

项目合同编号：25--77K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究

承担单位：长安大学

项目负责人：赵轲

通讯邮编、地址：710064、陕西省西安市南二环路中段

传真、电话：029-82334483、029-82334483

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

项目合同编号：25--77K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究

承担单位：长安大学

项目负责人：赵轲

通讯邮编、地址：710064、陕西省西安市南二环路中段

传真、电话：029-82334483、029-82334483

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

(1) 综合多维信息的桥梁监测技术研究

结构健康监测是桥梁智能检测与诊断评估的基础，其核心在于构建科学合理的传感体系与测点布设方案，以实现桥梁结构运行状态的全面、连续、真实与高精度感知。本研究以南沟大桥为对象，基于系统的结构损伤致因分析结果，结合现阶段结构健康监测技术与人工检测技术的发展水平，从桥梁本体状态特征与外部环境作用条件两个维度出发，系统规划桥梁在设计阶段、施工阶段及运营阶段的全过程监测内容、监测指标及技术手段。

研究遵循“全面监测、重点防控”的总体技术路线，在实现桥梁关键构件、关键部位及关键参数全覆盖监测的基础上，重点加强对结构损伤致因链关键节点的高密度、精细化监测与动态控制，精准把握桥梁结构性能退化过程中的“咽喉环节”，有效抑制病害演化与风险扩散，将桥梁运行安全风险控制在最低水平。同时，构建多源异构监测数据的统一管理与质量控制机制，为后续智能诊断、性能评估与趋势预测提供高可信度数据基础。

(2) 基于轻量化深度学习的桥梁故障诊断技术研究

桥梁监测系统获取的多源数据蕴含着丰富而复杂的结构状态信息，是实现桥梁智能诊断与健康评估的核心数据基础。然而，传统分析方法难以充分挖掘海量监测数据中隐含的高维特征及其演化规律，限制了桥梁安全评估精度与可靠性。

本研究围绕桥梁监测数据的深层信息挖掘问题，系统开展基于深度学习的桥梁损伤识别、状态诊断与性能评估技术研究。通过构建具备强泛化能力与高鲁棒性的智能模型，深入挖掘监测数据中潜在的损伤特征模式与劣化演化规律，实现对桥梁损伤类型、损伤位置、损伤程度及性能退化过程的精准识别与量化评估。同时，融合机理约束与数据驱动优势，提升诊断结果的工程可信度与可解释性，为桥梁健康状态判识、风险分级管控及养护决策提供稳定可靠的技术支撑。

（3）多参数融合的桥梁趋势预测技术研究

鉴于南沟大桥各结构部位已呈现不同程度的损伤与退化特征，桥梁性能演化呈现显著的非线性与不确定性特征，单一参数或单一模型难以满足长期安全评估与预测需求。本研究以桥梁服役全过程性能演化为目标，系统开展多参数融合与深度学习相结合的桥梁趋势预测方法研究。

通过综合结构变形、温度、振动、应力等多类关键监测参数，构建高维多源融合数据集，研究面向复杂服役环境的桥梁性能演化建模方法，形成覆盖短期预警、中期评估与长期预测的系统化桥梁预测算法库。实现对南沟大桥未来结构性能变化趋势、关键构件劣化进程及潜在安全风险精准预测与分级预警，为桥梁养护维修时机选择、养护方案优化及全寿命周期管理提供科学依据和决策支持。

2. 技术关键

（1）多维度传感器的南沟桥梁全方位监测技术

研究合理的传感器部署方案，确保对桥梁主梁、墩台、支座及关键构造部位的全面覆盖；结合桥梁不同结构部位、不同工况条件及不同运维任务需求，科学选配位移传感器、振动传感器、应变传感器等多类型传感设备，构建多维感知的桥梁监测体系。

(2) 基于轻量化深度学习的桥梁故障诊断技术

针对桥梁监测数据的复杂性与高维性，研究信号处理与数据预处理技术，提升监测数据质量，构建以卷积神经网络、递归神经网络等为核心的深度学习诊断模型，提高桥梁故障识别与性能评估精度；同时探索模型可解释性技术，使工程技术人员能够理解模型决策依据，增强智能诊断结果的可信度与工程可接受性。

(3) 多参数融合下的多尺度深度趋势预测技术

融合多传感器采集的桥梁多维监测参数，构建高维度、多时空尺度的桥梁状态数据集；设计多尺度深度神经网络模型，实现不同时间尺度、空间尺度信息的协同建模；结合递归神经网络开展时序特征学习，形成高精度的桥梁性能趋势预测结果。

3. 依托工程（依托工作）

南沟大桥位于 G312 国道，原为太（峪镇）火（石咀煤矿）二级汽车专用公路，桥梁运营桩号为 K1669+883。桥梁全长 276m，于 1998 年建成通车。2022 年实施维修工程，主要内容为更换桥面铺装、护栏、伸缩缝和支座。设计荷载：汽车-20 级，挂车-100。桥型布置：上部 3×3-30m 装配式预应力混凝土连续箱梁，下部结构 1#、8#墩为柱式桥墩桩基础、3#~7#墩为钢筋混凝土空心薄壁墩；柱式桥台、

挖孔桩基础。桥面宽度：0.5m（护栏）+净 9m（行车道）+0.5m（护栏）。设计纵坡：3%。该桥自建成通车以来已安全运营二十余年，是连接郴州市城区与周边交通干线的重要通道，在区域交通运输体系中发挥着关键作用。然而，长期服役过程中，受车辆荷载反复作用、温度应力变化、混凝土碳化及氯离子侵蚀等多重因素影响，桥梁上、下部结构已出现不同程度的病害现象，包括箱梁裂缝、支座老化、伸缩缝破损、墩台混凝土剥落及局部钢筋锈蚀等。随着结构性能的逐步退化，桥梁的承载能力及服役安全性面临潜在威胁。针对上述问题，迫切需要引入数字化监测与智能诊断技术，对桥梁运行状态进行长期、连续、精确的监测与评估，为后续养护维修提供科学依据。本项目以南沟大桥为依托工程，开展桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究，具有重要的工程现实意义和推广价值。

二、考核指标

1.预期目标

本项目以提升桥梁数字化运维水平与智能诊断能力为核心目标，围绕“结构状态精准感知—智能诊断识别—健康评估预测—决策优化支撑”的总体思路，构建桥梁全寿命周期的智能检测与评估体系。项目实施后，预计实现以下目标：建立面向桥梁全寿命周期的数字化监测与智能诊断理论框架，阐明多源耦合荷载作用下桥梁结构性能退化与损伤演化机理；构建融合力学机理与数据驱动的健康状态评估模型，实现从被动检测到主动感知的理论转变；提出适用于复杂环境条件下的桥梁健康评估与趋势预测模型，提升评估结果的科学性与可解释性；研发多源异构数据融合与异常识别技术，实现桥梁结构关键响应参数的高精度提取与噪声抑制；开发基于深度学习的智能故障诊断算法，实现多类型损伤的自动识别、定位与量化评估；在南沟大桥完成系统测试与验证，实现桥梁结构运行状态的实时监测与智能诊断。填补省级技术指标。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

为确保项目成果的科学性、可验证性与工程应用价值，本项目拟从技术指标与经济指标两方面设定具体考核目标。

序号	指标内容	目标
1	《桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究》	形成《桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究》

	研究报告一份	研究报告一份
2	“多维度传感器的南沟桥梁全方位监测技术”方案1套	提交“多维度传感器的南沟桥梁全方位监测技术”方案1套
3	“南沟桥梁故障诊断和评估技术算法库”1套	提交“南沟桥梁故障诊断和评估技术算法库”1套
4	“多参数融合下基于多尺度深度模型的南沟桥梁趋势预测算法库”1套	提交“多参数融合下基于多尺度深度模型的南沟桥梁趋势预测算法库”1套
5	提交南沟桥梁故障诊断与趋势预测集成软件系统1套	提交南沟桥梁故障诊断与趋势预测集成软件系统1套
6	结构损伤识别准确率	总体识别准确率 $\geq 92\%$
7	性能退化预测误差	平均绝对百分比误差 $\leq 8\%$
8	专利与软件著作权	申请国家专利 ≥ 1 项, 软件著作权 ≥ 1 项
9	论文发表	发表科技论文2篇
10	工程技术人员培养	培养工程技术人员 ≥ 2 名
3.经济和社会效益 本项目在理论创新与技术实现之外, 具有明显的经济与社会价值。通过智能化监测与预测性维护替代高频人工巡检和被动维修, 预计长期运维成本可下降 20% - 30%(依据桥梁运维历史数据与智能策略实施后的工单减少率测算)。优化维护时机与策略可减少应急维修与重复作业, 传感器及相关设备平均使用寿命得到显著提高, 从		

