

项目合同编号：25-52K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究

承担单位：西安电子科技大学

项目负责人：何刚

通讯邮编、地址：陕西省西安市太白南路 2 号

传真、电话：029-88203116、18392173226

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月（注：软课题一般不超过两年，其

他一般不超过三年，起止时间由厅科技处统一填写）

陕西省交通运输厅制

项目合同编号：25-52K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究

承担单位：西安电子科技大学

项目负责人：何刚

通讯邮编、地址：陕西省西安市太白南路 2 号

传真、电话：029-88203116、18392173226

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月（注：软课题一般不超过两年，其

他一般不超过三年，起止时间由厅科技处统一填写）

陕西省交通运输厅制

填写说明:

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

一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

桥梁安全预警视觉智能感知系统包括以下部分，如图 1.1 所示：

1) 基于超分辨率特征重构的复杂桥梁病害感知；2) 基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量；3) 基于深度感知的桥梁周边船车碰撞检测。4) 基于多源异构数据融合的智能预警系统。

基于超分辨率特征重构的复杂桥梁病害感知技术实现对桥梁裂缝、剥落、钢筋外露等典型损伤的自动化、实时化识别。针对实际监控环境中病害目标尺寸小、成像模糊、背景干扰强的问题，项目将引入基于 Transformer 的小目标超分辨预处理模型，通过纹理增强与特征重建等技术手段，有效提升病害区域的成像质量与特征可分性，从而显著增强复杂环境下表观病害检测的鲁棒性与识别精度。

基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量突破传统接触式传感器的布控限制。该方法通过对图像中退化因素（如模糊、噪声、色偏、低对比度等）的自动分析，实现恶劣天气条件下的图像统一增强，为结构变形测量提供高质量的视觉输入。在此基础上，结合多靶标识别与跟踪算法，实现关键结构部位在复杂环境下的位移与振动毫米级监测，具有部署灵活、成本低、不干扰交通运行等优势，能够有效支撑桥梁在不同荷载工况下的动态响应分析。

基于深度感知的桥梁周边船车碰撞检测首先基于 RGB 图像实现对目标类型的准确识别；进而采用孪生网络结合深度估计算法，通过对比正常状态与实时状态图像的特征差异，精确判断目标与桥

梁结构之间的相对距离及运动趋势，实现对潜在碰撞风险的快速识别与可靠预警。

基于多源异构数据融合的智能预警系统通过融合病害识别输出、图像增强结果、结构变形特征与环境风险事件等多维数据，构建统一的风险评估体系，实现对桥梁健康状态的智能化综合判断，以及五级风险预警机制。模型将采用深度融合与规则驱动相结合的方法，使预警结果既具有数据驱动的准确性，又具备可解释性，便于管理单位进行科学决策。

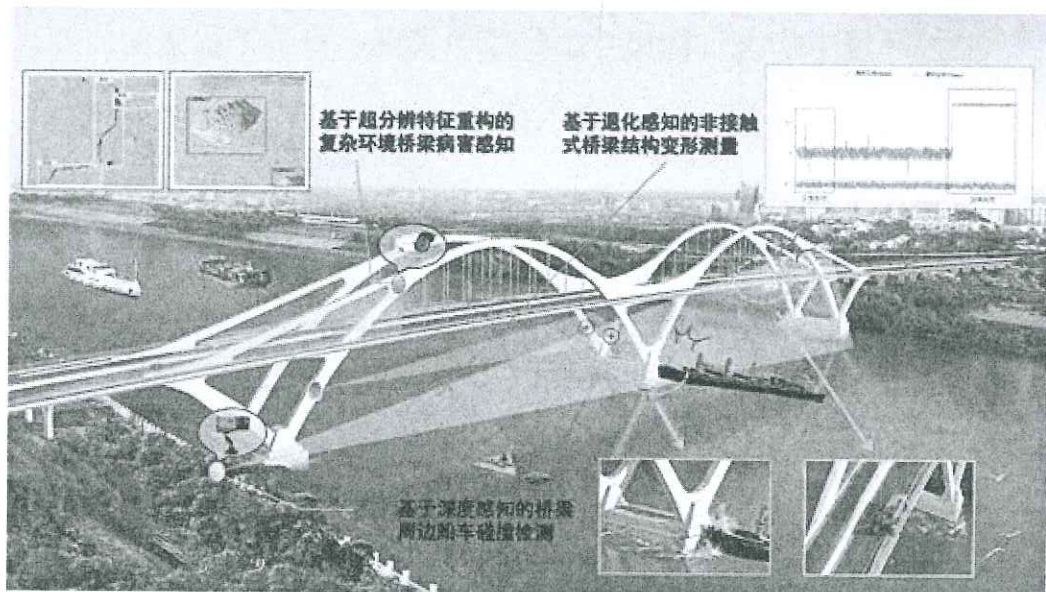


图 1.1 桥梁安全预警视觉智能感知系统

2. 技术关键

本研究将围绕桥梁病害识别、结构变形测量、周边环境灾害感知与多源融合预警四个核心方向展开系统性技术攻关，形成从图像获取、特征感知、智能诊断到综合预警的整体解决方案，为桥梁安全运维提供高效、精准、可长期部署的技术支撑。技术路线图如图

1.2 所示。

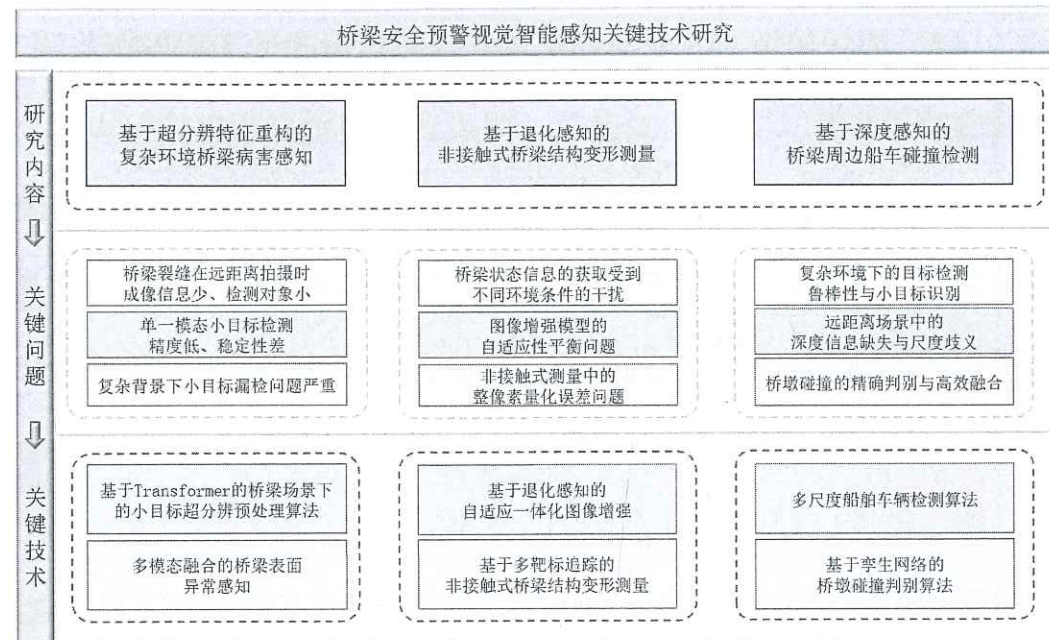


图 1.2 系统技术路线图

关键技术如下：

- ①构建面向桥梁表观病害的高性能视觉识别框架，实现对裂缝、剥落、露筋等典型损伤的自动化检测与实时化识别。
- ②研究基于退化感知语义增强的复杂环境多靶标位移测量技术，攻克恶劣天气下的图像质量提升难题，实现关键结构部位位移与振动的毫米级高精度监测。
- ③构建融合目标检测与深度估计的智能感知模型，精准解析环境目标与桥梁结构间的相对空间态势及运动趋势，实现对潜在碰撞风险的快速识别与可靠预警。
- ④构建多源异构信息融合的智能预警模型，统筹病害分布、结构变形特征与环境风险事件等多维数据，建立统一的风险评估体系，实现对桥梁健康状态的智能化综合研判及五级风险预警。

1.3. 依托工程（依托工作）

- (1) 依托国道 316 安康蜀河汉江大桥危桥改造工程健康监测工程；

二、考核指标

1.预期目标

本研究将围绕桥梁病害识别、结构变形测量、周边环境灾害感知与多源融合预警四个核心方向展开系统性技术攻关，形成从图像获取、特征感知、智能诊断到综合预警的整体解决方案，为桥梁安全运维提供高效、精准、可长期部署的技术支撑，预期达到以下目标：

①构建高性能视觉识别框架，实现对桥梁裂缝、剥落、钢筋外露等典型损伤的自动化、实时化识别。针对实际监控环境中病害目标尺寸小、成像模糊、背景干扰强的问题，项目将引入基于 Transformer 的小目标超分辨预处理模型，通过纹理增强与特征重建等技术手段，有效提升病害区域的成像质量与特征可分性，从而显著增强复杂环境下表观病害检测的鲁棒性与识别精度，裂缝自动识别精度不低于 95%。

②构建基于退化感知语义增强的复杂环境多靶标位移测量技术。该方法通过对图像中退化因素（如模糊、噪声、色偏、低对比度等）的自动分析，实现恶劣天气条件下的图像统一增强，为结构变形测量提供高质量的视觉输入。在此基础上，结合多靶标识别与跟踪算法，实现关键结构部位在复杂环境下的位移与振动毫米级监测，具有部署灵活、成本低、不干扰交通运行等优势，能够有效支撑桥梁在不同荷载工况下的动态响应分析，位移测量精度达到 1mm 以内，结构振动频率测量误差为 1.5%。

③研究基于视觉感知的船舶及车辆碰撞检测方法。针对突发性外部风险（如车辆偏航、船舶靠近等），项目将构建融合目标检测与深度估计的智能识别模型。该模型首先基于 RGB 图像实现对目标类型的准确识别；进而采用孪生网络结合深度估计算法，通过对比正常状态与实时状态图像的特征差异，精确判断目标与桥梁结构之间的相对距离及运动趋势，实现对潜在碰撞风险的快速识别与可靠预警，对船舶、车辆等外部风险目标的识别率为 97%。

④构建多源信息融合的智能预警模型。通过融合病害识别输出、图像增强结果、结构变形特征与环境风险事件等多维数据，构建统一的风险评估体系，实现对桥梁健康状态的智能化综合判断，以及五级风险预警机制。模型将采用深度融合与规则驱动相结合的方法，使预警结果既具有数据驱动的准确性，又具备可解释性，便于管理单位进行科学决策，系统端到端分析延迟为 2.7 秒，整体误报率控制在 4%。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

①病害识别能力：裂缝自动识别精度为 95%，对船舶、车辆等外部风险目标的识别率为 97%，能够稳定支持桥梁关键区域的全天候智能感知。

②结构变形测量性能：位移测量精度达到 1 mm 以内，结构振动频率测量误差为 1.5%，满足桥梁运行状态监测及趋势分析的精度需求。

③预警分析性能：系统端到端分析延迟为 2.7 秒，整体误报率控制在 4%，可支撑实时风险发现及分级预警响应。

④多路视频并发处理能力：系统支持 4 路视频流的同步接入与并发智能分析，包括病害检测、位移测量、风险目标识别等多任务协同处理。

3.经济和社会效益

实施桥梁安全预警视觉智能感知系统，可以显著提高桥梁的公共安全性，减少事故发生，降低维护成本，并延长桥梁的使用寿命。通过实时监测和预警，能够优化维护计划，减少资源消耗，保障了人员和车辆的安全。主要体现在以下几个方面：

（1）降低维护成本、延长使用寿命。通过实时监测桥梁状态，能够提前发现潜在问题，减少紧急修复的频率，从而降低维护费用，及时预警和早期干预有助于延长桥梁的使用寿命，减少重建和大规模修复的频率；

（2）提高公共安全。本系统通过多源感知技术，提供实时预警信息，能有效防止桥梁安全事故的发生，保障过桥人员和车辆的安全，在桥梁状况异常时，系统能够快速发出警报，协助相关部门迅速采取行动，减少事故损失；

（3）减少资源消耗。通过本系统的精准检测和预警，可以减少不必要的施工和修缮，有效降低建筑材料和能源的消耗。

4.成果提供形式

（1）提供一套基于多源视觉智能感知的桥梁安全监测与预警系

统原型；

(2) 撰写关键技术研究报告与系统测试验证报告；

(3) 申请专利 2-3 项；

(4) 形成《基于多源视觉感知的桥梁安全监测与预警系统技术指南》。

5.其他考核指标

开展媒体宣传 3 次，技术交流活动 2 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	1. 2026 年 3 月~2026 年 5 月：开展调查分析制定研究大纲； 2. 2026 年 6 月~2026 年 8 月：完成多场景的桥梁户外视觉数据集的构建； 3. 2026 年 9 月~2026 年 10 月：完成基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量构建； 4. 2026 年 11 月~2026 年 12 月：计划针对安康蜀河汉江大桥健康监测项目进行图像增强算法、结构变形测量算法的初步试验；
2027 年	1. 2027 年 1 月~2027 年 4 月：开发基于超分辨率特征重构的复杂环境桥梁病害感知算法； 2. 2027 年 5 月~2027 年 8 月：进行桥梁表面异常感知算法的实地效果测试。 3. 2027 年 9 月~2027 年 12 月：开发基于深度感知的桥梁周边船车碰撞检测算法，构建基于多源异构数据融合的智能预警模型；

2028 年	1. 2028 年 1 月：计划针对安康蜀河汉江大桥周边环境进行的实地效果测试，； 2. 2028 年 2 月~2028 年 3 月：完成整个桥梁安全预警视觉智能感知系统联调，撰写研究报告，完成项目验收。开展并完成相关专利 2-3 项撰写与申请。
--------	--

四、项目经费

项目总经费：110.0 万元
交通运输厅补助：19.85 万元
自筹资金：90.15 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	108	17.85
1. 设备费	10.2	2.85
(1) 购置设备费	10.2	2.85
(2) 试制设备费	0.0	0.0
(3) 设备改造与租赁费	0.0	0.0
2. 业务费	55.0	9.0
(4) 材料支出	17.0	2.0
(5) 测试化验实验加工支出	20.0	2.2
(6) 燃料及动力支出	0.0	0.0
(7) 差旅支出	2.0	0.4
(8) 会议支出	3.0	0.5
(9) 国际合作与交流支出	3.0	0.5
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	8.0	1.4
(11) 其他支出	2.0	2.0
3. 劳务费	42.8	6.0
(12) 劳务性支出	37.8	5.0
(13) 咨询专家支出	5.0	1.0
(二) 间接费用	2.0	2.0
4. 管理费	2.0	2.0
5. 绩效支出	0.0	0.0
合 计	110.0	19.85

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）	0
		3.发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	1
		（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）	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	0
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	0
		（3）新材料	0
		（4）新装备（装置）	0
		（5）平台/基地/示范点	0
		（6）中试线	0
		（7）生产线	0

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	否
		(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	12
		(1) 博士、博士后	2
		(2) 硕士	10
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	0
		4. 是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等）	0
		2. 科研仪器设备利用率（%）	0
		3. 孵化科技型企业（个）	0
		4. 转化科技成果（个）	0
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	0
		2. 新增销售（万元）	0
		3. 新增出口创汇（万美元）	0
		4. 新增利润（万元）	0
	社会效益	1. 新增税收（万元）	0
		2. 新增就业人数	0
		3. 就业培训（人次）	0
		4. 带动农民增收（万元）	0
		5. 培训和指导科技服务（人次）	0
		6. 新增产业带动情况	0
		7. 技术集成示范（项）	0
		8. 建立示范基地（亩数）	0
		9. 节约资源能源	0
		10. 环保效益	0
其他需要说明的情况	无		

六、承担单位或研究人员分工

西安电子科技大学：

- (1) 负责桥梁安全预警视觉智能感知系统；
- (2) 负责超分辨特征重构的复杂环境桥梁病害感知；
- (3) 负责基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量；
- (4) 负责基于深度感知的桥梁周边船车碰撞检测；
- (5) 负责基于多源异构数据融合的智能预警模型；
- (5) 撰写研究报告；
- (6) 完成国内外核心期刊论文的投稿并发表以及专利的申请；
- (7) 完成项目鉴定验收。

中交通力建设股份公司：

- (1) 提供现场实际采集数据及标注；
- (2) 提供课题依托工程，选择合适的试验路段；
- (3) 组织协调完成现场试验和研究工作；
- (4) 参与完成桥梁安全预警视觉智能感知系统；
- (5) 协助承担单位完成鉴定验收。

七、项目参加人员表

项目承担单位：西安电子科技大学						
参与单位（排序）：中交通力建设股份有限公司						
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	何刚	1986-12-04	西安电子科技大学	高级	通信工程	项目总体方案设计
主要研究人员（注：一般项目不超过15人）						
2	高隆	1988-01-18	西安电子科技大学	高级	通信工程	项目总体方案设计
3	徐莉	1995-10-10	西安电子科技大学	中级	通信工程	方案理论分析验证
4	刘振洋	2002-04-26	西安电子科技大学	技术员级	通信工程	复杂环境病害检测
5	乔彤	2002-10-07	西安电子科技大学	技术员级	通信工程	复杂环境病害检测

6	张应富	2001-07-17	西安电子科技大学	技术员级	通信工程	桥梁结构形变测量	张应富
7	刘卓岩	2002-07-02	西安电子科技大学	技术员级	通信工程	桥梁周边船车碰撞检测	刘卓岩
8	陈海军	2001-04-26	西安电子科技大学	技术员级	通信工程	智能预警模型	陈海军
9	孙洁琼	1986-05-15	中交通力建设股份有限公司	中级	桥梁工程	桥梁检测设备规划	孙洁琼
10	刘玉萍	1982-10-12	中交通力建设股份有限公司	副高级	桥梁工程	桥梁上部结构分析	刘玉萍
11	李宁祥	1971-09-01	中交通力建设股份有限公司	副高级	桥梁工程	桥梁下部结构分析	李宁祥
12	李英举	1983-11-19	中交通力建设股份有限公司	副高级	交通工程(安全设施)	桥梁检测设备规划	李英举
13	周云亮	1996-03-03	中交通力建设股份有限公司	中级	其他	数据集分析构建	周云亮
14	马海龙	2000-10-06	中交通力建设股份有限公司	技术员级	其他	数据增强算法设计	马海龙
15	胥斌	2000-12-11	中交通力建设股份有限公司	技术员级	其他	边缘计算设备搭建	胥斌

八、信息表

项目合同编号		25-52K		密级		C		A: 机密 B: 秘密 C: 内部			
项目名称		* 桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究									
项目实施所在地		陕西西安		起止年限		2026 年 3 月至 2027 年 12 月					
总 经 费		110.0 万元		厅 拨		19.85 万元					
第一承担单位	单位名称	西安电子科技大学									
	所在地	陕西省西安市						代码	610100		
	通讯地址	陕西省西安市太白南路 2 号						邮编	710071		
	单位性质	大专院校						代码	210		
参与单位	序号	单 位 名 称									
	1	中交通力建设股份有限公司									
项目负责人	姓 名	何刚		性 别		男		出生年份	1986		
	学 历	研究生									
	职 称	高级									
	联系电话	18392173226、 029-88203116			电子邮箱		ghe@xidian.edu.cn				
项目联系人	姓 名	徐莉			性 别		女				
	联系电话	13308384047、 029-88203116			电子邮箱		xuli@xidian.edu.cn				
项目组人数	14	高级	4	中级	3	初级	0	其他	7		
主要研究内容 (100 字以内)	本研究围绕桥梁安全运行的智能监测与风险预警需求, 构建桥梁安全预警视觉智能感知系统。重点研究基于超分辨率特征重构的复杂桥梁病害感知、基于退化感知的非接触式结构变形高精度测量以及基于深度感知的桥梁周边船车碰撞风险识别方法, 并通过多源异构数据融合构建统一的桥梁健康评估与五级风险预警模型, 实现桥梁状态的智能化综合研判。										
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	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.合同正本一式八份，甲方单位伍份，承担单位三份。

