 开展宣传报道 1 次。
2026 年 第三季度	1. 研究基于深度学习的道路病害检测； 2. 对 YOLO 目标检测算法进行优化与改进，为后续轻量化提供支撑； 3. 撰写相关学术论文 1 篇，参加 1 次国内外学术交流； 4. 申请发明专利 1 项。
2026 年 第四季度	1. 研究连续道路病害边界分割算法； 2. 撰写相关学术论文 1 篇，参加 1 次国内外学术交流； 3. 开展宣传报道 1 次，技术交流 1 次。
2027 年 第一季度	1. 研究道路损伤尺寸提取、综合评价算法研究； 2. 申请发明专利 1 项； 3. 撰写相关学术论文 1 篇。

2027 年 第二季度	1. 研制连续道路损伤检测与智能评估系统 1 套； 2. 开展宣传报道 1 次。
2027 年 第三季度	1. 撰写软件著作权一项； 2. 基于依托工程提供的数据，迭代优化系统。
2027 年 第四季度	1. 完成软件系统的第三方测试验证工作； 2. 验证指标的达成情况。
2028 年 第一季度	1. 软件系统改进，资料整理，文档归档，培养研究生； 2. 编写项目总结报告，总结研究成果，准备项目结题。

四、项目经费

项目总经费：39 万元
交通运输厅补助：19.5 万元
自筹资金：19.5 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	35.88	17.94
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	20.6	10.3
(4) 材料支出	10	5
(5) 测试化验实验加工支出	0	0
(6) 燃料及动力支出	0	0
(7) 差旅支出	2	1
(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	8.6	4.3
(11) 其他支出	0	0
3. 劳务费	15.28	7.64
(12) 劳务性支出	12.72	6.36
(13) 咨询专家支出	2.56	1.28
(二) 间接费用	3.12	1.56
4. 管理费	3.12	1.56
5. 绩效支出	0	0
合 计	39	19.5

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）	0
		（1）授权发明专利	0
		（2）实用新型	0
		（3）外观设计	0
		2.软件著作权授权数（项）	1
		3.发表论文（篇）	3
		（1）其中 SCI 索引收录数	1
		（2）其中 EI 索引收录数	2
		（3）其他	0
		4.著作（部）	0
		5.制订标准数（项）	0
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	0
	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	1
		（1）新工艺（或新方法模式）	1
		（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	
		(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	2
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	2
		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	无
其他需要说明的情况			

六、承担单位或研究人员分工

本项目由西安工业大学牵头，邸若海负责人全面负责项目的总体统筹工作，确保项目按计划推进。在核心技术架构方面，吕志刚主导总体设计，而李亮亮则负责算法的总体设计及算法开发工作，以支撑项目的核心功能实现。李晓艳负责项目管理相关工作。在具体系统实现与开发环节，郜辉承担了评估系统的设计工作。

陕西交通控股集团有限公司延延分公司韩特、康志荣、王海渊、申连平，陕西高速公路工程试验检测有限公司路鑫、黄晶晶，陕西交控飞行技术有限公司张国宏、李安琦、张全兵、张艺莹作为项目依托工程单位成员，主要负责道路病害样本采集、样本库的构建、智能检测评估验证等内容及其相关协调工作。

整个团队分工明确，涵盖了从顶层设计到具体软硬件开发的各个环节。

七、项目参加人员表

项目承担单位：西安工业大学						
参与单位（排序）：						
1、陕西交通控股集团有限公司延延分公司						
2、陕西高速公路工程试验检测有限公司						
3、陕西交控飞行技术有限公司						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作
1	邸若海	1986.09	西安工业大学	副教授	系统工程	项目负责人
主要研究人员						
2	李亮亮	1996.10	西安工业大学	讲师	机械电子工程	算法总体设计
3	韩特	1985.11	陕西交通控股集团有限公司延延分公司	高级工程师	交通运输工程	样本库构建

4	康志荣	1983.10	陕西交通控股集团有限公司延分公司	高级工程师	土木工程	样本库构建	康志荣
5	王海洲	1980.07	陕西高速公路工程试验检测有限公司	正高级工程师	交通工程	样本库构建	王海洲
6	吕志刚	1978.08	西安工业大学	教授	控制科学与工程	系统总体设计	吕志刚
7	李晓艳	1982.01	西安工业大学	副教授	信息与通信工程	项目管理	李晓艳
8	郜辉	1992.12	西安工业大学	讲师	控制科学与工程	评估系统设计	郜辉
9	路鑫	1985.06	陕西高速公路工程试验检测有限公司	正高级工程师	道路工程	评估方案设计	路鑫
10	张国宏	1981.11	陕西交控飞行技术有限公司	正高级工程师	综合系统科学	评估方案设计	张国宏
11	申连平	1988.03	陕西交通控股集团有限公司延分公司	高级工程师	岩土工程	智能检测验证	申连平
12	李安琦	1997.07	陕西交控飞行技术有限公司	助理工程师	物联网工程	数据采集	李安琦

13	黄晶晶	1999.10	陕西高速公路工程试验 检测有限公司	助理工程师	材料化学	评估验证	黄晶晶
14	张全兵	1994.11	陕西交控飞行技术有限公司	工程师	土木工程	数据预处理	张全兵
15	张艺莹	2000.10	陕西交控飞行技术有限公司	助理工程师	材料科学与工程	数据采集	张艺莹

八、信息表

项目合同编号		25-57K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部											
项目名称		高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究																	
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		39 万元		厅 拨		19.5 万元													
第一承担单位	单位名称		西安工业大学																
	所在地		陕西省西安市					代码		610100									
	通讯地址		陕西省西安市学府中路 2 号					邮编		710021									
	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		陕西交通控股集团有限公司延延分公司																
	2		陕西高速公路工程试验检测有限公司																
	3		陕西交控飞行技术有限公司																
项目负责人		姓 名		邸若海		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1986									
		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		13720450874 029-86173341		电子邮箱		xfwtdrh@163.com											
项目联系人		姓名		吕志刚 029-86173325		性别		男											
		联系电话		18309226264		电子邮箱		2977867201@qq.com											
项目组人数		15		高级		9		中级		3		初级		3		其他		0	
主要研究内容 (100 字以内)		本项目整体以无人机采集图像为基础，依次完成拼接、病害检测、量化提取、尺寸计算等环节，形成完整的道路病害检测与智能评估流程，提升检测效率，弥补传统检测不足。																	
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 7 份，甲方单位伍份，承担单位 2 份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：陕西省交通运输厅

负责人：（签字） 2020 年 3 月 27 日

联系人：（签字） （公 章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）

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：

开户银行：西安工业大学

61001781300052502618

建行大明宫支行

账 号：

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：印老母

年 月 日



项目编号: 25-57K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 高速公路表面损伤智能检测与评估技
术研究

申请单位: 西安工业大学 (盖章)

联系人: 吕志刚

电 话: 18309226264

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

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

公路交通建设不仅是我国经济发展的重要保障,同时也对国家战略安全方面有很大的影响。随着施工技术的发展、道路养护手段的提升,我国公路建设取得了举世瞩目的成就。高速公路作为公路交通中重要一员,承担着国家逐步走向现代化的重责,在整个交通发展中起着举足轻重的作用。我国加大了对现代交通业的发展,尤其是对高速公路的建设。

公路交通建设不仅是我国经济发展的重要保障,同时也对国家战略安全方面有很大的影响。随着施工技术的发展、道路养护手段的提升,我国公路建设取得了举世瞩目的成就。高速公路作为公路交通中重要一员,承担着国家逐步走向现代化的重责,在整个交通发展中起着举足轻重的作用。我国加大了对现代交通业的发展,尤其是对高速公路的建设。

中国公路养护行业市场规模在 2025 年至 2030 年间预计将呈现显著增长态势,这一趋势主要得益于国家基础设施建设的持续推进、交通流量逐年增加以及养护技术的不断创新。根据权威机构的数据分析,2025 年中国公路养护市场规模约为 1.2 亿元人民币,预计到 2030 年将增长至 2.1 万亿元人民币,复合年均增长率(CAGR)达到 8.58。这一增长主要由以下几个方面驱动:一是公路总里程的不断增加,二是

现有公路的加速老化与升级改造需求,三是智能化、绿色化养护技术的广泛应用。



图 1 人工进行公路养护

为了减轻养护压力、实现全面养护,应该着力突破建设和养护关键技术与设备,从而提高建设质量,缩短养护时间,降低维修成本。在高速公路网络大规模建设的同时,高速公路的保养维护是重中之重的一环。这不仅是对高速公路质量的保证,更是对全国人民生命安全的保障。

尽管我国高速公路建设发展迅速、建设质量大幅提高,但因工期短、车辆超载严重等原因,很容易出现质量问题。即使是在正常通车情况下,高速公路的使用寿命也在 17 年左右,随后就会出现路面裂缝、破损,路基沉陷,坑槽等病害。病害中裂缝病害最为普遍,同样最容易衍生成破碎、沉陷、坑槽等其他病害,不但花费巨额维修成本,严重影响路面使用性能和行车安全,造成经济和社会效益双重损失。

目前路面病害检测通常以人工检测和道路检测车为主,人工检测

具有效率低、检测结果容易受检测者主观因素影响等缺陷。道路检测车虽然可以提高路面病害检测效率，但存在能耗高、自动化程度低、容易影响路面交通等问题。半自动化检测是指通过图像采集技术将采集到的路面图像存储在硬盘设备上，由操作员手动跟踪路面破损，进行破损的标记、分析、评价和判断，检测人员的工作强度大，人工测量的路面损坏信息存在较大的误差，不能及时发现众多路面的病害和破损情况。

与传统人工检测相比，使用智能检测模式，**在检测效率上展现出了不可替代的突出优势**，此外，**该技术现阶段可做为道路巡查使用，无人机可以通过无线传输实时路况，及时发现和路面障碍，以达到道路巡查的目的**。彻底打破了传统检测模式的效率瓶颈，实现了道路病害检测的高效化、智能化。无人机凭借其机动灵活、覆盖范围广的特点，可快速升空并沿道路航线自主飞行，无需检测人员上路作业，大幅减少了人力投入，一架无人机即可完成多名检测人员的工作量，且飞行速度快、续航能力强，能够在短时间内覆盖大面积道路，无论是城市主干道、高速公路，还是乡村公路、高危路段，都能高效完成全覆盖检测，无需受地形、天气等外部因素的过多限制，即便面对高陡边坡、临水临崖等人工难以抵达的区域，无人机也能通过低空悬停、多角度拍摄等方式，快速完成病害图像采集，彻底解决了传统人工检测的盲区与效率短板。更为关键的是，深度学习技术的融入，让无人机采集到的路面图像能够实现自动识别、分析与分类，无需人工逐张查看图像，深度学习算法可快速识别出图像中的各类道路病害，精准

标注病害的位置、大小、类型，并自动生成检测报告与病害分布图，将原本需要人工花费数天甚至数周的数据分析与整理工作，缩短至数小时甚至数十分钟内完成，极大地节省了检测流程的耗时。例如，一段 100 公里的高速公路，传统人工检测需要 5-7 天才能完成全面排查与数据整理，而无人机加深度学习的智能检测模式，仅需 1-2 天即可完成从图像采集、病害识别到报告生成的全流程工作，检测效率较人工检测提升 5 倍以上，不仅大幅降低了检测成本，更实现了道路病害的快速发现、快速分析、快速反馈，为道路养护决策提供了及时、精准的数据支撑，有效提升了道路养护的整体效率与质量，真正实现了道路病害检测的高效化、智能化升级。

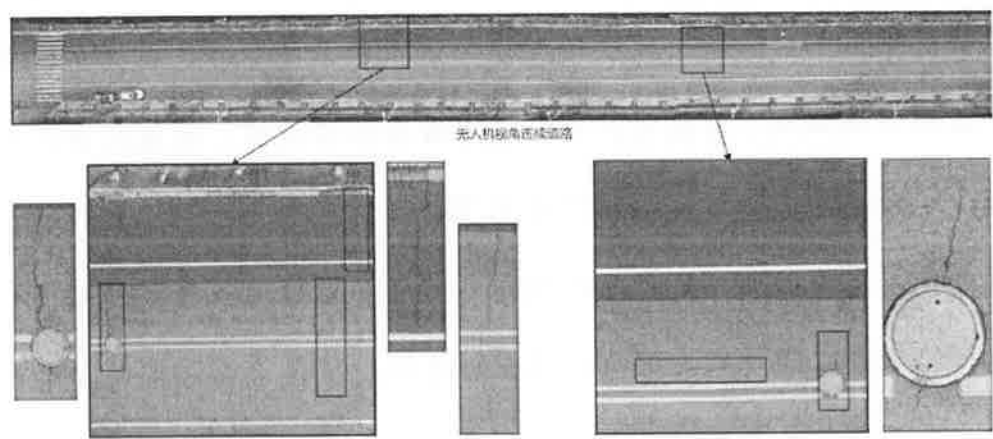


图 2 本项目提出的连续道路病害检测图像示意

近年来，无人机（UAV）的研究与应用取得了显著进展，广泛应用于军用的预警和侦察，以及民用的气象监测、灾害探测和搜索营救等领域。微型无人机凭借小巧结构和灵活操作，能够适应复杂环境。结合机器视觉技术，无人机在道路工程领域的应用愈加多元化。无人机凭借其优秀的视觉系统和飞行能力，可以在无干扰条件下观测地面状况，设计飞行高度和焦距以采集全面的道路信息，同时可搭载多种

传感器获取综合数据。其数据采集时效性强，现场即可进行初步检视，重点部位可重复观测，展现出广阔的发展前景。

在专项检测工作中，对**检测养护人员不容易检测到的部位，如桥梁、隧道、高路基边坡的检测具有优势**。面对场景复杂、作业风险高，对检测装备的灵活性、安全性要求极高，而无人机恰好能够满足这些需求。**其核心应用场景主要包括对高危区域重点核查，对于高陡边坡、临水临崖路段、大型桥梁、长隧道等人工难以抵达、作业风险极高的区域**，无人机可通过低空悬停、多角度拍摄等方式，对重点病害进行精准核查，及时发现边坡滑坡、桥梁结构破损、隧道衬砌开裂等隐患；尤其在人工难以抵达、作业风险极高的复杂区域和特殊工况下，无人机展现出传统检测方式无法比拟的优势，其不可替代的实用价值与保障作用，进一步推动了公路专项检测工作的高效、安全开展。

通过本项目研发成果，能直接减少经济损失，更好地推进我国道路巡检维护设备现代化、智能化水平，完善立体化、信息化道路巡检体系建设，推动区域经济发展。

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）

交通运输部统计公报指出^[1]，2020 年末全国公路总里程 519.81 万公里，高速公路里程 16.10 万公里。国家发改委最新规划纲要指出^[2]，到 2030 年我国普通国道剩余未建里程 0.75 万公里，国家高速公

路剩余未建里程 0.94 万公里。高等级公路新建任务已基本完成，对现有道路的管理与养护需求日益凸显。为提升公路养护管理的标准化和规范化，我国在《公路技术状况评定标准》(JTG 5210-2018)^[3]中明确规定路面技术状况指数 PQI (Pavement Maintenance Quality Index)。其中，根据道路等级和道路类型，路面损坏状况指数 PCI (Pavement Maintenance Quality Index) 对 PQI 的权重为 0.35 或 0.5 或 0.6，在所有七项指标中占比最高，充分体现了路表病害检测的关键性。

1)道路病害检测发展历程

路表病害检测经历 3 个阶段：人工检测阶段、半自动化检测阶段、无损自动检测阶段^[4]。

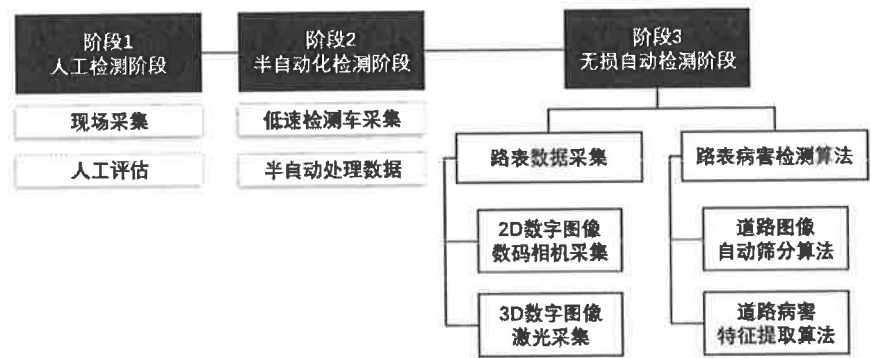


图3 道路病害检测发展历程

阶段 1 为人工检测法。公路检测人员在日间对病害路面进行现场测量、统计记录，并业内评估路面损坏程度。该方法的主要缺陷是易导致交通拥堵、工作量大，已不符合我国当前大规模、大范围路表病害检测的需求。

阶段 2 的半自动化检测阶段源于 20 世纪末，是自动化检测的铺垫时期。典型技术有法国 GERPHO 道路检测系统^[5]，通过搭载 35mm 胶片的 GPS 定位车采集道路表面图像数据，工作人员用室内设备判

定道路病害，并依此建立数据库。该方法具有划时代意义，改变了现场人工检测的传统手段，极大减轻了道路检测对交通的影响。20 世纪 80 年代日本开发 Komatsu 道路检测系统^[6]，摄像车辆两侧灯光照射路面，采用高密度录像带存储道路病害信息，可实现道路损坏、车辙、行驶图像数据的有效采集。但其无法自动识别病害类型，后期处理主要由人工完成。20 世纪 90 年代 CCD 数字成像技术发展后，搭载图像处理系统的瑞典 PAVUE 检测车^[7]实现一定时速下采集图像的能力，并可实现半自动化图像处理功能，但此系统将破损图像以模拟格式存储在 S-VHS 磁带中，造成数据存储困难和调用局限。这一阶段的道路检测装置实现了代替人工野外作业的功能，主要局限是检测车一般在夜间使用，行驶车速低，且后期人工处理图像耗时较长，道路检测效率十分有限。

阶段 3 采用多传感器道路检测车对路表面病害进行无损检测。该阶段主要采集两类数据：由 CCD 或 CMOS 数码相机采集的 2D 数字图像、由激光采集的 3D 数字图像。典型的数据采集装置有加拿大 FUGRO 公司的 ARAN 系列道路检测车、阿肯色大学 DHDV 检测车^[8]、美国 Waylink 道路检测车、加拿大 LRIS 系统、长安大学 CT-501A 高速道路激光车^[4]、武大 ZOYONRTM 智能道路检测车、南京理工大学 N-1 型道路状况智能检测车^{[9][10]}、中公高科多功能快速检测车 CiCS II 等。该阶段的采集装置应用数码相机和红外激光实现道路地理信息、道路病害信息等数据的采集，数据采集效率跨越式提升。

尽管现有的路面无损检测方法已经较传统检测方法有了很大进

步,但在实际使用过程中,对于高等级宽幅公路、复杂路段、山区公路和重交通路段,道路检测车的检测方式仍然存在不便。道路检测车的采集范围一般为单幅道路宽度——约 3.75m,对于双向四车道以上的高等级宽幅公路,需道路检测车反复通行才能获取整幅道路的路况信息,并会对交通造成一定影响,效率较低。

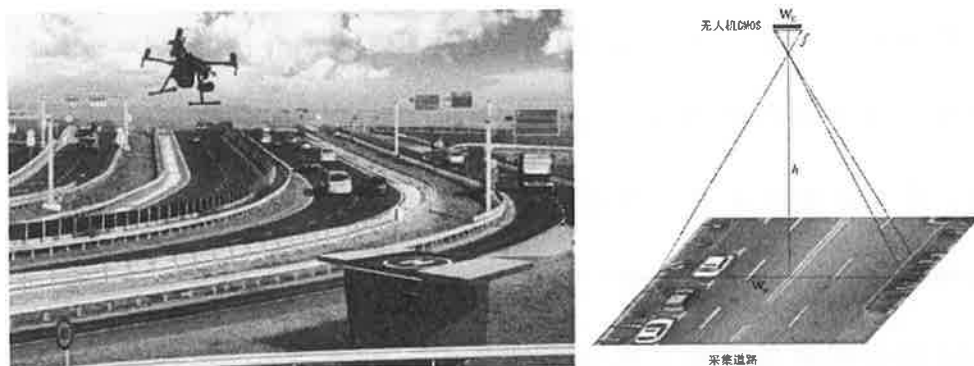


图 4 无人采集道路损伤示意图

随着科技的发展、不同领域技术的深入研究,各种道路检测机器人、道路检测无人机^{[11][12]}逐渐的出现在人们的视野中,无人机技术发展迅速,因其部署和维护成本低、机动性高以及可以随时悬停的优势,在各行各业应用广泛。例如,为公共安全和灾害管理服务提供无线网络支持、在地面通信中的无人机通信技术、用于物联网的无人机数据搜集、无人机构建虚拟现实场景、基于无人机的无线回程技术以及构建智慧城市的无人机应用等等,因此无人机应用于路面检测也是未来的发展趋势。无人机自身具有体积小、造价低、灵活高效、环境适应能力强等特点,能够完成恶劣环境下高分辨率图像的采集任务,同时与传统的检测车等路面采集方式相比,无人机拍摄可以覆盖更宽的路径,采集的路面图像更加全面,这为未来的路面破损检测提供了新途