而降低替换及维护投入。通过早期识别与处置病害，避免重大结构失效造成的高额维修或重建费用，事故相关直接经济损失预期下降 $\geq 50\%$ （基于历史事故平均处置成本估算）。

改进后的桥梁运维体系将提升道路通行可靠性与公共安全感，增强公众对交通基础设施管理的信任。预测性维护可避免不必要的大规模维修作业，减少材料消耗与施工交通干扰，降低施工带来的碳排放与环境影响，有助于实现基础设施运维的可持续发展目标。此外，项目将培养桥梁数字化运维领域的工程技术人员与研究生，为行业输送应用型人才，并通过论文提升学术与行业影响力。

4.成果提供形式

（1）形成《桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究》研究报告一份；

（2）提交“多维度传感器的南沟桥梁全方位监测技术”方案 1 套；

（3）提交“南沟桥梁故障诊断和评估技术算法库”1 套；

（4）提交“多参数融合下基于多尺度深度模型的南沟桥梁趋势预测算法库”1 套；

（5）提交南沟桥梁故障诊断与趋势预测集成软件系统 1 套

（6）申请国家专利 1 项、软件著作权 1 项；

（7）发表高水平科技论文 2 篇。

4. 其他考核指标

（1）培养工程技术人员 2 名及以上；

(2) 技术交流不少于 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）
第一年度	1. 完成南沟大桥现场调查与病害普查，布设监测方案；完成传感器选型与点位设计；提交《监测系统总体方案》报告 1 份。 2. 完成监测系统安装与调试，建立数据采集平台；获取原始监测数据。 3. 开展多源数据预处理与特征构建；初步建立深度学习诊断模型；完成 1 套桥梁初始健康评估模型原型。 4. 完成第一阶段诊断与评估验证；提交《年度技术报告》1 份；发表学术论文 1 篇和申请专利 1 项。
第二年度	1. 完善多参数融合模型与趋势预测算法；形成桥梁性能演化预测框架；完成模型工程化部署方案设计。 2. 开展长期监测数据建模与预测验证；完成不少于预测模型对比实验。 3. 在南沟大桥开展工程应用验证；形成《桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究》报告一份。 4. 完成项目综合评估与成果凝练；提交《项目总

	结报告》1 份；形成示范应用成果并推广。
--	----------------------

四、项目经费

项目总经费： 50 万元

交通运输厅补助：19.89 万元

自筹资金： 30.11 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	50.0	19.89
1.设备费	11.0	0.0
(1) 购置设备费	6.0	0.0
(2) 试制设备费	0.0	0.0
(3) 设备改造与租赁费	5.0	0.0
2.业务费	16.5	9.0
(4) 材料支出	4.0	1.5
(5) 测试化验实验加工支出	3.0	1.5
(6) 燃料及动力支出	2.0	1.0
(7) 差旅支出	2.0	1.0
(8) 会议支出	1.0	0.0
(9) 国际合作与交流支出	0.0	0.0
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	3.0	2.0
(11) 其他支出	1.5	1.0
3.劳务费	8.0	3.89
(12) 劳务性支出	6.0	2.89
(13) 咨询专家支出	2.0	1.0
(二) 间接费用	14.5	8.0
4.管理费	7.0	3.0
5.绩效支出	7.5	5.0
合 计	50.0	19.89

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	1
		（1）授权发明专利	1
		（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）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	0
		（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）	1
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	1
	其他成果	1.填补技术空白数	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）	2
		（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	是
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	0
	人才引育	1. 引进高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2. 培养高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	2
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	2
		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			

六、承担单位或研究人员分工

项目负责人赵轲主持项目总体设计与组织实施,负责制定技术路线、把控研究方案、审核成果并指导推广应用,确保项目按计划高质量推进。桥梁结构与监测研究团队卫党委、王瑞欣、李嘉等负责桥梁结构健康监测系统的设计与实施,包括传感器选型、测点布设、监测数据采集、数据预处理及系统功能实现,保证多维数据的可靠性和可用性。数据与算法研究团队陈丽俊、田金波等负责多源监测数据融合算法设计、故障诊断与诊断算法开发、深度学习模型训练、评估指标构建及模型验证,形成桥梁故障诊断与趋势预测的核心算法体系。工程验证与应用团队程师云、任刘珍、任江卓等负责现场监测系统安装与调试、运行维护、桥梁实际监测及台架或试验验证,推动诊断方法工程化应用,评估系统实际运行效果。管理与保障团队刘讲会负责项目经费预算与使用、设备采购、合同管理、校企及施工单位协调、交通安全管理及成果转化推广等保障性工作,为项目顺利实施提供制度和资源支持。通过上述分工与协作,项目形成了科研设计、数据分析、工程实施和管理保障的全流程团队体系,能够确保从理论研究、算法开发到工程验证的系统化推进和成果落地。

七、项目参加人员表

项目承担单位：长安大学						
参与单位（排序）：咸阳市公路局						
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	赵轲	1998-08	长安大学	讲师	机械工程	项目负责人，负责总体设计与组织实施
主要研究人员						
2	卫党委	1976-09	咸阳市公路局	高级工程师	交通运输工程领域工程	技术负责人，负责桥梁结构与监测系统设计
3	王瑞欣	1995-12	长安大学	副教授	人工智能科学与技术	故障诊断与退化趋势预测算法设计
4	李嘉	1987-01	长安大学	副教授	桥梁工程	桥梁结构健康监测系统的设计

5	陈丽俊	1989-1 2	长安大学	副教授	桥梁工程	数据与算法研究	陈丽俊
6	贾峰	1991-1 1	长安大学	副教授	机械工程	信息化与平台构建	贾峰
7	任刘珍	1993-0 4	长安大学	讲师	人工智能科学与技术	桥梁结构健康监测系统的设计实施	任刘珍
8	任江卓	1992-0 6	长安大学	讲师	养护运营技术	桥梁养护运营	任江卓
9	田金波	1971-0 2	咸阳市公路局	高级工程师	机械工程	技术支持	田金波
10	程师云	1974-0 3	咸阳市公路局	高级工程师	土木工程	技术支持	程师云
11	姚建荣	1972-0 8	咸阳市公路局	高级工程师	道路工程	桥梁养护运营	姚建荣
12	刘讲会	1970-0 3	咸阳市公路局	工程师	道路工程	桥梁养护运营	刘讲会

八、信息表

项目合同编号		25--77K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部	
项目名称		桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究							
项目实施所在地		西安		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月			
总 经 费		50.0		厅 拨		19.89			
第一承担单位	单位名称	长安大学							
	所在地	陕西省西安市碑林区					代码	610103	
	通讯地址	陕西省西安市南二环路中段					邮编	710064	
	单位性质	(1) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	10710	
参与单位	序号	单 位 名 称							
	1	咸阳市公路局							
	2								
	3								
项目负责人		姓 名	赵轲		性 别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1998
		学 历	(1) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其他						
		职 称	(2) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其他						
		联系电话	18829235512 029-82334483		电子邮箱		zhaoke@chd.edu.cn		
项目联系人		姓 名	赵轲		性 别		男		
		联系电话	18829235512 029-82334483		电子邮箱		zhaoke@chd.edu.cn		
项目组人数		12	高级	8	中级	4	初级		其他
主要研究内容 (100 字以内)		依托南沟大桥, 构建多维传感监测体系, 融合深度学习开展桥梁损伤诊断、健康评估与趋势预测研究, 形成数字化运维与智能养护关键技术, 实现桥梁全寿命安全监测与决策支撑。							
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.合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：

陕西省交通运输厅

负责人：

李涛

2026年3月27日

联系人：

张瑞

(公章)

电话：029-88869067

合同乙方：

陈建

长安大学

单位负责人：

科研项目专用章 2026年3月27日

项目负责人：

张瑞

(公章)

电话：18829235512

2026年03月16日

财务负责人：

师光

账户名：长安大学

开户银行：中国银行西安翠华路支行

账号：102007335073

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。

2018-03-05

项目承担单位：（盖章）

项目负责人：  

年 月 日

项目编号: 25--77K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 桥梁数字化运维下的智能检测与诊断
评估方法研究

申请单位: 长安大学

联系人: 赵轲

电话: 18829235512

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

目录

一、项目研究的背景和必要性	3
二、前期科研及工作基础	5
2.1 国内外研究现状	5
2.1.1 国际研究现状	5
2.1.2 国内研究现状	7
2.2 项目前期科研及现有工作条件	9
2.2.1 项目前期科研	9
2.2.2 现有工作条件	10
三、实施方案.....	14
3.1 拟解决的关键问题	14
3.2 主要研究内容及实施方案	16
3.2.1 综合多维信息的桥梁监测技术研究	16
3.2.2 基于轻量化深度学习的桥梁故障诊断技术研究	19
3.2.3 多参数融合的桥梁趋势预测技术研究	25
3.3 技术路线	28
3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接	31
3.5 技术经济指标	33
四、项目承担单位概况	34
4.1 单位概况	34
4.2 技术力量及人员构成	36