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）

李清

2020年3月27日

联系人：（签字）

张喆

（公章）

电 话： 029-88869067

合同乙方：（承担单位）

单位负责人：（签字）

李海波

2020年3月27日

项目负责人：（签字）

何刚

（公章）

电 话： 029-88203116

财务负责人：（签字）

于海清

账 户 名： 西安电子科技大学

开户银行： 交通银行西安光华路支行

账 号： 611301135018000478803

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：何刚

年 月 日



合同编号:N-KY-ZX-1101-202603-01175

项目编号：25-52K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究

申请单位：西安电子科技大学（盖章）

联系人：徐莉

电 话：13308384047

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月



填写说明

格式要求：目录页码齐全，双面打印，胶装不另加封皮。

可研报告可参考网评专家意见及建议，按照**研究大纲深度**编写。
应用技术类应本着有限目标、有限规模、重点突出、适应市场、重在应用的原则，不求全求大、面面俱到。综合考虑研究期限、财力等实际情况，合理确定研究内容。软科学研究项目可研报告应由相关业务单位或部门牵头完成，内容要与业务工作紧密结合。



目录

一、 项目研究的背景和必要性	5
二、 前期科研及工作基础	8
2.1. 项目领域国内外研究现状	8
2.1.1. 桥梁全天候及周边环境数据集	8
2.1.2. 退化图像增强算法	10
2.1.3. 桥梁健康检测	12
2.1.4. 基于深度学习的桥梁周边灾害识别	16
2.2. 项目前期科研及现有工作条件	18
2.3. 参考文献	18
三、 实施方案	24
3.1. 拟解决的关键问题	24
3.2. 主要研究内容及实施方案	24
3.2.1. 基于超分辨率特征重构的复杂环境桥梁病害感知	26
3.2.2. 基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量	33
3.2.3. 基于深度感知的桥梁周边船车碰撞检测	39
3.2.4. 基于多源异构数据融合的智能预警模型	45
3.3. 技术路线	50
3.4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接	51
3.5. 有关技术经济指标	53
四、 项目承担单位及参加单位概况	53
4.1. 项目承担单位概况	53



4.2. 技术力量及人员构成	55
4.3. 各自承担的主要工作	56
4.4. 项目主要负责人情况	58
五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	59
5.1. 依托工程（工作）概况	59
5.2. 投资来源	60
5.3. 工程进度与项目科研进度的配合	61
5.4. 组织管理形式	62
六、项目经费估算及资金筹措情况	63
七、项目绩效指标	68
八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益	70
8.1. 项目预期目标（项目的考核目标）	70
8.2. 提交的研究成果及其形式	70
8.3. 经济、社会、环境效益分析	71
九、其它需要说明的问题	71
十、申请单位意见	72



一、项目研究的背景和必要性

中国桥梁建设有着悠久的历史和丰富的文化内涵。自古以来，桥梁在中国不仅作为一种交通基础设施，也被赋予了深厚的文化和社会意义。随着科技的进步和经济的发展，交通运输需求日益增加，中国的桥梁的现代化建设进入了一个前所未有的快速发展时期。桥梁作为我国基础设施的重要组成部分，发挥着至关重要的作用。我国幅员辽阔，地形复杂，河流众多，桥梁成为了连接各地区的重要纽带。无论是公路、铁路，还是城市道路，桥梁都是不可或缺的一部分。截止到2023年底，我国桥梁总数已经达到107.93万座，位居世界第一。桥梁不仅承载了大量的运输任务，还为国民经济的稳定运行和人民日常生活提供了重要保障。而桥梁的安全和稳定不仅关系到交通运输的畅通，更直接关乎人民生命财产的安全。

然而近年来，一些桥梁事故的发生引发了广泛关注。这些事故不仅造成了大量的人员伤亡和财产损失，还暴露出我国在桥梁安全监测和预警方面的诸多不足。我国现有桥梁普遍没有配备安全检测和预警系统，在桥梁受损时无法及时准确地发现并预警问题。已有的设置在桥梁上的监控设备也易受到桥梁损毁影响，一旦桥梁受损，监控设备很有可能无法正常工作，从而不能及时有效地发现险情。由于缺乏对桥梁损毁信息的及时准确掌握，管理部门和车辆不能及时做出反应，进一步扩大了桥梁损毁导致的损失。此外，我国幅员辽阔，桥梁所在地气候差异大，地形复杂，导致仅依靠一种类型的传感器难以实现全天候准确的桥梁安全检测与预警。近年来，我国发生了多起桥梁坍塌



和桥梁事故，由于大多桥梁缺乏有效的监测手段，最终酿成了严重的后果。例如：

(1) 2020 年 11 月 1 日，天津市滨海新区天津南环临港铁路发生一起桥梁垮塌铁路交通较大事故，造成 8 人死亡、1 人重伤、5 人轻伤，造成的直接经济损失共计 482.27 万元。

(2) 2021 年 12 月 18 日，位于湖北省鄂州市境内的沪渝高速沪渝向转大广高速匝道桥发生桥梁侧翻，造成 4 人死亡、8 人受伤。事发前并未有任何预警信号，事后调查显示，该桥梁曾多次出现结构性问题，但由于缺乏有效的监测手段，未能及时发现问题并采取防范措施。

(3) 2022 年 8 月 14 日，四川德阳峨眉路南段与岷江东路交会处，一架在建桥封闭施工时坍塌，致 1 死 2 伤。

(4) 2023 年 6 月 8 日，广东韶关市南雄市一桥面坍塌，有人落水。现场有 2 人落水，其中 1 人被救起并送医院。建设单位曾于 2020 年 10 月 19 日至 2021 年 1 月 27 日（约 100 天）对水西桥进行修缮，由于监测不当而依然发生惨剧。

(5) 2024 年 7 月 19 日，陕西省商洛市柞水县境内丹宁高速水阳段桥梁因突发山洪发生局部单侧垮塌，垮塌长度约 40 米。截至 2024 年 8 月 2 日 18 时，已确认坠河车辆 25 辆、遇难 38 人、失联 24 人，1 人获救。

这些事故的发生暴露了当前桥梁安全监测体系的诸多问题。在我国桥梁数量多、自然灾害频发的背景下，桥梁的日常维护和安全管理



显得尤为重要。如何及时、智能并准确地监测桥梁的安全状况，成为了亟待解决的问题。

然而，现有的桥梁监测设备多是基于物理接触的传感器，这些传感器往往安装在桥梁的关键节点上，一旦桥梁发生坍塌或严重损毁，这些设备也会随之失效，无法提供实时的预警信息。其次，许多桥梁的监测设备老旧，数据采集不够全面，无法精准反映桥梁的实际状况。并且一些设备由于数据处理能力不足，往往无法做到实时分析和预警。一些问题在早期并未被及时发现，导致了事故的进一步扩大。此外，由于地理位置、气候条件、交通流量等多方面因素的影响，桥梁的损毁情况往往具有复杂性和多变性，单一的监测手段难以覆盖所有潜在的风险因素。因此，急需开展桥梁安全预警视觉智能感知关键技术的开发，保证在紧急条件下桥梁检测预警功能的准确性和稳定性，全面提升我国桥梁安全检测与预警水平，强化人民生命财产安全保障能力。

本项目面向我国桥梁数量规模大、服役年限长、运行环境复杂的现实背景，针对现有桥梁安全监测体系中普遍存在的监测方式依赖人工与点式传感器、远距离视觉感知能力不足、复杂环境适应性差以及风险预警滞后等突出问题，开展系统性技术研究。项目以视觉智能感知为核心，围绕复杂环境下桥梁结构与周边风险的长期、连续、自动化监测需求，重点研究基于超分辨率特征重构的桥梁表观病害精细感知、基于退化感知的非接触式结构变形高精度测量以及基于深度感知的桥梁周边船车碰撞风险识别等关键技术。进一步通过多源异构视觉数据的深度融合与智能分析，构建统一的桥梁健康状态评估与分级预



警模型，形成覆盖“病害识别—变形监测—环境风险感知—综合预警”的桥梁安全预警视觉智能感知技术体系，为桥梁安全运维提供高效、可靠、可长期部署的技术支撑。

二、前期科研及工作基础

2.1. 项目领域国内外研究现状

2.1.1. 桥梁全天候及周边环境数据集

桥梁及周围环境的信息采集是桥梁安全监测等下游任务进行的关键，通过对现有相关场景数据集的研究发现，目前工作主要集中在以下几个方面：一是基于现实场景的数据集，通过人为现场实地安装图像信息采集设备来记录实时的物理数据和图像；二是基于生成的数据增广，这些研究主要包括人为挑选合适的特征进行数学建模以及采用深度学习的生成模型方法，通过结合真实场景数据来模拟场景环境中的变化，以应对实际环境中数据不足的挑战。

2.1.1.1. 基于现实场景的数据集

桥梁现实场景的数据集主要来源于的实地收集，常见的数据集如 GLH-bridge[1]、KTTTI[2]、PASACAL VOC[3]、BDD100K[4]、DAACL10K[5]。这些数据集通常采用高清摄像头、雷达、红外等设备进行采集，数据集的真实性能够很好的被保留。同时，桥梁全天候环境受到了雨、雪、雾等天气因素的影响，现有数据集也一定程度上包含了不同场景的变化。这些为桥梁安全检测任务提供了坚实的基础。但是这些数据集大多集中在桥梁结构监测等特定应用领域，如表 2.1 所示，并且场景中天气等变化的种类较为单一，需要作进一步的增广。



表 2.1：基于现实场景的部分数据集

名称	描述	应用领域
GLH-bridge[1]	集中包含了大量不同天气和光照条件下桥梁结构的典型损伤图像。	桥梁健康监测
KITTI[2]	提供户外真实场景的深度信息、姿态估计和道路标记等。	道路检测、自动驾驶
PASACAL VOC[3]	覆盖多种常见物体类别，每张图像中物体的边界框和类别信息都进行了精确标注。	物体检测、图像分割
BDD100K[4]	包括城市、郊区、高速公路等多种道路类型，以及不同天气、光照条件。	物体检测与分割、车道监测、天气适应性研究
DACL10K[5]	桥梁表面与关键部分，多天气场景。	桥梁结构的检测

2.1.1.2. 基于生成的数据增广

现实场景的环境往往多变，单一的场景变化无法很好地涵盖现实场景的所有特征，而如果人为的进行多环境类型的场景收集又费时费力。因此，如何更好地在真实场景的基础上做进一步的增广是当前灵活应对各种复杂问题的关键。Kong 等人[6]在处理包含多种退化因素的图像修复任务时，手工设计了对图片可视化进行退化的特征公式。例如，在模拟低光照场景时，他们使用了伽马非线性变化公式($x=y^r$)来调整图像亮度。然而，这种基于手工设计的特征无法充分模拟真实

场景中的复杂环境。如今基于深度学习的生成技术也已经应用到了数据集增广领域，例如生成式对抗网络 GAN 通过生成器和判别器之间的对抗训练来生成目标图片，如 Weather GAN[8]通过手动标定的天气线索（weather cues）来引导网络学习不同天气的特征；GauGAN[9]根据输入图片的空间信息来调整生成过程的特征映射，使得生成的图像在纹理、光照和结构上都符合输入图像的特征；LSUN 数据集[10]通过渐进式增长的训练策略来实现图像的生成。生成能力更强的潜在扩散模型(LDM)近些年也被应用到图像增广领域，该技术通过使用文本引导和逐步去噪技术在如 MSCOCO[11]、CIFAR-10[12]、SVHM[13]数据集上实现了数据集的增广。这些数据增广技术进一步提高了本项目的可行性，同时也为本项目的数据增广提供了一定的思路。

2.1.2. 退化图像增强算法

天气变化会对桥梁的视觉信息采集和处理造成干扰，因此需要采用有效的图像增强技术来提高桥梁观测的可靠性。目前，针对天气场景的图像增强算法主要分为两类：单一增强和联合增强。单一增强技术专注于处理某一特定类型的干扰，而联合增强技术则综合考虑多种干扰类型，能够在一个网络中同时处理多种天气条件下的干扰，从而实现更加全面的图像增强效果。

2.1.2.1. 单一退化图像增强

Yasarla R 等人[14]提出一种基于高斯过程的半监督学习框架，网络使用合成数据集进行去雨训练，同时使用未标注的真实世界图像配合训练，以使网络能更好地泛化。Jiang K 等人[15]提出采用双层并行



网络来恢复去雨图像丢失的细节信息。与现有图像去雨工作不同，该方法将去雨和恢复细节视为并行独立的两个模块。Shao 等人[16]提出了一种基于 U-Net 架构的具有密集特征融合的多尺度增强去雾网络，解决大部分去雾方法在合成数据集上优秀而真实数据集上效果不足的问题。Pang Y[17]提出双目传输模块探索并编码双目图像对中的深度关系，从而在无需进行复杂的视差估计的前提下预测去雾模型中的透射图，进而恢复出清晰的双目图像对。Chen 等人[18]提出了一个基于 Dual-tree Wavelet Transform (DTCWT) 的阶层式 (Hierarchical Architecture) 网络，使用阶层式的分解方式去切割不同大小的雪，使得尺寸问题可以被解决。图像单一增强在处理单增强任务上有其优势，但是遇到更加多样化的增强任务时，就需要通过增加模型的冗余度来实现，这限制了这一技术的应用。

2.1.2.2. 多退化图像联合增强

单一增强方法在处理特定任务时表现出色，但在应对复杂多样的增强需求时，往往需要通过扩展模型来应对，这增加了系统的复杂性，并降低了其在处理多种任务时的效率和适用性。如何将多种类型的增强统一到一个网络中进行是现在图像增强领域的研究热点，Kong 等人[19]提出了顺序学习的方式来处理七种不同类型的退化，从而使多种去除任务能够在同一网络中完成。Prashant 等人[20]提出了一种多天气图像修复算法，首先利用 DT 模块学习雨、雪、雾三种天气条件下图像的特征，然后将其融入到 U-Net 网络的解码器端进行统一去噪处理。尽管该方法考虑到了多种天气退化的综合影响，但模型的设



计较为冗余，无法有效针对单一退化类型进行专一化处理，限制了其在特定退化场景下的性能表现。Chen 等人[21]通过知识蒸馏的两阶段学习机制，将多个教师网络的知识传递给学生网络，并且采用软对比正则化和硬对比正则化增强学生模型的性能，从而达到多种天气条件的统一处理。Li 等人[22]提出一种 AirNet 修复网络，网络基于对比学习的退化编码器学习退化图像的潜在表示，然后使用退化引导的修复网络进行图像恢复已达到同时处理多种未知退化类型的能力。Wang[23]指出在多重天气修复过程中会出现遮挡、颜色失真和对比度降低等问题，因此提出了一种三重注意力模块 TAB，包括局部像素注意力 LPA、全局条带注意力 GSA、全局分布注意力 GDA，实现多重恶劣天气的统一处理，从而提高了增强效果。图像混合增强在处理多种类型的干扰时更加具有鲁棒性，为本项目提供了更加可靠的理论依据，但是，这些基于生成方法的模型在应对气候变化时表现较为局限，难以有效模拟多种天气条件的相互耦合情况，此外现在的天气变化较为生硬，例如晴天转雨天并不会考虑天空、太阳、地面等场景的变化，无法充分模拟显示场景的天气变化，这也是当前数据集增强领域亟需解决的难题。

2.1.3. 桥梁健康检测

目前桥梁健康状态检测主要分为传统桥梁检测方法和基于计算机视觉技术的桥梁监测系统。

2.1.3.1. 传统桥梁检测方法

传统桥梁检测技术涵盖了人工目测、便携式仪器测量以及传感器



的应用等，通过这些方式对桥梁结构的安全状态进行评估。

从 20 世纪 50 年代起，美国和其他国家逐步建立了桥梁检测标准，开启了桥梁安全检测的第一代实践。1971 年，美国推出《国家桥梁检测标准》（NBIS），对检测方法、频率和人员资格进行了规范化指导。然而，传统检测仍主要依赖人工，通过定期或不定期的现场检查获取数据。但受限于便携式测量仪器监测数据不准确，数据采集不够及时、完整，导致无法全面、准确反映桥梁的真实状况，因而很难给出科学准确的桥梁健康评估[24]。

为了解决传统检测方法的数据不准确、采集不及时和不完整等问题，从上世纪 80 年代开始，北美、西欧、亚洲等发达国家在桥梁监测中逐步引入了传感器技术。相比于人工检查，传感器的应用具有实时性和高精度的优势，能够连续获取桥梁的温度、湿度、桥面负载、应力变化等关键数据。通过传感网络和数据融合等技术，这些国家建立了自动化的监控网络，大大提高了桥梁健康监测的效率和准确性。检测方法的发展趋势正朝着自动化、智能化方向迈进，传感器技术在桥梁安全评估中扮演着越来越重要的角色。

以日本石海峡大桥[25]为例，为了证实风力、地震、温度等外在因素影响所产生的变形特性，在大桥上安装了地震仪、风速仪、GPS 应变计等传感器，实现对该大桥的实时状况测量和安全评估。通过调查韩国桥梁监测系统的背景以及到目前为止韩国桥梁监测系统的发展历史，文献[26]开发了新一代监测系统，韩国 Seohae 大桥和 Yeongjong 大桥安装了第三代的桥梁监测系统，针对桥梁结构的静、



动态性能和桥梁环境荷载进行监测，其中，在 Seohae 大桥上部署了 120 个不同类型的传感器，而在 Yeongjong 大桥安装了多达 380 个传感器来获取大量的感知数据。在国内，将物联网技术运用到桥梁监测的项目已成为主流趋势。为了对江苏润扬长江大桥进

2.1.3.2. 基于计算机视觉技术桥梁监测系统

近年来，随着计算机视觉技术和图像采集设备的不断进步，基于计算机视觉的桥梁监测方法应运而生，并在实际工程应用中得到验证[29]。由于其成本低、操作简单、远程、非接触式等优点，引起了研究人员和工程师的关注。基于计算机视觉的监测方法已广泛应用于各种结构健康监测任务中，如桥梁表面缺陷检测[30],[31]和振动测量[32],[33],[34]。基于机器视觉的无损、快速、安全的自动裂缝检测方法已在桥梁监测领域得到应用[35]。与裂缝图像采集的效率相比，由于算法的复杂性和不具有自适应性，图像处理和裂缝识别大多是半自动的，而且耗时。随着不断发展，图像处理主要涉及去噪、阈值分割、边缘检测和渗透模型。许多用于裂缝检测的图像处理技术已经被开发出来，有助于测量系统的自动化。这是一个不断创新的科学领域。Lee et al[36]和 Oh et al[37]从原始图像中减去经过中值滤波处理的平滑图像以检测阴影中的裂纹，并使用滤波器去除孤立点，然后应用形态学操作获得连接的裂纹，并将裂纹图像划分为几个区域，在每个区域中选择一个种子点进行裂纹跟踪。Hao 等人[38]提出了一种改进的神经元分割模型，该模型包括鲁棒裂纹指示函数和迭代轮廓进化。Huang 等人[39]基于压缩感知(CS)框架和生成模型开发了一种使用压缩图像



数据进行裂缝分割的新方法。文献[40]把 Otsu 算法和梯度算子相结合解决了 Otsu 在背景复杂，光照复杂情况下的图像过度分割问题。获得了更好的分割效果。Li 等[41]开发了一种基于无人机和 Faster R-CNN 的桥梁裂缝自动检测系统。Dung 等[42]提出了一种基于深度全卷积神经网络(FCN)的混凝土裂缝检测方法。这种方法只能识别裂缝，难以对裂缝程度进行量化和评估。Zhang 等[43]提出了一种基于改进 U-net 网络的像素级自动裂缝检测方法(即 crack U-net)。然而，裂纹 U-net 不能准确地从低分辨率(LR)图像中检测裂纹。为了解决这一问题，Xiang 等[44]提出了一种基于超分辨率重构和语义分割的微裂纹自动检测方法，如图 2.1 所示。

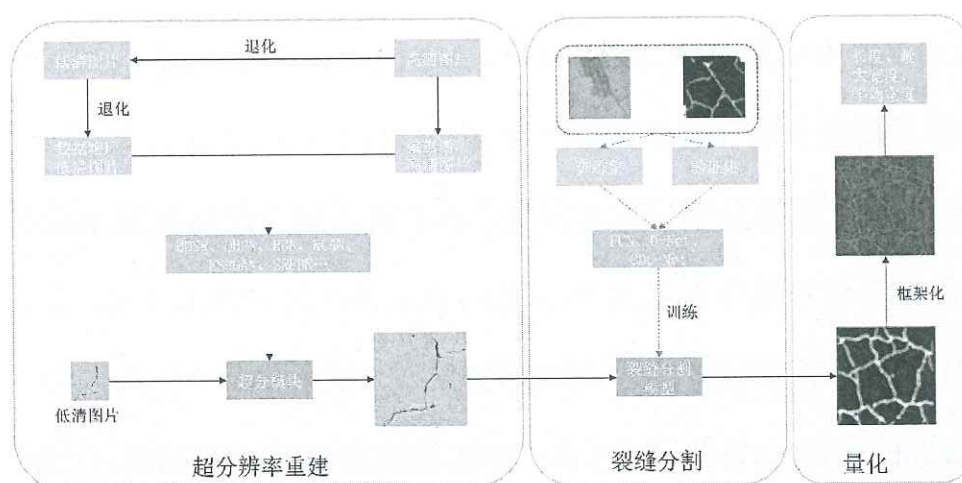


图 2.1 基于 SR 图像的裂纹分割与特征量化框架[44]