径,节省了大量的人力、物力和财力。

2)道路图像损伤目标检测研究现状

■ 基于机器学习的道路图像损伤检测

从海量道路图像中快速自动筛分出含病害图像显得尤为重要。近年来,机器学习算法的兴起使无人工干预或较少人工干预的大规模图像筛分成为可能。机器学习(Machine learning)是从已有数据中自动分析获得规律,并利用规律对未知数据进行预测的算法^[13]。机器学习可以分为监督学习、无监督学习、半监督学习和增强学习。监督学习(Supervised Learning)通过训练标签数据集得到一个广义函数,当处理新的未知数据时,可根据该广义函数预测结果。标签数据集需人工标注。针对路表病害检测这一问题,即通过标明病害类型的图像进行训练,并用未训练过的新图像检测分类回归效果。常用算法包括逻辑回归,朴素贝叶斯、支持向量机、人工神经网络和随机森林。

①**支持向量机**(Support vector machine)。支持向量机是一种二元分类模型,通过计算特征空间上的最大间隔得到超平面(hyper plane)以实现分类,对于非线性分类问题,可使用 Kernel 核函数将其映射至高维空间,从而解决原始空间中线性不可分问题。支持向量机被广泛应用于简单的道路图像分类问题。Georgios 等^[14]应用支持向量机对道路补丁图像进行分类,识别准确率为 81.97%,召回率 91.21%。其自动分类的道路补丁图像面积较大,基本以上的大型道路补丁,肉眼易辨识。但该方法可快速对大量图像分类,极大减少了人工筛选的工作量。Sari 等^[15]应用支持向量机对含有裂缝的道路图像进行分类,

并使用灰度共生矩阵(GLCM)及 OTSU 算法进行裂缝图像特征提取。通过数据对比可以得出,应用 Anova 核函数的 SVM 模型针对道路图像分类有最高的准确率。Hoang 等^[16]应用人工蜂群算法优化的支持向量机对道路裂缝进行分类,分类准确率高达 96%。Lin 等^[17]应用非线性支持向量机对坑洞图像和非坑洞图像进行分类,取得了较高识别率。

②**人工神经网络** (Artificial Neural Network)。人工神经网络是一种模仿生物神经元的计算模型,由输入层、隐藏层、输出层组成。自 1986 年 Hinton 等提出基于反向传播算法的三层神经网络后,一些学者应用 3 层 BP 神经网络对道路病害图像进行分类。Xu 等^[18]较早应用人工神经网络对道路裂缝图像进行自动分类,将均衡化和二元处理后的裂缝图像分为尺度更小的子块,使用子块样本训练神经网络。周林^[19]应用 3 级 BP 网络对 200 个裂缝图像样本进行训练,并使用 100 个未分类图像进行分类测试,成功将图像分成横向裂缝、纵向裂缝、网状裂缝、无裂缝 4 个类别。胡璠^[20]设计 6 输入节点、5 输出节点的三层 BP 神经网络用于道路裂缝分类。输入节点包括:横向裂缝种子个数、纵向裂缝种子个数、2 个对角方向裂缝种子个数、裂缝长度参数、平均连接分量长度。输出节点为横向裂缝、纵向裂缝、龟裂、块状裂缝、完好路面。

③**随机森林** (Random forest)。Shi 等^[21]基于随机森林理论建立了开源道路裂缝分类与分割算法 CrackForest。该算法重新自定义裂缝组成单元(tokens),可以更好表示不均匀裂缝;经过优化的随机森林算

法作为裂缝检测器，可以识别复杂状态下的裂缝。Hoang 等^[22]对支持向量机、随机森林、人工神经网络对裂缝图像进行分类的效果进行对比，分类准确率分别为 87.50%、70%、84.25%。可以看出，上述三类监督学习算法的最大特点是，利用特征提取算法对道路图像进行特征提取，随后应用机器学习算法实现图像自动筛分。但仍存在自动化不足的缺陷。以胡璠^[20]算法为例，其神经网络输入节点的裂缝种子个数、裂缝长度等参数，需用算法提取后以数据列表形式导入神经网络的输入节点，该过程仍需要一定的人工干预和操作。

■ 基于深度神经网络的道路损伤图像检测

深度学习（DL，Deep learning）是机器学习技术的发展，通过训练含有更多隐含层的深度神经网络（DNN，Deep neural network）来实现更复杂的特征学习和特征表达能力^[23]，深度学习的出现革命性地提升了处理图像等大型数据集的能力，广泛应用于图像分类和目标探测。图像处理数目可上升到千万级，是近 5 年来图像处理的新兴研究方向^[24]。卷积神经网络（CNN，Convolutional neural network）是一种典型的 DNN，尤其适用于图像处理任务。

与早期人工神经网络相比，在识别复杂图像上适应性更强。原因如下：

①传统人工神经网络的全连接结构，相邻层的所有神经元都直接连接，对像素较高的图片，会造成参数数量的快速膨胀，容易导致过拟合和陷入局部最优的问题。

②卷积神经网络应用局部感受野（local receptive fields）和共享

权重（shared weights）实现参数数量的大幅削减，同时在原理上更符合人类视觉识别的局部特征识别模式。此外，池化层的参数降维作用也可有效提升网络训练效率。

表中对比了机器学习下早期人工神经网络算法与本章所述的深度卷积神经网络的主要区别。总结来说，深度卷积神经网络就是实现了特征提取与神经网络分类的集成网络，真正实现了无人工干预的图像分类和目标检测（object detection）。

表 1 网络对比

	早期人工神经网络	深度卷积神经网络
输入数据	经特征提取算法处理后的道路特征数据。例：横向、纵向裂缝种子个数、裂缝长度参数等 ^[33] 。	原始道路图像
输入数据处理方式	提取图像特征后，人工选择并输入网络训练，选择参数不同将影响最终结果。	无需处理。由卷积和池化层自动完成特征提取与选择，该过程完全脱离人工干预。
网络复杂程度	简易。网络层数一般为 3 层至 5 层。	复杂。网络层数一般为 8 层至 100 余层。
网络分类泛化能力	一般。当图像类别复杂、图像数据较差时，分类效果一般。	较强。训练数据量可达千万级，对拍摄条件较差的图像也能有效识别。
目标检测	无法实现	可实现

较早应用深度卷积神经网络进行道路病害检测的文章发表于 2016 年，Zhang^[26]等采集 500 张智能手机拍摄的 3264×2448 像素的道路图像，将之分割成 100 万张 99×99×3 像素（RGB 彩色图像）的道路图片块，采用含有 4 层卷积层的神经网络对 64 万张图片进行训练，16 万张做训练验证样本（validation），20 万张做测试样本。首次实现应用深度学习对病害图像分类，可将图片块快速分为含裂缝与无病害两种类型，识别准确率 86.96%，召回率 92.51%。分类效果显著优于试验对照组 93 维 SVM 与 Boosting 法。此外，作者还将分类完成后的图片块合成一张完整图像以表征裂缝的形状，提取效果较好。Nhat

等^[27]将 CNN 与传统边缘检测算子裂缝提取法进行对比, 识别准确率分别为 79.99%、92.08%, 基于深度学习的方法表现出显著优势。沙爱民等^[28]利用自设计拍摄设备采集图像数据, 将 200 张原始图像分割成 12800 张尺寸为 512×512 像素的图像, 训练 3 个 CNN, 分别为病害识别模型、裂缝特征提取模型、坑槽特征提取模型, 结果表明其 CNN 的裂缝病害等级判断准确率 98.99%、坑槽病害等级判定准确率为 95.32%。研究表明, 在一定程度上, 神经网络深度越深, 对图片的分类能力和泛化能力越强^[29], 如深度网络 VGG Net 为 19 层, GoogleNet 为 22 层, ResNet 为 152 层。针对上述 Zhang 的论文, Pauly^[30]等认为其使用的神经网络深度不足, 因此应用优化后的 11 层神经网络进行试验。采用与 Zhang 相同的道路图片集, 设计两组试验, 试验 1 探究网络深度对分类准确率的影响; 试验 2 探究训练集与测试集图像差异对检测结果的影响。结果表明, 加大网络深度可以提高分类准确率和召回率。但无限制增加隐藏层深度, 则更易偏离全局最优, 陷入局部最优解, 性能甚至不如浅层网络, 因此网络层数的调试需通过试验对比得出。Wang 等^[31]将道路图像分割成 32×32 或 64×64 的网格, 然后用 CNN 来对网格图像进行分类, 判断其是否含有裂缝。判断结束后将含裂缝图块拼接。结果表明 64×64 网格可以获得更好的分类结果, 其中纵向裂缝分类成功率可达 97.6%。但是该方法对网格边缘的裂缝不能有效识别, 此外对网状裂缝的识别效果比较有限。Crack-pot 法^[32]融合了传统图像处理技术和深度学习方法, 可以有效检测坑洞、裂缝的边界框。分类模型采用 SqueezeNet。Chen 等^[33]对

道路视频进行研究,应用 CNN 对 120×120 的视频帧间图片进行分类,并应用朴素贝叶斯整合各帧数据结论。结果表明,帧间动态模糊是影响识别准确率的主要因素。Zhu 等^[34]采用较新的 Yolov4、Yolov3 与 Faster R-CNN 算法进行对比,均可实现对道路裂缝、坑槽、修补的目标检测,其中,Yolov3 算法效果最佳。Maeda 等^[35]对比了基于 MobileNet 和基于 Inception v2 的两种 SSD 算法,发现前者是后者识别速度的两倍。Yang 等^[36]在 SSD 中引入 RFB (Receptive Field Block) 进行道路裂缝识别,RFB 通过模拟人类视觉的感受野加强网络的特征提取能力。结构上体现为在 Inception 的基础上加入了空洞卷积层(dilated convolution),从而有效增大了感受野(receptive field)。

综上所述,本项目基于新兴起的无人机平台和先进的图像处理技术,结合新一代信息技术与制造技术的基础上,提出基于道路巡检无人机的路面裂缝病害检测方法。采用无人机沿道路中央自主巡航采集路面状态信息,依次通过高速公路路面识别、神经网络裂缝判断、裂缝病害识别等步骤对航拍影像中裂缝病害进行识别和检测。实现了无人机巡航裂缝病害的定位、识别、检测等功能,为后期高速公路路面监护、养护提供大量的数据,为路面病害的维护建立健全理论依据。

2.项目前期科研及现有工作条件

1) 准备工作情况

本项目组成员对嵌入式软硬件技术、图像处理、智能控制系统等相关方面的科学研究工作,不仅在理论上对各种图像的处理具有深入研究,还对嵌入式系统有较强的设计能力,并与相关企业有长期合作

基础。主要成员发表了与本项目相关论文 50 余篇（其中 SCI 和 EI 检索 6 篇）。这些先期研究对于实现基于国产昇腾 AI 边缘平台的无人机连续道路损伤检测与智能评估系统的研制奠定了坚实的技术基础，积累的丰富的科研经验。

在准备阶段，主要聚焦于实验工具和数据的准备，使用 Pycharm 和主流机器学习平台进行模型压缩理论的研究和代码实现，并通过实验数据集进行模型性能的测试和优化。通过深入分析不同模型压缩方法的原理和实践，理解参数设置对模型性能的影响，并最终实现性能对比和优化。

■ 准备的实验条件

本项目主要包括硬件组装和软件产品开发两个部分，经过前期项目的积累，本项目所需的设备齐全，已具备的实验条件与仪器设备情况如下：

- ①高清摄像头 2 个；
- ②云台设备 2 套；
- ③高性能计算服务器 1 台；
- ④昇腾 Atlas 200 异构平台 1 套；
- ⑤无人机一架。

2) 实现课题目标的主要措施

为了实现课题目标，项目组采取了一系列措施，包括模型压缩与加速、卷积算子优化、网络设计改进等问题。这些措施旨在提升模型的推理效率和降低能耗，同时保持或提高模型的性能。

■ 道路病害检测网络的精度提高问题

在利用深度学习网络进行道路病害巡检识别时，由于无人机航的拍摄角度和拍摄高度等特殊性的带来的图像旋转、角度、大小各异等问题，所以增加了网络模型在识别时的难度。因此，针对航拍图像特定的技术难点，应考虑引入对应的功能模块以克服上述问题带来的检测精度损失。

■ 设计更为轻量级的目标检测算法

基于整体轻量化的目标，分析现有目标检测网络的冗余，研究轻量级目标检测算法，进行轻量级目标检测网络的建立，主要包括轻量级骨干网络设计和轻量级特征金字塔及检测头设计。

■ 实现基于注意力机制的网络设计

在解决无人机图像背景复杂的问题时，引入注意力机制可以使网络能够以较低的能耗提取关键位置的信息，聚焦并选择对任务有用的信息，从而提高 CNN 的性能，被广泛应用于深度学习中。注意力机制可以使检测器对目标进行“有区别”地检测，提升网络模型运行的效率。

■ 实现基于上下文增强和特征细化的特征金字塔复合神经网络结构

无人机的空中拍摄范围很大，导致航拍图像中目标占比较小，并且由于无人机飞行高度不同时图像中的目标尺寸也呈现出较大的差异。利用深度卷积神经网络提取图像目标特征时，卷积神经网络的高层感受野较大，语义信息表征能力强，但是特征的几何信息表征能力

弱，不利于小目标的检测；低层网络的感受野比较小，几何细节信息表征能力强，但是语义信息表征能力弱。因此结合深层网络中的高级语义信息和浅层网络中的几何信息可以提高网络的检测性能。

■ 采用反向残差结构的轻量级道路损伤检测算法

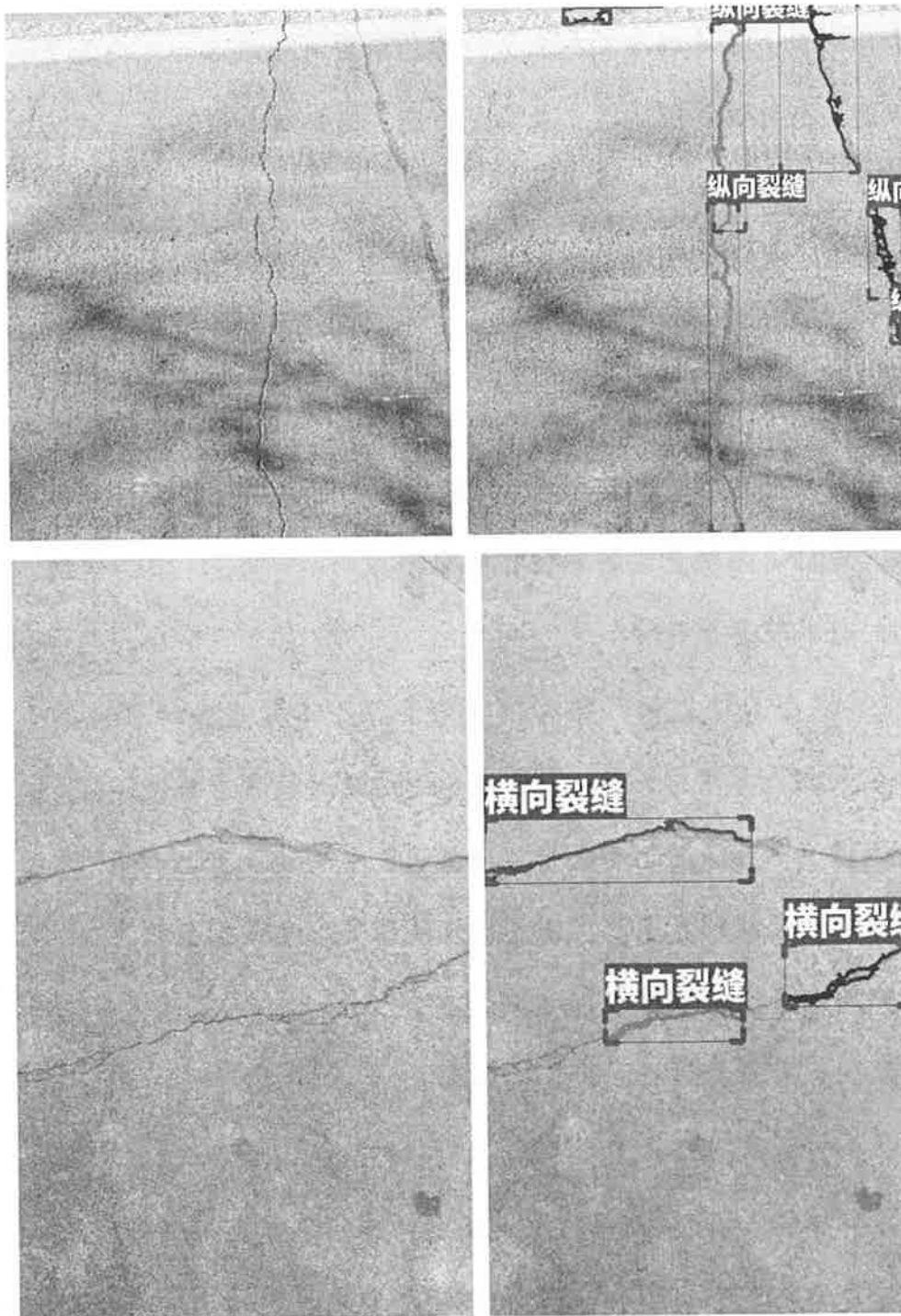
针对道路巡检难度大、效率低下的问题，本项目拟采用基于深度学习的连续道路损伤检测，提取图像中的道路损伤信息。针对神经网络模型过大冗余度过高的问题，研究基于反向残差结构的轻量级卷积网络，设计更为轻量级的卷积神经网络。

3) 技术装备条件

技术装备条件方面，项目组依托于 AI 计算平台的强大算力和 CANN 异构计算架构，以及高性能卷积神经网络加速器设计，为道路损伤图像检测算法的部署和推理提供了坚实的硬件基础。不仅能够满足算法的高性能计算需求，还支持算法的快速迭代和优化。

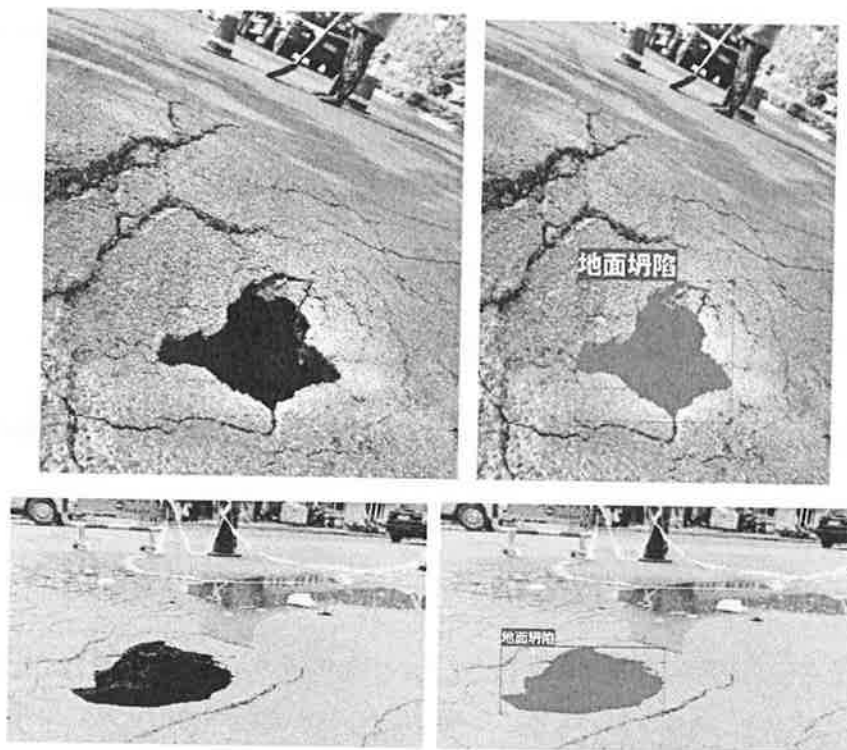
■ 路面裂缝检测技术基础

路面病害包括坑槽，龟裂，不规则裂缝，纵裂，横裂，裂缝扩展，井盖丢失，地面坍塌等，研究基于级联的思想，将多个特征检测的方法通过数据输出-数据输入的方法连接起来，达到提高检出率降低误报率的目的。首先通过训练目标检测模型实现端到端的病害类型的初次识别与定位，之后针对提取出的各种类型破损使用不同的特征提取分类器进行二次识别。



■ 路面坍陷检测技术基础

道路的坍陷表现为道路某一区域存在明显的坑洞型异常。针对这一表现形式，进行区域分割-区域特征分析-形状拟合的方法进行特征提取，确定是否存在路面坍陷。



3.参考文献:

[1]交通运输部. 2020 年交通运输行业发展统计公报[N].中国交通通报, 2021-05-19: 002.