4.3 各自承担的主要工作	37
4.4 项目主要负责人情况	38
五、项目依托工程(工作)情况及其他必要支撑条件.....	41
5.1 项目依托工程(工作)情况.....	41
5.2 投资来源	43
5.3 工程进度与项目科研进度的配合	44
5.4 组织管理形式	45
六、项目经费估算及资金筹措情况	47
七、项目绩效指标	48
八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益	50
8.1 项目预期目标（项目的考核目标）	50
8.2 提交的研究成果及其形式	50
8.3 经济社会效益	51
九、其它需要说明的问题	51
十、申请单位意见	53

一、项目研究的背景和必要性

桥梁作为交通基础设施网络的重要组成部分,其结构安全性与服役性能直接关系到交通系统的稳定运行与区域经济发展^[1]。在长期服役过程中,桥梁结构不仅承受车辆荷载,还受到温度变化、风荷载、地震作用及环境腐蚀等多种复杂因素的耦合作用,易出现材料性能退化、构件损伤累积等问题^[2]。根据美国土木工程师学会 2021 年发布的基础设施评估报告显示,全球范围内服役超过 50 年的桥梁中约有 32%存在不同程度的承载能力不足或结构退化问题^[3]。其中,混凝土箱梁桥因其结构体系复杂、预应力构件多以及内部损伤隐蔽性强,在长期服役过程中更容易出现难以察觉的性能退化问题。

近年来国内外多起桥梁坍塌事故表明,桥梁结构损伤的长期积累与监测预警不足密切相关。例如,2018 年意大利莫兰迪桥坍塌事故调查表明,该预应力混凝土箱梁桥在长期盐蚀环境作用下拉索腐蚀严重,同时结构冗余度不足,最终导致结构失效^[4]。2007 年美国 I-35W 密西西比河大桥坍塌事故则被证实与节点板设计缺陷及长期超载作用有关^[5]。此外,我国福建武夷山公馆大桥垮塌事故以及陕西柞水严坪村 II 号大桥垮塌事件也表明,在极端荷载或长期服役条件下,桥梁结构安全风险可能不断累积并最终导致失效。这些案例在一定程度上反映出传统桥梁检测与监测体系在损伤早期识别和长期性能演化评估方面仍存在明显不足。例如,传统人工巡检方式主要依赖目视检测,难以及时发现结构内部隐蔽损伤;同时,对长期监测数据的智能化分析能力不足,难以有效识别结构性能退化趋势。

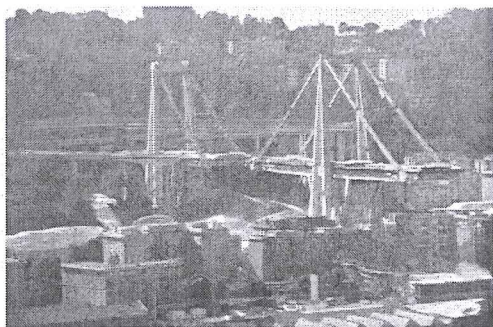


图 1 意大利莫兰迪桥

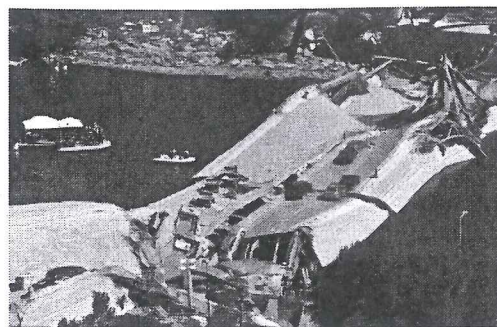


图 2 美国 I-35W 密西西比河大桥

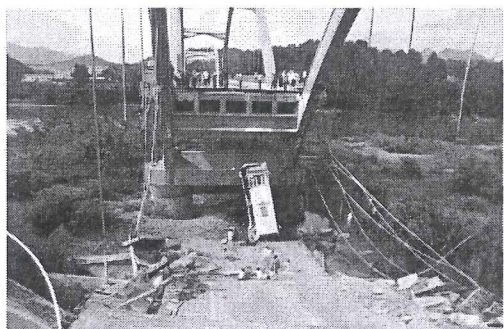


图 3 武夷山公馆大桥

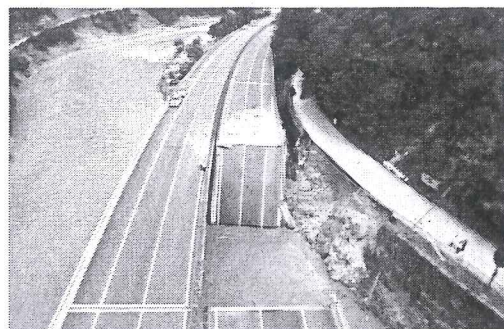


图 4 严坪村 II 号大桥

随着桥梁健康监测技术的发展,通过布设多类型传感器获取结构响应数据,已成为桥梁状态评估的重要手段。然而在实际工程应用中,桥梁健康监测系统仍面临诸多挑战。例如,传感器老化、通信中断或设备故障容易导致监测数据缺失或异常;环境噪声和设备噪声会降低监测信号质量;同时,现有监测评估模型在复杂工况下的泛化能力与鲁棒性仍有待提升^[6]。这些问题会影响桥梁健康状态评估的准确性与可靠性,进而影响结构安全预警与养护决策的科学性^[7]。

因此,针对混凝土箱梁桥结构健康监测数据质量与智能评估问题开展系统研究具有重要意义。本项目拟结合理论分析、算法优化与工程验证,提升桥梁监测数据处理与状态评估的准确性与鲁棒性,从而提高桥梁健康监测系统的可靠性与实时响应能力,为桥梁结构安全

监测与运维管理提供更加有效的技术支撑。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

2.1.1 国际研究现状

从全球范围来看,桥梁健康监测技术的理论研究与实践应用可以追溯到 20 世纪 70 年代。随着材料科学、信息技术和计算机技术的快速发展,桥梁健康监测技术经历了从单一参数监测到多参数融合、从离线检测到在线监测、从人工分析到智能诊断的演进过程^[8]。特别是在 20 世纪 90 年代以后,随着大型桥梁建设项目的增多,结构健康监测技术得到了快速发展。

在北美地区,美国联邦公路管理局主导的国家桥梁数据库项目建立了覆盖全美超过 60 万座桥梁的详细档案。该项目不仅实现了桥梁基本信息的数字化管理,更重要的是开发了基于多源数据融合的桥梁状态评估系统。加拿大在 Confederation Bridge 项目中创新性地应用了基于微机电系统的加速度传感器网络,显著提高了对桥梁动力特性的监测精度^[9, 10]。

欧洲各国在桥梁监测技术方面具有鲜明的特色。瑞士联邦理工学院主导的 GeoSHM 项目将全球导航卫星系统与惯性测量单元技术相结合,成功应用于阿尔卑斯山区多座大跨度桥梁的变形监测^[11, 12]。值得关注的是,德国在易北河大桥项目中开发了基于声发射技术的损伤早期识别系统,能够有效检测微米级的混凝土裂缝。

近年来,智能化监测技术在国际上取得突破性进展。美国加州大

学伯克利分校的研究团队将卷积神经网络应用于桥梁图像识别,实现了裂缝宽度的自动测量,精度达到 0.1 mm。日本东京工业大学开发的基于深度强化学习的桥梁状态预测模型,通过对历史监测数据的学习,能够提前 72 小时预测可能出现的结构异常。这些创新性研究为桥梁健康监测技术的发展开辟了新的方向^[13, 14]。Fakhrosadat 等人^[15]提出了一种结合模糊逻辑和元启发式算法的框架,用于无人机驱动的可充电无线传感器网络 (WRSN) 在桥梁健康监测中的应用,该研究通过优化网络拓扑管理、数据路由和充电调度,显著提高了网络的稳定性和能源效率。实验结果表明,该框架在三种实际桥梁场景中表现优异,平均性能提升超过 30%,这一研究为动态环境下的无线传感器网络管理提供了新的解决方案,尤其适用于桥梁等复杂基础设施的长期监测需求。Guzman-Acevedo 等人^[16]提出了一种结合 InSAR 技术和有限元模型的桥梁结构健康监测与风险评估方法,通过 Sentinel-1 卫星数据对墨西哥的 El Carrizo 桥进行了案例分析。研究发现,该方法能够有效评估桥梁的应力状态和位移变化,计算得出的风险概率在 10 年内低于 20%,验证了桥梁修复后的结构安全性。Thanh 等人^[17]提出了一种基于卷积神经网络和能量耗散损失因子的桥梁结构健康监测方法,通过分析振动信号的功率谱和能量耗散特性,实现了对桥梁结构状态的实时评估。研究发现,该方法能够有效区分正常运行信号、噪声干扰信号和缺陷相关信号,并在越南西贡桥的实际应用中验证了其可靠性。研究还表明,损失因子作为能量耗散的量化指标,对结构微小变化具有高敏感性,能够检测早期损伤,