将基于深度学习模型重建的 SR 图像输入到所提出的语义分割网络中进行裂缝分割，并根据改进的中轴变换方法测量裂缝长度和宽度。由于缺乏开源代码的裂缝数据集，使用完全监督分割方法需要对大量数据进行人工标注，耗时较长。为了解决这一问题，Wang 等[45]提出了一种用于裂纹检测的半监督语义分割网络。然而，这种方法检测



微小裂纹的能力较差。为了解决微小裂纹难以分割的问题,Chu 等[46]提出了一种带有注意机制的多尺度特征融合网络来捕捉微小裂纹的局部特征。

2.1.4. 基于深度学习的桥梁周边灾害识别

目前,基于深度学习的桥梁周边环境灾害识别中采集观测环境的信息通常通过机载激光雷达、无人机倾斜摄影、合成孔径雷达和地理信息系统(Geographic Information System, GIS)等获取。在通过遥感技术获取桥梁周围环境信息后,通过先进的深度学习技术进行异常环境识别,特别是在图像识别、目标检测和事件预测等方面[47]。这些技术的核心在于利用卷积神经网络 (Convolutional Neural Network, CNN)、生成对抗网络 (Generative Adversarial Networks, GAN) 等深度学习模型,基于遥感数据提取深度特征,从而实现了对落石、泥石流、洪水等灾害的早期识别和预警。以下将详细介绍这些技术在桥梁周边异常环境检测中的应用和实现。

2.1.4.1. 基于卷积神经网络 (CNN)

Minh-Vuong Pham 提出了一种基于深度卷积神经网络 (CNN) 和图像处理的泥石流检测和速度估计方法[48],旨在为泥石流预警和防灾减灾提供重要参考。论文对泥石流区域的图像利用光流法或光流跟踪算法对相邻帧图像中的泥石流区域进行像素跟踪,得到像素的运动轨迹,由此计算出泥石流的速度,并结合其他相关因素(如泥石流规模、地形地貌等),对泥石流的危险程度进行评估。

同时王毅等[49]提出了基于深度学习的滑坡灾害易发性分析,构



建了一维、二维和三维的滑坡数据表达形式,并提出 3 种基于卷积神经网络模型 (Convolutional Neural Networks, CNN) 的滑坡易发性分析处理框架: 基于 CNN 分类器、基于 CNN 与逻辑回归的融合和基于 CNN 集成, 能够更好地模拟滑坡灾害的形成并准确预测潜在的滑坡。

此外文献[50][51]提出了基于卷积神经网络 (CNN) 的河道山地灾害快速识别方法, 旨在为灾害预警和应急处置提供重要支持。该方法首先利用 CNN 对输入的图像进行特征提取, 随后采用了语义分割技术, 将特征图中的每个像素分类为灾害区域或非灾害区域。通过这种方式识别出图像中的灾害区域, 并将其从背景中分割出来, 最后利用一个预训练的 CNN 模型 (已经在大规模数据集上学习了不同灾害类型的特征, 例如山体滑坡、泥石流、落石等) 能够快速识别河道山地灾害。

2.1.4.2. 基于生成对抗网络 (GAN)

在滑坡监测预警领域, GAN 可以生成逼真的滑坡图像和空间预测模型, 用于模型训练和评估, 从而提高模型的鲁棒性和泛化能力, 并实现对滑坡、泥石流等情况的探测。

论文[52]提出了一种基于 GAN 的滑坡数据平衡和空间预测的新方法, 利用 GAN 生成缺失的滑坡数据, 并通过训练判别器来学习识别真实和生成的滑坡图像, 从而实现对滑坡数据的平衡和空间预测。该方法首先收集和预处理大量滑坡图像数据, 包括正常和异常情况, 以便于模型训练, 接着使用这些数据训练 GAN 模型, 其中生成器学



习生成逼真的滑坡图像，判别器则学习区分真实与生成图像。随后，利用训练好的 GAN 模型生成缺失的滑坡数据，如纹理和颜色信息。最后，结合生成的数据和真实数据，训练卷积神经网络等空间预测模型来预测滑坡区域的变形和位移。

此外，论文[53]提出了一种循环 GAN 模型 RGAN-LS，以模仿真实滑坡现场测量数据的特征，并且在 RGAN-LS 的训练过程中加入了定制的矩匹配损失，以捕捉实时序列数据中的时间动态和相关性。最后使用 RGAN-LS 生成的合成数据增强长短期记忆 (LSTM)网络和粒子群优化-支持向量机(PSO-SVM)模型的训练，以完成滑坡位移预测任务。

2.2. 项目前期科研及现有工作条件

目前组建了西安电子科技大学和中交通力建设股份有限公司：共同组成的项目组，主要研究人员中既有经验和阅历丰富的专家、教授，又有年富力强的中青年骨干；既有从事工程设计、施工和管理的技术人员，又有从事理论研究和应用研究的科研人员。总体上人员能备齐全，且具有很强的科学研究工作能力以及协作精神。项目组经过了一个月的前期调研工作，认真查阅相关资料文献并进行了市场调研，初步制定了详细的技术路线和具体实施方案。

2.3. 参考文献

- [1] Li Y, Luo J, Zhang Y, et al. Learning to holistically detect bridges from large-size vhr remote sensing imagery[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2024.
- [2] Geiger A, Lenz P, Urtasun R. Are we ready for autonomous driving? the kitti



- vision benchmark suite[C]//2012 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. IEEE, 2012: 3354-3361.
- [3] Everingham M, Van Gool L, Williams C K I, et al. The pascal visual object classes (voc) challenge[J]. International journal of computer vision, 2010, 88: 303-338.
- [4] Flotzinger J, Rösch P J, Braml T. dacl10k: benchmark for semantic bridge damage segmentation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. 2024: 8626-8635.
- [5] Yu F, Chen H, Wang X, et al. Bdd100k: A diverse driving dataset for heterogeneous multitask learning[C]//Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2020: 2636-2645.
- [6] Kong X, Dong C, Zhang L. Towards Effective Multiple-in-One image restoration: A sequential and prompt learning strategy[J]. arXiv preprint arXiv:2401.03379, 2024.
- [7] Bi Q, You S, Gevers T. Modeling Weather Uncertainty for Multi-weather Co-Presence Estimation[J]. arXiv preprint arXiv:2403.20092, 2024.
- [8] Li X, Kou K, Zhao B. Weather GAN: Multi-domain weather translation using generative adversarial networks[J]. arXiv preprint arXiv:2103.05422, 2021.
- [9] Park T, Liu M Y, Wang T C, et al. Semantic image synthesis with spatially-adaptive normalization[C].Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2019: 2337-2346.
- [10] Yu F , Zhang Y , Song S ,et al.LSUN: Construction of a Large-scale Image Dataset using Deep Learning with Humans in the Loop[J]. Computer science, 2015.
- [11]Tsung-Yi Lin, Michael Maire, Serge Belongie. Microsoft COCO: Common Objects in Context[C].European Conference on Computer Vision. Springer International Publishing, 2014.DOI:10.1007/978-3-319-10602-1_48.
- [12]Krizhevsky A , Hinton G .Learning multiple layers of features from tiny images[J].Handbook of Systemic Autoimmune Diseases, 2009, 1(4).
- [13]Ho J, Saharia C, Chan W, et al. Cascaded diffusion models for high fidelity



- image generation[J]. Journal of Machine Learning Research, 2022, 23(47): 1-33.
- [14]Yasarla R, Sindagi V A, Patel V M. Syn2real transfer learning for image deraining using gaussian processes[C]//Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2020: 2726-2736.
- [15]Jiang K, Wang Z, Yi P, et al. Multi-scale progressive fusion network for single image deraining[C]//Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2020: 8346-8355.
- [16]Shao Y, Li L, Ren W, et al. Domain adaptation for image dehazing[C]//Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2020: 2808-2817.
- [17]Pang Y, Nie J, Xie J, et al. BidNet: Binocular image dehazing without explicit disparity estimation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2020: 5931-5940.
- [18]Chen W T, Fang H Y, Hsieh C L, et al. All snow removed: Single image desnowing algorithm using hierarchical dual-tree complex wavelet representation and contradict channel loss[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2021: 4196-4205.
- [19]Kong X, Dong C, Zhang L. Towards Effective Multiple-in-One Image Restoration: A Sequential and Prompt Learning Strategy[J]. arXiv preprint arXiv:2401.03379, 2024.
- [20]Patil P W, Gupta S, Rana S, et al. Multi-weather image restoration via domain translation[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2023: 21696-21705.
- [21]Chen W T, Huang Z K, Tsai C C, et al. Learning multiple adverse weather removal via two-stage knowledge learning and multi-contrastive regularization: Toward a unified model[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022: 17653-17662.
- [22]Li B, Liu X, Hu P, et al. All-in-one image restoration for unknown corruption[C]//Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2022: 17452-17462.



- [23] Wang H H, Tsai F J, Lin Y Y, et al. TANet: Triplet Attention Network for All-In-One Adverse Weather Image Restoration[J]. arXiv preprint arXiv:2410.08177, 2024.
- [24] LI Hui, HAN Xiaofei, ZHU Wancheng, et al. Current status and prospects of research on landslide disasters in mine slopes based on multi-source information fusion[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50 (6) : 6-15.
- [25] 雨虹. 世界第一的悬索桥——日本明石海峡桥[C]//养护与管理, 2011. YU H. The world's first suspension bridge-Akashi Strait Bridge of Japan[C]//Conservation and Management. 2011.
- [26] SUNG-PIL C, JAEYEOL Y, JUNGWHEE L. Necessity of the bridge health monitoring system to mitigate natural and man-made disasters[J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2009, 5(3):173-197.
- [27] 李爱群, 缪长青, 李兆霞, 等. 润扬长江大桥结构健康监测系统研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2003, 33(5): 544-548. LI A Q, LIAO C Q, LI Z X, et al. Health monitoring system for the Runyang Yangtse River Bridge[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(5): 544-548.
- [28] 欧进萍, 周智, 武湛君, 等. 黑龙江呼兰河大桥的光纤光栅智能监测技术[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1):45-49. OU J P, ZHOU Z, WU Z J, et al. Intelligent monitoring of heilongjiang Hulan River Bridge based on FBGS[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37 (1): 45-49.
- [29] Yu, S.; Zhang, J.; Su, Z.; Jiang, P. Fast and robust vision-based cable force monitoring method free from environmental disturbances. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 201, 110617.
- [30] Xiang, C.; Gan, V.J.; Guo, J.; Deng, L. Semi-supervised learning framework for crack segmentation based on contrastive learning and cross pseudo supervision. Measurement, 2023, 217, 113091.
- [31] Xiang, C.; Guo, J.; Cao, R.; Deng, L. A crack-segmentation algorithm fusing transformers and convolutional neural networks for complex detection scenarios. Automation in Construction, 2023, 152, 104894.
- [32] Wang, M.; Ao, W.K.; Bownjohn, J.; Xu, F. Completely non-contact modal



- testing of full-scale bridge in challenging conditions using vision sensing systems. *Engineering Structures*, 2022, 272, 114994.
- [33]Jiang, T.; Rønquist, A.; Song, Y.; Frøseth, G.T.; Nåvik, P. A detailed investigation of uplift and damping of a railway catenary span in traffic using a vision-based line-tracking system. *Journal Of Sound and Vibration*, 2022, 527, 116875.
- [34]Jiang, T.; Frøseth, G.T.; Rønquist, A.; Fagerholt, E. A robust line-tracking photogrammetry method for uplift measurements of railway catenary systems in noisy backgrounds. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 144, 106888.
- [35]Ayele, Y. Z., Aliyari, M., Griffiths, D. & Droguett, E. L. Automatic crack segmentation for UAV-assisted bridge inspection. *Energies* 13, 23 (2020).
- [36]Lee, J. H., Lee, J. M., Kim, H. J. & Moon, Y. S. Machine vision system for automatic inspection of bridges. In *Congress on Image and Signal Processing*. 363–366 (2008).
- [37]Oh, J.-K. et al. Bridge inspection robot system with machine vision. *Automation in Construction*, 18(7), 929–941 (2009).
- [38]Hao, M., Lu, C., Wang, G. & Wang, W. An improved neuron segmentation model for crack detection—Image segmentation model. *Cybernetics And Information Technologies*, 17(2), 119–133 (2017).
- [39]Huang, Y., Zhang, H., Li, H. & Wu, S. Recovering compressed images for automatic crack segmentation using generative models. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 146, 113 (2021).
- [40]Wang, R., Chen, RQ., Guo, XX. et al. Automatic recognition system for concrete cracks with support vector machine based on crack features. *Scientific Reports*, 14, 20057 (2024).
- [41]Li, R.; Yu, J.; Li, F.; Yang, R.; Wang, Y.; Peng, Z. Automatic bridge crack detection using Unmanned aerial vehicle and Faster R-CNN. *Construction and Building Materials*, 2023, 362, 129659.
- [42]Dung, C.V. Autonomous concrete crack detection using deep fully convolutional



- neural network. *Automation in Construction*, 2019, 99, 52–58.
- [43] Zhang, L.; Shen, J.; Zhu, B. A research on an improved Unet-based concrete crack detection algorithm. *Structural Health Monitoring-An International Journal*, 2021, 20, 1864–1879.
- [44] Xiang, C.; Wang, W.; Deng, L.; Shi, P.; Kong, X. Crack detection algorithm for concrete structures based on super-resolution reconstruction and segmentation network. *Automation in Construction*, 2022, 140, 104346.
- [45] Wang, W.; Su, C. Semi-supervised semantic segmentation network for surface crack detection. *Automation in Construction*, 2021, 128, 103786.
- [46] Chu, H.; Wang, W.; Deng, L. Tiny-Crack-Net: A multiscale feature fusion network with attention mechanisms for segmentation of tiny cracks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2022, 37, 1914–1931.
- [47] 程德强, 寇旗旗, 江鹤, 等. 全矿井智能视频分析关键技术综述[J]. *工矿自动化*, 2023, 49 (11) : 1-21.
- [48] Pham, MV., Kim, YT. Debris flow detection and velocity estimation using deep convolutional neural network and image processing. *Landslides* 19, 2473–2488 (2022).
- [49] 王毅, 方志策, 牛瑞卿, 彭令. 基于深度学习的滑坡灾害易发性分析[J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(12): 2244-2260
- [50] 赵鹏辉, 李俊杰, 康飞. 河道山地灾害的卷积神经网络快速识别方法[J]. *水利水电工程学报*, 2019, (2): 65-70.
- [51] 凌骐, 张轩, 孔松. 水电工程地质灾害监测预警与应急管理系统设计及应用[C]// 中国水力发电工程学会. 中国水力发电工程学会, 2016.
- [52] Al-Najjar, H.A.H.; Pradhan, B.; Sarkar, R.; Beydoun, G.; Alamri, A. A New Integrated Approach for Landslide Data Balancing and Spatial Prediction Based on Generative Adversarial Networks (GAN). *Remote Sensing* 2021, 13, 4011.
- [53] Qi Ge, Jin Li, Suzanne Lacasse, Hongyue Sun, Zhongqiang Liu, Data-augmented landslide displacement prediction using generative adversarial network, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024.



三、实施方案

3.1. 拟解决的关键问题

①拟解决传统人工巡检与点式传感器监测存在的效率低、覆盖窄、成本高以及难以适应恶劣环境和实时自动化需求的问题。

②拟解决受布设距离限制导致的远距离成像分辨率不足，以及由雨雪、光照变化等复杂工况引起的图像退化与细微病害特征提取可靠性差之间的矛盾。

③拟解决传统手段难以在大范围内对风荷载、车辆荷载作用下的结构变形实现同步、连续且高精度监测的问题。

④拟解决现有系统对通航船舶、漂浮物冲击等具有突发性与隐蔽性的周边环境潜在风险缺乏实时识别与预警能力的问题。

3.2. 主要研究内容及实施方案

桥梁安全预警视觉智能感知系统包括以下部分，如图 3.1 所示：

1) 基于超分辨率特征重构的复杂桥梁病害感知；2) 基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量；3) 基于深度感知的桥梁周边船车碰撞检测。4) 基于多源异构数据融合的智能预警系统。

基于超分辨率特征重构的复杂桥梁病害感知技术实现对桥梁裂缝、剥落、钢筋外露等典型损伤的自动化、实时化识别。针对实际监控环境中病害目标尺寸小、成像模糊、背景干扰强的问题，项目将引入基于 Transformer 的小目标超分辨预处理模型，通过纹理增强与特征重建等技术手段，有效提升病害区域的成像质量与特征可分性，从



而显著增强复杂环境下表观病害检测的鲁棒性与识别精度。

基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量突破传统接触式传感器的布控限制。该方法通过对图像中退化因素（如模糊、噪声、色偏、低对比度等）的自动分析，实现恶劣天气条件下的图像统一增强，为结构变形测量提供高质量的视觉输入。在此基础上，结合多靶标识别与跟踪算法，实现关键结构部位在复杂环境下的位移与振动毫米级监测，具有部署灵活、成本低、不干扰交通运行等优势，能够有效支撑桥梁在不同荷载工况下的动态响应分析。

基于深度感知的桥梁周边船车碰撞检测首先基于 RGB 图像实现对目标类型的准确识别；进而采用孪生网络结合深度估计算法，通过对比正常状态与实时状态图像的特征差异，精确判断目标与桥梁结构之间的相对距离及运动趋势，实现对潜在碰撞风险的快速识别与可靠预警。

基于多源异构数据融合的智能预警系统通过融合病害识别输出、图像增强结果、结构变形特征与环境风险事件等多维数据，构建统一的风险评估体系，实现对桥梁健康状态的智能化综合判断，以及五级风险预警机制。模型将采用深度融合与规则驱动相结合的方法，使预警结果既具有数据驱动的准确性，又具备可解释性，便于管理单位进行科学决策。



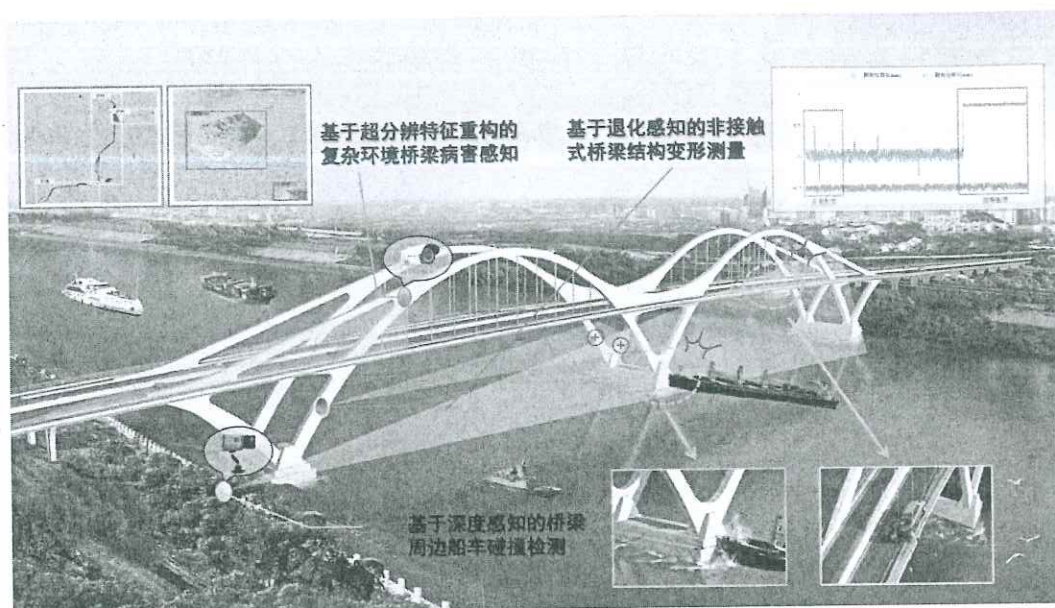


图 3.1 桥梁安全预警视觉智能感知系统示意图

3.2.1. 基于超分辨率特征重构的复杂环境桥梁病害感知

针对陕西省内量大面广的现浇箱梁及各类拱桥，本项目构建了一种具备差异化适配能力的病害感知体系。鉴于桥梁倒塌可能带来的巨大人员伤亡和财产损失，以及其引发的严重社会影响，及时检测和预防桥梁结构潜在隐患变得尤为关键。本研究聚焦于西安市蜀河汉江大桥，构建了一种针对陕西省内拱桥的基于超分辨率特征重构的复杂环境桥梁病害感知系统，通过融合先进的图像处理和深度学习技术，实现对桥梁关键部位的异常状态的精确感知。本系统不仅能够从多角度、多维度捕捉桥梁表面细微损伤，还能在各种复杂环境下保持高鲁棒性，确保检测的精准性与实时性，为桥梁安全监测提供了前沿的技术保障。核心技术包括基于 Transformer 的超分辨率图像增强模块和基于 Transformer 的多模态融合算法，旨在全面提升系统在实际应用中的检测性能。