[2]乔望.《国家公路网规划(2013 年-2030 年)》发布[J].交通世界(建养机械), 2013(7): 24-25.

[3]中华人民共和国交通运输部. 公路技术状况评定标准: JTG 5210-2018[A]. 2018.

[4]马建,赵祥模,贺拴海,等.路面检测技术综述[J].交通运输工程学报, 2017, 17(05): 121-137.

[5]ER-YONG C. Development Summary of International Pavement Surface Distress Automatic Survey System[J]. Transport Standardization, 2009, 9: 96-97.

[6]KIM J, LEE H D. Development of New Automated Crack

Measurement Algorithm to Analyze Laser Images of Pavement Surface[J].
Dissertations & Theses, 2009, 112(3): 1231-1236.

[7]SJOGREN L, OFFRELL P. Automatic crack measurement in Sweden[C]//SURF 2000: Fourth International Symposium on Pavement Surface Characteristics on Roads & Airfields.2000.

[8]WANG K C P, HOU Z, GONG W. Automation Techniques for Digital Highway Data Vehicle(DHDV)[C]//International Conference on Managing Pavement Assets. 2008.

[9]滕井玉.路面病害自动检测系统的体系结构改进及检测算法研究[D].南京理工大学, 2004.

[10]王晨.路面病害自动检测系统的改进和相关算法的研究[D].南京理工大学, 2006.

[11]贺志勇,王鹏.无人机视觉的桥梁底面裂缝检测方法[J].筑路机械与施工机械化, 2019,36(06): 131-137.

[12]樊邦奎,张瑞雨.无人机系统与人工智能[J].武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11):1523-1529.

[13]JORDAN M I, MITCHELL T M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects[J].Science, 2015, 349(6245): 255-260.

[14]HADJIDEMETRIOU G M, CHRISTODOULOU S E, VELA P A. Automated detection of pavement patches utilizing support vector machine classification[C]//2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). IEEE, 2016: 1-5.

[15]SARI Y, PRAKOSO P B, BASKARA A R. Road Crack Detection using Support Vector Machine (SVM) and OTSU Algorithm[C]//2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT). IEEE, 2019: 349-354.

[16]HOANG N D, NGUYEN Q L, TIEN BUI D. Image processing-based classification of asphalt pavement cracks using support vector machine optimized by artificial bee colony[J]. Journal of Computing in civil Engineering, 2018, 32(5): 04018037.

[17]LIN J, LIU Y. Potholes detection based on SVM in the pavement distress image[C]//2010 Ninth International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science. IEEE, 2010: 544-547.

[18]XU G, MA J, LIU F, et al. Automatic recognition of pavement surface crack based on BP neural network[C]//2008 International Conference on Computer and Electrical Engineering. IEEE, 2008:19-22.

[19]周林.基于图像处理的路面裂缝检测系统设计与研究[D].太原理工大学, 2013.

[20]胡璠.基于数字图像的高速公路路面病害识别系统的应用研究[D].重庆交通大学, 2013.

[21]SHI Y, CUI L, QI Z, et al. Automatic road crack detection using random structured forests[J].IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(12): 3434-3445.

[22]HOANG N D, NGUYEN Q L. A novel method for asphalt pavement crack classification based on image processing and machine learning[J]. Engineering with Computers, 2019, 35(2): 487-498.

[23]卢宏涛,张秦川.深度卷积神经网络在计算机视觉中的应用研究综述[J].数据采集与处理,2016, 31(01): 1-17.

[24]LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. nature, 2015, 521(7553): 436-444.

[25]CHA Y J, CHOI W, BÜYÜKÖZTÜRK O. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017,32(5): 361-378.

[26]ZHANG L, YANG F, ZHANG Y D, et al. Road crack detection using deep convolutional neural network[C]//2016 IEEE international conference on image processing (ICIP). IEEE, 2016: 3708-3712.

[27]NHAT-DUC H, NGUYEN Q L, TRAN V D. Automatic recognition of asphalt pavement cracks using metaheuristic optimized edge detection algorithms and convolution neural network[J].Automation in Construction, 2018, 94: 203-213.

[28]沙爱民,童峥,高杰.基于卷积神经网络的路表病害识别与测量[J].中国公路学报, 2018,31(01): 1-10.

[29]GOPALAKRISHNAN K. Deep Learning in Data-Driven Pavement Image Analysis and Automated Distress Detection: A

Review[J]. Data, 2018, 3(3): 28.

[30]PAULY L, PEEL H, LUO S, et al. Deeper Networks for Pavement Crack Detection[C]//34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Taipei, Taiwan, 2017.

[31]WANG X, HU Z. Grid-based pavement crack analysis using deep learning[C]//2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). IEEE, 2017: 917-924.

[32]ANAND S, GUPTA S, DARBARI V, et al. Crack-pot: Autonomous road crack and pothole detection[C]//2018 Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA). IEEE, 2018: 1-6.

[33]CHEN F C, JAHANSHAHI M R. NB-CNN: Deep learning-based crack detection using convolutional neural network and Naïve Bayes data fusion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(5): 4392-4400.

[34]钟靖涛.基于无人机图像与深度学习的路面病害识别研究[D]. 东南大学, 2022.

[35]MAEDA H, SEKIMOTO Y, SETO T, et al. Road damage detection using deep neural networks with images captured through a smartphone[J]. arXiv preprint arXiv:1801.09454, 2018.

[36]YANG J, FU Q, NIE M. Road Crack Detection Using Deep Neural Network with Receptive Field Block[J]. MS&E, 2020, 782(4): 042033.

[37]王宁.道路路面缺陷检测算法与养护策略研究[D].山东交通学院,2024.

[38]韩扬,宋婷婷,魏国芳.基于无人机遥感技术的市政道路智能测绘方法研究[J].电脑知识与技术,2024,20(17):98-99+103.

[39]宣以国.基于改进 YOLO 算法的路面裂缝和坑洞损害检测研究[D].重庆理工大学,2024.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题

为得到符合道路病害检测与评价要求的无人机连续道路图像,需要进行连续道路图像拼接算法研究。获取单张图像后,每张道路图像间都有重叠区域。为去除重叠区域冗余信息,提升后期病害目标检测和量化提取处理效率,本项目基于特征点匹配算法合成无人机连续道路图像,主要过程分为:特征点提取、特征粗匹配、消除误匹配、计算转换矩阵、图像拼接。根据序列无人机道路图像特点对特征识别区域进行限定,优化了图像拼接运算效率,提升了序列化无人机图像拼接精度。结合采集参数建立数据库。

2. 主要研究内容及实施方案

项目围绕四大核心内容展开:一是结合特征点匹配算法完成图像拼接,建立连续道路图像数据库;二是提出改进型特征金字塔复合神经网络,实现无人工干预下多种道路病害的自动化识别与定位。三是提出基于熵量化理论的高可信表征模型,通过多环节操作实现病害精准量化;四是计算病害真实尺寸、调整相关评价公式,生成病害库为

路面评价提供数据支撑。

技术路线上，采用 SIFT 算法完成图像拼接并制定判定标准；以 YOLOv5 为基础，通过 GAM-CA 注意力机制和 CTA-BIFPN 特征融合结构提升检测效果；明确 EHAF-Net 模型细节及病害精确评估方法，优化算子实现算法加速。

项目整体以无人机采集图像为基础，依次完成拼接、病害检测、量化提取、尺寸计算等环节，形成完整的道路病害检测与智能评估流程，提升检测效率，弥补传统检测不足。

1) 连续道路图像采集及序列化拼接算法研究

针对道路病害检测的需求，本项目获取序列化道路图像后，为去除冗余信息，提升后期病害检测效率，基于像素特征点提取和匹配算法拼接为无人机连续道路图像，判定无人机连续道路图像拼接重合率参考值。结合无人机道路图像采集参数对照表和拼接，建立无人机连续道路图像数据库。

2) 海量连续道路损伤图像检测算法研究

基于获取道路连续图像数据库，采用人工方式进行道路病害区域的筛选和道路病害位置识别过程繁琐，不符合道路养护管理的需求。本项目提出基于上下文增强和特征细化的特征金字塔复合神经网络结构，针对缺乏上下文信息可能会阻碍性能的进一步提高，特别是对于微小目标很容易被冲突信息淹没。针对微小目标的特征分散和层间语义差异的问题，本项目提出了一种结合上下文增强和特征细化的特征金字塔复合神经网络结构。通过自适应融合不同层间的特征，消除

层间的冲突信息，防止微小目标特征淹没在冲突信息中。在检测过程无人工干预的情况下识别横向裂缝、纵向裂缝、块状裂缝、龟裂、坑槽病害。并自动生成一定概率的边界框标定不同种类裂缝病害在图块中的具体位置和大小，实现对大量损伤图像中病害区域的自动化识别。

3) 海量连续道路图像损伤量化表征算法研究

利用深度学习模型实现批量道路图像的快速病害目标检测后，针对损害区域进行形态特征提取，获得完整、连续的损伤形态图。本项目提出一种基于熵量化理论的道路损伤高可信表征模型。包括混合特征增强和多池融合编码、跨层自适应特征融合解码、融合信息熵的高确定性动态核检测模块。利用 RSU 进行特征提取，进而利用混合膨胀卷积注意力机制对提取的特征增强处理，为了弥补单一池化的不足，本项目在此设计了多池化融合机制进行下采样处理。重新设计了一种联系上下文信息的跨层自适应特征融合解码模块，对编码阶段提取的特征进行融合处理。针对现有量化检测头部模型存在确定性检测输出低的问题，设计一种融合信息熵的高确定性动态核检测模块，首先利用动态核进行分割，其次利用信息熵进行不确定性量化及确定性输出。

4) 连续道路图像损伤综合评价研究

本项目依据勘测道路的宽度信息与病害区域的比例，计算病害真实尺寸（如长度、宽度、面积等指标）；依据现有规范，精确区分横向裂缝、纵向裂缝、块状裂缝、龟裂四种裂缝类型，并对路面破损率

指标 DR 进行公式调整。综合应用本项目模型,生成无人机连续道路图像病害库,直观表征道路损伤状况。无人机连续道路图像病害库可作为路面技术状况指数 PQI 及路面损坏状况指数 PCI 的有效数据支撑。

3. 技术路线

1) 研究技术方案

本项目技术路线如图所示。

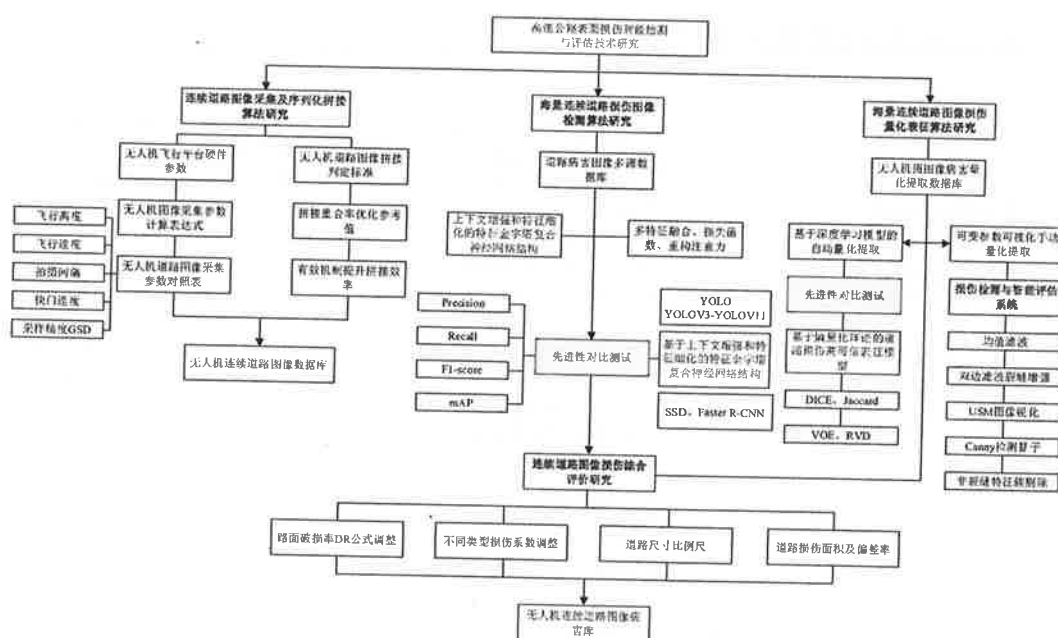


图 5 技术路线图

■ 连续道路图像采集及序列化拼接算法研究

为获取符合道路病害检测与评价要求的无人机连续道路图像,需从两个方面进行研究。一是样本来源说明。即根据相机硬件参数、无人机硬件参数、所摄路面状况确定无人机飞行高度、无人机飞行速度、拍摄焦距、快门速度、拍摄间隔、图像像素指标,形成无人机道路图像采集参数对照表。二是连续道路图像拼接算法研究。获取单张图像

后，每张道路图像间都有重叠区域。为去除重叠区域冗余信息，提升后期病害目标检测和量化提取处理效率，本项目基于特征点匹配算法合成无人机连续道路图像，主要过程分为：特征点提取、特征粗匹配、消除误匹配、计算转换矩阵、图像拼接。根据序列无人机道路图像特点对特征识别区域进行限定，优化了图像拼接运算效率，提升了序列化无人机图像拼接精度。

①样本来源说明

参数间影响关系如图 6 所示。

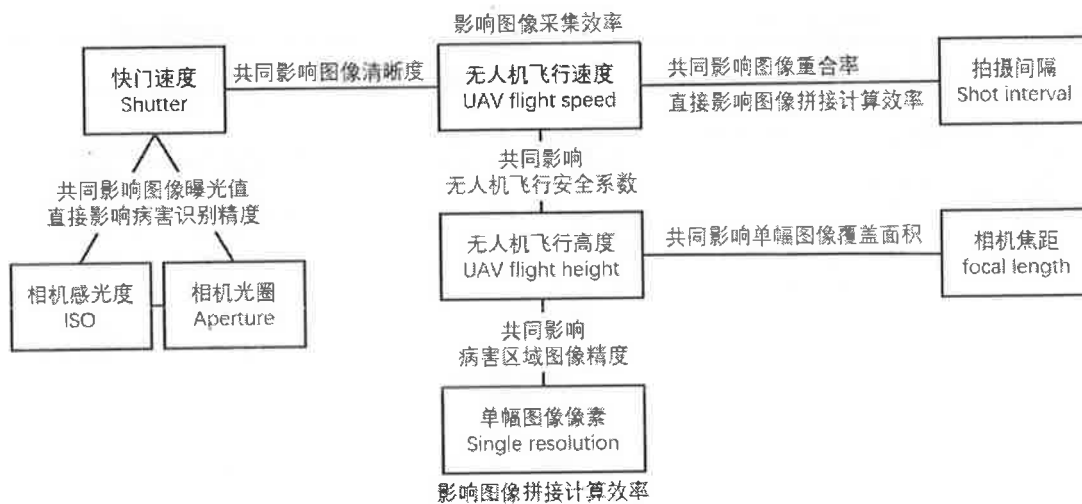


图 6 无人机飞行参数影响关系

无人机采集道路图像过程中，需要快门速度、飞行速度、拍摄间隔、相机感光度、相机光圈、无人机飞行高度、相机焦距、单幅图像像素等参数合理配合，才能获取清晰可用的道路图像。本项目中，相机感光度 ISO 与相机光圈 Aperture 设为 Auto 自动，以快门速度为基准，共同保障曝光为+0.5EV。

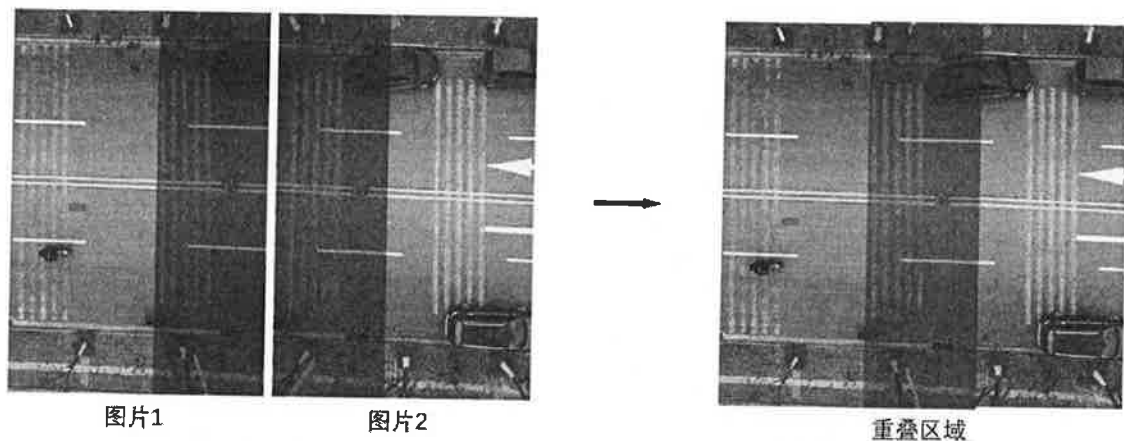


图 7 无人机道路图像重叠区域

②连续道路图像拼接算法

采集序列化道路图像后，每张图像间一般重叠区域在 10%~50% 之间。重叠区域存在大量图片冗余信息，增加数据存储负担。此外，序列化图像在目标定位、特征感知等方面具有显著劣势，在人工观察作业中直观性也较弱，为解决上述问题，利用 SIFT 算法对采集的序列化道路图像进行优化拼接研究。

关键点检测

关键点检测需通过 DoG 金字塔关键点检测完成。高斯金字塔 (Gaussian Pyramid) 和 DoG (Difference of Gaussian) 金字塔如图所示。组 (Octave) 由若干层 (Level) 组成，每个层都是一张图像或特征图。

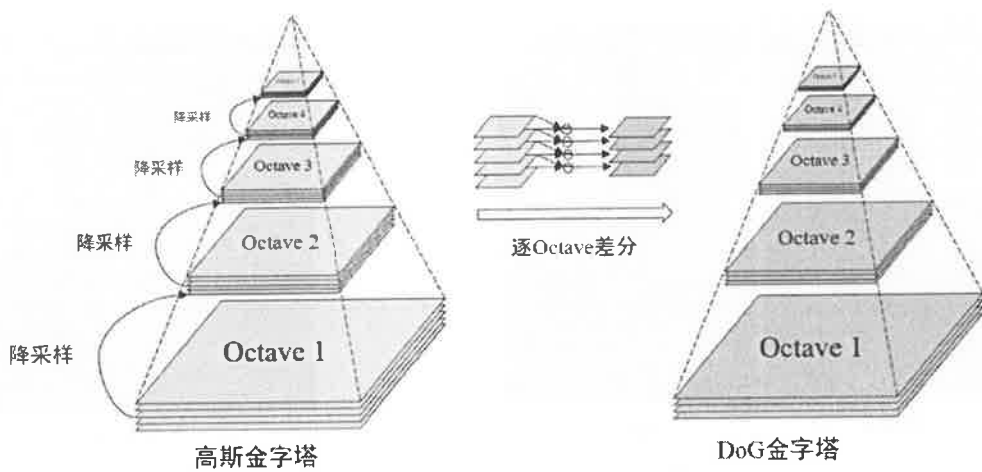


图 8 高斯金字塔与 DoG 金字塔原理

获取 DoG 差分层后，每一个点都要与其相邻的 26 个点位进行比较，以选出极值点。如图所示。由图中可以观察到，高斯层层数 L 为 5，高斯差分层层数为 4，极值点判定层为 $n=2$ ，因为在极值点判定时，需要将一个点与上一层和下一层的相邻点位进行对比，因此最上层和最下层的高斯差分层不能参与极值点判定。对局部极值点进行三维二次函数拟合以进行特征点初筛。