为预防性维护提供了重要依据。

2.1.2 国内研究现状

近年来,我国桥梁健康监测技术发展迅速,这主要得益于国家基础设施建设的持续投入和大型桥梁工程项目的不断涌现。作为保障桥梁安全运营的关键技术手段,桥梁健康监测已在国内学术界和工程实践中形成了较为完善的技术体系^[15]。从具体工程应用来看,我国在特大跨径桥梁监测领域已取得突破性进展。以苏通长江公路大桥为例,该项目创新性地采用了分布式光纤传感网络与北斗卫星定位系统相结合的监测方案,实现了对桥梁结构应力、位移等关键参数的毫米级精度监测。而港珠澳大桥则建立了基于物联网技术的综合监测平台,通过部署超过 2000 个各类传感器节点,构建了目前世界上规模最大的跨海桥梁健康监测系统^[16, 17]。

在理论研究层面,国内学者针对桥梁健康监测的关键技术问题展开了多角度的探索。清华大学土木工程系开发了基于贝叶斯概率框架的数据融合算法,该算法能够有效整合来自不同传感器的异构监测数据,显著提高了异常识别的准确性。东南大学的研究团队则提出了“数字孪生”技术在桥梁监测中的应用框架,通过建立虚拟桥梁模型与实体结构的实时映射关系,实现了对桥梁性能演变的动态预测^[18, 19];在技术创新方面,国内研究呈现出明显的跨学科特征。武汉理工大学将计算机视觉技术引入桥梁监测领域,开发了基于深度学习的桥梁裂缝自动识别系统,其识别准确率达到 92%以上。同济大学桥梁工程系则建立了国内首个桥梁监测大数据中心,该中心整合了全国 30

余座特大桥梁的长期监测数据,为开展基于数据挖掘的桥梁性能评估提供了重要支撑^[20]。中国铁道科学研究院针对铁路桥梁的特殊需求,研制了具有自主知识产权的无线传感网络系统,解决了传统有线监测系统在长大铁路桥上部署困难的技术难题。

尽管取得显著进展,但与国际先进水平相比,我国桥梁健康监测技术仍存在若干亟待解决的问题^[21, 22]。首先,在标准化建设方面,目前不同地区和单位采用的监测技术标准存在较大差异,这给数据的共享和对比分析带来困难。其次,在数据分析方法上,现有算法对复杂环境干扰因素的鲁棒性不足,特别是在台风、地震等极端工况下的监测数据可靠性有待验证。此外,监测系统的长期稳定性问题也较为突出,部分传感器在使用 3-5 年后就会出现性能衰减现象。针对这些挑战,未来研究应着重从以下方面进行突破:一是建立全国统一的桥梁监测数据标准体系,推动监测数据的规范化管理;二是开发具有自适应能力的智能分析算法,提升系统在复杂环境下的监测精度;三是加强新型传感器材料的研发,提高监测设备的耐久性和可靠性^[23, 24]。特别值得关注的是,随着 5G 通信、边缘计算等新技术的成熟,构建“云-边-端”协同的智能监测体系将成为重要发展方向。这种新型监测模式有望显著提升数据处理效率,降低系统运维成本,为桥梁全寿命周期管理提供更优质的技术支持^[25]。

石佳琪等人^[26]提出了一种基于转向架加速度的重载铁路桥梁车载多级健康监测方法,通过建立考虑轨道结构的列车-轨道-桥梁耦合模型,结合时间域相关分析去噪法和经验模态分解技术,有效抑制了

轨道不平顺的干扰并提取了桥梁损伤特征。研究发现,该方法能够准确检测桥梁损伤的发生,并通过滑动窗口策略实现损伤定位,结合马氏距离和 k-means 聚类分析量化损伤程度。张胜飞等人^[27]提出了一种基于编码人工目标的自动化视觉位移监测方法,用于桥梁健康监测中的多目标二维和三维位移测量。他们通过智能算法和自标定技术,解决了传统视觉监测方法在多目标场景下需要手动选择模板和重复标定的问题。马云坤等^[28]开发了一种针对古石拱桥的结构健康监测与定量安全评估方法,通过结合层次分析法(和基于广义结构刚度的单元重要性分析,实现了对桥梁结构安全状态的实时量化评估。朱乾坤等^[29]提出了一种基于一维局部二值模式和统计特征融合的桥梁结构健康监测数据异常检测方法,通过提取特征和时域统计特征,并利用极端梯度提升分类器进行异常分类。研究发现,该方法在检测瞬时异常(如离群值)时表现出色,准确率达到 97.0%,同时通过特征简化将特征维度降低了 93.7%,显著提升了检测效率。

2.2 项目前期科研及现有工作条件

2.2.1 项目前期科研

在工程正式启动前,项目组围绕南沟大桥开展了一系列前期科研与技术准备工作,主要包括以下内容:(1) 结构状况综合评估,对桥梁上下部结构进行了全面的勘察与检测,采用目视检查结合必要的无损检测手段(如位移/裂缝观测、局部探伤等),明确了结构的服役状态与潜在风险点,为后续维修需求的确定提供了依据。(2) 多源监测数据采集,已布设并运行了覆盖关键构件的监测系统,持续采集了结

构变形、温度、加速度/振动响应等多类关键参数，形成了可用于时序分析与故障诊断的原始数据集。(3) 数据管理与预处理，对采集的数据开展了初步的质量控制与预处理工作，包括时序同步、异常值筛查、噪声抑制与缺失数据补齐，确保后续分析所用数据的完整性与可用性。(4) 初步分析与问题识别，基于已有监测数据进行了初步特征提取与趋势分析，识别出若干需重点关注的构件与工况（如温度影响下的位移变化规律、环境振动对结构响应的影响等），为精细化检测与靶向试验设计提供了方向。综上，前期科研准备工作已为本项目的后续研究与维修实施建立了扎实的基础，既具备充足的监测数据资源，也明确了需深入研究的问题和试验目标，能够有效支持后续的算法优化、试验验证与工程化推广。

2.2.2 现有工作条件

在工程正式启动前，项目组围绕南沟大桥开展了一系列前期科研与技术准备工作，主要包括以下内容：成熟的跨学科研发团队，包括桥梁结构工程师、结构健康监测专家、数据科学与信号处理工程师、机电与通信工程师、软件开发人员以及试验与施工技术人员。具有桥梁现场检测、台架试验与算法开发经验的关键人员若干，能够承担传感器布设、数据采集、算法验证与工程化实施工作。配备高性能工作站/服务器用于数据处理、深度学习模型训练与离线分析；支持 GPU 运算的开发环境已部署。拥有用于信号处理、结构分析(有限元软件)、数据可视化与 AI 模型开发的商业/开源软件工具链，并具备自研的算法模块原型。