3.2.1.1. 基于 Transformer 的桥梁场景下的小目标超分辨预处理算法

针对桥梁表面的裂缝在远距离拍摄时存在成像信息少，检测对象小的问题，提出了一种基于 Transformer 的桥梁场景下的小目标超分辨预处理算法。在进行网络训练时，考虑到现有样本不足且样本类型不够丰富的问题，对数据进行增强预处理，主要包括在训练准备阶段对数据进行旋转、翻转、平移、增加高斯噪声或变换亮度。

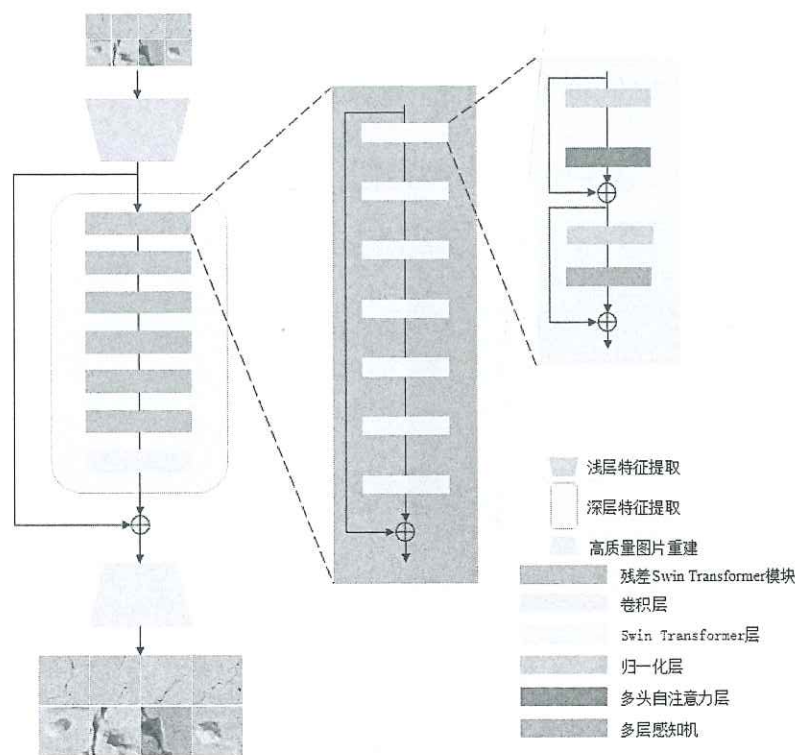


图 3.2 基于 Transformer 的桥梁场景下的小目标超分辨
预处理算法结构图

基于 Transformer 的桥梁场景下的小目标超分辨预处理算法结构如图 3.2 所示。其中，浅层特征主要包含低频信息，而深层特征侧重于恢复丢失的高频信息。通过长跳跃连接，该方法能够将低频信息直接传递到重建模块，这有助于深层特征提取模块专注于高频信息的恢

复，并稳定训练过程。深层特征提取模块由多个残差 Transformer 块组成，通过滑动窗口自注意力机制捕获裂缝等小目标的局部细节，提升在复杂背景下对细微裂缝的检测能力。高质量图像重建模块结合浅层和深层特征，通过卷积和上采样重建高分辨率图像，确保裂缝细节在放大后清晰呈现，并有效抑制噪声干扰。

通过这种方式，低分辨率的桥梁表面图像在进入感知网络之前得到了高质量的放大和细节增强。这不仅提高了小尺度损伤特征的可辨识度，还在一定程度上抑制了由于噪声和环境因素带来的干扰，超分结果如图 3.3 所示，其中左图为实拍图，右图为裂缝超分结果。

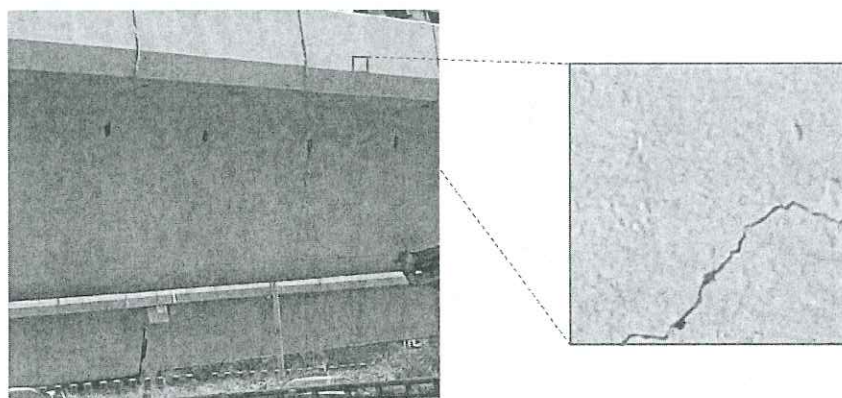


图 3.3 桥梁表面裂缝超分结果示例

3.2.1.2. 多模态融合的桥梁表面异常感知

在针对桥梁场景下的小目标异常感知任务中，实际工程光照变化复杂，单一的 RGB 图像难以全面表征异常，本项目提出了多模态融合的小目标桥梁表面异常感知算法，通过结合 Transformer 架构，基于交叉注意力机制，将红外图像、深度图与 RGB 图进行有效融合，以实现桥梁表面异常的感知，网络架构如图 3.4 所示。



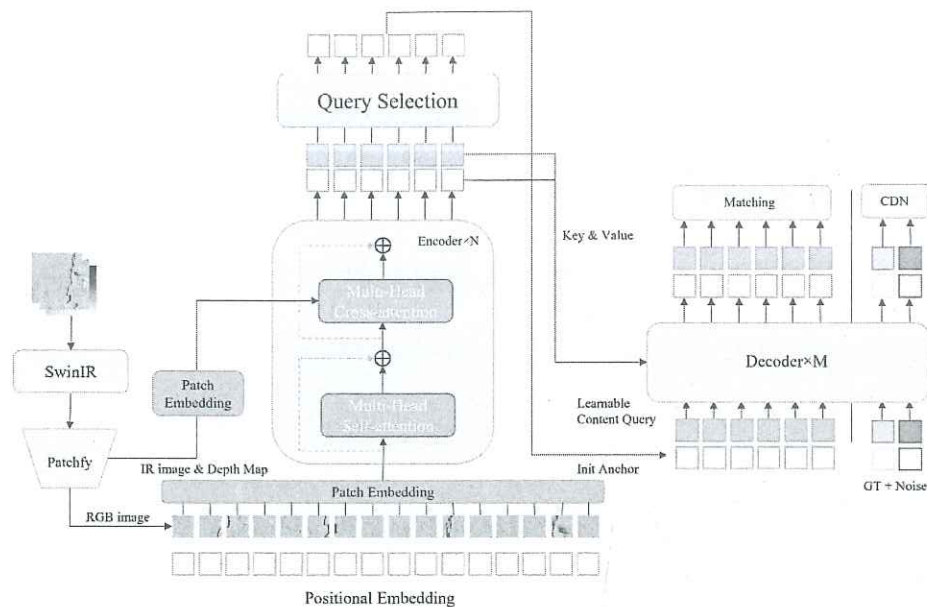


图 3.4 多模态融合的小目标桥梁表面异常感知架构示意图

首先，RGB、红外和深度图像经由超分辨率处理，并通过块嵌入（Patch Embedding）模块将图像块转化为适合 Transformer 处理的嵌入表示。在编码器部分，采用多头自注意力和交叉注意力机制，实现多模态特征的深度融合。接着，模型通过位置编码与查询机制对潜在目标区域进行筛选，解码器执行候选框的关联匹配。

在检测阶段，引入了软式非极大值抑制算法以便更好地保留潜在目标信息、提升检测的精确度和鲁棒性。传统非极大值抑制（Non-Maximum Suppression, NMS）策略通过抑制置信度较低的候选框以减少冗余检测,存在的主要问题在于其直接剔除低置信度的候选框，可能导致潜在目标的漏检，尤其在复杂背景下对小目标的检测表现不佳。不同于传统 NMS 的硬性抑制，软式非极大值抑制算法（Soft-Non-Maximum Suppression, Soft-NMS）通过对重叠区域的候选框置信度进行平滑衰减，避免对弱置信度框的直接剔除，从而保留更



多潜在目标信息。这种策略在复杂场景下能有效降低漏检率，并显著提高检测的精度和稳定性。此外，Soft-NMS 结合噪声鲁棒性训练，使模型在处理复杂背景和干扰时，能够更精确地区分出真实目标，提升了模型对异常检测的整体一致性与鲁棒性。

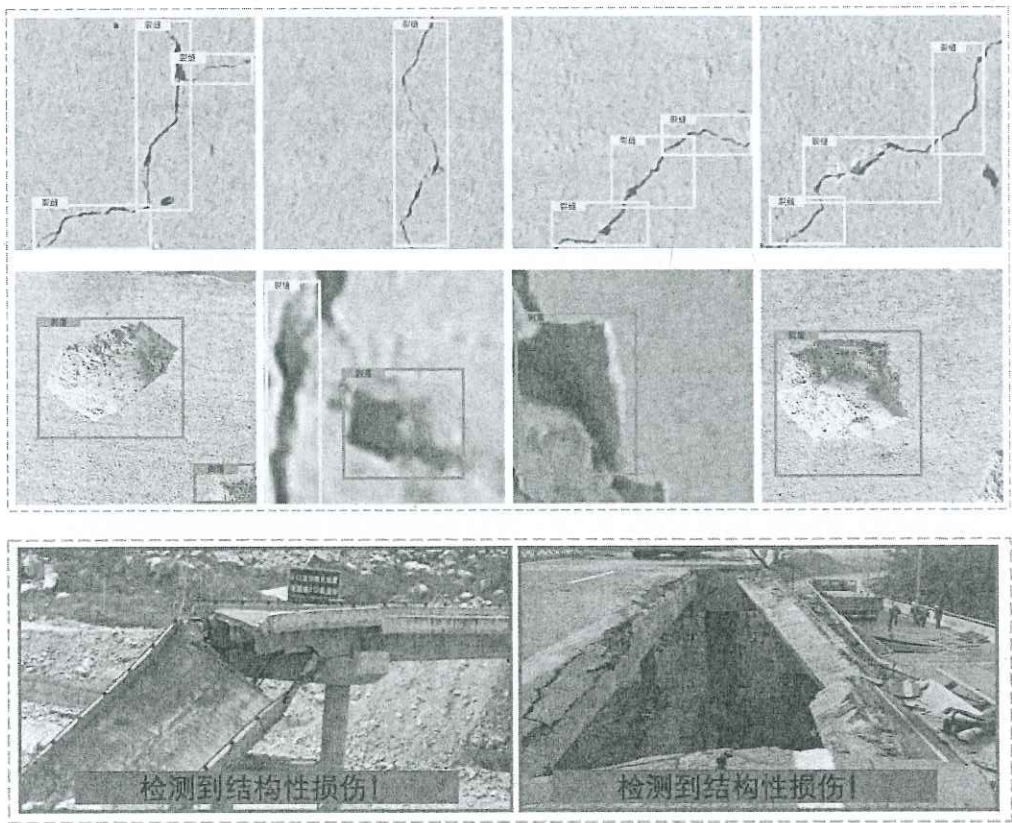


图 3.5 桥梁表面异常感知结果示例

在模型训练过程中，首先，采用自监督学习预训练模型进行初始化，通过从无标签数据中自主学习丰富的特征表示，并结合多任务学习策略，使模型能够高效适应多种任务需求。在裂缝和表面损伤数据集上进行精细调优，进一步提升模型对特定场景的适应性与泛化能力。在训练过程中，采用了更为先进的损失函数组合，包括 Focal Loss 用于缓解类别不平衡问题，通过动态调整易分类和难分类样本的权重，有效解决裂缝像素占比极低($<10\%$)的挑战。同时，结合 Tversky Loss，



进一步优化对小目标和不对称目标区域的处理，增强模型对细小裂缝区域的分割能力，确保在复杂背景下模型的收敛性与准确性。与传统的交叉熵损失和 Dice 损失相比，这种组合更适合处理不平衡数据和复杂分割任务，提升了整体检测性能。

综上，通过采集桥梁表面的成像信息，对网络进行训练，可以实现对桥梁表面异常状态的感知分类，得到损伤类别，感知示例如图 3.5 所示。其中黄色检测框表示为检测到裂缝、蓝色检测框表示为检测到剥落、红色检测框为检测到坍塌。在野外复杂光影干扰下，单一尺度的感知算法极易受植被阴影、水面反光及混凝土纹理干扰，导致识别精度大幅波动。本项目通过多模态特征深度融合与 Soft-NMS 算法的引入，从底层逻辑上增强了系统对复杂背景的抗干扰能力。

此外，由于裂缝等损伤对桥梁的损害不仅与损伤外观相关，本项目联合损伤外观表征与损伤发生位置提出针对结构抗力衰减风险的外观异常程度评级。其中，轻度外观异常场景包含混凝土表面出现少量网状裂缝等轻度耐久性裂缝；中度外观异常场景包含，出现一定数量的耐久性裂缝；中重度外观异常场景包含，出现少量未超限斜裂缝，钢筋露出但未锈蚀或有轻度浮锈；重度外观异常场景包含，出现大量未超限斜裂缝或出现贯通性等超限裂缝，钢筋露出且锈蚀。

本部分的桥梁病害感知算法在对桥梁上的耐久性裂缝，超限裂缝、钢筋裸露等病害的识别及分类准确率与该类型病害的外观异常等级评估的精度拟达到 95% 以上。



3.2.1.3. 小样本病害检测优化策略

针对钢筋外露、局部坍塌等桥梁表观损伤发生频率低、样本稀缺导致的识别精度不足问题，本项目在上述异常感知框架基础上，进一步引入了多种针对小样本学习与长尾分布的优化策略，构建数据层面与训练范式层面的小样本病害检测增强体系。在数据层，构建"桥梁结构-病害类型-环境条件"三元组文本提示范式，引导生成式 AI 模型基于真实桥梁场景图像，合成多视角、多天气条件下的稀缺病害样本，从根本上扩充训练数据；此外，通过数据增强方案，实现模型对相同样本的差异化感知，以扩大模型训练数据量。具体采用的增强方案包括几何变换（旋转、剪切、透视变换），颜色空间扰动（亮度、对比度、饱和度、色调分离）及混合裁剪等算法。

在训练层，首先基于大规模未标注桥梁图像进行掩码自编码（MAE）预训练，提取桥梁表观通用特征表征；进而引入伪标签对比学习半监督框架，利用高置信度伪标签作为辅助监督信号，结合一致性正则化机制（通过对同一样本施加差异化增强强制预测一致），充分挖掘未标注数据潜在分布信息。针对尾部类别，采用类别感知的非均匀采样机制，依据有效样本数倒数动态调整采样概率，确保钢筋外露、局部坍塌等稀缺类别在每轮训练中获得充足梯度更新；并引入 Focal Loss 与 Tversky Loss 组合，通过动态调制难易样本权重与优化类别不平衡度量，缓解小样本类别在优化过程中的梯度淹没问题。针对标注稀缺的局部坍塌，钢筋外露等少数类别，在进一步全监督训练阶段采用类别感知的非均匀采样机制。确保全部样本中的稀缺类



别在每轮训练中获得更高的采样权重。

3.2.2. 基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量

陕西省地跨秦岭、巴山及关中平原，地形地貌极端复杂，秦巴山区极易受强暴雨、暴雪引发的山洪、泥石流等次生灾害影响，对桥梁结构的瞬时稳定性构成了巨大威胁。传统的非接触式监测技术在面对此类极端图像退化与结构突发响应时，往往因特征提取失效而导致预警漏报。因此，本项目不仅关注常规天气下的图像恢复，更聚焦于极端地质灾害场景下的视觉生存能力。具体来说，该模型采用一个自适应退化感知提取框架准确提取退化图像中的关键特征，并与联合修复网络配合实现在多退化场景下的“一体化”图像增强，随后，结合基于多靶标追踪的非接触式桥梁结构变形测量算法高精度地检测桥梁具体的位移数据，实现复杂环境下桥梁结构异常形变的实时监测和预警，保障桥梁的结构安全。基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量模型主要分为两个核心部分：基于退化感知的自适应一体化图像增强，基于多靶标追踪的非接触式桥梁结构变形测量，该技术流程示例如图 3.6 所示。

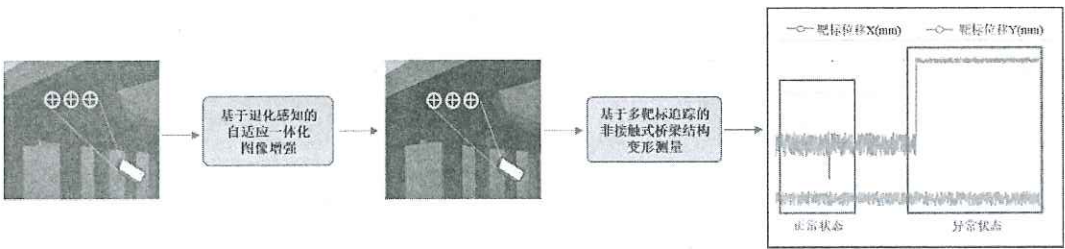


图 3.6 基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量技术流程图

3.2.2.1. 基于退化感知的自适应一体化图像增强

桥梁全天候视觉信息的清晰度是结构健康监测的基础。为了确保



在多变气候和光照条件下的桥梁形变监测稳定性与准确性，当前研究的重点在于如何有效减少增强模型的冗余度，并显著提升视觉增强的效果。尽管通过融合多个模块的训练方法和引入相关的蒸馏技术能够在一定程度上缓解模型的冗余问题，但在实际应用场景中，增强效果仍存在局限。尤其在面对陕西关中及秦巴山区常见的强暴雨、暴雪等常规环境，以及由此诱发的山洪、泥石流、落石等极端地质灾害场景时，模型可能无法充分处理细节信息，容易导致诸如目标遮挡、颜色偏移、亮度和对比度失真等负面影响。这些问题不仅影响图像的视觉质量，还可能掩盖桥梁受灾后的突发变形或周边环境异常，造成严重的安全隐患。因此在退化图像的增强过程中，捕捉和理解图像的退化信息至关重要。基于这一考虑，本项目拟设计基于退化感知的自适应一体化图像增强模型，如图 3.7 所示，旨在建立一种从常规天气到极端灾害场景的全覆盖增强机制。

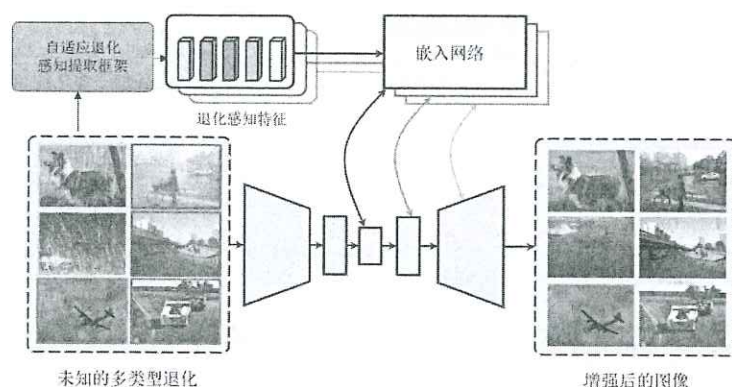


图 3.7 基于退化感知的自适应一体化图像增强模型

在这个模型中，退化感知特征通过嵌入网络将信息融入到解码端，从而帮助网络在增强过程中关注图像的退化信息，以解决增强过程中的遮挡、颜色失真、对比度降低等负面效果。在整个训练过程中，我