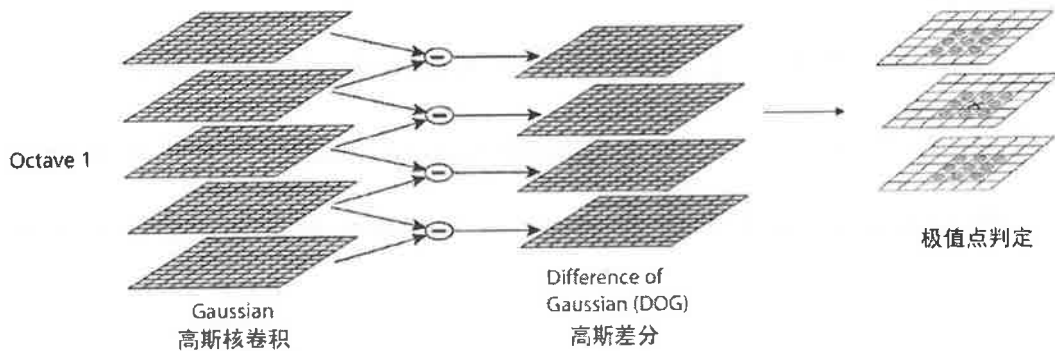


图 9 高斯差分原理与极值点判定原理

应用 Matlab 中的 SIFT 特征提取工具箱对道路图像进行特征提取测试。输入图像后，应用 `extractFeatures` 函数对原始图像进行特征点提取计算，结果如图所示。其中，圆圈大小表示特征点描述符值的大小，圆圈内的横线表示特征点描述符主方向。通过这两个参数定义具

有方向不变性的描述符。

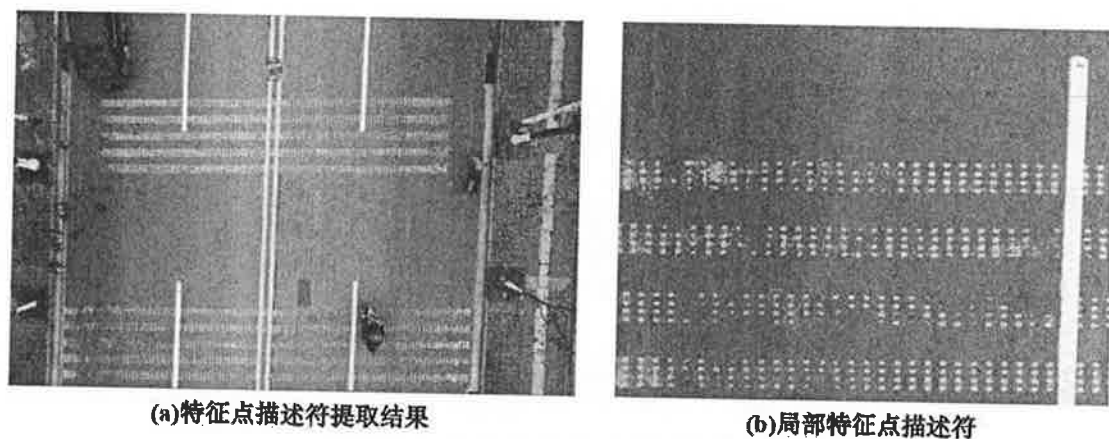


图 10 道路图像关键点检测

③特征点匹配与消除错配点

通过上述流程，对待拼接的两张图像分别计算关键点，并对关键点求得特征点描述符。随后对特征点描述符进行相似性度量。度量方式采用欧式距离。得到特征点匹配后，此时仍存在许多误匹配点，故对所有特征点一一匹配往往不能取得良好的拼接效果。因此需要采用 RANSAC 算法消除错配点。

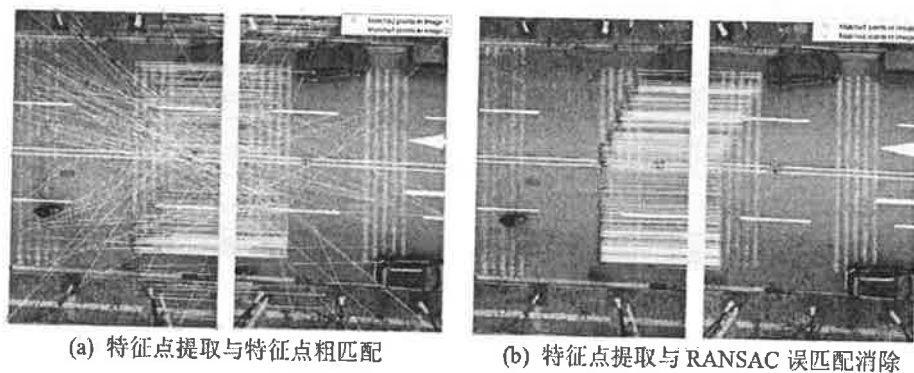


图 11 SIFT 特征点匹配与 RANSAC 误匹配消除

④拼接判定标准

对于图像拼接任务，有些拼接结果直观感受拼接效果很好，但实际在细节处不满足道路病害识别的工程需要，为量化表示道路图像拼接效果，本项目中定义道路中央标线接缝处偏移率作为判定标准。当

计算偏移小于偏移阈值时，判定图像拼接成功，否则判定图像拼接失败。

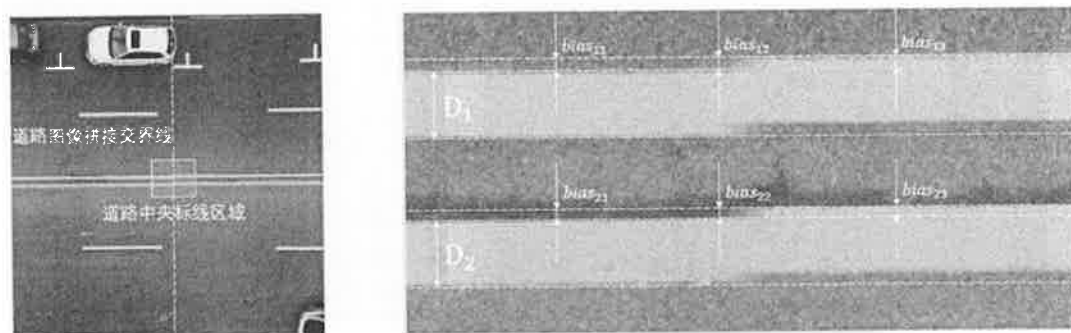


图 12 道路图像拼接判定示意图

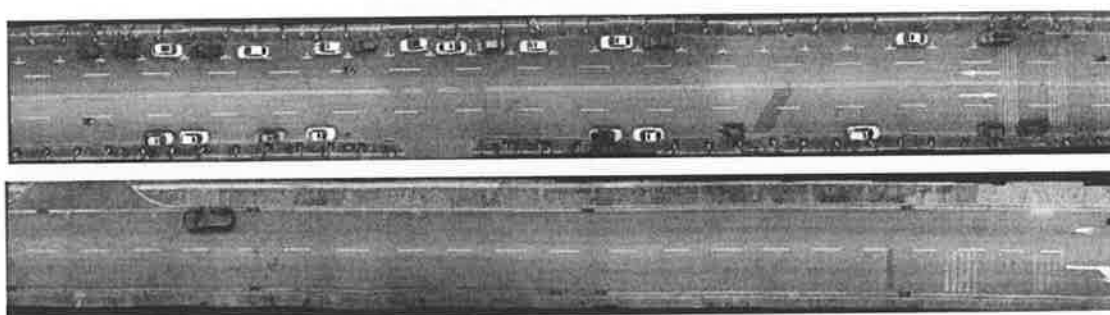


图 13 道路图像拼接效果

■ 海量连续道路损伤图像检测算法研究

①YOLO 基本原理技术

YOLO (You Only Look Once) 算法是 Redmon 等人在 2016 年提出的基于锚点的，端到端的目标检测算法，将目标检测问题转化为回归问题，不同于先产生预测框再识别的两阶段网络，YOLO 系列算法只用一个卷积神经网络就同时完成了边界框预测和类别识别，检测速度非常快，可以满足航拍图像目标检测对于实时性的要求，因此本项目选择 YOLO 算法为本项目实验的检测算法。

YOLO 目标检测算法主要分为四个步骤：(1)使用基础网络提取出输入图像的特征，得到尺度为 $S \times S$ 的特征图；(2)将输入图像划分

为 $S \times S$ 个网格，每个网格都生成 B 个预测框；(3)所有预测框针对 C 个类别进行概率预测；(4)使用非极大值抑制(NMS)算法对预测框进行筛选，得到最终的检测结果，检测结果包含目标类别和位置坐标。

每个预测框包含 5 个预测值： x 、 y 、 w 、 h 、 $confidence$ ， x 和 y 指的是预测框相对于当前网格中心的偏移坐标， w 和 h 是归一化后的预测框宽度和高度， $confidence$ 是预测框的置信度，其计算公式如式(1)所示，其中 $Pr(Object)$ 在网格内有目标时取值为 1，没有目标时取值为 0， $IOU(\cdot)$ 表示预测框和标定框的重叠率。

$$Confidence = Pr(Object) \times IOU(pred, truth) \quad (1)$$

$$Confidence\ Score = Pr(Class_i | Object) \times Pr(Object) \times IOU(pred, truth) \quad (2)$$

然后，每个网格预测 C 个类别概率 $Pr(Class_i | Object)$ ，也就是在网格包含目标的条件下，该目标属于某个类别的概率，如公式(2)所示，将置信度和类别概率相乘得到预测框属于某个类别的置信得分(confidence score)。最后，对于某一类别，将所有预测框根据置信得分从高到低排序，使用 NMS 去除和排序靠前的预测框重叠率大于 50% 的排序靠后的预测框，所有类别的 NMS 筛选完成后，剩余预测框属于哪个类别的置信得分越高，就将其判定为哪个类别的目标。

图 14 为 YOLO 目标检测算法。

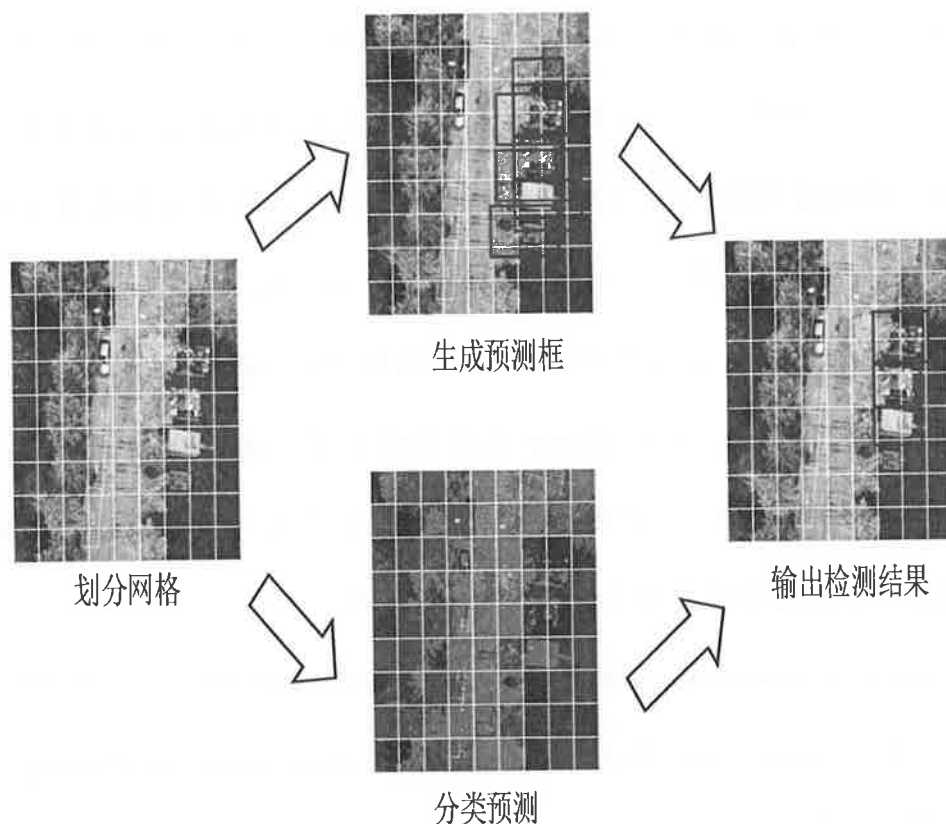


图 14 YOLO 目标检测算法

YOLO 系列算法使用了自己设计的特征提取网络,借鉴了各种基础网络的结构,设计出了计算复杂度低且特征提取能力较好的网络。

表 2 给出了 YOLOv1-YOLOv5 的发展以及每个算法具体的优缺点对比。

表 2 YOLOv1-YOLOv5 对比

YOLO	时间	骨干网络	创新点	优点	缺点
v1	2016	GoogleNet	利用整张图作为网络的输入,直接在输出层回归边界框的位置及类别。	检测速度快,可达到 45 FPS; 背景误检率低; 通用性强	小目标检测效果差; 损失函数对定位误差影响较大
v2	2017	DarkNet19	引入 Anchor 机制, K-means 聚类的方法提高召回率; 结合图	检测速度在 67FPS 时精度可达到	识别物体位置精准性差; 召回率

			像细粒度特征，结合深层与浅层特征，提高小目标检测率	76.8mAP，可以很好地平衡速度和精度	低
v3	2018	DarkNet53	引入 DarkNet53 进行特征提取，利用特征金字塔实现了多尺度检测；使用 logistic 兼顾实时性和准确性	进一步提升了检测性能；提高了模型泛化能力	内存过大，难以移植；检测精度相比于二阶段网络有待提高
v4	2020	CSPDarkNet53	采用 Mosaic 数据增强；CSPDarkNet53 提取特征；引入 SPP 增加感受野，分离上下文特征；引入 PANet 进行特征融合	与其它先进的检测器相比，速度与精度更高；能在普通 GPU 上训练和使用	使用 Darknet 框架搭建复杂；网络模型过大，在移动端部署受内存限制
v5	2020	Focus+CSP DarkNet53	输入端增加 Mosaic 数据增强、自适应锚框计算、自适应图片缩放等；特征提取网络 CSPDarkNet53，可以在一定范围内降低内存损耗；输出部分采用 PANet 和 FPN，加快各层级之间的信息流通	采用 Pytorch 框架容易使用；模型检测速度快、精度高，v5s 可达 140FPS；模型轻量化，大小是 v4 的 10%	可以针对不同检测任务进行进一步改进和轻量化

经过上述 YOLOv1-YOLOv5 的一系列对比，发现 YOLOv5 在检测准确率和速度方面均具有非常大的优势，且综合了多种检测增强模块，是近年来最新提出的兼顾准确度和速度的网络，凭借其较快的检测速度以及良好的检测精度得到了研究人员的青睐，因此本项目对 YOLOv5 具体结构进行进一步详细介绍。

YOLOv5 网络由输入、主干网络、颈部和预测输出层 4 个部分组成。在网络结构上新增了 Focus 模块，主要作用就是切片，图像在没

有进入 Backbone 以前先进入 Focu 部分,使图像进行下采样的同时保留完整的信息。Backbone 的 CSP 又对网络进行局部跨层融合,接着 Neck 部分的 SPP 极大地增加了感受野,Head 部分同样采用多尺度输出。因为这些特点,在小目标检测任务上,YOLOv5 在检测速度和精度上都能取得很不错的效果,其结构图如 15 所示。

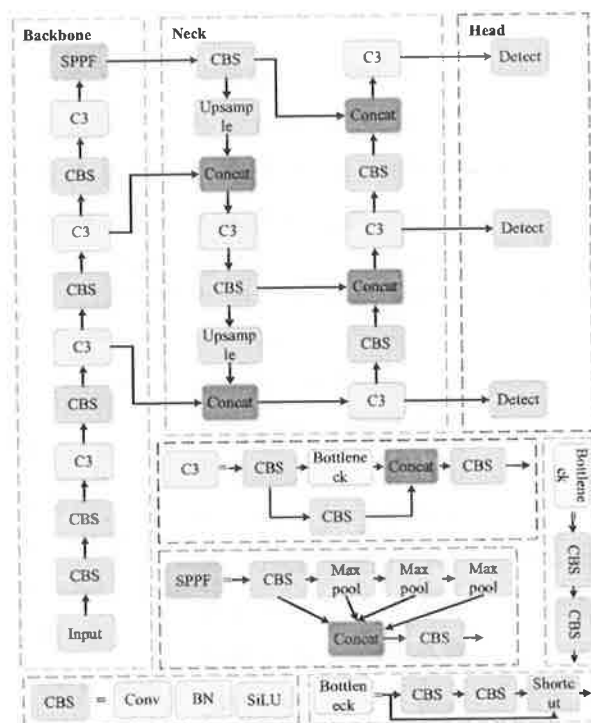


图 15 YOLOv5 网络结构

第一部分输入端的作用是对输入的数据进行一系列处理,包括数据增强和自适应锚框计算。数据增强采用 Mosaic 方式,将图像按随机缩放、随机裁剪和随机排布的方式进行拼接,增加数据集维度。自适应锚框计算通过聚类找到适合当前数据集使用的最佳标记框尺寸。

第二部分 Backbone 为特征提取部分,是网络的主干,包括 Focus 结构、CSP 结构和 SPP 结构,其中 Focus 结构通过对图片的切片操作

来加深图像的特征维度。CSP 结构可以减少特征传输过程中的信息丢失和计算量。SPP 结构可以扩展网络可处理的图片类型,使网络可以输入任意长宽比或任意尺度的图像。

第三部分 Neck 为特征融合部分,是网络的中间模块,将获取的特征融合在一起并传递给输出模块,由 PANET 构成。PANET 网络是在 FPN 的基础上增加了额外的信息传输路径,丰富了网络的特征学习范围。

第四部分 Prediction 包括预测边界框、损失函数计算和非极大值抑制,用来输出目标检测识别的结果。

②基于上下文增强和特征细化的特征金字塔复合神经网络结构

本项目设计的算法整体框架如图 16 所示。

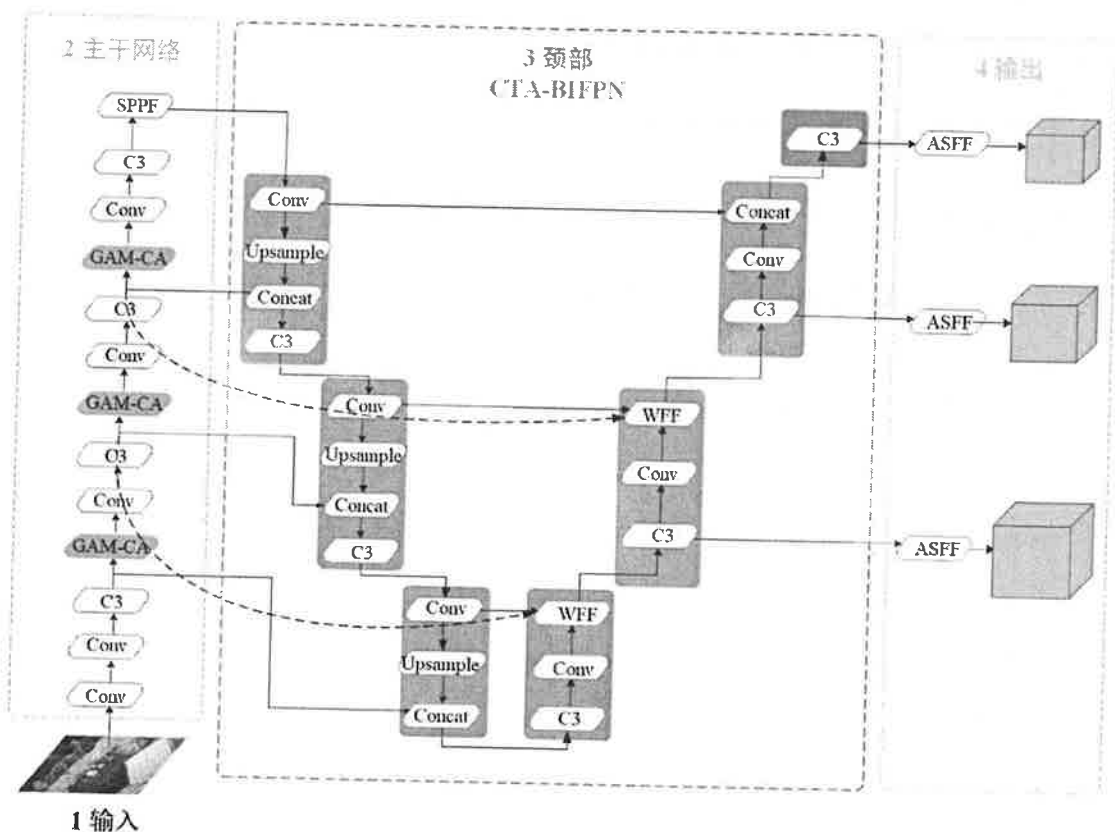


图 16 检测算法整体框架

YOLOv5 目标检测算法主要由四部分组成，第一部分为输入层，主要实现数据训练前预处理，主要功能有 Mosaic 数据增强、自适应锚框计算和自适应图片缩放；第二部分为主干网络(Backbone)，主要实现目标特征的提取，由 C3 结构和 Conv 结构组成，进行特征信息的提取和增强；第三部分为颈部网络(Neck)，由基于 PANET 的特征金字塔构成，主要实现目标特征的增强，第四部分为网络头部(Head)检测层，主要用于预测信息损失并输出目标信息。YOLOv5 检测算法具有较好的检测精度和速度，但是对于背景复杂时特定目标的检测仍存在一定的不足。在保证模型实时性的前提下，通过修改 YOLOv5 网络结构，尽可能挖掘小目标密集区域的特征信息，减少背景噪声干扰，提高检测精度。