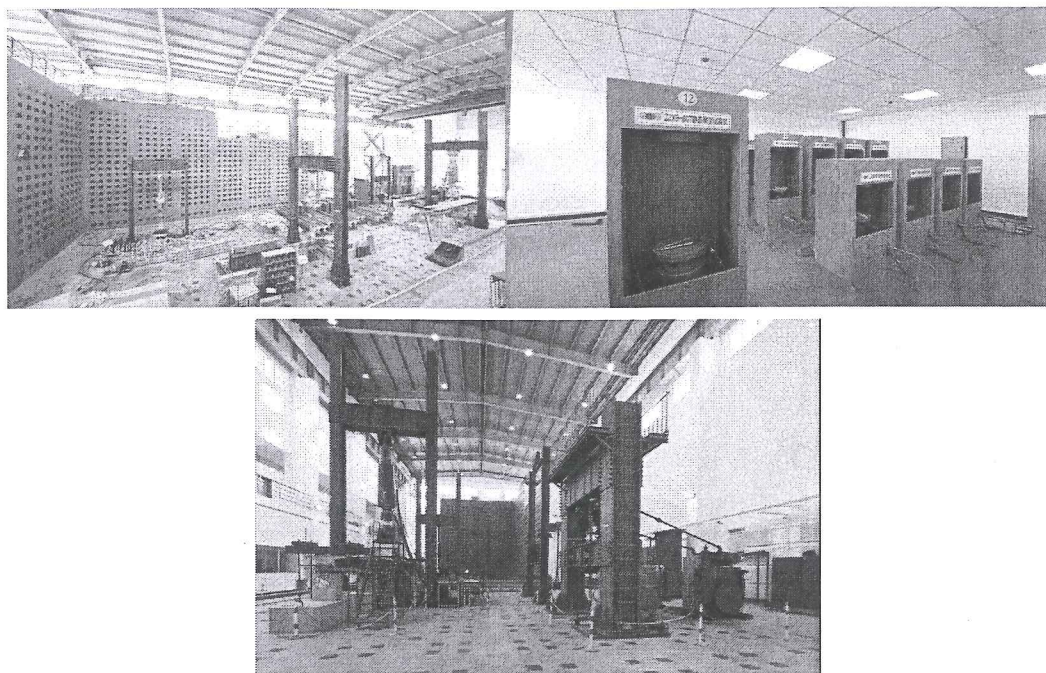


图 4 桥梁监测相关实验设备

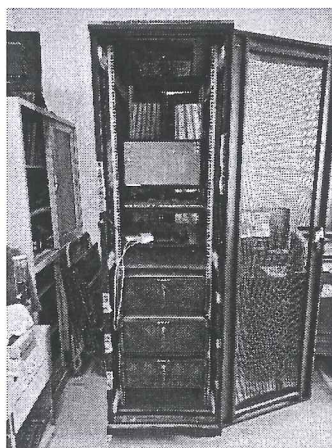


图 5 高性能服务器

参考文献

- [1] Sivasuriyan A, Vijayan D S, LeemaRose A, et al. [Retracted] Development of Smart Sensing Technology Approaches in Structural Health Monitoring of Bridge Structures[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021(1): 2615029.
- [2] Song M. [Retracted] Construction of Intelligent Building Integrated Evaluation System Based on BIM Technology[J]. Advances in Multimedia, 2022, 2022(1):

3807681.

- [3] Zhao L, Li P, Liu H. Health status diagnosis of the bridges based on multi-fractal de-trend fluctuation analysis[J]. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 2021, 36(3): 45.
- [4] Li X, Li F. Displacement monitoring requirements and laser displacement monitoring technology of bridges with short and medium spans[J]. Applied Sciences-Basel, 2022, 12(19): 1.
- [5] Kong X, Liu Z, Liu H, et al. Recent advances on inspection, monitoring, and assessment of bridge cables[J]. Automation in Construction, 2024, 168(4): 102-115.
- [6] 邹晓光, 徐祖恩. 大型桥梁健康监测动态及发展趋势[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(01): 39-4.
- [7] He Y., Liu R., Li H., et al. Short-term power load probability density forecasting method using kernel-based support vector quantile regression and Copula theory[J]. Applied Energy, 2017, 185: 254-266.
- [8] 牛津. 基于数据时空关联挖掘的桥梁结构状态评估方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2023.DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2023.005427.
- [9] Deng L, Lai S, Ma J, et al. Visualization and monitoring information management of bridge structure health and safety early warning based on BIM[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2022, 21(2): 427-43.
- [10] Xu Y, Qiu J. Internet-based centralized remote real-time long-span bridge health monitoring system[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2023, 23(2): 781-797.
- [11] Shu-Ren Y, Song D. Bridge damage identification and assessment method based on strain ratio[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2021, 15(1): 45-56.
- [12] Zhou Y, Wei J, Li J, et al. Research on temperature deformation monitoring of long-span bridges based on InSAR technology[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(3): 39-50.

- [13] Liu J. Development of vibration base health monitoring in bridge[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1802(1): 01.
- [14] Devi G N, Vijayalakshmi M M. Smart structural health monitoring in civil engineering: a survey [Z]. Materials Today-Proceedings, 2021, 45(3): 7143-71.
- [15] Fakhrosadat F, Marjan K R. Combined fuzzy-metaheuristic framework for bridge health monitoring using UAV-enabled rechargeable wireless sensor networks[J]. Applied Soft Computing, 2024, 167:112429.
- [16] Guzman-Acevedo G M. Structural health monitoring and risk assessment of bridges integrating InSAR and a calibrated FE model[J]. Structures, 2024, 63: 106353.
- [17] Thanh Q, Tu B, Niussha S, et al. Real-time structural health monitoring of bridges using convolutional neural network-based loss factor analysis for enhanced energy dissipation detection[J]. Structures, 2024, 70: 107.
- [18] Zhang L, Chen X, Li W, et al. Comparative study of micro image strain sensing system and FBG sensing system for strain measurement[J]. Optical Engineering, 2022, 61(3): 1-10.
- [19] Singh P, Mittal S, Sadhu A. Recent advancements and future trends in indirect bridge health monitoring[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2023, 28(1): 1-15.
- [20] Catbas N, Avcı O. A review of latest trends in bridge health monitoring[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering, 2023, 176(2): 76-91.
- [21] Colford B R, Zhou E, Pape T. Structural health monitoring - a risk-based approach [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering, 2022, 177(2): 89-98.
- [22] Abdoli F, Rashidi M, Wang J, et al. Structural health monitoring of timber bridges - a review[J]. Results in Engineering, 2024, 24(1): 1-20.
- [23] Radoi A, Margineanu C, Ploesteanu C, et al. Static and dynamic structural health monitoring system for bridges[J]. Romanian Journal of Transport Infrastructure, 2021, 10(1): 108-123.

- [24] Ozer E, Kromanis R. Smartphone prospects in bridge structural health monitoring, a literature review[J]. Sensors, 2024, 24(11): 1-25.
- [25] Caspani V F, Tonelli D, Rocca A, et al. Satellite InSAR technology for structural health monitoring of road bridges and the surrounding territory: a case study[Z]. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, 2023, 112(5): 102-115.
- [26] Shi J Q, Shi H M, Wu Z Z. An approach of on-board multistage health monitoring for heavy haul railway bridge using bogie acceleration[J]. Structures, 2023, 57: 105
- [27] Zhang S F, Ni P H. Automated vision-based multi-plane bridge displacement monitoring[J]. Automation in Construction, 2024, 166: 105619.
- [28] Ma Y K, Chun Q, Zhang C W, et al. Structural health monitoring and quantitative safety evaluation methods for ancient stone arch bridges[J]. Journal of Cultural Heritage, 2024, 70(4):366-380.
- [29] Zhu Q K, Li W Q, Wang X Y. Anomaly detection in bridge structural health monitoring via1D-LBP and statistical feature fusion[J]. Structures, 2024, 70: 107734.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

本项目依托南沟大桥(桥梁全长 276 m, 上部结构为 $3\times3\times30$ m 装配式预应力混凝土连续箱梁), 面向混凝土箱梁桥数字化运维需求, 针对现有桥梁健康监测系统在结构状态感知、监测数据利用及健康评估等方面存在的不足, 重点围绕装配式预应力混凝土箱梁桥结构特性, 拟解决以下关键问题:

(1) 面向箱梁桥关键部位的结构状态感知能力不足问题

对于装配式预应力混凝土连续箱梁桥而言, 主梁跨中区域、梁端支座区、湿接缝及桥墩连接部位是结构受力与病害演化的关键区域。

然而, 现有桥梁监测系统在传感器布设和监测参数选择方面缺乏针对性, 难以准确反映箱梁关键构件的受力状态及其长期性能变化。同时, 传统监测体系多以固定监测方案为主, 缺乏针对桥梁服役全过程的动态监测策略与监测敏感性分析方法, 导致结构退化早期特征难以有效捕获。因此, 亟需研究面向装配式预应力混凝土箱梁桥关键部位的监测参数优化与结构状态感知方法。

(2) 多源监测数据质量与融合利用效率不足问题

桥梁健康监测系统通常通过应变、位移、加速度、温度及图像等多种传感器获取结构响应信息。然而在实际工程应用中, 监测数据易受到环境噪声、设备性能衰减以及通信故障等因素影响, 导致数据缺失、异常或信号失真。此外, 不同类型监测数据之间缺乏有效的融合机制, 使得多源监测信息的关联特征难以充分挖掘, 影响监测数据对结构状态评估的支撑能力。因此, 需要研究面向桥梁多源监测数据的质量控制与信息融合方法, 提高监测数据的有效利用率。