们采用了特征提取与增强同步进行的策略，以确保模型在理解图像干扰因素时能够保持一致性。这种联合训练机制使得模型不仅能够准确处理退化图像，还能在恢复过程中保持语义内容和结构信息的完整性，从而有效提升增强效果和模型的鲁棒性，为复杂场景下的图像增强提供了更加稳健的解决方案。

自适应退化感知提取框架如图 3.8 所示，该框架首先将退化图像送往浅层提取模块以提取图像的整体退化特征 F_{deg} ，随后这些特征将被送往融合模块进行多层次信息的整合。同时，将图像进行下采样操作后输入到注意力模块中以提取干净的结构特征 F_{str} ，从而防止图像在增强过程发生失真。针对陕西本地典型极端场景，如强降雨导致的低能见度、泥石流遮挡等，该框架通过“退化强度自适应”机制实现技术保障：当感知到的退化特征强度剧增时，注意力模块能够自动聚焦受损严重的区域，并在融合过程中动态提升结构特征 F_{struct} 的响应权重。这种机制确保了在极端恶劣环境下，模型依然能稳定锁定桥墩、主梁等关键监测部位的边缘信息，有效捕获桥梁的突发变形或周边异物侵入，为极端场景下的图像恢复提供技术应急支撑。

通过逐步融合总体退化特征和结构特征来提取退化感知特征，如下方公式所示，这些退化感知特征将进一步送往增强主网络中的 U 型模块解码端进行增强辅助。

$$F_{fusion} = Attn(F_{deg} \oplus F_{struct})$$

其中 F_{deg} 为图像的整体退化特征， F_{struct} 为图像的结构特征， F_{fusion} 为融合特征， $Attn$ 表示注意力模块。



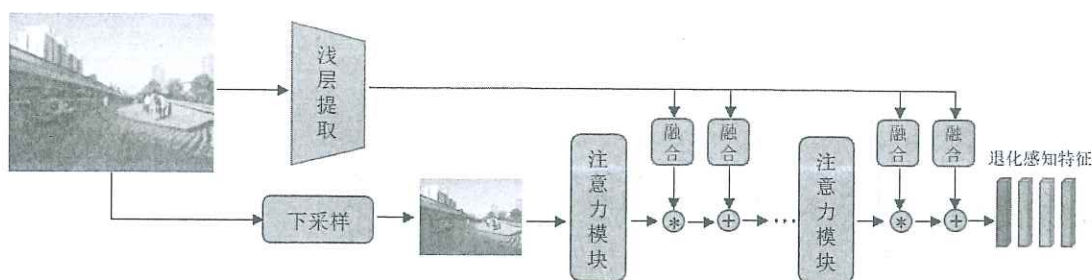


图 3.8 自适应退化感知提取框架

基于退化感知的自适应一体化图像增强技术，能够在多种未知天气状态下实现场景图像增强，如去除雨水、雪、雾等天气带来的干扰，从而提升图像的清晰度和可视化效果。该技术通过感知和自适应处理机制，有效融合了多天气条件下的图像信息，确保在复杂环境中仍能获得高质量的视觉数据，为桥梁结构形变监测与预警提供了可靠的技术支撑。具体的增强效果如图 3.9 所示，展示了不同天气条件下的处理结果。

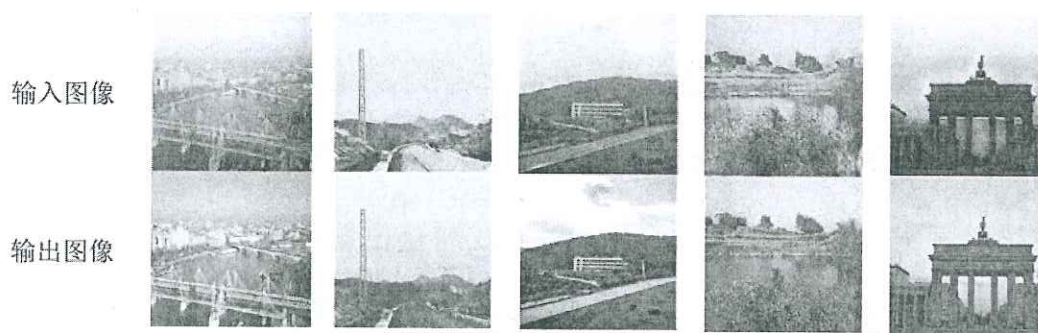


图 3.9 增强效果图

3.2.2.2. 基于多靶标追踪的非接触式桥梁结构变形测量

针对桥梁结构形变监测的多点测量需求，本项目拟结合陕西省内典型桥型制定差异化的设备布设方案。针对桥梁结构形变监测的多点测量需求，本项目拟结合陕西省内典型桥型制定差异化的设备布设方案。对于蜀河汉江大桥等跨越 U 型河谷的中承式拱桥，重点在拱顶、



拱脚及吊杆锚固区布设靶标,并通过在河谷两岸基岩及墩台侧方交错布设视觉感知单元,实现对梁体侧面、底面及支座等关键部位的全方位覆盖。针对梁体侧面及底面感知,相机利用河岸高程优势形成 20 - 45° 的斜仰视观测角度,以突破常规视场对梁底暗区感知的局限,观测间距控制在 20 - 50m; 针对支座及细部构件,相机安装高度原则上与监测中心齐平,水平偏角控制在 15° 以内,通过近程高倍率成像建立对支座剪切变形及脱空状态的精密感知机制。

采用固定安装的光学相机,在桥梁空载状态下采集基准图像,并在运营过程中高频采集实时图像,相机通过精确标定,建立图像坐标系与世界坐标系的映射关系,为后续位移量化提供几何基础。相机标定模型如公式所示:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中, (u, v) 为像素坐标, (X_w, Y_w, Z_w) 为世界坐标, $\mathbf{K}$ 为相机内参矩阵, $[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$ 为相机外参矩阵(旋转和平移), s 为尺度因子。图 3.10 为多靶标位移测量示意图。

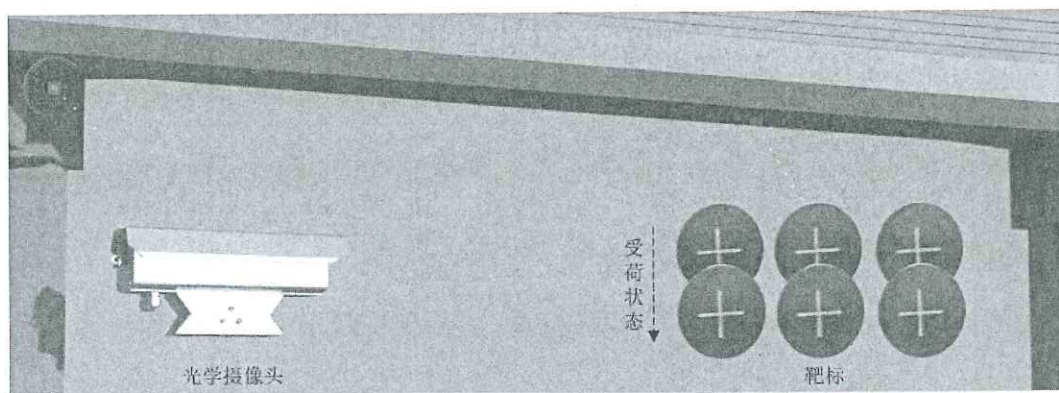


图 3.10 靶标位移测量示意图



本项目拟采用自适应阈值分割和形态学处理技术从复杂背景中提取靶标区域。随后通过 Canny 边缘检测算法提取靶标轮廓，然后基于灰度矩计算靶标的亚像素质心坐标，如公式所示：

$$x_c = \frac{\sum_i \sum_j i \cdot I(i,j)}{\sum_i \sum_j I(i,j)}, \quad y_c = \frac{\sum_i \sum_j j \cdot I(i,j)}{\sum_i \sum_j I(i,j)}$$

其中， (x_c, y_c) 为靶标质心的亚像素坐标， $I(i,j)$ 为像素点 (i,j) 的灰度值，有效克服整像素定位的量化误差，为微小位移测量提供技术保证。随后通过比对基准图像与实时图像中各靶标的质心坐标，计算得到像素域的二维位移矢量：

$$\Delta u_i = u_i^{real} - u_i^{ref}, \quad \Delta v_i = v_i^{real} - v_i^{ref}$$

其中， $(u_i^{ref} - u_i^{ref})$ 为第 i 个靶标在基准图像中的质心坐标， $(u_i^{real} - u_i^{real})$ 为实时图像中的质心坐标， $(\Delta u_i, \Delta v_i)$ 为像素位移矢量。通过尺度转换关系转化为实际物理位移：

$$\begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1} \cdot \frac{Z_i}{f} \begin{bmatrix} \Delta u_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix}$$

基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量模型通过高频采集实时状态下的靶标位置图片，送入基于退化感知的自适应一体化图像增强模块中进行图像增强，随后进行基于多靶标追踪的非接触式桥梁结构变形测量，如图 3.11，模型在复杂环境下的位移测量精度能够达到 1mm 以内。



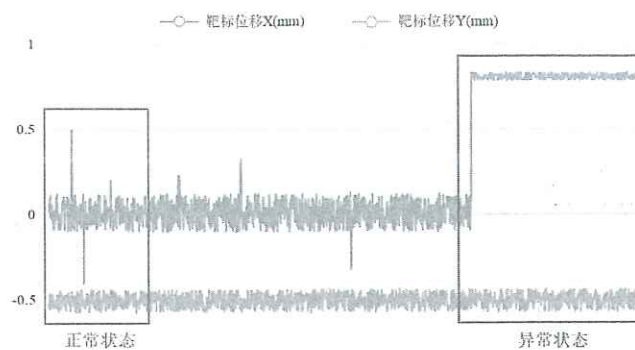


图 3.11 靶标位移测量曲线图

3.2.3. 基于深度感知的桥梁周边船车碰撞检测

基于深度感知的桥梁周边船车碰撞风险预警方法是桥梁安全监测系统的子模块，负责实施评估由外部撞击等因素导致的突发事故风险。该算法主要分为两部分，其中采用目标检测算法判断发生撞击的车辆或船舶的类别与距离信息，此外使用深度估计技术辅助的孪生网络负责判断是否发生撞击。

方案核心采用计算机视觉算法，通过对与桥面方向平行的摄像监控视频帧的实时分析，实现桥下通过的车辆或船舶的精确识别与是否发生碰撞的精确判断。系统首先利用轻量化目标检测网络对图像中的车辆与船舶目标进行识别与边界框回归；在目标接近桥梁后，通过结合孪生网络及深度感知算法预测是否与桥墩发生碰撞。当检测结果满足预警条件时，系统立即触发报警逻辑，实现对撞击导致桥梁安全风险的智能预警。为保证算法在复杂气候与光照条件下的鲁棒性，检测模型将通过多场景、多角度、多时间段的数据集进行训练与优化。此外，整体算法采用轻量化设计，通过对各模块初步测算时延并计算得出，整体方案时延小于 1s。在实际部署层面，为实现桥梁关键断面的全方位监控，系统支持单台边缘计算终端同时接入并并行处理 4 路



高清视频流，同步覆盖桥梁上、下游航道及双向路面，实现了对桥梁关键受力断面（如桥墩、跨中）的闭合监控。在多路并发的高负载工况下，系统依然能保持秒级响应，显著提升了大规模监控场景下的预警效率。

3.2.3.1. 多尺度船舶车辆检测算法

实现船舶及车辆的定位与类别判断，需要对拍摄桥墩的摄像头视角下的拍摄图片进行检测，对此提出基于轻量化网络的船舶及车辆目标检测算法，实现水面及公路上目标的快速准确识别，如图 3.12 所示，为目标检测的网络结构示意图。

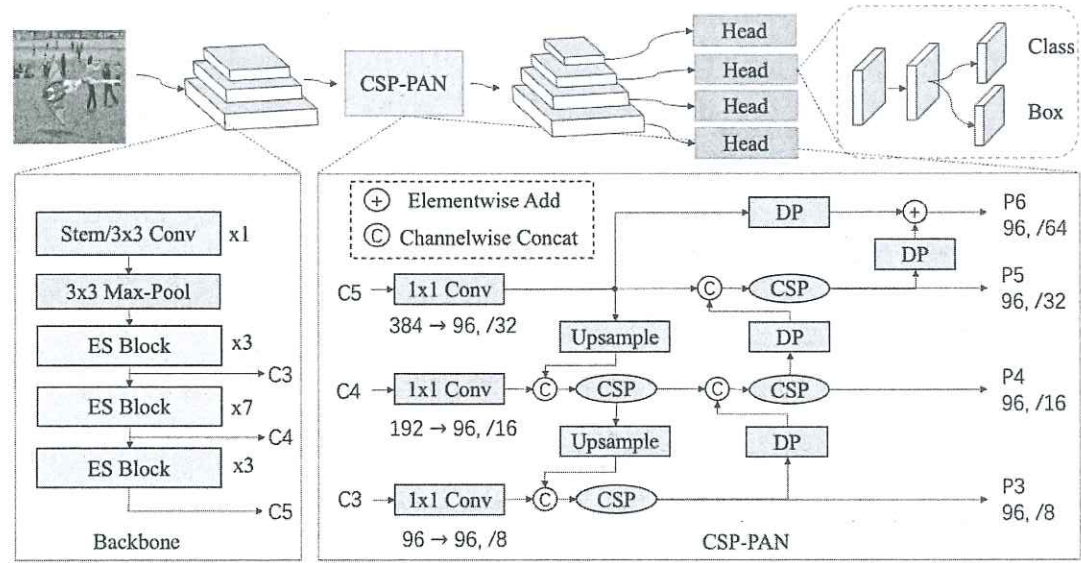


图 3.12 目标检测网络结构示意图

一个高性能的骨干网络对目标检测模型的精度和速度至关重要。船舶及车辆目标检测采用了超轻量、高精度骨干网络 ESNet(Enhanced ShuffleNet)，使得整个目标检测模型不仅计算量更小、延迟更低、精度更高，还拥有更好的鲁棒性，能够更好地适配多种硬件环境，适合部署与落地。ESNet 是在 ShuffleNetV2 的基础上引入了添加压缩与激



励模块（SE 模块）和 GhostNet 中的 Ghost 模块，对不同通道信息进行融合来加强模型特征表达能力，使模型更加关注被检测目标本身，提升模型精度；同时 ESNet 使用了深度可分离卷积，提升了目标检测的速度。

该目标检测算法在 Neck 和 Head 部分也采用了深度可分离卷积，将 3×3 卷积核增大至 5×5 ，增大感受野的同时保持了速度不变。在 Neck 部分，算法采用了 CSP-PAN 结构，使用 1×1 的卷积统一输出特征的通道数，减少计算量并保证特征融合性能不受影响。

该目标检测算法受到 YOLOX 等优秀算法的启发，使用了更精准的 SimOTA 采样策略，随训练过程动态变换标签分配方式，通过在目标区域采集高质量的样本来有效加速模型收敛。

此外由于部分场景下存在桥梁长度长，远景目标小等情况，针对这一问题本方案额外采用多维度优化策略提升小目标检测性能。首先，在模型架构层面，引入特征金字塔网络（FPN）与多级 anchor 设计，通过自上而下和自下而上的特征融合机制，有效整合不同尺度的语义信息，使网络能够同时利用浅层的高分辨率细节特征和深层的强语义特征；同时，针对小目标尺寸特性，优化 anchor 尺寸分布，增加小尺寸 anchor 的比例，提升模型对远端小目标的空间适应能力。其次，在数据层面，采用针对性的数据增强技术，包括随机裁剪、尺度变换、亮度对比度调整等方法，人工生成更多样化的小目标训练样本，并结合 focal loss 损失函数，通过动态调整难易样本的权重分配，有效缓解正负样本不平衡问题，使模型更加关注难以分类的小目标样本。最



后,在预处理环节,部署轻量级超分辨率网络对输入图像进行预处理,在不显著增加计算复杂度的前提下,提升图像分辨率,增强小目标的细节信息,为后续检测任务提供更丰富的视觉特征。

在训练阶段,检测算法针对车辆检测任务的训练数据采用 COCO 数据集与 BDD100K 数据集进行训练,总共包含约 30 万张图像数据;针对船舶检测部分的训练数据采用 Seaships、iShip-1 与 CM-Ship-ReID 数据集进行训练,总共约 4.5 万张数据。另外,在训练过程中还加入少量的如 Crop、Flip、Multi-Scale 等数据增强策略进行更稳定的训练,使得模型精度再次提升。

综上,通过上述算法对实时采集的桥墩视角视频进行推理,可以实现对水面及道路场景下的船舶与车辆目标的快速准确识别,得到实时的目标位置信息,检测示例如图 3.13 所示。

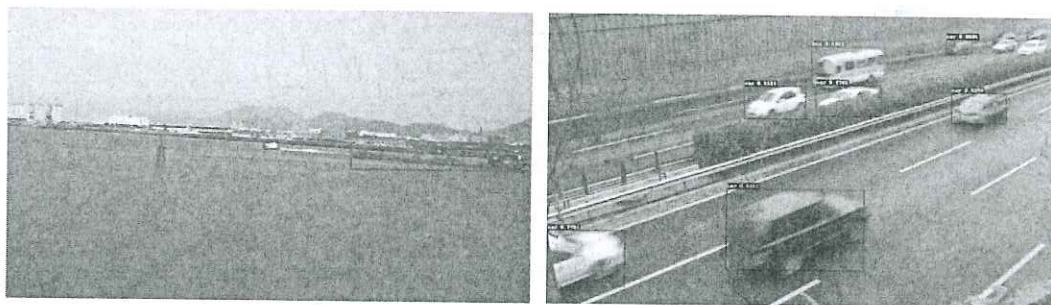


图 3.13 船舶及车辆目标检测结果示例

3.2.3.2. 基于孪生网络的桥墩碰撞判别算法

对于桥墩碰撞的检测,本方案采用基于孪生网络的特征比对检测方案。该网络包含两个结构相同、参数共享的子网络,分别接收桥梁完好状态下的基准图像和当前同角度拍摄的实时监测图像作为输入。两个分支通过深度卷积层提取高维特征表示后,在特征融合层进行相



似度计算，生成特征差异图。基于此差异图对是否发生撞击进行差异化判断。具体算法结构如图 3.14 所示。

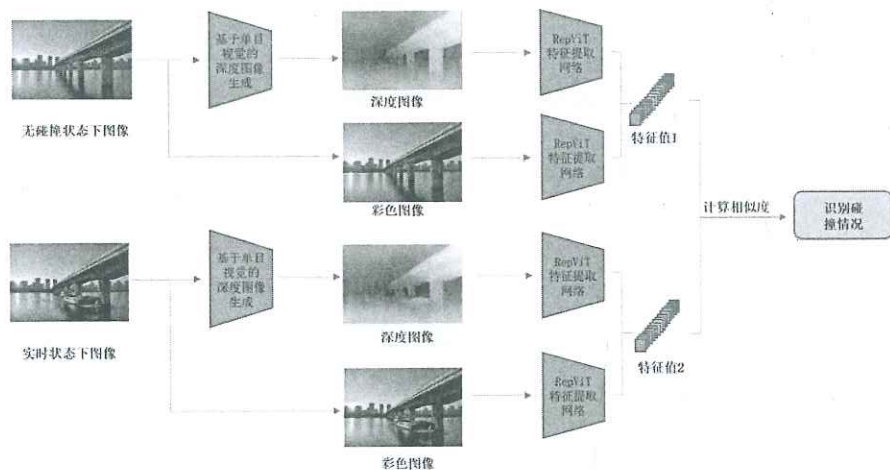


图 3.14 桥墩碰撞判别算法结构

此外，由于图片纵深较大，2D 的 RGB 图像很难包含较远处的目标与桥墩之间的相对位置关系。而考虑到双目视觉系统在远距离测量中的基线限制及激光雷达的高昂成本，本方案拟采用直接基于单目摄像头拍摄的 RGB 图像生成与之对应的深度图像，通过融合彩色图像与深度图像的特征以实现综合评估。此方法不仅可以有效降低硬件系统的复杂度，还能通过深度信息解决单目 RGB 视觉测量中“近大远小”的尺度歧义问题。