如图所示，本项目在原始 YOLOv5 的算法框架之上提出了两个主要的改进点，具体介绍如下：

a)多特征交叉融合注意力机制 GAM-CA:骨干网络中的红色标注模块所示,针对航拍图像背景复杂,存在背景和相似物体干扰等问题,提出一个多特征交叉融合度注意力机制 GAM-CA,并引入在每一个 C3 模块之后进行骨干网络的重构,以进一步关注目标空间和通道两个维度的特征交互,聚焦并选择复杂背景中对任务有效的信息,强化特征输入到后续网络中,从而提高整体网络的性能,提升网络模型的运行效率。

b) 基于跨层级联的多尺度特征融合金字塔 CTA-BIFPN:如图颈部中的绿色标注模块所示,针对无人机飞行高度不定,航拍目标尺度

不一，跨尺度特征融合效果差，容易造成目标漏检的问题，引入并改进 BIFPN 结构，采用跨层级联路径进行不同缩放尺度的特征融合以减少网络传递过程中的浅层信息的丢失，同时使用反卷积弥补最近插值带来的特征损失，最后用 ASFF 进行自适应空间特征融合，进而进一步增强不同目标之间的跨尺度融合，降低小目标的漏检率，从而提高整个算法的运行效果。

③多特征交叉融合注意力机制 GAM-CA 构建

对于航拍图像中存在的小目标来说，目标所占像素少，并且易受高空拍摄的复杂背景因素等影响，原 YOLOv5 模型算法在进行卷积采样时容易丢失小目标的特征信息，对小目标的检测效果不是很好，引入注意力机制可以使网络能够以较低的能耗提取关键位置的信息，使检测器对目标进行“有区别”地检测，聚焦并选择对任务有用的信息，从而提高 CNN 的性能，且对于小目标和密集目标来说，可以有效地提取其特征信息，进一步提高检测的准确率。目前常用的注意力机制有 CBAM、GAM、SE、CA 等，但他们都存在一定的缺陷与不足，因此，本项目针对无人机航拍图像的上述特点，以常用的 GAM 和 CA 为基础，采用残差模块的思想构建了一个多特征交叉融合注意力机制 GAM-CA。其组成细节和具体构建方法如下所示。

全局注意力机制 GAM

GAM 采用顺序通道-空间注意机制，首先将输入特征图经过 GAM 模块中的通道注意力模块 M_c 以保留特征的三维信息，放大跨维通道-空间的依赖性，再通过空间注意力模块 M_s 进行空间信息的融合，最

后调整特征图得到最后输出，GAM 是一种可以减少信息缩减并放大全局维度交互特征的注意力机制，其结构图如图 17 所示。

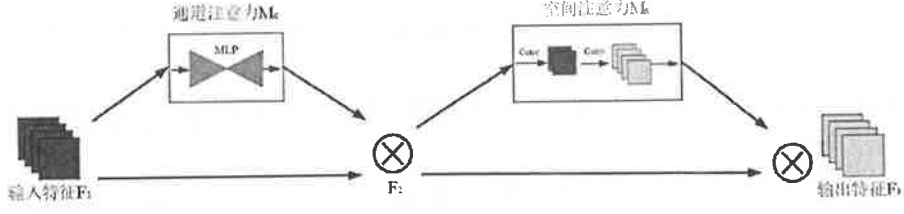


图 17 GAM 算法结构

如图所示，给定输入特征映射 $F_1 = R^{C \times H \times W}$ ，中间状态 F_2 和输出 F_3 ，并定义为：

$$F_2 = M_c(F_1) \otimes F_1 \quad (3)$$

$$F_3 = M_s(F_2) \otimes F_2 \quad (4)$$

其中 M_c 和 M_s 分别是通道和空间注意力图； $\otimes$ 表示基于元素的乘法。

通道注意力子模块使用 3D 置换来保留三维信息，然后利用两层 MLP（多层感知器）放大跨维通道-空间依赖关系。在空间注意力子模块中，为了聚焦空间信息，使用了两个卷积层次进行空间信息融合。

坐标注意力机制 CA

CA 将位置信息融合到通道信息中。CA 在捕获通道特征的同时，还进行方向和位置的信息捕捉。因此，CA 注意力机制能更加精准的定位和识别图像中的重要信息。如图 18 所示，CA 注意力机制由两部分组成。第一部分为坐标信息嵌入。图像输入注意力机制后，池化层沿着水平和垂直方向进行编码，分别得到水平和垂直方向的特征图。然后将特征图进行拼接，利用 1×1 卷积函数得到中间特征图。第二部分为坐标信息特征图生成。首先沿着空间维度分解两个张量，分别沿

水平和垂直方向进行卷积和激活函数处理，然后将两个方向的输出进行融合。

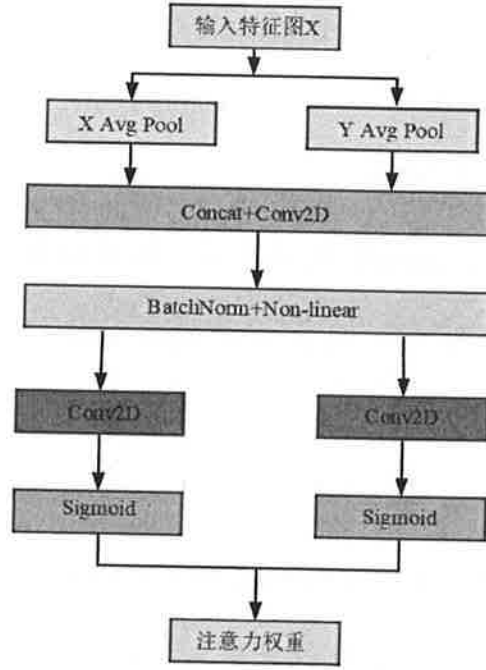


图 18 CA 算法结构

如图所示，输入特征图 X 是上一层卷积的输出，其维度为 $C \times H \times W$ ，即通道数为 C ，高为 H ，宽为 W 。使用尺寸 $(H,1)$ 和 $(1,W)$ 的平均池化分别沿着水平坐标与垂直坐标方向对每个通道进行编码，即高度为 h 的第 c 个通道与宽度为 w 的第 c 个通道的输出，公式如下：

$$z_c^h(h) = \frac{1}{W} \sum_{0 \leq i < W} x_c(h, i) \quad (5)$$

$$z_c^w(w) = \frac{1}{H} \sum_{0 \leq i < H} x_c(i, w) \quad (6)$$

上式两个变换沿着两个空间方向进行特征聚合，然后级联生成的两个特征图 z^h 、 z^w ，并进行卷积核大小为 1 的卷积运算 z_1 ，生成对空间信息在水平方向和垂直方向的中间特征图 f ，公式如下：

$$f = \delta(F_1([z^h, z^w])) \quad (7)$$

沿空间维度将 f 分成两个单张量 f^h 和 f^w ，再利用两个卷积核大小为 1 的卷积运算 F_h 和 F_w 将特征图 f^h 和 f^w 变换为与输入 X 同样的通道数，公式如下：

$$g^h = \sigma(F_h(f^h)) \quad (8)$$

$$g^w = \sigma(F_w(f^w)) \quad (9)$$

式中， σ 运算是 Sigmoid 激活函数，经过运算得到 0~1 的范围数值，即代表重要等级程度。将 g^h 和 g^w 进行拓展，作为注意力权重，最终输出公式如下：

$$y_c(i, j) = x_c(i, j) \times g_c^h(i) \times g_c^w(j) \quad (10)$$

综上所述，GAM 注意力机制增强了通道和空间特征之间的信息交互，但并没有考虑通道中的位置信息，CA 注意力机制进行方向和位置的信息捕捉但并未考虑全局的跨维信息交互问题，本项目构建的 GAM-CA 注意力机制弥补了这两类网络的缺陷通过结合 GAM 对全局信息的跨维度交互作用和 CA 对通道中方向、位置信息的精确定位，进一步提高注意力机制对整体特征信息的交互和把握，加强通道空间信息交互的同时，增强了局部精确的位置信息。

GAM-CA 具体构建方法

GAM-CA 结构图如图 19 所示，其将通道注意力和空间注意力机制有效的融合到检测网络中，从而增强通道和空间的交互性，同时强调目标的位置信息，聚焦算法对有效信息的关注度，从而进一步提高复杂背景下算法的检测性能。

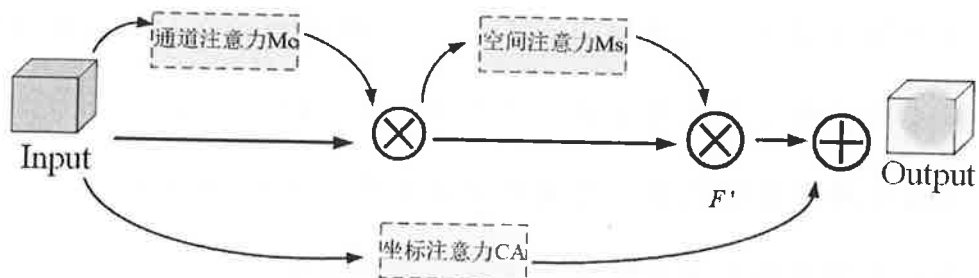


图 19 多特征交叉融合注意力机制结构

如图所示，输入特征首先进入 GAM 模块中的通道注意力来保留三维信息并放大跨维通道-空间依赖关系，再经过空间注意力模块进行空间信息的聚焦。对于全局注意力和坐标注意力的连接方式本项目采用引入残差结构的方式进行组合，残差结构可以很好地减轻深层网络训练的负担，通过跨层恒等连接的方式连接浅层网络与深层网络，相当于把底层的特征信息融合到高层中，可以保证输入的特征信息不流失，增强了特征对目标的表达能力，并且使得梯度能够很好地传递到浅层，残差模块结构图如图 20 所示。

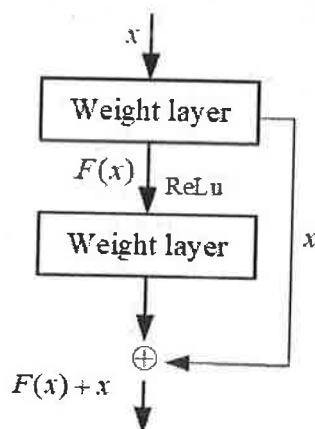


图 20 残差模块结构图

输入特征在进入 GAM 的同时输入 CA 注意力模块，最后对两个模块输出的特征图进行相加调整得到整个模块输出的叉融合注意力信息。此操作不仅能综合 GAM 对空间通道的信息跨维交互，而且能够结合 CA 对位置信息的精确定位，进一步增强有用的特征信息，聚

焦并选择复杂背景中对任务有效的信息，强化特征输入到后续网络中，从而提高整体网络的性能，提升网络模型的运行效率。

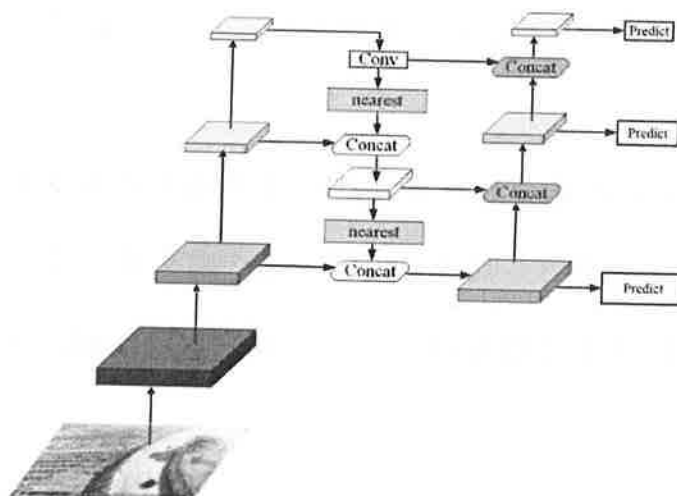
④基于跨层级联的多尺度特征融合金字塔 CTA-BIFPN

多尺度特征融合金字塔模块组成及构建方法

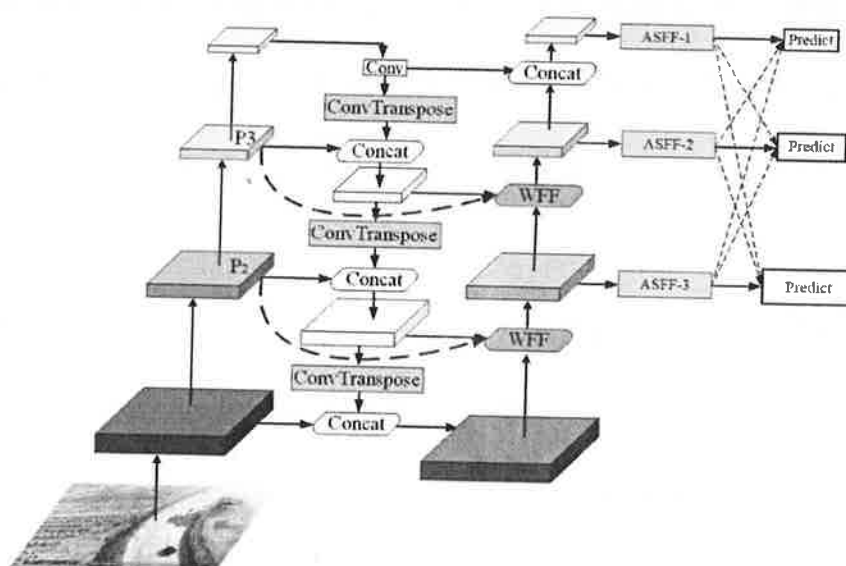
无人机的飞行高度不定，空中拍摄角度多变、拍摄范围广，对于无人机影像上的目标来说，处于不同飞行姿态下的目标具有较大差别，小目标占比较多且不同目标之间尺度差异较大。利用深度卷积神经网络提取图像目标特征时，位于网络深层的特征图具有感受野大、强语义信息、强鲁棒性的特点，适用于分类任务，但特征图的分辨率低、丢失的细节信息较多。相反，浅层网络感受野小，特征图分辨率更高，具有更多的细节信息，更有利于目标的定位，但缺乏语义信息。目标检测任务不仅需要对目标进行定位还需要对检测到的目标进行分类，这就要求用于检测层输入的特征图同时具备丰富的细节特征和语义特征。因此结合深层网络中的高级语义信息和浅层网络中的几何信息可以提高网络的检测性能。

YOLOv5 原始网络采用 PANet 结构来实现多尺度特征融合模块，通过简单的双向特征提取网络融合深层特征图的语义信息和浅层特征图的定位信息，虽然在一定程度上降低了底层特征信息向顶层传递的损失，但是，直接融合不同密度的信息会忽略不同尺度特征之间冲突信息的存在，引起语义冲突，限制多尺度特征的表达，缺乏上下文信息可能会阻碍性能的进一步提高，特别是对于微小目标很容易被冲突信息淹没。且 PANet 简单地认为来自不同阶段的特征图对最终融合

结果的贡献都是一样的，直接的融合不同层的特征信息，融合效果有待进一步提升。为解决上述问题，提高模型效率和融合效果，本项目在 PANet 的基础上融合 BIFPN 的思想设计了一种跨层级联的多尺度特征融合金字塔 CTA-BIFPN，具体结构及其与原网络 PANET 对比如图 21 所示。



(a) PANET 结构图



(b) CTA-BIFPN 结构图

图 21 改进前后金字塔结构对比图

由上图可知，本节构建的 CTA-BIFPN 跨层级联特征融合金字塔

相比于原始金字塔增加了以下三部分内容：

a)跨层级联特征增强路径：如图中红色虚线以及橙色加权特征融合模块 WFF 所示，首先通过跨层融合的连接路径向上增加金字塔的深度，进一步融合深层网络的语义信息和浅层网络的细节信息；然后通过快速归一化的方式计算得到对应特征图的注意力权重，动态分配到不同尺度的特征图中，最终更好地融合跨尺度连接过程中丢失目标特征的问题。

b)基于反卷积的上采样方式：如图中的紫色反卷积模块所示，通过引入反卷积利用插 0 的方式估计插值，避免造成原始网络采用最邻近上采样方式带来的损失特征问题，得到更加细腻的特征图，降低细节损失。

c)自适应空间特征融合 ASFF：如图中最右侧黄色方块所示，在网络预测输出之前增加一个自适应空间特征融合模块，通过权重参数来调整特征融合时不同尺寸特征的贡献大小，避免了小尺度语义信息和大尺度细节信息的混乱和丢失，进一步增强了多尺度之间的信息交互融合。

跨层级联特征增强路径

首先针对 FPN 网络高层感受野大，特征图分辨率低，丢失细节信息多，浅层网络感受野小，特征分辨率高，但缺乏语义信息的缺点，本项目在 3 层 FPN 结构的基础上基于 BIFPN 的网络结构设计了一种跨层级联的特征融合金字塔将其深度变为 4 层，向上加深了金字塔的深度。如图 22 中的红色虚线条所示即为跨层级联方式。

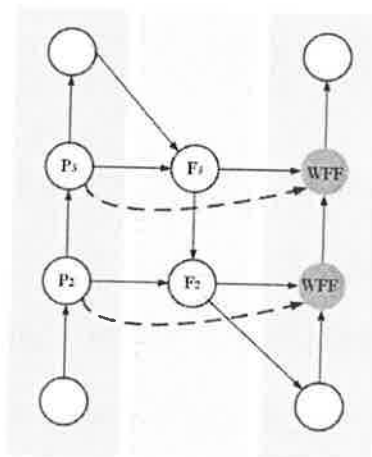


图 22 跨层级联特征增强路径

原始 BIFPN 只是在自顶向下和自底向上的路径中融合前一层的特征，忽略了网络在传播过程中对细节特征的丢失，本项目设计的跨层级联方式在自底向上的通路中进一步结合基础特征图中的丰富信息，可以使深层网络的语义信息和浅层网络的细节信息进一步融合，从图中可以看出，跨层加权融合仅仅用于两个中间层 P2、P3，对于顶层 P1 和底层 P4，由于信息流动造成的损失不多，考虑到模型的运行效率，本项目直接将两部分特征图按通道进行拼接。最终，在不消耗更多成本的情况下可以融合更多的特征。

接着，针对一般 FPN 直接融合不同密度的信息而忽略不同尺度特征之间冲突信息的缺点，采用加权特征融合的方式(WFF(Weighted feature fusion, WFF))来平衡不同特征层的权重，判断不同输入的重要性，不仅可以保留更多的特征信息，还可以简化融合计算。WFF 使用了快速归一化融合的方式，直接用权值除以所有权值加和来进行归一化，同时将权值归一化到 $[0, 1]$ 之间，提高了计算速度，如式(11)所示：

$$O = \sum_i \frac{\omega_i}{\varepsilon + \sum_j \omega_j} I_i \quad (11)$$

其中，用激活函数 ReLU 来确保权重 $\omega_i \geq 0$ ，该权值由网络训练得到， I_i 表示输入的特征。

修改后的特征融合网络与原本直接由 Concat 操作进行特征融合不同，WFF 利用快速归一化方式计算得到对应特征图的注意力权重，动态分配权重到不同尺度的特征图中，以便更好地融合上、下采样后特征图中的小目标特征，缓解特征融合过程中小目标特征丢失的问题。改进后的网络将主干网络中提取出的两种不同尺度的特征 P4、P5 作为 CTA-BiFPN 的输入，进行跨尺度连接和加权特征融合。最后，将自顶向下和自底向上的路径融合到一个模块中，以便可以重复堆叠，以实现更高层次的特征融合。最后设置三种不同尺度特征分辨率的预测分支。