(3) 箱梁桥结构健康诊断与性能评估智能化水平不足问题

传统桥梁损伤识别与状态评估方法多依赖经验判断或基于简化模型的分析方法, 难以准确描述装配式预应力混凝土箱梁桥在复杂荷载与环境耦合作用下的非线性损伤演化过程。同时, 现有方法在结构性能退化趋势分析与寿命预测方面仍存在不足, 难以满足桥梁数字化运维背景下对智能化诊断与预测评估的需求。因此, 有必要研究融合监测数据与智能算法的箱梁桥结构健康诊断与性能评估方法, 实现结构状态识别与性能退化趋势预测, 为桥梁运维决策提供科学依据。

3.2 主要研究内容及实施方案

本研究围绕桥梁健康监测与管理的核心目标,系统展开了多维信息获取、故障诊断和趋势预测三大研究方向,构建从理论研究到工程应用的完整技术路线。首先,通过综合多维信息的桥梁监测技术研究,实现结构响应、环境工况和表面病害等多源数据的采集、清洗与规整,为后续分析提供高质量数据基础。基于此数据基础,本研究进一步开展轻量化深度学习的桥梁故障诊断技术研究,利用多源融合特征构建病害识别模型,实现对桥梁病害的自动识别与定位,并在实际监测系统中进行验证,确保方法的准确性和工程可实施性。在此基础上,多参数融合的桥梁趋势预测技术研究将故障诊断结果、结构状态信息及环境参数进行综合分析,通过深度学习模型预测桥梁未来结构演变趋势,为维护决策提供科学依据。三部分研究形成紧密衔接的闭环,多维信息采集为特征提取与模型训练提供数据支持,故障诊断模型的结果为趋势预测提供可靠输入,而趋势预测结果又反馈于桥梁管理实践,实现从理论方法研究到工程应用验证的全流程覆盖,确保研究成果具有系统性、完整性及可落地性。

3.2.1 综合多维信息的桥梁监测技术研究

结构健康监测系统能够为桥梁智能检测与诊断评估提供持续、可靠的数据支撑,因此合理选择传感器类型、监测参数及测点布置方案是开展桥梁智能检测与诊断评估的重要前提。本项目以南沟大桥(桥梁全长 276 m,上部结构为 $3\times 3\times 30$ m 装配式预应力混凝土连续箱梁)为研究对象,结合装配式箱梁桥结构受力特点及常见病害类型,

在结构损伤成因分析基础上构建综合多维信息监测体系。针对箱梁桥跨中受弯区、梁端支座区、湿接缝连接区以及桥墩受力区等关键部位，构建覆盖桥梁本体状态与环境作用的多维监测体系。在桥梁设计、施工及运营阶段建立统一的监测框架，形成全面监测、重点识别和智能诊断的桥梁监测模式。其中，全面监测用于获取桥梁整体运行状态信息，重点监测则针对结构损伤成因链中的关键部位，实现结构性能退化早期特征的识别，从而提高桥梁监测系统对结构病害演化的感知能力。

(1) 应力应变与结构动力响应监测

在车辆荷载、温度变化及环境作用的耦合影响下，结构应力应变与振动响应能够直接反映桥梁受力状态及结构性能变化，是桥梁健康监测的重要指标。针对南沟大桥装配式预应力混凝土箱梁结构特点，在主梁跨中、梁端支座区、湿接缝区域及桥墩关键截面布设光纤光栅应变传感器与加速度传感器，实现结构受力与动力响应的实时监测。

具体监测方案如下：

- 主梁应力应变监测,在主梁跨中及梁端关键截面预埋光纤光栅应变传感器，用于获取箱梁受弯应力变化特征；
- 桥墩受力监测,在桥墩关键截面布设应变计，监测桥墩在车辆荷载与环境荷载作用下的应力变化；
- 结构振动监测,在主梁跨中布设加速度传感器，用于获取桥梁振动响应数据并识别结构动力特性变化。

为保证监测数据的准确性与可靠性，本项目拟采用以下采集参数，

光纤光栅应变传感器测量精度 $\pm 1 \mu\epsilon$ ；振动传感器采样频率 100–200 Hz；位移/变形监测精度 0.1 mm；数据采集周期：关键监测点实时采集，普通监测点周期采集。

表 1 南沟桥梁桥梁本体监测内容

类别	监测内容	监测手段
应力应变监测	主梁应力	光纤光栅应变传感器、应变计
	桥墩应力	
监测	结构振动	加速度传感器
病害表征	支座/阻尼器损伤	人工巡检、视频监测
监测	结构腐蚀	人工巡检、高清摄像
	结构裂缝	无人机巡检、高清摄像
	结构界面损伤	人工巡检、高清摄像

(2) 结构病害表征监测

桥梁结构病害表征监测主要针对裂缝发展、支座损伤、材料腐蚀及界面劣化等典型病害开展监测。结合人工巡检、高清摄像监测及无人机巡检等技术手段，实现桥梁表观病害信息的全面获取。具体监测内容包括：

- 支座及阻尼装置损伤监测，通过人工巡检与视频监测方式识别支座偏移、破损等问题；
- 混凝土裂缝监测，采用高清摄像设备和无人机巡检技术获取桥梁表面裂缝图像，并通过图像识别算法提取裂缝长度、宽度及发展趋势；

- 材料腐蚀监测, 通过图像检测与人工巡检识别混凝土剥落及钢筋锈蚀现象;
- 结构界面损伤监测, 重点关注湿接缝区域及结构连接部位的损伤情况。

(3) 监测数据与结构病害演化关系分析

通过对桥梁结构响应数据与表观病害信息进行综合分析, 可建立监测数据、结构状态及病害演化之间的关联关系。例如主梁应变异常增长可能对应结构裂缝发展或刚度退化; 振动频率变化反映结构整体刚度变化; 支座位移异常可能反映支座损伤或结构受力重新分布。通过多源监测数据融合分析, 可实现对桥梁结构损伤发展过程的识别与预警, 为后续智能诊断与性能评估提供数据基础。

3.2.2 基于轻量化深度学习的桥梁故障诊断技术研究

桥梁健康监测系统可获取应变、振动、位移、温度及图像等多源监测数据, 这些数据蕴含了桥梁结构状态变化的重要信息, 是开展桥梁病害识别与检测的重要基础。针对现有方法理论分析较多、工程应用能力不足的问题, 本研究以南沟大桥监测数据为基础, 构建轻量化桥梁病害智能检测方法, 重点研究桥梁病害自动识别技术, 实现桥梁结构病害的快速检测与识别。本研究的技术流程主要包括数据采集、数据预处理、特征提取与融合、故障诊断模型构建以及模型训练与验证五个环节, 其总体流程如图 6 所示。

(1) 数据采集与预处理

桥梁监测系统采集的原始数据包括结构响应数据与图像数据两

类。结构响应数据包括应变、振动、位移、温度等监测数据；结构表面数据则包括桥梁裂缝、破损及腐蚀等图像信息。由于原始监测数据往往存在噪声干扰、采样不连续以及异常值等问题，因此需要对数据进行预处理。具体包括：数据重采样与尺度统一，对不同采样频率的数据进行统一处理；异常值检测与噪声过滤，利用统计方法与信号处理方法进行数据清洗；数据标准化处理，提高不同类型数据之间的一致性。经过数据预处理后，可形成标准化的桥梁监测数据集，为后续故障诊断模型提供可靠输入。其中输入为原始监测数据（应变、振动、图像等），输出则为预处理后的标准化监测数据。

（2）多源特征提取与融合

为充分挖掘桥梁监测数据中的结构状态信息，本研究从结构响应特征与图像特征两个方面进行关键特征提取。结构响应特征提取通过时域分析、频域分析及时频联合分析方法，从桥梁的振动信号中提取结构固有频率、阻尼比、能量谱密度、应变变化等特征，以反映结构健康状态的动态变化规律。同时，利用小波变换提取局部瞬态特征，从而捕捉微小损伤信号。图像特征提取针对桥梁表面病害，利用卷积神经网络自动提取裂缝的宽度、长度、方向及形态等空间特征，结合深度特征表示，可获得丰富的表面损伤信息。多源特征融合机制在特征融合阶段，本研究采用特征级融合策略，将结构响应特征与图像特征映射到统一的高维特征空间。具体包括以下步骤：

- 标准化与维度对齐，对各源特征进行归一化和主成分分析降维，保证不同特征量纲和尺度可比。

- 特征拼接与交互建模, 将处理后的结构响应特征和图像特征进行拼接, 形成初始融合向量; 进一步通过全连接网络或自注意力机制建模特征间的互信息和依赖关系, 实现跨模态特征的深度交互。
- 融合特征输出, 生成统一的多源融合特征向量, 作为下游故障诊断或健康评估模型的输入, 以提高诊断准确性与鲁棒性。