本项目拟采用基于 Transformer 的无监督模型实现深度估计。在训练过程中拟采用混合数据驱动策略，结合了真实世界数据集与合成数据集的优势，通过改良多任务训练重构损失函数，如公式所示，以提高深度估计的精度和图像边界的清晰度：

$$L_{depth} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i - \hat{D}_i)^2,$$



其中, D_i 是真实深度值, $\hat{D}_i$ 是预测深度值, N 是像素点的数量。

该方法不仅能够从彩色图像中合成高分辨率的深度图, 而且具有卓越的清晰度和高频细节。模型通过高效的多尺度视觉 Transformer 进行密集预测, 并由此生成深度图, 从而即使在复杂多变的光照和天气条件下, 也能快速准确地预测桥梁场景中各点至虚拟摄像头的距离。此外, 该模型通过结合真实和合成数据集的训练方法, 实现了高泛化能力的估计效果。生成的深度估计图像能够为桥梁的二维像素坐标提供第三维度的深度修正, 从而更精确地表征桥墩结构及目标在三维空间中的相对位置关系。图 3.15 为深度估计算法网络结构。

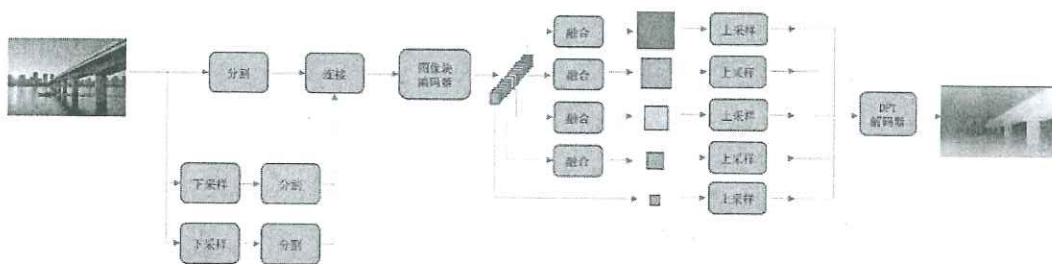


图 3.15 深度估计网络结构

在获取深度信息图像后, 孪生网络采用 RepViT 架构, 包含两个并行特征分支网络, 分别针对深度和彩色图像进行特征提取与融合, 以实现桥墩处是否发生撞击的精确识别。深度图像分支捕捉空间几何特征, 突出场景的整体空间信息; 彩色图像分支则专注纹理、边缘和颜色信息, 通过层次化结构和局部到全局的注意力机制提取细节视觉特征。特征融合阶段, RepViT 的跨模态交互能力将两种图像特征高效融合, 综合信息以提升识别精确度, 确保了模型能够从不同图像数据中提取高维、细粒度特征, 显著提高对桥墩处碰撞的敏感度。



通过上述深度估计与孪生网络融合策略，本研究成功地实现了深度图像和彩色图像特征的深度融合，并结合目标检测算法在孪生网络架构下进行了实时的桥梁周边船车碰撞风险预警。

3.2.4. 基于多源异构数据融合的智能预警模型

传统的桥梁预警多依赖人工经验或单一物理指标，难以应对复杂环境下病害演化、结构响应与外部扰动之间的非线性耦合。针对这一行业痛点，本项目立足于陕西省公路网韧性提升需求，构建了“数据驱动+规则约束”的双引擎预警模型。该模型不再孤立地看待视觉感知的病害图像或传感器监测的形变曲线，而是将其置于桥梁全寿命周期的风险链条中进行审视。

在桥梁运营状态的实时监测与风险研判过程中，来自图像、结构传感器以及外部环境的多源数据并非彼此独立，而是共同反映了桥梁材料劣化、结构响应变化和外部扰动作用之间的复杂耦合关系。单一数据源往往只能描述局部现象，难以揭示结构风险的真正成因。为此，本项目构建了基于多源异构信息的智能预警模型，如图 3.1 所示，在统一的语义框架下融合表观病害、结构变形以及外部威胁信息，通过对其发展趋势和交互影响的综合分析，实现对桥梁整体安全状态的持续感知和动态评估。

3.2.4.1. 多源信息综合关联分析与统一表征

对于桥梁结构而言，表观损伤、结构响应和外部风险事件虽然来源不同，但它们共同构成了由材料层面到整体结构再到外部扰动的完整风险链条。图像数据中裂缝宽度的扩展、剥落区域的变化和混凝土



表面纹理的异常，代表了材料层面的退化过程，反映了局部承载能力的下降趋势。传感器数据中的位移、挠度和振动变化则指向结构整体刚度和受力状态的调整，定义了结构当前的工作状态和演化轨迹。而外部环境中的通航船舶、漂浮物或异常车辆，则可能成为诱发结构异常或放大病害风险的外部触发因素，其运动方向、速度变化以及与桥梁的空间关系均具有重要的风险指示意义。

在构建预警模型前，项目首先对桥梁安全风险类型进行了系统梳理，将其划分为三类核心风险：1）结构抗力衰减风险：主要指裂缝开展、钢筋锈蚀外露、局部坍塌等导致的承载能力持续性退化；2）几何状态异常风险：指由于荷载变化或地质因素引发的墩台沉降、主梁挠度超限及支座突发位移；3）外部环境致灾风险：包括陕西特有的强降雨/山洪导致的冲刷退化、落石撞击以及常规的船车碰撞事件。

智能预警模型通过统一的风险语义框架，将上述三类信息的时间演化、空间分布及变化趋势进行关联分析，使系统不仅能够识别单一风险源本身，更能识别它们之间的作用机制，如材料退化导致的薄弱区在风载或车载作用下产生响应放大，或外部对象的冲击可能对原本就正在加速发展的病害造成进一步破坏。通过这种跨模态的综合表征方式，系统能够在结构尚未达到临界状态前提前捕捉潜在危险信号，使预警结果更符合作用机理与工程逻辑，为科学研判提供完整依据。

3.2.4.2. 智能预警决策模型与风险分级机制

针对拱桥等大型结构，局部细微裂缝往往更多反映的是材料的表面性能，而非结构的即时失稳。因此，本项目摒弃了传统的“单一指



标触发”模式，转而构建基于多源指标耦合的联合预警体系。该体系参考了最新的《公路桥梁运营期安全风险评估标准》（T/CECS G XXXX: 2025），将风险评估从单纯的“病害识别”提升至基于 L （可能性）和 C （后果严重程度）的动态风险评分 D 。

为此，项目建立了以病害特征参数（裂缝，钢筋外露等外观表征异常严重程度）、结构形变参数（位移偏差 Δs 、挠跨比 f/L ）以及外部时空参数（目标间距 D 、相对速度 v ）为核心的指标矩阵。考虑到视觉传感器在百米级运距下的有效分辨率，对于主梁跨中等关键部位，将预警限值重点聚焦于更具结构指示意义的几何变形指标（如 Δs ）和影响结构抗力的显著病害特征。

在正常监控状态下，结构响应稳定、病害无扩展迹象，外部扰动处于常规范围，系统保持常态识别。在病害和结构变形方面，系统基于时间序列分析模型对裂缝位置及宽度等表观损伤变化以及关键部位的位移、振动变化进行动态感知。当感知指标触发初步阈值（如裂缝等外观表征异常严重程度达到中度，或位移出现 $5mm$ 到 $10mm$ 的波动）且呈现超出背景噪声的可疑趋势时，系统会进入风险提示状态；若表观损伤加重或关键部位位移呈现非正常陡升（如外观表征异常严重程度达到重度，位移偏差 Δs 超过 $30mm$ ）时，则表明结构可能进入不稳定演化阶段，系统自动提升预警等级。对于外部环境事件，模型通过运动预测识别船舶、车辆等目标的轨迹偏移与速度异常。当系统判断某类外部对象的运动方向与桥梁可能存在交汇风险，且实时距离 D 缩减至安全阈值（如 $20m$ ）以内时，将自动进入高级别预



警，并提示开展专项检查和必要的交通控制措施；若监测到对象已发生实际接触、指标出现跨越式跳变（如位移瞬间变化超过设计限值的20%）或碰撞迹象，则无须再依赖其他数据进行综合判断，而是直接进入最高等级的极端紧急状态，以保障应急响应的及时性。

表 3.1 预警分级机制

预警级别	关键预警指标限值	特征描述	推荐操作
一级 (正常监控)	轻度外观异常; $\Delta s < 5mm$	结构状态稳定, 病害无扩展趋势, 环境事件风险可控	常规监测
二级 (潜在异常)	中度外观异常; $5 \leq \Delta s < 10mm$	病害或位移趋势出现轻微偏离, 或外部对象呈现轻度关注迹象	加密监测、必要时人工核查
三级 (显著异常)	中重度外观异常; $10 \leq \Delta s < 30mm$; $D < 20m$	病害扩展明显、结构响应加速, 或外部对象呈现潜在危险路径	开展专项检查, 视情况采取限速/限载措施
四级 (高度危险)	重度外观异常; $\Delta s \geq 30mm$; $D <$	结构响应显著异常、病害快	启动应急预案, 可能需要交通



	5m	速发展，或外部对象接近危险距离	管控或局部封闭
五级 (极端紧急)	指标突发跨阈值跳变；发生冲击；局部坍塌	已发生冲击、重大变形，或监测指标出现突发性跨阈值跳变	立即封桥、开展应急抢护和联动处置

如表 3.1 所示，五级预警体系下，系统能够根据监测到的病害扩展速率、结构响应强度及外部风险事件的危险程度动态调整风险级别。特别是在涉及极端事件的情况下，如监测到船舶与桥梁发生接触、冲击结构产生急剧变形、桥梁关键部位响应瞬间跳变等情形时，系统会绕过所有常规综合分析流程，直接触发最高级别的极端紧急预警，要求立即封桥并启动应急抢护和联动处置流程，以确保应急响应能够在第一时间启动，避免因延迟判断造成更大的安全风险。

通过从趋势、机制到行为结果的多层关联，五级预警体系不仅满足工程上的实时性，也具备充分的可解释性。系统会同步给出造成预警提升的关键依据，包括病害发展特征、结构响应变化、外部威胁路径以及三者之间可能的耦合机制，使整个预警过程能够被追溯、复核并用于运营单位的科学决策。依托这一模型，桥梁安全运行的监测管理由以往的“被动响应”转变为“主动识别与提前干预”，显著提升了桥梁全生命周期的风险防控能力。

结合研究内容、实施路线及相应的方案选择，给出桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究的具体工作流程图：

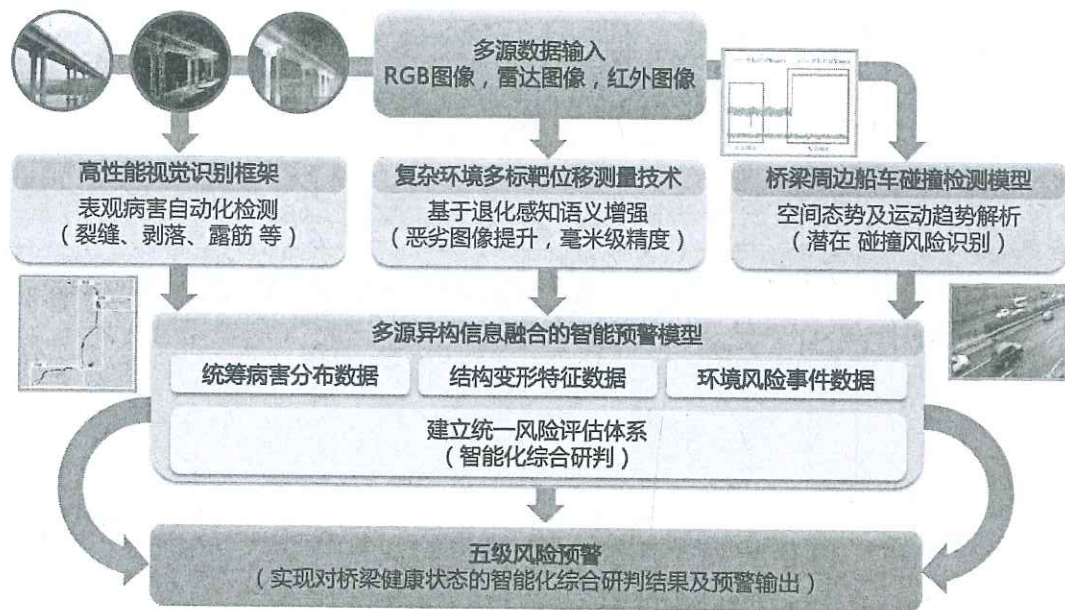


图 3.16 工作流程图

3.3. 技术路线

本研究将围绕桥梁病害识别、结构变形测量、周边环境灾害感知与多源融合预警四个方向展开系统性技术攻关，形成从图像获取、特征感知、智能诊断到综合预警的整体解决方案，为桥梁安全运维提供高效、精准、可长期部署的技术支撑。技术路线图如图 3.17 所示。



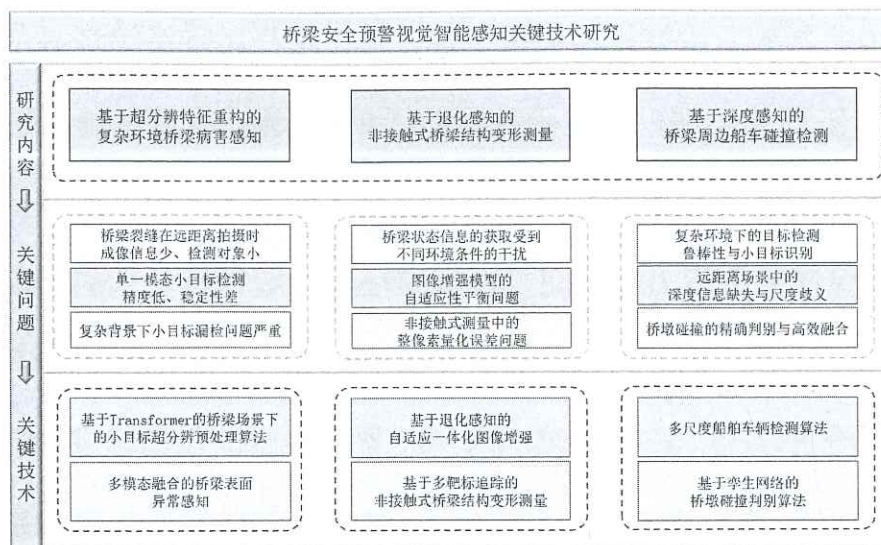


图 3.17 系统技术路线图

①构建面向桥梁表面病害的高性能视觉识别框架，实现对裂缝、剥落、露筋等典型损伤的自动化检测与实时化识别。

②研究基于退化感知语义增强的复杂环境多靶标位移测量技术，攻克恶劣天气下的图像质量提升难题，实现关键结构部位位移与振动的毫米级高精度监测。

③构建融合目标检测与深度估计的智能感知模型，精准解析环境目标与桥梁结构间的相对空间态势及运动趋势，实现对潜在碰撞风险的快速识别与可靠预警。

④构建多源异构信息融合的智能预警模型，统筹病害分布、结构变形特征与环境风险事件等多维数据，建立统一的风险评估体系，实现对桥梁健康状态的智能化综合研判及五级风险预警。

3.4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接

在前述核心算法与关键技术研发的基础上，本项目拟完成桥梁安全预警视觉智能感知系统的集成部署工作，实现从数据采集、智能识



别、风险研判到运维管理的完整闭环。系统围绕实际桥梁场景的运行需求进行工程化实现，构建了稳定的视频接入模块、智能分析模块、可视化管理平台与后台维护体系，并在典型桥梁上开展了连续现场验证，以确保模型能力能够在复杂真实环境下取得可复现的监测效果。

在系统集成阶段，平台实现了多路视频流的同步接入与解码，能够在不同气象条件、昼夜环境和跨距位置下稳定获取清晰图像，并以毫秒级延迟完成关键区域的实时分析。基于前期研发的病害识别算法与结构变形测量模型，系统能够在前端实时提取裂缝变化、剥落区域扩展与关键节点位移信息，结合外部风险目标识别模块，对船舶偏航、车辆异常停留及漂浮物靠近等潜在威胁进行即时报警，在单一平台上实现对桥梁自身状况与外部环境的协同感知。通过统一的数据管理服务，所有识别结果、结构状态参数和风险事件都会在后台持续更新，并自动推送至可视化监控大屏。系统在大屏中提供桥梁全景图层、关键部位状态图表、病害发展曲线以及预警等级变化记录，使管理人员能够基于直观界面快速掌握桥梁整体运行状态。

在运维功能方面，系统提供用户权限管理、参数配置、模型更新、日志审计等后台维护能力，使平台在长期运行中保持可控、可调和可追溯性。现场验证过程中，系统在风雨、大温差、高湿度以及高通航密度环境下均保持稳定运行，实现了病害识别的准确落点、变形测量的持续跟踪以及外部风险的实时预警，验证了原型系统在真实工程条件下的鲁棒性和实用性。通过现场验证，系统不仅证明了技术路线的可行性，也为后续规模化应用及深度功能拓展奠定了坚实基础。



3.5. 有关技术经济指标

本项目完成的多源视觉桥梁安全监测与预警系统原型，经实验室测试与实地验证，整体性能满足工程化应用要求，主要技术指标如下：

（1）病害识别能力：裂缝自动识别精度为 95%，对船舶、车辆等外部风险目标的识别率为 97%，能够稳定支持桥梁关键区域的全天候智能感知。

（2）结构变形测量性能：位移测量精度达到 1 mm 以内，结构振动频率测量误差为 1.5%，满足桥梁运行状态监测及趋势分析的精度需求。

（3）预警分析性能：系统端到端分析延迟为 2.7 秒，整体误报率控制在 4%，可支撑实时风险发现及分级预警响应。

（4）多路视频并发处理能力：系统支持 4 路视频流的同步接入与并发智能分析，包括病害检测、位移测量、风险目标识别等多任务协同处理。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1. 项目承担单位概况

西安电子科技大学是以信息与电子学科为主，工、理、管、文多学科协调发展的全国重点大学，直属教育部，是国家“优势学科创新平台”项目和“211 工程”项目重点建设高校之一、国家双创示范基地之一、首批 35 所示范性软件学院、首批 9 所示范性微电子学院、首批



9 所获批设立集成电路人才培养基地和首批一流网络安全学院建设示范项目的高校之一。2017 年学校信息与通信工程、计算机科学与技术入选国家“双一流”建设学科。

多年来，学校致力于电子信息技术领域的系统研制、科技攻关、工程研发等，创造了我国电子与信息技术领域等多项第一，包括第一台气象雷达、第一套流星余迹通讯系统、第一台可编程雷达信号处理机、第一台毫米波通讯机，以及我军通信装备史上第一部“塞绳电报互换机”、第一台“塔型管空腔振荡器”、第一套“三坐标相控阵雷达”等，为我国信息化、国防现代化做出了重要的贡献。学校现有 8 个国家级科技创新基地、1 个科工局科技创新基地，10 个教育部科技创新基地、28 个陕西省科技创新基地，2013 年入选国家级创新人才培养示范基地。先后牵头承担了“973”、“863”、重大专项、国家重点研发计划、国家自然科学基金重大项目、国家重大项目科研仪器研制项目等重大、重点项目，产生了一批标志性的研究成果。2013 年以来，学校科研指标稳步提升，在认知雷达、移动通讯、网络信息安全、高功率微波集成器件、智能计算、大型天线机电耦合等方面取得了卓有成效的成果，获国家科技奖励 19 项，省部级科技奖励一等奖以上 36 项。

本课题组是我国最早从事星载压缩编码器研制的单位之一，自 1997 年以来深入开展了星载图像、视频压缩编码的研究工作。在该研究领域，课题组先后主持并完成了国家自然科学基金、863、总装国防预研、武器装备预研、卫星型号任务、总装军用电子元器件项目、高分重大专项、探月工程、载人航天、火星探测等多项科研项目。课