基于反卷积的上采样方式

上采样的目的是将较小特征图放大到与较大特征图相同尺寸，满足特征融合的前提条件，这并没有带来更多的特征信息，但会对特征图的质量造成影响。YOLOv5 采用最邻近插值法进行上采样，该方法选用单个参考点像素值进行估计，虽然速度快、开销小，但上采样过程中会造成很严重的特征损失，降低小目标的检测精度。针对此问题，本项目采用反卷积的方式进行上采样，以减少采样过程带来的信息丢失。

反卷积也称为转置卷积，但该操作并不是标准卷积的逆过程，而

是按照一定的比例规则，首先在特征图上进行补0操作；然后，将卷积核进行旋转，最后进行正向的卷积操作。如图 23 所示，对特征图四边进行数值为 1 的区域延展，卷积过程是一个将 5*5 的特征图与 3*3 的卷积核进行卷积操作，其中卷积核每次滑动间隔为 2，得到一个 3*3 的输出特征图。而转置卷积相反，3*3 的特征图作为转置卷积的基础输入，对 3*3 的特征图每间隔一行与一列的位置进行插入 0 数值，并将该补充后的 7*7 特征图作为新输入，运用 3*3 的卷积核进行步长为 1 的反卷积操作，得到最终的 5*5 特征图，转置卷积的计算公式如下：

$$o'_w = \frac{i'_w - k + 2p}{s} + 1 \quad (12)$$

$$o'_h = \frac{i'_h - k + 2p}{s} + 1 \quad (13)$$

公式中， (i'_w, i'_h) ， (o'_w, o'_h) 代表输入与输出特征图的宽、高； k 为卷积核大小； s 滑动步长； p 表示边界增强值。

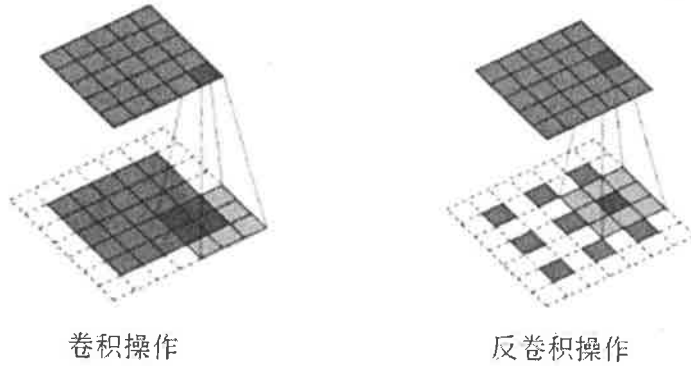


图 23 卷积与反卷积示意图

反卷积利用插 0 的方式估计插值，得到的特征图更加细腻，细节的损失更少，通过实验验证了利用反卷积进行上采样能够进一步减少采样过程中的特征损失，提高小目标的检测精度。

自适应空间特征融合 ASFF

在目前的目标检测任务中，特征金字塔是解决目标尺度多变的重要手段，然而，不同特征尺度之间的不一致是基于特征金字塔检测器的主要限制。在检测分支当中，低层特征适合检测图片中的小物体，高层特征适合检测图片中的大物体，中间层特征适合检测图片中的中等大小物体。而一般 FPN 均采用的是直接连接或者按元素相加这种特征拼接的方式，但是这种连接方式不能充分学习到不同尺度之间的特征信息，从而不能有效地进行多尺度特征融合。因此，本项目提出利用一种自适应空间特征融合（Adaptively Spatial Feature Fusion, ASFF）的方式来进行跨尺度特征融合。其网络结构如图 24 所示。

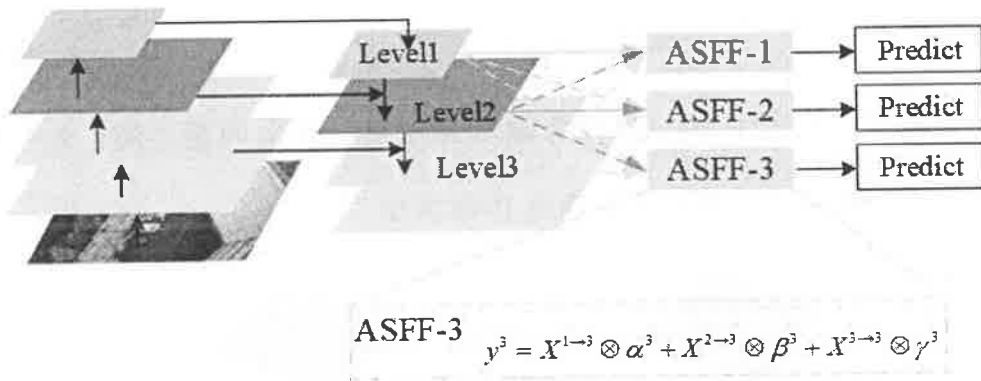


图 24 ASFF 结构示意图

如图所示，在经过了 FPN 特征增强之后，预测输出之前引入了 ASFF 结构来进一步融合特征，以 ASFF-3 为例，图中的黄色框描述了如何将特征进行融合，其中 X^1 , X^2 , X^3 分别为来自 level1, level2, level3 的特征，与为来自不同层的特征乘上权重参数 α^3 , β^3 和 γ^3 并相加，就能得到新的融合特征 ASFF-3，最终 ASFF-3 输出的特征如下面公式所示：

$$y_{ij}^l = \alpha_{ij}^l \cdot x_{ij}^{1 \rightarrow l} + \beta_{ij}^l \cdot x_{ij}^{2 \rightarrow l} + \gamma_{ij}^l \cdot x_{ij}^{3 \rightarrow l} \quad (14)$$

其中，权重参数 α ， β 和 γ 是通过通道调整之后每一层对应的特征图经过 1×1 卷积得到的，再经过softmax归一化到 $[0,1]$ 。并且 $\alpha_{ij}^l + \beta_{ij}^l + \gamma_{ij}^l = 1$ 。

ASFF 通过利用权重参数来调整特征融合时不同尺寸特征的贡献大小，避免了小尺度语义信息和大尺度细节信息的混乱和丢失，进一步增强了多尺度之间的信息交互融合，提高了检测精度。

综上所述，CTA-BIFPN 模块具有自顶向下、自底向上、跳跃连接和自适应融合的特点。能够充分解决无人机航拍过程中由于拍摄高度不同和目标大小不同带来的多尺度问题，提高整个算法的准确率。

■ 海量连续道路图像损伤量化表征算法研究

如图 25 所示展示了本项目设计的基于熵量化理论的微细损伤高可信表征模型，Enhanced Hybrid Attention and Fusion Network (EHAF-Net)。

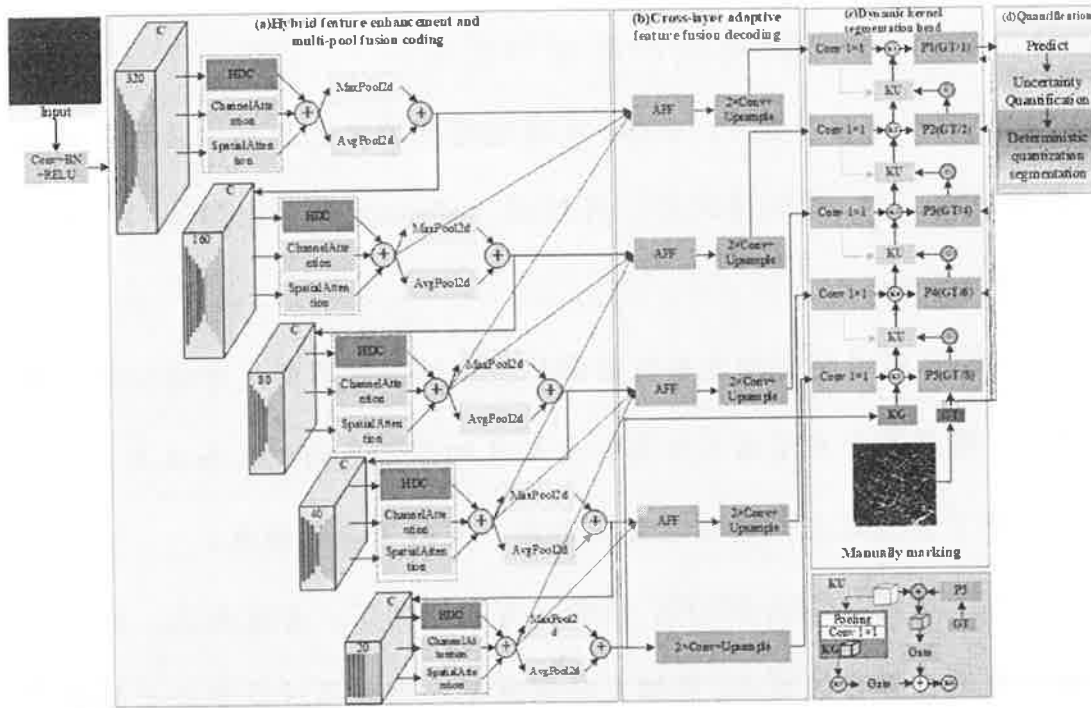


图 25 高可信表征模型示意图

①混合特征增强和多池融合编码：利用 RSU(ReSidual U-blocks) 进行特征提取，进而利用混合膨胀卷积注意力机制对提取的特征增强处理，为了弥补单一池化的不足，本项目在此设计了多池化融合机制进行下采样处理。

②跨层自适应特征融合解码：重新设计了一种联系上下文信息的跨层自适应特征融合解码模块，对编码阶段提取的特征进行融合处理。

③本项目针对现有缺陷检测头部模型存在确定性检测输出低的问题，设计一种融合信息熵的高确定性动态核检测模块，首先利用动态核进行分割，其次利用信息熵进行不确定性量化及确定性输出。

a)高确定性动态核检测模块

其中 KG 表示核生成模块，主要通过自适应平均池化操作将特征

聚合成 $K \times K$ ，利用 1×1 卷积进行降维处理，产生的初始分割核数为 64。

$$K_3 = \text{Conv}\left(LT\left(AAP\left(F_{HDCAC_3}(D_3)\right)\right)\right) \quad (15)$$

其中 KU 表示核更新模块。为了能够准确地实现多尺度缺陷特征的提取，利用门机制来过滤损伤特征中的噪声并实现自适应内核更新，计算公式为：

$$K_2 = \left[G_2^F = \text{Sigmoid}\left(LT_6\left(LT_3\left(F_{HDCAC_2}\right) \otimes LT_4\left(K_3\right)\right)\right) \otimes LT_1\left(F_{HDCAC_2}\right) + \right. \\ \left. G_2^K = \text{Sigmoid}\left(LT_5\left(LT_3\left(F_{HDCAC_2}\right) \otimes LT_4\left(K_3\right)\right)\right) \otimes LT_2\left(K_3\right) \right] \quad (16)$$

其中， $\otimes$ 表示 Multiplication，*Sigmoid* 表示 *Sigmoid* 函数，*LT* 表示线性变换，*G* 表示门控(gates)， K_2 表示新的核(kernels)， F_{HDCAC_2} 的计算公式如下：

$$F_{HDCAC_2} = \sum_{i=0}^{H_2} \sum_{j=0}^{W_2} UP(P_3) \otimes F_{HDCAC}(D_2) \quad (17)$$

b) 多级混合损失函数

本项目通过对五个尺度下的特征进行监督学习，重构设计了多尺度下的监督混合损失函数，计算公式如下所示。*G* 表示真实值，*P* 表示预测输出值。 L_{DSL} 作为最终的前向传播损失。模型的损失越小，意味着模型的预测结果越接近真实标签，因此可以认为模型的准确性越高。

$$L_1 = \text{Dice}(P_0, G) + \text{Bce}(P_0, G) \quad (18)$$

$$L_2 = \text{Dice}\left(P_1, \text{Interpolation}\left(G, \frac{1}{2}\right)\right) + \text{Bce}\left(P_1, \text{Interpolation}\left(G, \frac{1}{2}\right)\right) \quad (19)$$

$$L_3 = \text{Dice}\left(P_2, \text{Interpolation}\left(G, \frac{1}{4}\right)\right) + \text{Bce}\left(P_2, \text{Interpolation}\left(G, \frac{1}{4}\right)\right) \quad (20)$$

$$L_4 = \text{Dice}\left(P_3, \text{Interpolation}\left(G, \frac{1}{6}\right)\right) + \text{Bce}\left(P_3, \text{Interpolation}\left(G, \frac{1}{6}\right)\right) \quad (21)$$

$$L_5 = Dice\left(P_4, Interpolation\left(G, \frac{1}{8}\right)\right) + Bce\left(P_4, Interpolation\left(G, \frac{1}{8}\right)\right) \quad (22)$$

$$L_{DSL} = \sum_{i=1}^5 L_i \quad (23)$$

c) 基于熵值理论的预测结果确定性量化

现有方法通常将最大熵模型认为具有最大熵的预测是最佳预测，用在缺陷检测结果量化方面，其计算公式为：

$$H(p) = -\frac{p}{255} \log_2\left(\frac{p}{255}\right) - \left(1 - \frac{p}{255}\right) \log_2\left(1 - \frac{p}{255}\right), (p \in [0, 255]) \quad (24)$$

其中， p 是模型的预测输出， H 表示信息熵。在此对 H 关于 p 求导，并令导数为 0，可知：

$$\frac{dH}{dp} = -\log_2(p) - 1 + \log_2(1-p) + 1 = 0 \quad (25)$$

求得 $p=0.5$ ，这意味着，对于给定的预测结果，当预测结果正好处于 0.5 的概率时，不确定性最大，信息熵也最大。因此更适合于二分类像素量化。然而对于深度模型而言，一般高置信度，确定性更高。本项目重新修改了信息熵，使得更适应于多像素图像分割确定性量化，计算公式为：

$$H_{new}(p) = \left\{ -\frac{p}{\varphi} \log_2\left(\frac{p}{\varphi}\right) - \left(1 - \frac{p}{\varphi}\right) \log_2\left(1 - \frac{p}{\varphi}\right) \right\} > T, \quad (26)$$

($p \in [0, 255], T \in [0, 1], \varphi = 510$)

其中， T 表示确定性输出阈值。

■ 连续道路图像损伤综合评价研究

综合所述的道路病害提取结果，依据勘测道路的宽度信息与病害区域的比例，计算病害真实尺寸（如长度、宽度、面积等指标）；依据现有规范，精确区分横向裂缝、纵向裂缝、块状裂缝、龟裂四种裂缝类型，并对路面破损率指标 DR 进行公式调整。另一方面，综合

应用本论文模型,生成连续道路图像病害库,直观表征道路损伤状况。连续道路图像病害库可作为路面技术状况指数 PQI 及路面损坏状况指数 PCI 的有效数据支撑。

现行规范中对病害的数值化评价指标存在如下问题:①对横向裂缝与纵向裂缝的评价以裂缝长度 $\times 0.2\text{m}$ 换算为损伤面积,该指标为考虑工程实际应用效率而设置的简化指标,对裂缝评价的精细化程度不足。②现行规范中对自动化路面破损率 DR 的计算中,第 i 类路面损坏的累计面积 AA_{ii} 以网格数为评价标准,损坏网格标准尺寸为 $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$,对破损评价造成一定程度的误差。

上述分析可以得出,现行规范对道路裂缝的评价较粗放。对横纵向裂缝以影响面积的形式进行评价不够准确。为表征裂缝病害真实尺寸,应以像素级标准确定损伤面积。如前文所述,本论文第二章采集并处理后的连续道路图像具备精确的路面采集宽度信息、飞行高度信息等关键飞行参数,因此,结合目标检测识别、量化提取,根据连续道路图像与道路比例尺计算病害像素级尺寸,实现道路病害的精确评估。评定流程如图 27 所示。

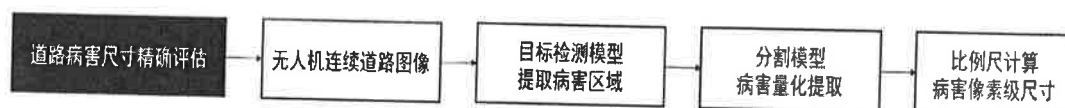


图 27 道路病害尺寸精确评估流程图

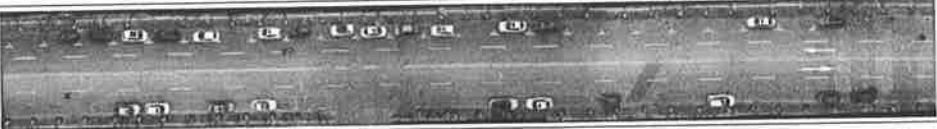
为实现通过比例尺计算病害像素级尺寸,首先需保证通过比例尺可准确计算并表征道路图像上的道路设施真实尺寸。

连续道路图像病害库构建

对 6 张连续图像进行批量病害自动化目标检测,该连续道路图

像病害库具备工程应用价值。

表 3 连续道路图像病害目标检测库

编号	无人机连续道路图像目标检测结果
01	
02	
03	
04	
05	

2) 工作流程

近年来，无人机因姿态操控灵活、体积小巧而广泛应用于工程地质勘察及道路选线。通过操控无人机在单次飞行中采集多幅连续道路图像，可有效提升路表病害检测效率，弥补检测车在作业中检测范围覆盖有限的缺陷。本项目以无人机飞行载具为道路图像采集装置，研究连续道路图像采集与拼接、道路图像自动化损伤目标检测、损伤区域像素级形态特征提取、道路损伤尺寸提取。综合应用上述研究成果，形成一套连续道路损伤检测与智能评估流程。

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）

本项目研究成果将直接服务于交通运输基础设施的智能化运维

体系，为后续的技术改造与基本建设提供核心支撑。首先，在技术应用衔接方面，项目研发的基于昇腾 AI 的无人机自动巡检算法及评估系统，可直接嵌入现有的交通路网监控平台或新建的“智慧公路”、“智慧桥梁”管理系统中。通过软硬件接口标准化设计，成果可迅速转化为实际生产力，实现对道路病害、桥梁裂缝等隐患的自动化识别与分级预警，大幅降低人工巡检成本，提升检测效率与精度。

其次，在成熟度与市场需求的匹配上，本项目针对复杂气象与光照条件下的识别难题提出的解决方案，显著提高了算法的鲁棒性，表明该技术已具备在大规模实际场景中推广应用的成熟度。当前交通行业对“无人化、智能化”巡检需求迫切，本成果恰好填补了高精度、低功耗边缘计算巡检设备的市场空白。预计项目结题后，可立即在省内重点高速公路及特大桥梁开展示范应用，并逐步向全国交通路网推广。

最后，在后续建设与改造计划中，本项目的理论模型与数据积累将为制定新一代交通基础设施养护标准提供科学依据。基于项目形成的评估体系，相关部门可据此优化养护资金分配，推动从“定期被动维修”向“预测性主动维护”的技术改造模式转变。同时，项目构建的数据集与算法框架可作为未来交通大模型训练的基础底座，支持后续更高级别的车路协同与数字孪生交通系统的建设，确保持续的技术迭代与产业升级。

5. 有关技术经济指标

1) 预期目标

针对重要的市政道路、省道、国道和高速公路等公共道路存在道路裂缝、坑洞等病害问题，严重影响道路行车舒适性和安全性以及造成道路养护成本不断增大的问题，开展基于无人机航拍场景下智能道路病害巡检技术研究。集成基于深度学习的无人机航拍道路病害检测技术，提高无人机航拍目标检测速度，构建基于国产昇腾 AI 计算平台的道路病害巡检系统，完成对公共道路场景下道路病害的智能识别，实现对特定病害的自主检测、帮助决策、及时预警，提高道路行车安全性，为道路养护部门提供理论基础，降低大型病害养护带来的高昂成本。