通过上述机制, 融合后的特征不仅保留了结构动力学信息, 还充分利用了表面病害图像的空间语义特征, 实现桥梁健康状态的综合、精细化表征。

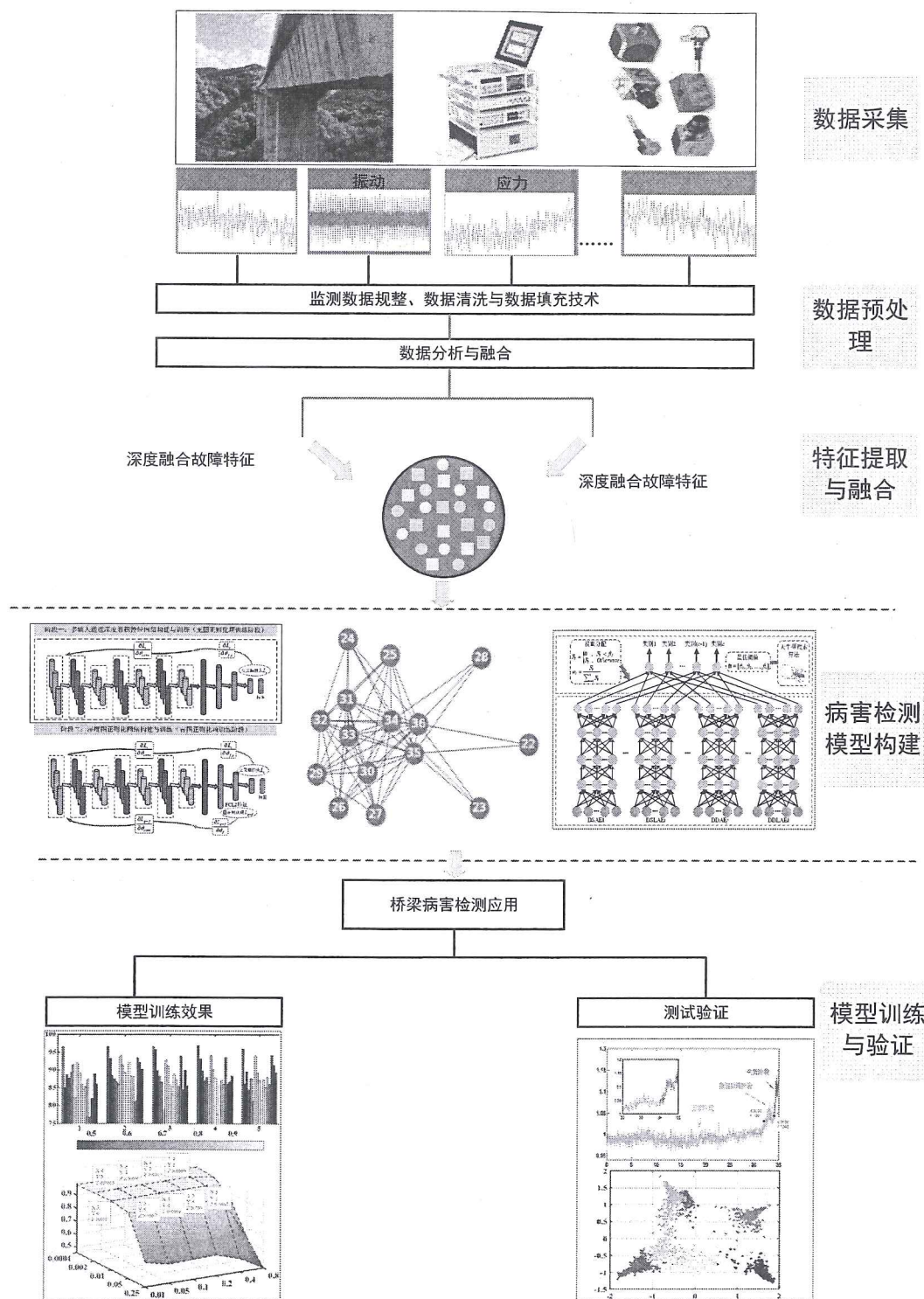


图 6 基于轻量化深度学习的桥梁故障诊断流程

(3) 轻量化故障诊断模型构建

为满足桥梁工程实际部署需求，本研究构建轻量化深度学习网络

模型用于桥梁故障诊断。相比传统深度网络模型，本研究通过网络结构优化减少模型参数量，提高计算效率。模型结构主要包括：输入层，接收融合后的监测特征；特征提取层采用轻量化卷积神经网络提取深层特征，网络结构如表 2 所示；特征融合层融合多源监测数据特征；分类输出层输出桥梁故障诊断结果。模型输出结果主要包括正常状态、裂缝病害、结构破损和支座异常等。其中输入为多源融合特征，输出为故障诊断结果。

表 2 特征提取层模型参数

层编号	层名称	参数设置
1	输入层	/
2	多尺度卷积层	空间注意力机制处理{卷积核数量: 32, 卷积核尺寸: 3×3, 步长: 1×1, 填充为 1, 激活函数: ReLU }
		空间注意力机制处理{卷积核数量: 32, 卷积核尺寸: 5×5, 步长: 1×1, 填充为 2, 激活函数: ReLU }
		空间注意力机制处理{卷积核数量: 32, 卷积核尺寸: 7×7, 步长: 1×1, 填充为 3, 激活函数: ReLU }
3	池化层	池化核尺寸: 2×2, 步长: 2×2
4	多尺度卷积层	空间注意力机制处理{卷积核数量: 64, 卷积核尺寸: 3×3, 步长: 1×1, 填充为 1, 激活函数: ReLU }
		空间注意力机制处理{卷积核数量: 64, 卷积核尺寸: 5×5, 步长: 1×1, 填充为 2, 激活函数: ReLU }
		空间注意力机制处理{卷积核数量: 64, 卷积核尺寸: 7×7, 步长: 1×1, 填充为 3, 激活函数: ReLU }
5	池化层	池化核尺寸: 2×2, 步长: 2×2
6	池化层	池化核尺寸: 2×2, 步长: 2×2
7	多尺度卷积层	空间注意力机制处理{卷积核数量: 64, 卷积核尺寸: 3×3, 步长: 1×1, 填充为 1, 激活函数: ReLU }
		空间注意力机制处理{卷积核数量: 64, 卷积核尺寸: 5×5, 步长: 1×1, 填充为 2, 激活函数: ReLU }
		空间注意力机制处理{卷积核数量: 64, 卷积核尺寸: 7×7, 步长: 1×1, 填充为 3, 激活函数: ReLU }
8	全连接层	/
9	全连接层	激活函数: ReLU
10	输出层	Dropout: 0.5

(4) 模型训练与验证

为了保证多源特征融合模型的检测性能,本研究采用桥梁历史监测数据与现场采集数据进行模型训练与验证,具体流程如下:

- 训练集与测试集构建,根据时间、传感器类型及病害分布,将桥梁监测数据划分为训练集、验证集和测试集,确保数据覆盖不同工况和损伤状态。
- 数据预处理,对结构响应信号进行去噪、归一化;对图像数据进行增强(旋转、缩放、裁剪等),以提升模型的泛化能力。
- 特征提取与融合,对训练集和测试集的数据分别进行结构响应特征与图像特征提取,并生成多源融合特征向量,作为模型输入。
- 模型训练目标利用深度神经网络对多源融合特征进行映射,输出病害类型或健康状态预测。
- 参数优化通过反向传播算法和梯度下降优化网络参数,训练过程中采用早停、正则化等策略防止过拟合。
- 在训练阶段使用 K 折交叉验证评估模型稳定性,调整超参数(学习率、网络层数、特征维度等)以获得最佳性能。
- 性能评估在独立测试集上进行预测,计算准确率、召回率、F1-score、ROC-AUC 等指标,对比不同特征融合方式和网络结构的效果。
- 误差分析与模型优化,分析预测错误案例,识别特征弱化或信息缺失问题,进一步优化特征提取、融合策略和网络结构。

- 模型训练完成后,生成最终的多源融合故障诊断模型,可用于实时桥梁健康监测和病害诊断。

(5) 工程应用与系统验证

在模型构建完成后,本研究进一步开展工程验证,以提高方法在实际桥梁监测中的应用价值。将所提出的多源融合故障诊断模型部署到南沟大桥监测系统中,输入实时结构响应信号和桥梁表面图像数据,自动生成桥梁健康状态预测及病害类型识别结果。对模型输出的病害位置、类型及严重程度进行可视化展示,支持监测平台的实时报警与管理决策。通过现场巡检人员记录的裂缝、剥落及其他结构异常情况,与模型自动检测结果进行对比。结合桥梁历年的监测数据,评估模型对已知病害事件的检测准确性和提前预警能力。通过实际桥梁监测数据验证,本方法可实现桥梁病害的自动识别与健康评估,降低人工巡检成本,提高故障诊断的及时性和可靠性,为桥梁维护与管理提供科学依据。