课题组始终围绕国家航天领域重大需求，深入研究了可见光全色图像、高光谱图像、立体图像、红外图像和视频图像等各类卫星遥感图像的成像特性、高效压缩编码方法以及高速星载硬件系统实现方法，解决了我国现阶段卫星图像数据传输和存储的瓶颈问题，在满足图像质量要求的前提下提高了压缩比和图像压缩解压缩实时处理能力。相关研究成果已经成功应用于“嫦娥一号”卫星、“嫦娥二号”卫星、“嫦娥三号”卫星、“神州七号”伴随小卫星、“天宫一号”目标飞行器、“天绘一号”测绘卫星以及一系列遥感卫星、马里亚纳海沟万米深潜、火星探测器等多个重大工程中，创造了较大的社会和经济效益。近五年作为课题组获得国家科技进步二等奖 1 项、教育部科技进步一等奖 1 项和国防科学技术奖二等奖 1 项。在科研过程中形成的创新成果发表于 IEEE TIP、IEEE TCSVT、IEEE TGRS, IEEE TNNLS 等杂志以及 IEEE CVPR, AAAI, ACM MM, MMM 等领域顶会中，近五年发表论文 50 余篇，获得专利二十余项。

4.2. 技术力量及人员构成

姓 名	单 位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
何刚	西安电子科技大学	男	1986-12-04	高级	通信工程	项目总体方案设计
高隆	西安电子科技大学	男	1988-01-18	高级	通信工程	项目总体方案设计



徐莉	西安电子科技大学	女	1995-10-18	中级	通信工程	方案理论分析验证
刘振洋	西安电子科技大学	男	2002-04-26	技术员级	通信工程	复杂环境病害检测
乔彤	西安电子科技大学	女	2002-10-07	技术员级	通信工程	复杂环境病害检测
张应富	西安电子科技大学	男	2001-07-17	技术员级	通信工程	桥梁结构形变测量
刘卓岩	西安电子科技大学	男	2002-07-02	技术员级	通信工程	桥梁周边船车碰撞检测
陈海军	西安电子科技大学	男	2001-04-26	技术员级	通信工程	智能预警模型
刘玉萍	中交通力建设股份有限公司	男	1982-10-12	副高级	桥梁工程	桥梁上部结构分析
李宁祥	中交通力建设股份有限公司	男	1971-09-01	副高级	桥梁工程	桥梁下部结构分析
孙洁琼	中交通力建设股份有限公司	女	1986-05-15	中级	桥梁工程	桥梁检测设备规划
李英举	中交通力建设股份有限公司	男	1983-11-19	副高级	交通工程(安全设施)	桥梁检测设备规划
周云亮	中交通力建设股份有限公司	男	1996-03-03	中级	其他	数据集分析构建
马海龙	中交通力建设股份有限公司	男	2000-10-06	技术员级	其他	数据增强算法设计
胥斌	中交通力建设股份有限公司	男	2000-12-11	技术员级	其他	边缘计算设备搭建

4.3. 各自承担的主要工作



课题组由项目承担单位和协作单位组成联合领导小组。本课题拟每半年进行一次检查考评，主要检查科研进度情况，监督科研质量，解决主要问题。在科研经费使用方面，实行由处长、财务科、项目负责人层层审批制度，严格控制经费使用在计划范围内。课题组接受交通运输厅科技处的检查和监督，定期以报告的形式提交中间成果。各单位实施措施如下：

西安电子科技大学：

- (1) 负责桥梁安全预警视觉智能感知系统；
- (2) 负责超分辨特征重构的复杂环境桥梁病害感知；
- (3) 负责基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量；
- (4) 负责基于深度感知的桥梁周边船车碰撞检测；
- (5) 负责基于多源异构数据融合的智能预警模型；
- (5) 撰写研究报告；
- (6) 完成国内外核心期刊论文的投稿并发表以及专利的申请；
- (7) 完成项目鉴定验收。

中交通力建设股份有限公司：

- (1) 提供现场实际采集数据及标注；
- (2) 提供课题依托工程，选择合适的试验路段；
- (3) 组织协调完成现场试验和研究工作；
- (4) 参与完成桥梁安全预警视觉智能感知系统；
- (5) 协助承担单位完成鉴定验收。



4.4. 项目主要负责人情况

项目负责人为西安电子科技大学何刚教授、博士生导师，任国家工信部人工智能评审专家、国家信标委人工智能分委会计算机视觉工作组联合组长、陕西省高校工程研究中心副主任、西电荣耀通信互联创新联合实验室执行主任。于 2008 年本科毕业于西安交通大学，2014 年博士毕业于日本早稻田大学，师从后藤敏教授（IEEE Life Fellow），毕业后加入长江学者李云松教授“图像传输与处理研究所”团队。研究方向是基于人工智能的未来高效视频编码，基于深度学习卷积网络和对抗技术的图像增强处理，视频编码算法及 VLSI 结构设计等研究，发表包括 AAAI、CVPR、T-CSVT 等顶级人工智能及计算机视觉领域会议期刊在内的 SCI 论文及国际会议 40 余篇。主持了国家工信部纵向，国家自然科学基金，陕西省自然基金，国家一等博士后基金，陕西省交通厅科研项目等项目。同时，与工业界合作促进产学研结合，包括与荣耀公司建立联合实验室开发端侧视频增强，与支付宝蚂蚁金服合作流媒体增强，与腾讯公司联合开发图像增强系统，与中科院联合开发 4K 编解码系统，与快手开发高动态视频处理，与数码视讯合作 AI 视频增强系统等。此外，与数码视讯开发的 AI 视频增强 2019 年被 CCTV13《朝闻天下》采访报道。同时，于 2021 年参与完成我国首次马里亚纳海沟万米深潜实时直播任务，受到《陕西新闻》采访报道。担任 IEEE 会员，IEEE T-IP, T-CSVT, T-VLSI, T-MM, ICIP, ISCAS, IET 等期刊会议审稿人，AVS 专家组成员，未来视频编码组(FVC)成员。



五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1. 依托工程（工作）概况

本项目拟依托“国道 316 安康蜀河汉江大桥危桥改造工程健康监测”项目。该项目拟改造蜀河汉江大桥所在地隶属陕西省安康市旬阳县蜀河镇辖区，北距蜀河镇约 300m，西距旬阳县城约 57.70km，蜀河汉江大桥位于 G316 线上跨汉江，连接旬阳县和白河县。桥起止桩号为 K0+047.043~K0+362.830，全桥长 315.79m，桥跨布置：

(14.5+11.8)m 钢筋混凝土现浇板+2×净 119.4m 中承式钢管混凝土拱桥+(10.47+10.52+7.09)m 钢筋混凝土现浇板。

主桥采用中承式有推力钢管混凝土拱桥结构，计算跨径 121.714m，计算矢高 26.84，拱轴线为 $m=1.65$ 的悬链线。主桥标准宽度：1.8m(人行道)+1.2m(吊杆锚固区及护栏)+9.0m(行车道)+1.2m(吊杆锚固区及护栏)+1.8m(人行道)=15.0m，吊杆两侧设置防护栏杆，为方便检修，在拱肋顶增设检修通道。引桥部分主要为平交口，标准桥面横向布置为：0.5m(防撞护栏)+10.2m(行车道)+1.8m(人行道)=12.5m。

桥梁结构随着桥龄的增长、气候和环境等自然因素长期作用以及交通量和非常规超重车荷载的不断增加，桥梁结构和构件将产生不同程度的劣化和损伤积累；同时在桥梁结构运营过程中也不可避免的存在维护不当、交通事故等人为因素和地震、风暴等偶然不利作用。以上种种不利因素必然导致桥梁结构安全性和耐久性发生退化。蜀河汉江大桥投资规模大，是鄂尔多斯康巴什地区建设的重大交通枢纽核心



控制工程，确保大桥的长期安全运营意义重大，其大桥健康监测系统监测范围包括桥梁重要环境参数及荷载输入(如：环境温湿度、温度、视频监控等)与结构静力响应(如：结构应变、吊杆索力、主梁挠度、桥墩沉降等)。

桥梁所在地地貌类型属低山丘陵-汉江河谷河漫滩地貌，拟改造蜀河汉江大桥横跨汉江“U 型”河谷。河谷内地表受汉江流水侵蚀作用强烈，地势起伏较大，地面标高 180.00~225.00m，相对高差约 45m。据安康气象站资料，旬阳县年均降水量 758.2mm，易发生滑坡、崩塌和泥石流地质灾害。

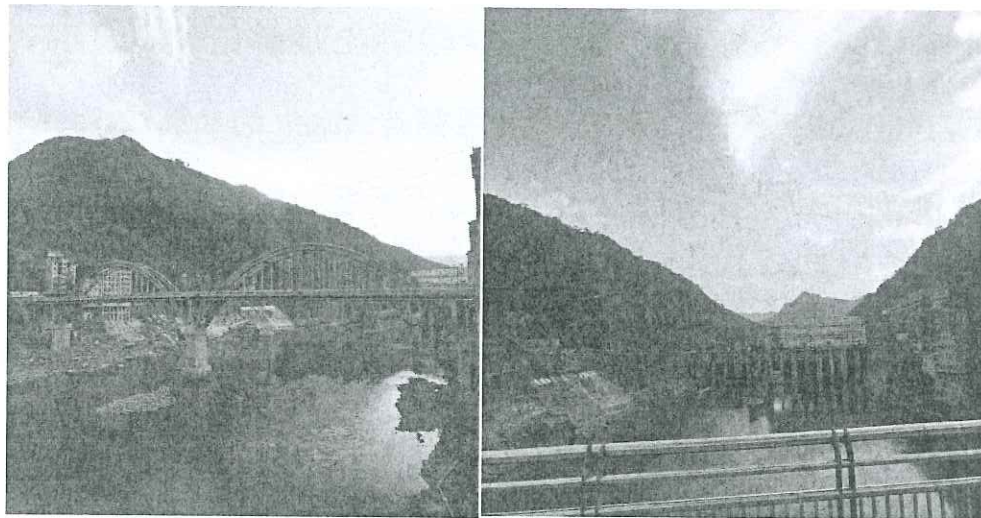


图 5.3 桥梁全貌及周边环境

5.2. 投资来源

本项目经费来源由省级财政科技资金与项目承担单位自筹经费共同构成，资金筹措渠道明确、落实可靠，能够充分保障课题研究任务的顺利实施与按期完成。

其中，陕西省交通运输厅科技计划专项补助经费为 19.85 万元，



主要用于支持项目关键技术研发过程中所需的设备购置、试验测试、专家咨询及部分科研劳务支出等，与项目研究目标和技术路线紧密匹配；项目承担单位自筹经费为 90.15 万元，主要用于补充科研人员劳务、业务试验、现场测试、系统联调、成果凝练及示范应用等相关支出，确保项目研究工作的连续性和完整性。

项目依托的相关桥梁工程均已处于在建或运营阶段，具备完善的基础设施条件和稳定的运行保障能力，可为本课题提供必要的试验环境、监测条件和工程配合支持。项目经费已纳入单位年度科研经费统筹安排，资金来源稳定、使用规范，不存在经费落实风险。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

课题研究起止日期为 2026 年 3 月至 2028 年 3 月，为此，各项研究工作应在 2028 年 3 月前完成。具体计划进度如下：

- (1) 2026 年 3 月~2026 年 5 月：开展调查分析制定研究大纲，现场调查，进行初步试验研究；
- (2) 2026 年 6 月~2026 年 9 月：完成多场景的桥梁户外视觉数据集的构建，包括实际户外场景数据采集；
- (3) 2026 年 9 月~2026 年 10 月：完成基于退化感知的非接触式桥梁结构变形测量构建；
- (4) 2026 年 11 月~2026 年 10 月：进行第一次实地系统调试测试，计划针对蜀河汉江大桥健康监测项目进行图像增强算法、结构变形测量算法的初步试验，测试算法对多场景下桥梁结构变形测量的精



度。

(5) 2027 年 1 月~2027 年 4 月：开发基于超分辨特征重构的复杂环境桥梁病害感知算法；

(6) 2027 年 5 月~2027 年 8 月：进行桥梁表面异常感知算法的实地效果测试；

(7) 2027 年 9 月~2027 年 12 月：开发基于深度感知的桥梁周边船车碰撞检测算法，构建基于多源异构数据融合的智能预警模型；

(8) 2028 年 1 月：计划针对安康蜀河汉江大桥周边环境进行的实地效果测试；

(9) 2028 年 2 月~2028 年 3 月：完成整个桥梁安全预警视觉智能感知系统联调，撰写研究报告，完成项目验收。开展并完成相关专利 2-3 项撰写与申请。

5.4. 组织管理形式

课题组由项目承担单位和协作单位组成联合领导小组。本课题拟每半年进行一次检查考评，主要检查科研进度情况，监督科研质量，解决主要问题。在科研经费使用方面，实行由处长、财务科、项目负责人层层审批制度，严格控制经费使用在计划范围内。课题组接受交通运输厅科技处的检查和监督，定期以报告的形式提交中间成果。



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	19.85	合 计	110.0	19.85	90.15
工程配套研究经费	0.0	1.设备费	10.2	2.85	7.35
单位自筹	90.15	（1）购置设备费	10.2	2.85	7.35
其他经费	0.0	（2）设备改造与租赁费	0.0	0.0	0.0
		2.业务费	55.0	9.0	46.0
		（1）材料费	17.0	2.0	15.0
		（2）测试化验实验加工费	20.0	2.2	17.8
		（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	8.0	1.4	6.6
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	8.0	1.4	6.6
		（6）其他费用	2.0	2.0	0.0
		3.劳务费	42.8	6.0	36.8
		（1）专家咨询费	5.0	1.0	4.0
		（2）聘用人员劳务费	37.8	5.0	32.8
		（3）其他劳务费	0.0	0.0	0.0
		（二）间接费用	2.0	2.0	0.0
		4.管理费	2.0	2.0	0.0
		5.绩效支出	0.0	0.0	0.0



1、设备费

序号	设备名称	数量	单价（元）	合计（元）	备注
1	高分辨率摄像机	2	7,000	14,000	桥梁关键部位布控
2	红外热成像摄像机	1	12,000	12,000	热成像病害检测
3	多路视频采集与同步设备	1	16,000	16,000	多源视频接入
4	智能边缘计算单元	1	18,000	18,000	AI 分析/前端识别
5	通信与数据传输模块	1	3,500	3,500	4G/5G 通信
6	标定辅助靶标	4	750	3,000	变形测量标定
7	安装支架	4	1,000	4,000	高稳定安装
8	数据缓冲与存储模块	1	2,500	2,500	工业级存储
9	远距离光学变焦摄像机	1	8,000	8,000	外部风险监测
10	可视化显示终端	1	4,000	4,000	现场/中心展示
11	平台服务器	1	17,000	17,000	后端数据处理

2、业务费测算说明（64.0 万元）



业务费主要用于项目研发过程中的材料消耗、系统测试、实验加工、差旅会议以及成果产出等支出，具体包括：

(1) 材料费（17.0 万元）

材料费主要用于项目研发与测试过程中所需的各类实验材料与消耗性器件采购，重点支撑系统搭建、多轮实验与算法优化，具体包括：

视觉感知与病害检测相关材料：用于桥梁病害感知实验中所需的工业相机配套器件、镜头附件、连接线缆、固定组件及相关辅材，支撑基于超分辨率特征重构的裂缝、剥落及钢筋外露等病害检测研究。

非接触式结构变形测量相关材料：用于退化感知图像增强与结构变形测量实验所需的标定靶标、标识材料、安装辅件及测试耗材，支撑多靶标识别与跟踪算法在复杂环境下的精度验证。

船车碰撞检测与环境感知相关材料：用于船舶、车辆等目标识别与深度感知实验中所需的辅助器件、测试标识及环境布设材料，支撑相对距离与运动趋势分析实验。

系统集成与数据采集耗材：包括接口模块、转接器、存储介质、临时布线及其他实验消耗品，用于多源异构数据采集、融合与系统调试过程。

上述材料根据实验批次和实际消耗量分阶段采购，合计测算 17.0 万元。

(2) 测试化验实验加工费（20.0 万元）

测试化验实验加工费主要用于系统功能验证、算法性能评估及样机加工等工作，重点保障项目关键技术 in 真实桥梁环境下的可靠性与



工程适用性，具体测算如下：

(a) 分系统与全系统现场测试费用（15.0 万元）

项目计划开展三次现场测试：

第一次测试：复杂桥梁病害感知与非接触式结构变形测量分系统测试；

第二次测试：桥梁周边船车目标识别、深度感知与碰撞风险判别测试；

第三次测试：多源异构数据融合的智能预警系统全系统联调与验证。

测试费用按 5.0 万元/次测算，主要用于测试组织、设备布设、系统调试、数据采集与测试保障等支出。

(b) 实验加工与样机试制费用（5.0 万元）

用于系统研发过程中涉及的标定部件、结构件、接口模块等的加工与试制，以及系统集成过程中必要的功能验证加工支出。

上述两部分合计 20.0 万元。

(3) 差旅费/会议费/国际合作与交流费（8.0 万元）

用于项目启动、中期检查、阶段交流与成果总结等会议组织，10000/次，2 次；以及项目成员外出调研、学术交流和现场测试差旅支出，食宿标准 300 元/人天，交通费 1500/人次，按每次出差 4 人，5 天，预估共需 5 次。共 8 万元。

(4) 出版/文献/信息传播/知识产权事务费（8.0 万元）

用于项目成果论文发表、专利申请、资料印刷及相关信息传播费



用，保障研究成果的规范产出与推广应用。

(5) 其他费用（2.0 万元）

用于项目实施过程中发生的必要但无法细分至上述科目的零星支出。

3、劳务费测算说明（42.8 万元）

劳务费主要用于项目研发人员和专家咨询支出，包括：

(1) 聘用人员劳务费（37.8 万元）

用于支持研究生和科研辅助人员参与项目研发、实验和数据分析工作；8 个研究生，1500 人/月，2 个博士，3000 人/月；共 18 个月，37.8 万元；

(2) 专家咨询费（5.0 万元）

用于邀请相关领域专家对技术路线、实施方案和阶段成果进行咨询与评审。

劳务费标准按照相关管理规定执行，支付对象、标准及周期均经过合理测算。

4、间接费用（2.0 万元）

间接费用主要用于项目组织实施过程中发生的管理与服务支出，包括科研管理、财务管理、条件保障等必要费用，按照相关政策规定比例计取。

5、经费筹措与使用说明

本项目经费筹措以单位自筹为主、省厅补助为辅，资金来源清晰、落实可靠。经费支出结构与研究内容高度匹配，能够有效保障项目按



计划推进。项目实施过程中将严格执行财务管理制度,确保专款专用,项目验收阶段将配合开展财务专项验收或审计工作。

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)	0
		3、发表论文(篇)	2
		(1) 其中 SCI 索引收录数	1
		(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)	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	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



一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(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	否
		(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	12
		(1) 博士、博士后	2
		(2) 硕士	10
		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



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	0
		10、环保效益	0
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

8.1. 项目预期目标（项目的考核目标）

（1）病害识别能力：裂缝自动识别精度为 95%，对船舶、车辆等外部风险目标的识别率为 97%，能够稳定支持桥梁关键区域的全天候智能感知。

（2）结构变形测量性能：位移测量精度达到 1 mm 以内，结构振动频率测量误差为 1.5%，满足桥梁运行状态监测及趋势分析的精度需求。

（3）预警分析性能：系统端到端分析延迟为 2.7 秒，整体误报率控制在 4%，可支撑实时风险发现及分级预警响应。

（4）多路视频并发处理能力：系统支持 4 路视频流的同步接入与并发智能分析，包括病害检测、位移测量、风险目标识别等多任务协同处理。

8.2. 提交的研究成果及其形式

- （1）提供一套桥梁安全预警视觉智能感知系统原型；
- （2）撰写关键技术研究报告与系统测试验证报告；



(3) 申请专利 2-3 项;

(4) 发表与成果相关 SCI/EI 检索论文 2 篇, 论文发表将注明“依托陕西交通科技项目”;

(4) 形成《桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究技术指南》。

8.3. 经济、社会、环境效益分析

实施桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究, 可以显著提高桥梁的公共安全性, 减少事故发生, 降低维护成本, 并延长桥梁的使用寿命。通过实时监测和预警, 能够优化维护计划, 减少资源消耗, 保障了人员和车辆的安全。主要体现在以下几个方面:

(1) 降低维护成本、延长使用寿命。通过实时监测桥梁状态, 能够提前发现潜在问题, 减少紧急修复的频率, 从而降低维护费用, 及时预警和早期干预有助于延长桥梁的使用寿命, 减少重建和大规模修复的频率;

(2) 提高公共安全。本系统通过多源感知技术, 提供实时预警信息, 能有效防止桥梁安全事故的发生, 保障过桥人员和车辆的安全, 在桥梁状况异常时, 系统能够快速发出警报, 协助相关部门迅速采取行动, 减少事故损失;

(3) 减少资源消耗。通过本系统的精准检测和预警, 可以减少不必要的施工和修缮, 有效降低建筑材料和能源的消耗。

九、其它需要说明的问题

无。



十、申请单位意见



单位负责人：(签字)

年 月 日

廖海波



桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究

大纲评审意见

2026年03月13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“桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究”（项目编号：25-52K）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、项目研究人员组成基本合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，经费预算符合规定，具备开展研究工作的条件。

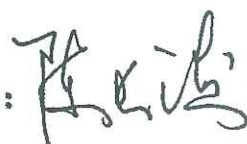
三、预期成果完全覆盖研究目标。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：1. 尽快落实与项目研究相符的依托工程。

2. 进一步聚焦研究内容。

主任委员：



2026年03月13日

专家审查意见表

项目名称	桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究				
专家姓名	陈长海	职务/职称	正高级工程师	专 业	桥梁工程
专家单位	陕西省交通规划设计研究院有限公司			联系电话	13309281155

评 审 意 见

项目聚焦桥梁安全监测行业核心痛点，以视觉智能感知为核心构建全流程技术体系，研究方向贴合陕西交通基础设施安全运维的实际需求，项目整体设计具备较强的创新性、工程性和实用性，研究基础扎实、技术路线可行、研究内容基本完整，团队具备一定的前期研究基础与实施能力具备开展研究的基本条件。建议进一步完善。

1、建议针对不同桥型结构明确设备（摄像头、靶标等）的布设方案，包括布设高度、角度、间距，以及与桥梁结构关键部位的相对位置等。

2、桥梁工程中部分病害（如钢筋外露、局部坍塌）属于小样本场景，方案中针对小样本病害的模型训练策略较少，易导致此类病害的识别精度不足，建议补充小样本病害的检测优化方案。

3、项目针对雨、雪、雾等常规复杂环境设计了图像增强方案，但未考虑陕西本地典型极端场景（如强暴雨、山洪、暴雪、强风、地震等）对桥梁监测的影响，此类场景不仅会导致图像严重退化，还可能引发桥梁突发变形、周边灾害（泥石流、落石）等，建议结合陕西的气候、地质特点，补充极端场景下的技术应急处理策略。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 13 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	桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究				
专家姓名	李皓	职务/职称	正高	专 业	桥梁
专家单位	铁一院.			联系电话	13609191693

评 审 意 见

1. 优化人员组成. 建议增加桥梁专业人员.
2. 依托工程有三项. 应进一步落实依托工程.
3. 对安全风险的类型进一步梳理.
4. 明确安全预警用哪些指标. 并~~由~~提出安全预警的限值.
5. 聚焦桥梁安全本身, 总结陕西省内量大面广的桥梁特点、~~和~~结构
研究内容.