2)主要技术经济指标

论著成果：发表学术论文 3 篇，其中 EI/SCI 索引 3 篇；

技术成果：申请发明专利 2 项，授权软件著作权 1 项；

■ 技术指标：

- 1) 连续图像不低于 5 张；
- 2) 涵盖横向，纵向，龟裂，块状裂缝等四种病害类型；
- 3) 连续道路病害检测精度不低于 90%；
- 4) 连续道路病害量化精度不低于 90%。

3)经济和社会效益

本项目所形成的核心技术，可以衍生出各种道路病害巡检系统，广泛应用于道路巡检、道路养护等领域。其经济效益和社会效益分析如下：

■ 经济效益

在城市化发展过程中,公共基础设施的建设和维护一直是国家经济发展的重点对象。从 2010 年至今,国家平均每年在公用设施建设上的投资超过 16000 亿元,针对城市化发展的进程,无论是理论上还是实践上都是作为国家的重点战略方针,是发展新经济建设的重点对象。俗话说“千古百业兴,先行在交通”,交通系统作为公共基础设施中的核心,其完善性和安全性,关系着社会经济的进一步发展。截至 2020 年,我国境内的公路已经形成了一个畅通无阻的“交通网”,其总里程已经达到大约 500 万公里。城市到农村的高速公路数量越来越多,全国范围内大大小小的高速公路已经达到了 15 万公里,交通运输体系也愈加完善。公路系统的庞大数量和广泛性使其成为交通系统的日常维护重点对象之一。当前科技得到了前所未有的飞速发展,无论是硬件设施还是算法技术都得到了极大的提升。

目前如何既节约工程造价,又能够较好的完成道路维修处治,是道路路面维修领域中研究的一个主要方向。这就首先要求我们对路面病害性能的种类、产生、发展及形成原因均有一个相对较为深入的研究,才能够提出相对较为合理和节约造价的方案。道路维护主旨是通过检测道路病害轻重的程度,预先评估道路病害发展的趋势,从而提前进行治疗,以防止病害趋势的加重;从而降低工程造价,达到事半功倍的效果。

■ 社会效益

我国城市道路发展自建国以来呈现快速发展的势头,然而目前大部分城市现状道路修建年代较为久远。原道路设计标准较低,不能满

足目前交通量迅速增长的趋势，大多数道路已经出现超过原设计荷载的情况；同时道路的使用年限也超出了原设计年限，城市道路基础设施已经远远不能满足当前的经济建设与居民生活的需求。由于城市道路建设年代、建设标准及施工单位技术都存在不同程度的差异，因此城区道路情况也有所不同，造成了不同道路之间行驶品质产生差异，影响了居民出行的便利性，造成了部分路段交通不畅，降低了驾驶舒适性。当道路投入运营后，通常会出现随道路使用时间的增加，道路性能以及各项特征指标逐渐下降，即道路每年以一定的速率发生路况和性能的降低，当到一定年限后就会出现各项性能不满足规范要求及行车舒适度的情况，严重影响了人民的交通出行。性能严重下降的路况难以满足人民群众对交通出行日益增长的需求。因此针对道路巡检的智能化，不仅有利于道路行车的舒适性和安全性，更有利于道路维护的低成本化与经济的发展。同时增强了人民群众道路行驶的安全系数，促使人类社会不断发展与生活质量的不断提升。

4)成果提供形式

■ 预期研究结果

理论成果：开展连续道路图像采集与拼接、道路图像自动化损伤目标检测、损伤区域像素级形态特征提取、道路损伤尺寸提取研究。综合应用上述研究成果，形成一套连续道路损伤检测与智能评估系统。

论著成果：发表学术论文 3 篇，其中 EI/SCI 索引 3 篇；

技术成果：申请发明专利 2 项，授权软件著作权 1 项；

交流成果：参加国际会议，与国内外同领域内专业人员加强交流合作，了解领域内学科发展前沿；邀请国内外同领域知名专家学者赴华讲学并开展学术交流。

人才培养成果：协助培养硕士 2 名。

技术报告：技术方案报告 1 份；系统软件设计报告 1 份；系统软件用户手册 1 份；系统研制总结报告 1 份。

■ 成果提供形式

序号	名称	数量	形式
1	连续道路损伤检测与智能评估系统	1	软件可执行文件+演示视频+高性能计算机
2	系统技术方案报告	1	纸质+光盘
3	系统软件设计报告	1	纸质+光盘
4	系统软件用户手册	1	纸质+光盘
5	系统研制总结报告	1	纸质+光盘
6	论文+专利	6	纸质+光盘

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

西安工业大学是一所具有深厚军工行业背景的高校，在国防科研和军民两用技术领域拥有独特的优势。学校高度重视科研平台建设，项目申请团队依托学校建立了包括“新型网络与检测控制国家地方联合工程实验室”在内的多个高水平科研基地。此外，还建有自主系统智能检测与控制陕西省高校工程研究中心、西安市军民两用智能测评技术重点实验室以及陕西省军民装备智能测试与评估工程技术研究中心等省部级及市级平台，为科学研究提供了坚实的硬件与制度

保障。

在科研实力方面，该校团队展现出强大的项目承担能力与技术积累。团队先后主持了包括科技部重点研发计划、国家自然科学基金面上项目以及中央军委科技委、装备发展部、国防科工局等在内的国家级科研项目 20 项，同时主持或参与了来自中国兵器科学研究院及省市科技厅的横向与纵向项目 60 余项，累计承担科研经费近 5000 万元。这些经历不仅证明了其在复杂场景多维信息融合与智能处理领域的领先地位，也体现了其在多源信息融合、智能检测与控制、计算机视觉等核心技术上的深厚积淀。

凭借卓越的科研产出，西安工业大学在科技奖励与教学成果上屡获殊荣。团队曾荣获国家质量监督检验检疫总局“科技兴检奖”、陕西省科学技术进步奖二等奖等多项重要奖项，并在教育部“新工科”研究与实践项目及产学研协同育人项目中取得突破性进展。目前，学校已具备完善的实验平台和软硬件支持能力，能够充分满足高速公路表面损伤智能检测与评估等前沿项目的理论研究与仿真实验需求，是推动相关领域技术创新的重要力量。

2. 技术力量及人员构成

姓 名	单 位	性别	技术职称	专 业	在项目中担任 具体工作
邱若海	西安工业大学	男	副教授	系统工程	项目负责人
李亮亮	西安工业大学	男	讲师	机械电子工程	算法总体设计
韩特	陕西交通控股集团有限公司延延分公司	男	高级工程师	交通运输工程	样本库构建
康志荣	陕西交通控股集团有限公司延延分公司	男	高级工程师	土木工程	样本库构建
王海渊	陕西高速公路工程试	男	正高级工	交通工程	样本库构建

	验检测有限公司		程师		
吕志刚	西安工业大学	男	教授	控制科学与工程	系统总体设计
李晓艳	西安工业大学	女	副教授	信息与通信工程	项目管理
郜辉	西安工业大学	男	讲师	控制科学与工程	评估系统设计
路鑫	陕西高速公路工程试验检测有限公司	男	正高级工程师	道路工程	评估方案设计
张国宏	陕西交控飞行技术有限公司	男	正高级工程师	综合系统科学	评估方案设计
申连平	陕西交通控股集团有限公司延安分公司	男	高级工程师	岩土工程	智能检测验证
李安琦	陕西交控飞行技术有限公司	男	助理工程师	物联网工程	数据采集
黄晶晶	陕西高速公路工程试验检测有限公司	女	助理工程师	材料化学	评估验证
张全兵	陕西交控飞行技术有限公司	男	中级工程师	土木工程	数据预处理
张艺莹	陕西交控飞行技术有限公司	女	助理工程师	材料科学与工程	数据采集
许韞韬	西安工业大学	男	工程师	控制工程	评估系统设计

3. 各自承担的主要工作

根据项目研究大纲，本项目由邱若海担任项目负责人，全面负责项目的总体统筹工作，确保项目按计划推进。在核心技术架构方面，吕志刚主导总体设计，而李亮亮则负责算法的总体设计及算法开发工作，以支撑项目的核心功能实现。李晓艳负责项目管理相关工作。在具体系统实现与开发环节，郜辉和许韞韬共同承担了评估系统的设计工作。

韩特、康志荣、王海渊、路鑫、张国宏、申连平、李安琦、黄晶晶、张全兵、张艺莹作为项目依托工程单位成员，主要负责道路病害样本采集、样本库的构建、智能检测评估验证等内容及其相关协调工作。

整个团队分工明确，涵盖了从顶层设计到具体软硬件开发的各个环节。

4. 项目主要负责人情况

姓 名	邸若海	性别	男	年龄	39
职 称	副教授	学历	博士研究生	毕业时间	2016 年 6 月
毕业院校	西北工业大学		所学专业	系统工程	
专业工作年限	9 年		从事项目经 理年限	6 年	
注册执业资格			教师资格证		
担任的职务及责任			项目负责人		
主要工作经历及业绩：					
参加过的类似项目名称			担任职务	联系电话	
煤矿智能化安全监测与行为识别预测判定系统开发			项目负责人	15002916178	
物联网集成系统虚实共生测试验证与示范应用			项目负责人	15091656101	
基于贝叶斯网络的无人机集群效能智能评估模型研究			项目负责人	029-84706319	
军民无人装备可靠性智能测评及国产化软件系统			项目负责人	029-86173055	

5. 科研团队情况

申请人所在的创新团队依托国家级“新型网络与检测控制国家地方联合工程实验室平台”成立于 2010 年，建设的平台有：自主系统智能检测与控制陕西省高校工程研究中心、陕西高校青年创新团队、西安市军民两用智能测评技术重点实验室、陕西省军民装备智能测试与

评估工程技术研究中心。

团队先后主持科技部重点研发计划、国家自然科学基金面上项目、中央军委科技委、中央军委装备发展部、国家国防科技工业局、火箭军研究院等国家级科研项目 20 项，主持或参与中国兵器科学研究院、陕西省科技厅重点研发计划项目、陕西省交通厅项目、西安市科技局项目、企业横向项目 60 余项，累计承担科研经费近 5000 万。研究成果获国家质量监督检验检疫总局“科技兴检奖”1 项，陕西省科学技术进步奖二等奖 2 项，陕西高等学校科学技术奖二等奖 2 项。首批教育部“新工科”研究与实践项目 1 项、教育部产学研协同育人项目 4 项，陕西省高等学校教学改革研究项目 2 项，获陕西省教学成果二等奖 1 项，院校科技一等奖两项。

团队依托学校军工行业背景及承担的科研课题，在复杂场景多维信息融合与智能处理方向展开了深入的研究，在多源信息融合、智能检测与控制、计算机视觉与图像处理方面有较好的研究基础和相应的实验平台。这些平台为本项目的理论研究及仿真实验提供了良好的工作环境和软硬件支持，基本可以满足本项目的实验需求。

■ 科研项目

序号	项目名称	来源单位
1	云端协同 XXXX 目标识别与跟踪系统	国防科工局
2	超常条件下适合低慢小无人机的 人体目标跟踪新方法研究	国家自然科学基金委
3	****无人机技术研究	中央军委科技委
4	提升恶劣 XXXX 研究	中央军委科技委

5	基于鹰眼视觉仿生的目标识别与 XXX 模型研究	中央军委装备 发展部
6	无人驾驶感知数据多维计量方法与 评估系统	国家重点研发计划
7	异构车域网多模式自适应切换/接入 方法	国家重点研发计划
8	计及资源约束与可信评测的军民载 具智能运维决策研究	陕西省科技厅
9	云端协同下公共安全目标智能识别 与跟踪系统	陕西省科技厅
10	结合国产 AI 模块与低慢小平台的河 道污染智能监测系统	陕西省科技厅
11	基于深度神经网络的煤矿不安全行 为识别系统	陕西省科技厅
12	基于多模态融合模型的车载复杂交 通环境智能感知系统	陕西省科技厅
13	单兵 XXXX 的感知技术研究	中国兵器工业集团
14	复杂环境下自主目标识别与跟踪警 戒机器人	陕西省知识产权局项目
15	基于视频结构化技术的公共场所多 人姿态识别与跟踪系统	西安市科技局
16	互联网+智慧焊接数据监测系统	西安市未央区科技局
17	基于视频结构化的智慧城管案件系 统	西安市未央区科技局
18	XX 试验图像处理及运动分析平台系 统设计及软件研制	中国兵器第 202 研究所
19	水下图像处理及运动分析/视景仿真 系统	中国兵器第 202 研究所
20	无损检测中焊缝 X 射线底片数字化 仪及焊缝图像缺陷检测识别系统	陕西省科技厅
21	高性能承压容器射线影像高清数字 化装置与典型缺陷智能评估系统	陕西省科技厅
22	工业射线底高清晰成像设备研制与 辅助分类管理系统	西安特种设备检验研究院 陕西西宇无损检测有限公司
23	射线检测中胶片数字化与缺陷智能 分析技术研究及推广	山东省特种设备检验研究院

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

项目以 G65 包茂高速陕西境内西安至镇安段运营公路和 G2211 长延高速陕西境内延安至延川段运营公路为依托工程，作为项目的主要的数据采集和研究成果验证场地。

包茂高速陕西境内西安至镇安段是国家高速 G65 包茂高速的核心组成部分，也是陕西省“2637”高速公路路网中贯通南北中轴线的重要路段，起于西安绕城高速曲江枢纽，向南经长安、柞水，止于镇安县城，串联关中平原与秦巴山区，分阶段建成通车，其中西安至柞水段于 2006 年通车，全线于 2009 年贯通运营，主线采用双向四车道标准建设，平原段设计速度 100km/h，秦岭山区段设计速度 80km/h，路基宽度 24.5 米，为全封闭、全立交式高速公路。G65 包茂高速陕西境内西安至镇安段运营公路隶属于陕西交通控股集团有限公司西镇分公司管理。

长延高速陕西境内延安至延川段（简称“延延高速”）是国家高速 G2211 长延高速的重要组成路段，同样是陕西省“2637”高速公路路网中 7 条东西横向线之一、延吴线的延伸段，同时还是联系陕西省与山西省的便捷运输通道，起于延安市安塞县马家沟，设枢纽立交与包茂高速相接，向东途经姚店、甘谷驿、文安驿、延川等区域，于刘家畔附近设特大桥跨越黄河，与山西省霍州至永和高速公路相连，主线全长约 116.35 公里，于 2015 年 10 月 14 日全线建成通车，2018 年 12 月 29 日与山西霍永高速正式连通，成为陕西又一条向东出省大

通道。该路段全线采用双向四车道高速公路标准建设，技术指标符合国家现行相关规范，其中姚店至延川段约 48 公里设计速度为 100 公里/小时，路基宽度 26 米，其余路段设计速度 80 公里/小时，路基宽度 24.5 米，桥涵设计汽车荷载采用公路-I级，为全封闭、全立交式高速公路，配套完善的交安、监控、收费、照明等设施，沿线设有桥梁 162 座、隧道 13 座。G2211 长延高速陕西境内延安至延川段运营公路隶属于陕西省交通建设集团公司延分公司管理。

2. 投资来源

无

3. 工程进度与项目科研进度的配合

项目实施主要分为四个阶段：

阶段	开始日期	结束日期	计划完成内容
第 1 阶段	2026.3.1	2026.6.30	1) 资料收集，制定系统整体方案，完成系统功能模块划分，完成昇腾 AI 硬件平台系统搭建； 2) 研究基于深度学习的道路损伤检测。
第 2 阶段	2026.7.1	2026.12.31	1) 对 YOLO 目标检测算法进行优化与改进，为后续轻量化提供支撑； 2) 采集道路损伤图像，建立本地数据集； 3) 参加 1 次国内外学术交流。
第 3 阶段	2027.1.1	2027.6.30	1) 研究基于残差结构的轻量化目标检测算法； 2) 初步完成基于国产昇腾 AI 边缘平台的无人机连续道路损伤检测与智能评估系统测试与匹配调试； 3) 撰写相关学术论文 1 篇，参加 1 次国内外学术交流。

第 4 阶段	2027.7.1	2027.12.31	1) 产品改进, 提交出合格的产品, 产品资料整理, 文档归档, 培养研究生; 2) 编写项目总结报告, 总结研究成果和经验教训; 3) 撰写相关学术论文 1 篇, 申请发明专利 1 项, 参加 1 次国内外学术交流。
--------	----------	------------	---

4. 组织管理形式

本项目实行项目负责人负责制, 由邱若海副教授担任项目负责人, 全面主持项目的研究与管理工作。项目组依托西安工业大学“新型网络与检测控制国家地方联合工程实验室”等科研平台, 组建了一支涵盖系统工程、控制科学、信息通信等多学科背景的科研团队。团队成员分工明确, 分别负责硬件总体设计、算法总体设计、评估系统设计、软件开发及算法开发等工作。项目实施过程中, 将严格执行阶段性目标管理, 按四个阶段推进研究任务, 定期召开项目进展会议, 协调解决关键技术问题, 确保项目按期高质量完成。同时, 加强与合作单位的沟通协作, 促进研究成果的工程化应用。

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	19.5	合 计	39	19.5	0
工程配套研究经费	0	1. 设备费	0	0	0
单位自筹	19.5	(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	20.6	10.3	0

		(1) 材料费	10	5	0
		(2) 测试化验实验加工费	0	0	0
		(3) 燃料动力费	0	0	0
		(4) 差旅费/会议费/国际合作与交流费	2	1	0
		(5) 出版/文献/信息传播/知识产权费	8.6	4.3	0
		(6) 其他费用	0	0	0
		3. 劳务费	15.28	7.64	0
		(1) 专家咨询费	2.56	1.28	0
		(2) 聘用人员劳务费	12.72	6.36	0
		(3) 其他劳务费	0	0	0
		(二) 间接费用	3.12	1.56	0
		4. 管理费	3.12	1.56	0
		5. 绩效支出	0	0	0

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。

6.1 材料费

本项目预计支出省交通运输厅补助材料费5万元。

测算方法：依据《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[2222022]3号），按照课题研究工作的实际需求进行测算和编制。

测算依据：主要依据市场规律，以及目前市场价格作为材料费测算的依据，在测算过程中通过厂家、供货单位以及查询政府采购网等电子产品报价网站等多种渠道，并取得供货商报价，以此保证价格合理性。根据研究和课题的要求，通过合理评估确定材料的数量。

具体说明：材料费支出明细如下表所示：

材料名称	规格型号	数量	单位	单价(元)	小计(万元)	用途
高清摄像头模块	海康威视 1200 万面阵	3	个	800	0.24	数据采集模块： 用于采集图像信息，获取交通道路概况。
图像采集卡	高速 PCIe 视频采集卡	3	个	4000	1.2	
网线	千兆六类	2	箱	200	0.04	
深度学习 GPU 显卡	华硕 RTX5070 12G	2	个	5200	1.04	高速计算模块： 支撑基于深度学习方法的综合建模和模型迁移理论及其关键算法，达到高速运算及模型日常训练要求
计算主板	AMD B850M+9900X	2	个	4100	0.82	
电源	鑫谷 MU-850G	2	个	1400	0.28	
机箱	CoolerMaste GX1250	2	个	1200	0.24	
计算内存	DDR5 32G	2	个	2200	0.44	数据存储模块： 海量图像数据的实时及完全存储，为后续计算模型提供数据支撑
机械硬盘	希捷 4TB	2	个	1500	0.3	
SSD 硬盘	三星 2TB SSD	2	个	2000	0.4	
合计					5	

项目的材料费具体测算方法和依据如下：

(1) 数据采集模块：本专题研究聚焦于多场景图像数据的高效采集与处理算法，需要购置高清摄像头模块以实现对不同环境下的图像精准捕捉；图像采集卡用于将摄像头模块采集到的模拟图像信号转换为数字信号，并传输至计算机进行后续处理与分析，是图像数据采集流程中的关键转换设备；为确保图像数据能够稳定、高速地传输至

计算机，需配置相应的优质网线作为连接媒介，保障数据采集系统的可靠运行。

(2) 高速计算模块：本专题研究立基于深度学习的建模方法和模型迁移理论，当前已有的计算设备不足以满足深度学习的计算需要，因此需要加装 GPU 显卡提升原有计算性能，开展数据的分析和建模的研究；对计算设备的显卡进行升级之后，需要配置与之相适配的主板、电源、内存、机箱模块，本专题共需要 2 台高性能计算设备，故一共需要升级 2 台计算设备。

(3) 数据存储模块：本专题需要对实时采集的海量图像数据进行快速存储及处理，并保证数据安全性及可靠性，因此需要购买机械硬盘、SSD 硬盘等存储材料，本专题对 2 台升级后的每台计算平台配备 2 个不同类型存储模块，因此每个存储模块需要 2 个。