评审专家(签字): 李皓
 2016年3月13日
 (本意见入档, 应填写工整, 纸面不敷, 可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	25-52K 桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究				
专家姓名	李立峰	职务/职称	教授	专 业	桥梁
专家单位	湖南大学			联系电话	13607433836

评 审 意 见

研究大纲总体内容齐全，具有一定的研究技术路线和前期研究基础，科研团队在图形处理方面具有很好的研究能力，团队具有很好的科研能力、人员组织合理，经费预算符合规定，并有依托工程支撑。几点建议进行细化

1、关键技术问题有 5 个，内容明显偏多、需要提炼。

2、研究内容也偏多，病害、变形、船车撞等预警，任何一个内容都足够构成一个研究项目。如何深化并能达到实用更为合适。

3、技术指标的精度说明，裂缝自动识别精度为 95%、系统支持 4 路视频流，怎么理解的、建议说明。

评审专家（签字）： 李立峰

2026 年 3 月 13 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	桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究				
专家姓名	杜进生	职务/职称	教授	专 业	桥梁工程
专家单位	北京交通大学			联系电话	13552795846

评 审 意 见

项目研究围绕桥梁病害识别、结构变形测量、周边环境灾害感知与多源融合预警四个方向展开系统性技术攻关，形成从图像获取、特征感知、智能诊断到综合预警的整体解决方案，试图为桥梁安全运维提供高效、精准、可长期部署的技术支撑。

项目研究内容宽泛，似乎更专注所谓的智能和图像问题，对桥梁工程检测监测存在的实际问题凝练不聚焦。

建议针对桥梁的实际需求，凝练问题，有针对性的提出研究技术路线和研究内容。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 13 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	桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究				
专家姓名	张保昆	职务/职称	正高	专 业	桥梁工程
专家单位	西安理工大学			联系电话	13892818733

评审意见

一、明确研究项目的适用范围（石拱桥、钢桥、
悬索桥、连续梁等）

二、研究项目与常规的桥梁监测数据源
的对比、结合。

三、视觉智能感知的范围受限，桥梁侧
面、对立面、立面、顶面如何感知

评审专家（签字）：张保昆

年 月 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究 (项目编号: 25-52K)

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	陈长海	陕西省公路勘察设计院	桥梁工程	桥梁工程	正高工	陈长海
2	委员	张保元	西安市市政建设集团 有限公司	公路工程 与管理	市政工程	正高工	张保元
3	委员	卢皓	中铁第一勘察设计院	桥梁工程	桥梁工程	正高工	卢皓
4	委员	杜进生	北京交通大学	桥梁工程	桥梁工程	教授	线上评审
5	委员	李立峰	湖南大学	土木工程	土木工程	教授	线上评审

评审会参会人员签到表

姓名	职称/职务	工作单位	联系电话
陈世海	正高	省设计院	13309281155
张陈昆	正高	市双安团	1389281872
李皓	正高	铁一院	13609191693
杜进生	正高	北京交通大学	13552795846
李立峰	正高	湖南大学	13607433836

2016 年 3 月 13 日

专家意见处理表

项目名称：桥梁安全预警视觉智能感知关键技术研究

(项目编号： 25-52K)

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	陈长海	建议针对不同桥型结构明确设备（摄像头、靶标等）的布设方案，包括布设高度、角度、间距，以及与桥梁结构关键部位的相对位置等。	已根据专家意见完成对应内容修改，本项目在研究大纲 3.2.2.2 中补充了面向典型拱桥的设备布设方案。相关修改内容说明如下： 针对桥梁结构形变监测的多点测量需求，本项目拟结合陕西省内典型拱桥制定针对性的设备布设方案。以蜀河汉江大桥等跨越 U 型河谷的中承式拱桥为代表，对于蜀河汉江大桥等跨越 U 型河谷的中承式拱桥，重点在拱顶、拱脚及吊杆锚固区布设靶标，相机利用河岸高程优势布置于基岩稳固处，相机安装高度原则上与靶标中心齐平，观测间距 20-50m，水平偏角控制在 15° 以内。采用固定安装的光学相机，在桥梁空载状态下采集基准图像，并在运营过程中高频采集实时图像，相机通过精确标定，建立图像坐标系与世界坐标系的映射关系，为后续位移量化提供几何基础。
2	陈长海	桥梁工程中部分病害（如钢筋外露、局部坍塌）属于小样本场景，方案中针对小样本病害的模型训练策略较少，易导致此类病害的识别精度不足，建议补充小样本病害的	已根据专家意见对相关内容进行了补充完善，针对钢筋外露、局部坍塌等小样本病害识别精度不足的问题，在研究大纲 3.2.1.3 节中补充了小样本

		检测优化方案。	病害检测优化方案。相关修改内容说明如下： 数据层：采用生成式 AI 合成多视角、多天气条件下的稀缺病害样本，同时结合数据增强策略，扩充样本多样性与特征覆盖面。 训练层：首先基于大规模未标注图像进行 MAE 预训练提取通用特征；进而引入半监督伪标签对比学习框架，利用高置信度伪标签与一致性正则化挖掘未标注数据价值。针对尾部类别，实施类别感知非均匀采样机制动态调整采样概率，并采用 Focal Loss 与 Tversky Loss 组合损失函数，通过动态调制难易样本权重与优化类别不平衡度量，有效缓解稀缺类别的梯度淹没问题，显著提升小样本病害的检测精度。
3	陈长海	项目针对雨、雪、雾等常规复杂环境设计了图像增强方案，但未考虑陕西本地典型极端场景（如强暴雨、山洪、暴雪、强风、地震等）对桥梁监测的影响，此类场景不仅会导致图像严重退化，还可能引发桥梁突发变形、周边灾害（泥石流、落石）等，建议结合陕西的气候、地质特点，补充极端场景下的技术应急处理策略。	已根据专家意见对相关内容进行了补充完善，针对陕西本地典型极端场景对桥梁监测的影响，在研究大纲 3.2.2 及 3.2.2.1 节中补充了极端场景下的技术应急处理策略。修改内容概述如下： 1. 在 3.2.2 开头增加了针对陕西秦巴山区复杂地质与气候背景的描述，明确了极端灾害监测对非接触式测量技术的严苛挑战，将技术目标从“通用增强”提升为“极端灾害应急监测”。 2. 在 3.2.2.1 中细化了极端退化因素对监测效果的具体负面影响（如目标遮挡、突发变形掩盖等）。针对性地提出了“退化强度自适应”机制，通过动态调整结构特征的权重，确保在低能见度、泥

		石流等极端环境下,模型能优先锁定桥梁关键部位(如桥墩、主梁)的边缘信息。 3. 完善了针对陕西本地强降雨、暴雪等场景的应急处理逻辑,确保系统在图像质量严重退化时,依然具备对结构异常形变与周边异物侵入的捕获能力,显著增强了系统的鲁棒性与可靠性。
4	卢皓 优化人员组成,建议增加桥梁专业人员。	已根据专家意见对项目人员进行进行了优化完善,相关修改内容已体现在研究大纲 4.2 节中。项目组新增中交通力建设股份有限公司桥梁专业技术人员刘玉萍、李宁祥全程参与项目指导,进一步加强了团队在桥梁结构分析、工程判定和现场应用方面的专业支撑。两位桥梁结构工程师将结合大跨度桥梁受力分析、结构状态评估及工程运维经验,对监测指标设置、预警判据构建及结果解释进行专业把关,强化预警模型与桥梁实际受力特征、结构安全状态之间的一致性,从而提升项目方案的工程针对性、专业性和实施可行性。 已根据专家意见进一步落实依托工程,并对研究大纲 5.1 节中的依托工程概述进行了相应更新。项目组已与合作单位专家进行了深入沟通和专题论证,最终明确以蜀河汉江大桥作为本项目的主要研究对象。该桥作为典型的中承式拱桥,在结构受力特征、运行环境条件及安全监测需求等方面具有较强代表性,能够为本项目相关关键技术研究、系统验证与工程应用提供有力支撑。
5	卢皓 依托工程有三项,应进一步落实依托工程。	

6	卢皓	对安全风险的类型进一步梳理。	已根据专家意见对安全风险类型进行了进一步梳理，相关修改内容已体现在研究大纲 3.2.4.1 节中。本项目以蜀河汉江大桥为依托，聚焦于拱桥的相关安全风险，将该类别桥梁风险统一归纳为“结构抗力衰减”、“几何状态异常”及“外部环境致灾”三大核心类型。体系涵盖了从微观材料损伤到宏观结构失稳的全过程，并针对陕西秦巴山区地质特点，增补了山洪冲刷、落石撞击等特定致灾因子的权重分析。 在此基础上，项目参考桥梁运营期安全风险评估相关标准，本项目参考最新的《公路桥梁运营期安全风险评估标准》(T/CECS G XXXX: 2025) 针对“结构抗力衰减”、“几何状态异常”两个维度提出了相应的安全风险预警等级标准。系统通过各模块测量与检测到的各维度风险指标对整体风险等级进行分级研判，形成一级（正常监控），二级（潜在异常），三级（显著异常），四级（高度危险），五级（极端紧急）的五级预警体系，从而提升风险识别、状态判别与预警响应的系统性和规范性。
7	卢皓	明确安全预警用哪些指标，并提出安全预警的限值。	已根据专家意见对安全预警指标及其限值进行了补充完善，相关修改内容已体现在研究大纲 3.2.4.2 及表 3.1 中。项目结合蜀河汉江大桥的结构特点，重新梳理了安全预警逻辑，参考最新的《公路桥梁运营期安全风险评估标准》(T/CECS G XXXX: 2025)，将预警判定重点聚焦于“结构抗

		力衰减”与“几何状态异常”两类核心指标的耦合分析,并进一步明确了相应的预警指标体系与分级限值。修改内容概述如下: 1. 重新针对导致拱桥中的钢筋混凝土结构结构抗力衰减的外观异常如裂缝等情况进行分类,以辅助安全预警限值的评估。其中,轻度外观异常场景包含混凝土表面出现少量网状裂缝等轻度耐久性裂缝;中度外观异常场景包含,出现一定数量的耐久性裂缝;中重度外观异常场景包含,出现少量未超限斜裂缝,钢筋露出但未锈蚀或有轻度浮锈;重度外观异常场景包含,出现大量未超限斜裂缝或出现贯通性等超限裂缝,钢筋露出且锈蚀。 2. 针对拱桥特点,将位移偏差 D 和挠跨比 f/L 设定为更高权重的结构状态指标。对于视觉感知较为困难的细小裂缝,将其作为二级(潜在异常)的辅助参考,而将三级(显著异常)的裂缝,符合视觉传感器在实际布控环境下的识别精度上限和桥梁结构维修加固的工程判据。 3. 表 3.1 中的风险等级判定严格遵循了新标准中的“风险等级取值区间”与“后果严重程度等级”的对应关系。同时,保留并细化了基于相对距离 D 的物理预警限值,确保了方案的合规性。
8	卢皓	已根据专家意见对相关内容进行了补充完善,相关修改内容已体现在研究大纲 3.2.1、3.2.2 及 3.2.3 节中,进一步强化了研究内容对陕西省桥梁 研究内容聚焦桥梁安全本身,结合陕西省内量大面广的桥梁特点和结构。

		结构特点和实际需求适配性。 项目立足陕西省桥梁数量大、分布广、类型多样的实际情况，结合山区桥梁占比较高、服役环境复杂、运维压力较大的区域特点，进一步将研究重点聚焦于桥梁结构安全监测与风险预警本身。以蜀河汉江大桥为主要依托工程，围绕拱桥病害识别、结构变形感知和周边风险监测等关键任务，完善了面向典型拱桥的技术方案设计，并通过对监测间距、拍摄角度、相机安装位置及关键部位覆盖方式的针对性优化，增强方案对陕西省内典型运营桥梁安全监测需求的适应能力与工程应用价值。
9	李立峰	已根据专家意见对关键技术问题进行了提炼和重构，相关修改内容已体现在研究大纲 3.1 节中。针对原有关键技术问题数量偏多、内容交叉较为明显的问题，项目组对相关表述进行了系统梳理，将原 5 项关键技术问题精炼整合为 4 项，进一步突出研究主线和核心矛盾。修改过程中，重点对原有问题之间的关联性进行了归并优化，将“远距离成像分辨率不足”与“恶劣环境下图像退化”两类高度相关的视觉感知问题进行整合，统一纳入复杂环境下桥梁目标可靠感知这一核心问题框架之中，并通过超分辨率重构与退化感知增强相结合的技术思路加以解决。修改后的关键技术问题如下： ①拟解决传统人工巡检与点式传感器监测存在的效率低、覆盖窄、成本高以及难以适应恶劣环 关键技术问题有 5 个，内容明显偏多、需要提炼。

		境和实时自动化需求的问题。 ②拟解决受布设距离限制导致的远距离成像分辨率不足, 以及由雨雪、光照变化等复杂工况引起的图像退化与细微病害特征提取可靠性差之间的矛盾。 ③拟解决传统手段难以在大范围内对风荷载、车辆荷载作用下的结构变形实现同步、连续且高精度监测的问题。 ④拟解决现有系统对通航船舶、漂浮物冲击等具有突发性与隐蔽性的周边环境潜在风险缺乏实时识别与预警能力的问题。
10	李立峰	本研究内容也偏多, 病害、变形、船车撞等预警, 任何一个内容都足够构成一个研究项目。如何深化并能够达到实用更为合适。 本部分修改内容在研究大纲 3.1 中, 本项目针对桥梁可能出现的安全风险, 构建了一种视觉桥梁安全预警系统。通过结合“结构抗力衰减”(外观病害)、“几何状态异常”(变形)与“外部环境致灾风险”(船车撞)等可能风险。通过依托蜀河汉江大桥开展的研究于验证, 将研究项目深化为针对陕西省内拱桥场景的通用预警系统。 此外, 相关研究内容根据项目指南和招标文件制定。面向系统性桥梁安全预警任务, 多个维度对桥梁可能存在风险的关键位置进行数据获取, 利用视觉智能感知算法实现预警。因此, 保留了项目研究内容所包含的桥梁缺陷检测, 桥梁形变检测以及车船检测等内容。

11	李立峰	技术指标的精度说明，裂缝自动识别精度为95%、系统支持4路视频流，怎么理解的、建议说明。	本部分修改内容在研究大纲 3.2.1.2 及 3.2.3 中。 1. 针对“95% 识别精度”，在 3.2.1.2 中补充说明该精度指本系统在对桥梁上的耐久性裂缝，超限裂缝、钢筋裸露等病害的识别及分类准确率与该类型病害的外观异常等级评估精度达到 95% 以上。 2. 在 3.2.3 中明确了“4 路视频流”的部署价值。说明该指标通过算法的轻量化设计与异构加速实现，能够支撑单台设备同时监控“上/下游航道、路面双向”四个维度。实现了桥梁关键断面的全方位闭环覆盖，且在多路并发下保持时延小于 1s 的秒级响应，显著提升了碰撞风险的预警效率。
12	杜进生	项目研究内容宽泛，似乎更专注所谓的智能和图像问题，对桥梁工程检测监测存在的实际问题凝练不聚焦。建议针对桥梁的实际需求，凝练问题，有针对性的提出研究技术路线和研究内容。	本部分修改内容在研究大纲 3.1 中，重点对关键技术问题进行了提炼与重构： 针对评审意见提出的“内容偏多”问题，将原有的 5 项问题精炼为 4 项。重点将“远距离成像分辨率不足”与“恶劣环境下图像退化”这两个相关联的视觉感知痛点进行了深度合并，通过“超分辨率重构”与“退化感知增强”的一体化手段，解决复杂环境下桥梁工程监测的可靠性问题。 同时，在上述问题基础上，依托蜀河汉江大桥，将问题凝练为针对陕西省内拱桥的安全评估系统，将复杂环境桥梁病害，结构型变检测，车船碰撞检测，整合为评估安全风险“结构抗力衰减”、“几

			何状态异常”与“外部环境致灾风险”三个维度，聚焦于整体的桥梁安全风险评估。 相关研究内容根据项目指南和招标文件制定。面向系统性桥梁安全预警任务，多个维度对桥梁可能存在风险的关键位置进行数据获取，利用视觉智能感知算法实现预警。因此，保留了项目研究内容所包含的桥梁缺陷检测，桥梁形变检测以及车船检测等内容。
13	张保元	明确研究项目的适用范围（砖桥、钢桥、缆索桥、连续梁等）。	本项目聚焦于陕西蜀河汉江大桥，构建了一种针对陕西省内拱桥的视觉桥梁安全预警系统。
14	张保元	研究项目与常规的桥梁监测发掘信息的比较、结合度。	常规的桥梁监测主要依赖技术人员定期现场检查，或通过传统视觉监控设备与人工检查的方案实现。本项目依托人工智能技术，辅助工作人员对传统视觉监控设备采集数据进行监测。通过前沿深度学习技术，本项目改进了传统监控设备的“远距离成像分辨率”与“恶劣环境下图像退化”等问题，并从结构抗力衰减”（外观病害）、“几何状态异常”（变形）等多方面构建智能预警决策模型，提升了常规监测系统的智能度。 本部分修改内容在研究大纲 3.2.2.2 中，通过在河谷两岸基岩及墩台侧方交错布设视觉感知单元，实现对梁体侧面、底面及支座等关键部位的全方位覆盖。针对梁体侧面及底面感知，相机利用河
15	张保元	视觉智能感知的范围受限。对梁体侧面、底面、支座等方面如何感知。	

			岸高程优势形成 20-45°的斜仰视观测角度，以突破常规视场对梁底暗区感知的局限，观测间距控制在 20-50m；针对支座及细部构件，相机安装高度原则上与监测中心齐平，水平偏角控制在 15° 以内，通过近程高倍率成像建立对支座剪切变形及脱空状态的精密感知机制。
--	--	--	---

陈洪

大纲评审委员会专家（签字）：

项目负责人（签字）：何刚