6.2 差旅费

本专题预计支出省交通运输厅补助差旅费 1 万元。

测算方法：依据《陕西省省级机关差旅费管理办法》（陕财办行〔2014〕54 号）及《陕西省财政厅关于调整省级机关差旅住宿费标准等有关问题的通知》，按照课题研究工作的实际外业检测与调研需求进行测算和编制。

测算依据：

交通费测算：省内短途出行（西安至周边地市，距离<700 公里）：主要采用高铁或动车出行，依据铁路部门官方票价测算；部分偏远路段检测需租赁车辆或乘坐长途客车，按实际里程及市场租车价格测算。省内长途出行（如涉及陕北、陕南远距离路段）：若时间紧迫需乘坐飞机，机票费用按照经济舱全价票的折扣价测算；原则上优先选择高铁。

住宿及公杂费测算：住宿费：严格执行陕西省财政厅发布的差旅住宿费限额标准。西安市及省内其他地级市一般地区，处级及以下人员住宿费标准上限为 350 元/人·天（参考最新标准，预留一定浮动空间按 350 元计）。公杂费（市内交通及伙食补助）：按照陕西省标准，省内出差公杂费及伙食补助合计约 180 元/人·天（其中伙食补助 100 元，市内交通 80 元）。

具体说明：本项目《高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究》需在陕西省内多条典型高速公路开展路面病害数据采集、算法验证及系统测试工作。预计开展 4 次集中外业出差，每次 2 人，平均每次 3 天。主要出差地点包括：

西安周边路段（如绕城高速、西临高速）：用于系统初步调试与短途测试。

陕南/陕北典型路段（如西汉高速、延西高速）：用于不同气候、不同荷载条件下的复杂路面损伤数据采集与模型验证。

省交通厅/项目依托单位：用于阶段性成果汇报与技术对接。

差旅费支出明细测算表：

出差任务内容	出差地点	次数	天数(天)	人数	住宿费(元/人/天)	交通费(元/人/次)	公杂补助(元/人/天)	单次人均成本(万元)	总金额(万元)
路面数据采集与系统测试(西安周边)	西安-周边高速	2	2	2	350	200	180	0.126	0.252

出差任务内容	出差地点	次数	天数(天)	人数	住宿费(元/人/天)	交通费(元/人/次)	公杂补助(元/人/天)	单次人均成本(万元)	总金额(万元)
复杂路况验证与模型修正(陕南/陕北)	西安—汉中/延安	2	4	2	350	600	180	0.186	0.372
阶段性成果汇报与技术对接	西安—省交通厅	2	1	2	0	100	100*	0.020	0.040
项目结题现场核查配合	项目指定路段	1	3	2	350	400	180	0.169	0.169
不可预见差旅备用	省内其他地区	-	-	-	-	-	-	-	0.167
合计		7	-	-	-	-	-	-	1.000

6.3 知识产权事务费

本专题预计支出省交通运输厅补助知识产权事务费 4.3 万元。

测算方法：依据《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），按照课题研究工作的实际需求及预期成果产出进行测算和编制。

测算依据：主要依据市场规律，以及目前市场价格作为知识产权事务费测算的依据。在测算过程中通过查询国家版权局、相关学术期刊官网、正规专利代理机构以及政府采购网等多种渠道，并取得服务商报价或参考同类项目支出标准，以此保证价格合理性。根据研究课题的预期考核指标，合理评估确定各项成果的申报数量及费用标准。

具体说明：知识产权事务费支出明细如下表所示：

序号	支出项目	数量/单位	单价（元）	总价（元）	备注/测算理由
1	计算机软件著作权登记费	1 项	2,000	2,000	用于保护课题研发的软件系统，按中国版权保护中心收费标准及代理服务费用测算。
2	学术论文发表版面费	3 篇	—	41,000	用于支持课题研究成果的学术交流与传播。
2.1	其中：SCI 索引收录论文	2 篇	18,000	36,000	拟投稿国际高水平期刊（OA 模式），依据期刊平均版面费及汇率测算（约 \$2,500/篇）。
2.2	其中：EI 索引收录论文	1 篇	5,000	5,000	拟投稿工程领域权威期刊，依据国内核心

序号	支出项目	数量/单位	单价(元)	总价(元)	备注/测算理由
					期刊平均版面费测算。

6.4 专家咨询费

本专题预计支出省交通运输厅补助专家咨询费 1.28 万元。

测算方法：依据《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）及参照《中央财政科研项目专家咨询费管理办法》相关规定，按照课题研究各阶段的实际咨询需求进行测算。

测算依据：

开支范围：用于支付项目实施过程中临时聘请的咨询专家的费用，严禁支付给本项目组成员及项目管理相关人员。

执行标准（税前）：

高级专业技术职称人员（现场咨询）：按 1000 元/人天测算。

高级专业技术职称人员（通讯/线上咨询）：按 600 元/人次测算。

行业权威专家（正高/知名专家，现场咨询）：按 1500 元/人天测算。

具体说明：本项目拟在研究全周期组织 3 个阶段的专家咨询活动，共计邀请专家 13 人次，具体安排及测算如下：

咨询阶段	咨询形式	专家构成及人数	工作量	单价标准	小计金额(元)	备注
1. 方案论证/启动咨询	现场会议	5人 (1名行业权威+4名高工)	1天	权威:1500元 高工:1000元	5,500	对技术路线、检测方案进行集中论证

咨询阶段	咨询形式	专家构成及人数	工作量	单价标准	小计金额(元)	备注
2. 中期检查/技术指导	通讯/线上	3人 (3名高工)	1次	600元/人次	1,800	针对算法模型瓶颈及数据进展进行书面/线上指导
3. 成果鉴定/验收预演	现场会议	5人 (1名行业权威 + 4名高工)	1天	权威:1500元 高工:1000元	5,500	对检测报告、软著、论文进行预审
合计		13人次			12800	

6.5 专家咨询费

本专题预计支出省交通运输厅补助劳务费 6.36 万元。

测算方法：依据《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）及《陕西省省级科研计划项目资金管理办法》，按照课题研究工作的实际需求及参与人员的贡献度进行测算和编制。

测算依据：以陕西省相关科研经费管理规定为指导，结合《高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究》工作的实际需求，参考省内高校（如长安大学、西安交通大学等）硕博研究生助研津贴及外聘技术人员薪酬水平进行测算：

硕士研究生：主要承担基础数据处理、算法代码编写及日常实验工作，按 0.15 万元/人月测算。

博士研究生：主要承担核心算法攻关、模型优化及高水平论文撰写，按 0.25 万元/人月测算。

外聘技术人员：主要用于高速公路外业数据采集辅助及图像数据标注工作，按 0.16 万元/人月测算。

具体说明：劳务费支出明细如下表所示：

内 容	数 量 (人)	工作时间 (人/月)	单价(万 元 / 人 月)	金额(万 元)	备注
硕 士 生	2	36 (18 个月×2 人)	0.15	5.40	负责数据预处理、系统搭建及常规实验，周期覆盖项目中后期。
外 聘 人 员	3	6 (2 个月×3 人)	0.16	0.96	用于高峰期高速公路外业数据采集辅助及海量图像数据标注。
合 计	—	42	—	6.36	

6.6 管理费

本专题预计支出省交通运输厅补助管理费 1.56 万元。

测算方法：依据《西安工业大学科研经费管理办法》及陕西省省级科研项目资金管理相关规定，按照项目总经费的一定比例提取，用于补偿学校为项目研究提供的仪器设备及房屋占用、水电气暖消耗、有关管理费用补助等间接成本。

政策依据：严格执行依托单位（西安工业大学）现行科研经费管理规定。根据学校财务及科研管理部门核定，此类省级交通厅立项项目，学校按项目总经费的 8%提取管理费。

支出范围：管理费主要用于弥补学校提供的现有仪器设备使用费、实验室及办公场所占用费、水电暖消耗、图书馆资源使用费、科

研管理人员绩效及日常行政运行成本等间接费用。该费用不由项目组直接支配，由学校财务部门统一划转管理。

具体说明：本项目申请总经费为 19.50 万元。根据西安工业大学管理费提取标准（8%）进行测算：

$$\text{管理费} = \text{项目总经费} \times \text{提取比例}$$

$$\text{管理费} = 19.50 \text{ 万元} \times 8\% = 1.56 \text{ 万元}$$

故本专题预算列支管理费 1.56 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）	0
		（1）授权发明专利	0
		（2）实用新型	0
		（3）外观设计	0
		2、软件著作权授权数（项）	1
		3、发表论文（篇）	3
		（1）其中 SCI 索引收录数	1
		（2）其中 EI 索引收录数	2
		（3）其它	0
		4、著作（部）	0
		5、制订标准数（项）	0
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	0
	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

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(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	1
		(1) 新工艺（或新方法模式）	1
		(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
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	
		(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	2
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	2
		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

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		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	无
		其他需要说明的情况	

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

1.项目预期目标（项目的考核目标）

本项目针对高等级公路养护需求与传统检测手段的矛盾，聚焦复杂路况下小尺度、低对比度病害表征困难和现有深度模型的局限性，开展系统性研究。项目将高分辨率图像与地理时空信息耦合，挖掘道路结构与时序特征的协同表达，提升病害定位精度和鲁棒性；基于物理成像退化建模，重构自适应对比度增强映射，提升病害视觉可辨性；结合道路特征，构建不确定性量化与主动学习模型，确保检测结果的可解释性和高置信度；开展多粒度病害演化分析，构建融合 PCI 指数的深度监督评估系统，实现自动化评级与可视化呈现，为智慧养护决策提供科学支撑。

- 1) 连续图像不低于 5 张；
- 2) 涵盖横向，纵向，龟裂，块状裂缝等四种病害类型；
- 3) 连续道路病害检测精度不低于 90%（基于目标检测数据，计

算检出率);

4) 连续道路病害量化精度不低于 90% (基于图像分割数据, 计算边界检出率)。

2.提交的研究成果及其形式

1) **理论成果:** 开展连续道路图像采集与拼接、道路图像自动化损伤目标检测、损伤区域像素级形态特征提取、道路损伤尺寸提取研究, 形成一套连续道路损伤检测与智能评估系统。

2) **论著成果:** 发表学术论文 3 篇, 其中 EI/SCI 索引 3 篇;

3) **技术成果:** 申请发明专利 2 项, 授权软件著作权 1 项;

4) **交流成果:** 参加国际会议, 与国内外同领域内专业人员加强交流合作, 了解领域内学科发展前沿; 邀请国内外同领域知名专家学者赴华讲学并开展学术交流。

5) **人才培养成果:** 协助培养硕士 2 名。

6) **技术报告:** 技术方案报告 1 份; 系统设计报告 1 份; 系统用户手册 1 份; 系统研制总结报告 1 份。

3.经济、社会、环境效益分析

1) 本项目研发的智能检测与评估系统能够实现自动化、高精度的病害识别与量化, 将检测精度提升至 90%以上。

2) 通过精准掌握路面状况, 可避免过度养护或养护滞后, 优化养护决策, 从而显著延长道路使用寿命 (目前约为 17 年), 减少全生命周期的维修投入。

3) 项目较低投入, 产出包含核心算法、系统及数据库在内的成

套技术成果，并计划发表 3 篇高水平论文及申请多项知识产权，具有极高的科研投入产出比，后续成果转化与推广潜力巨大。

4) 项目突破了复杂路况下小尺度病害检测难、量化不准的技术瓶颈，提出的改进 YOLOv5 算法及高可信表征模型填补了行业技术空白，推动了交通基础设施检测向数字化、智能化转型。

5) 项目还将协助培养 2 名硕士研究生，并通过构建开放共享的病害数据库，为行业标准的完善及智慧交通人才的储备提供坚实支撑，具有深远的社会影响。

九、其它需要说明的问题

无。

十、申请单位意见

同意申报。本项目已经明确落实了依托工程、配套经费。


单位负责人：(签字) 

年 月 日



高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究 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“高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究”（项目编号：25-57K）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，研究目标基本明确，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，基本具备开展研究工作的条件。

三、预期成果完全覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架高度契合。

与会专家同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

1. 进一步突出无人机检测技术与现有检测手段的比较优势；
2. 进一步落实依托工程和配套研究经费。

主任委员：



2026年3月10日

专家审查意见表

项目名称	高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究				
专家姓名	徐沁晨	职务/职称	正高	专 业	公路工程
专家单位	西安公路研究院有限公司			联系电话	1391855657

评审意见

项目针对高速公路表面损伤检测技术, 引入无人机采集与智能识别等相关技术研究, 具有创新性和实用性建议。

1. 引入无人机与现有检测设备对高速公路表面损伤采集的对比研究。

2. 细化考核指标的边界条件与标准, 明确具体检测病害的检测精度。

3. 明确依托项目和配套经费

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	高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究				
专家姓名	叶明	职务/职称	教授	专业	道路工程
专家单位	长安大学			联系电话	1308757538

评审意见

本项目开展高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究，具有较好的工程应用价值。

项目研究内容明确，技术方案科学合理，前期研究基础较好，同意通过研究大纲评审。

建议：

1. 明确路面病害损伤的类型；
2. 明确路面损伤智能检测与评估的指标。

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	高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究				
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

公路表面损伤检测与评估近年来越来越受到重视，本项目基于现状，开展相关研究，意义重大，同意立项，建议如下：

1. 研究背景和必要性资料较详，建议更新至2025年底，并作合理分析；

2. 研究内容应进一步梳理，尤其是与~~研究~~项目立项相对比，评估方法、指标、体系应进一步梳理；
表面损伤的定义、类型，

3. 研究大致的思路应进一步梳理，力求清晰、技术路线图应补充；

4. 配套经费应进一步落实。

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 (25-57K)

项目名称	高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究				
专家姓名	王松根	职务/职称	研究员	专 业	公路工程
专家单位	原山东省交通厅公路局			联系电话	13488700091

评 审 意 见

本项目基于新兴起的无人机平台和先进的图像处理技术，结合新一代信息技术与制造技术的基础上，提出基于道路巡检无人机的路面裂缝病害检测方法。

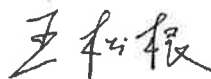
采用无人机沿道路中央自主巡航采集路面状态信息，依次通过高速公路路面识别、神经网络裂缝判断、裂缝病害识别等步骤对航拍影像中裂缝病害进行识别和检测。实现了无人机巡航裂缝病害的定位、识别、检测等功能具有一定的创新性。提交的研究大纲，研究内容较全面、技术路线和实施方案基本可行，项目承担单位和研究团队人员组成可满足项目研究要求，并有一定研究工作基础，基本具备开展项目研究的条件，但依托工程和配套研究经费有待落实。

原则同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

1. 利用无人机平台对公路路面裂缝进行智能检测与评估是公路巡查的发展方向。但公路路况检测仅对路面裂缝进行检测时不够的，尤其是无人机平台，检测养护人员不容易检测到的部位恰恰是重点，如桥梁、隧道、高路基边坡、标志牌等。
2. 路面病害种类很多，主要有裂缝类、破损类、变形类等，还有车辙、抗滑和弯沉等指标。仅检测裂缝不能评定路况指数。该技术现阶段可做为道路巡查使用，及时发现和清除路面障碍，突出它的快速、高效优势。
3. 进一步与现有路面检测车进行功能、精度、效率等方面的比较，梳理出该项目的比较优势。
4. 项目依托工程和配套研究经费有待落实。

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）

专家审查意见表

项目名称	高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究				
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、本项目结合机器视觉技术，开发无人机在道路工程裂缝病害的检测应用，以期推进我国道路巡检维护设备现代化、智能化水平，项目研究工作具有一定必要性，大纲编写较为认真，方案实施基本可行。
- 二、路面表面损伤病害种类较多，包括裂缝、车辙、坑槽、泛油、修补等，建议课题题目进一步聚焦裂缝病害的智能检测与评估。
- 三、路面检测按目的来划分有日常巡检、定期检测、专项检测、应急检测等，不同类型检测的目标范围、精度、频率都有所不同，不能一概而论，建议进一步明确无人机检测的定位。
- 四、采用无人机进行路面病害检需要考虑路域行车道范围内飞行许可的问题，以及飞行成本问题。

评审专家（签字）：

2016 年 3 月 10 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究 (项目编号: 25-57K)

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	2/8/2025
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	网上评审
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	网上评审

专家意见处理表

项目名称：高速公路表面损伤智能检测与评估技术研究

(项目编号：25-57K)

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	- 进行无人机与现有检测设备对高速公路表面损伤采集的对比研究。 - 细化考核指标的边界条件与标准，明确检测病害的检测精度。 - 明确依托工程和配套经费。	- 已在项目研究的背景和必要性部分，添加了无人机与现有检测设备对高速公路表面损伤采集的对比分析。 - 已在项目预期目标和研究内容部分明确横向，纵向，龟裂，块状裂缝四种病害类型。 - 已对第五章明确了项目的依托工程，第六章增加了项目经费估算及资金筹措情况，整体进行修改。
2	景宏君	- 研究背景和必要性资料较旧，建议更新至2025年底并作理性分析。 - 研究内容进一步梳理，评估方法，指标，病害类型进一步明确。 - 研究大纲撰写应进一步梳理，技术路线图应补充。 - 配套经费依托工程应落实。	- 已将数据更新至2025年，在研究背景和必要性部分进行了具体修改和详细描述。 - 将项目研究内容修改为4个方面，在研究内容、实施方案章节进行了具体修改和详细描述。预期目标、技术指标部分添加评估方法，详细技术指标，病害类型等相关内容。 - 研究大纲与技术路线图已经补充在第三部分实施方案中补充，具体在主要研究内容及实施方案部分对整体技术路线做了概括总结，并绘制了技术路线图。 - 已对第五章明确了项目的依托工程，第六章增加了项目经费估算及资金筹措情况，整体进行修改。
3	王松根	利用无人机平台对公路路面裂缝进行智能检测与评估是公路巡查的发展方向。但公路路况检测仅对路面裂缝进行检测时不够的，尤其是无人机平台，检测养护人员不容易检测到的部位恰恰是重点，如桥梁、隧道、高路基边坡、标志牌等。	由于本项目主要是实现路面病害的检测，对于桥梁、隧道、高路基边坡、标志牌等并不涉及，为了进一步明确项目的落脚点，已在研究背景和必要性部分强调了检测养护人员不容易检测到的部位是作业重点，侧重于效率的提升。

		2. 路面病害种类很多，主要有裂缝类、破损类、变形类等，还有车辙、抗滑和弯沉等指标。仅检测裂缝不能评定路况指数。该技术现阶段可作为道路巡查使用，及时发现和清除路面障碍，突出它的快速、高效优势。 3. 进一步与现有路面检测车进行功能、精度、效率等方面的比较，梳理出该项目的比较优势。 4. 项目依托工程和配套研究经费有待落实。	2. 已在研究背景和必要性部分分析了无人机具有高效的优点，同时在项目预期目标部分明确横向、纵向、龟裂、块状裂缝四种病害类型。 3. 在项目背景和立项必要性部分已补充通过无线传输实时路况信息达到道路巡查目的可能性，突出本项目开展的优势。 4. 已对第五章明确了项目的依托工程，第六章增加了项目经费估算及资金筹措情况，整体进行修改。
4	王振军	1. 明确路面病害损伤的类型。 2. 明确路面损伤智能检测与评估的指标。	1. 已在项目预期目标和研究内容部分明确横向、纵向、龟裂、块状裂缝等四种病害类型。 2. 已在预期目标、技术指标部分添加评估方法，详细技术指标，病害类型等相关内容。
5	吴传海	1、路面表面损伤病害种类较多，包括裂缝、车辙、坑槽、泛油、修补等，建议课题进一步聚焦裂缝病害的智能检测与评估。 2、路面检测按目的来划分有日常巡检、定期检测、专项检测、应急检测等，不同类型检测的目标范围、精度、频率都有所不同，不能一概而论，建议进一步明确无人机检测的定位。 3、采用无人机进行路面病害检测需要考虑路域行车道范围内飞行许可的问题，以及飞行成本问题。	1. 已在项目预期目标和研究内容部分明确横向、纵向、龟裂、块状裂缝等四种病害类型。 2. 已将进一步明确无人机检测的定位是人工难以到达的区域的专项检测，同时重点落在日常巡检和应急检测方面。 3. 本项目依托工程，基于提供的数据进行分析和处理，同时，依托工程进行采集序列，开展连续道路病害检测研究。

大纲评审委员会专家（签字）：张发贵

项目负责人（签字）：邱永海