3.2.3 多参数融合的桥梁趋势预测技术研究

本研究针对南沟大桥不同结构出现的病害,旨在通过多参数融合与深度学习方法,结合结构变形、温度、振动等关键参数,建立全面的桥梁趋势预测算法库,实现对未来结构状态的精准预测。技术路线和研究流程如下:

(1) 多源数据分析与预处理

分析桥梁多源监测数据的多样性、冗余性、统计特性和参数间相关性,明确各参数对趋势预测的贡献度。研究信号重采样、尺度变换、

维度调整等方法，提高多源数据一致性；采用异常值检测、噪声过滤等数据清洗技术；通过非线性回归或极大似然估计完成数据缺失填充。基于时域、频域及时频域分析提取结构状态相关特征，构建多源融合特征指标，为深度学习模型提供高质量输入。

(2) 多源特征提取与融合

提取振动频率、阻尼比、能量谱、应变变化等动态信息，捕捉结构损伤信号。提取温度、荷载、风速等影响因素，反映桥梁工况变化。采用特征级融合，将结构响应特征与环境工况特征映射到统一高维空间；通过多尺度卷积神经网络模块实现跨参数交互建模，增强特征表示能力，同时考虑轻量化网络设计以适应工程实时应用。

(3) 深度学习模型设计

多尺度卷积神经网络（用于提取多源融合特征的空间与频率信息，捕获结构状态的局部与全局特征。门控循环神经网络趋势预测模块对于输入卷积神经网络提取的特征序列，学习时间依赖关系，实现桥梁结构未来状态的预测。通过通道压缩、深度可分离卷积等方法减少参数量，提高工程部署效率。

(4) 模型训练与验证

训练数据利用桥梁历史监测数据和现场实时采集数据构建训练集、验证集和测试集。训练策略采用梯度下降优化，结合正则化、早停策略防止过拟合；使用 K 折交叉验证优化网络超参数。性能验证在独立测试集上评估模型预测的准确性、鲁棒性与时效性，指标包括均方误差、平均绝对误差、预测准确率等。将深度学习方法与传统非线

性回归或极大似然估计方法进行对比, 验证多源融合深度模型的优势。

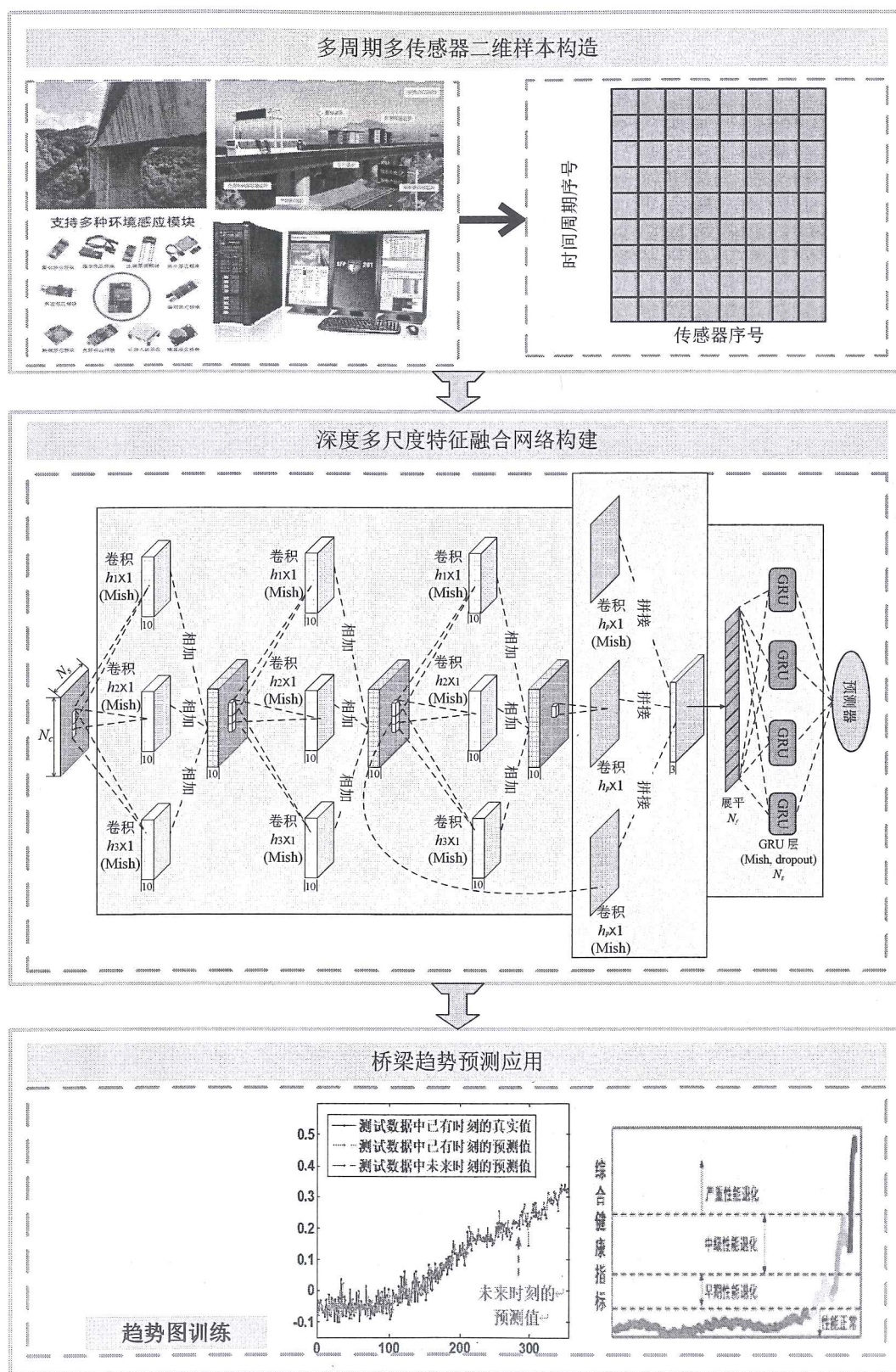


图 7 多参数融合的桥梁趋势预测技术流程

(5) 工程应用与趋势预测

将训练完成的深度学习模型部署在南沟大桥监测系统中,输入实时多源监测数据,预测未来趋势,包括结构变形、荷载变化及温度影响等。对预测结果进行可视化与报警,结合人工巡检验证模型在实际工程环境中的应用效果。为桥梁维护和管理提供可靠的数据支持,提高安全性和决策效率。

3.3 技术路线

本项目以南沟大桥为研究对象,面向桥梁结构长期服役过程中病害识别效率低、人工巡检依赖程度高以及监测数据利用率不足等问题,构建多源监测数据采集、数据预处理与特征提取、轻量化深度学习病害检测和工程应用验证的系统化技术路线。技术路线以桥梁多源监测数据为基础,通过数据获取、数据处理、特征融合、模型训练与工程验证等环节逐步推进,形成从原始监测数据到桥梁病害检测结果的完整数据流与技术链条,实现桥梁监测数据向结构健康状态信息的有效转化,从而为桥梁智能运维提供可靠技术支撑。

在桥梁监测数据采集阶段,以南沟大桥结构特点为基础,构建覆盖桥梁关键结构部位的多维监测体系。在桥梁主梁、桥墩及关键受力部位布设振动传感器、应变计和位移计,用于获取桥梁在车辆荷载及环境作用下的结构响应信息;在桥面及环境区域布设温度与环境传感器,用于记录环境温度变化及外部环境因素对结构响应的影响;同时在桥梁关键区域布设高清摄像设备,并结合无人机巡检手段,对桥梁

表观病害进行持续监测。通过上述多源传感设备可获取桥梁振动信号、应变响应、位移变化、环境参数以及桥梁表面图像等多类型监测数据,从而形成包含结构响应信息与表观损伤信息的桥梁多源数据体系。这一阶段的输出为桥梁原始监测数据集,是后续数据处理和模型分析的基础输入。

由于桥梁长期监测数据在采集和传输过程中容易受到环境干扰、设备噪声以及通信不稳定等因素影响,因此在数据处理阶段需要对原始监测数据进行系统预处理,以提高数据质量并保证不同数据之间的一致性。首先对振动与应变等时序信号进行信号去噪处理,通过滤波方法削弱环境噪声对信号的影响;其次利用统计分析方法对监测数据进行异常值检测与剔除,避免异常数据对后续模型训练产生干扰;同时针对监测过程中可能出现的数据缺失问题,采用数据插值或回归方法对缺失数据进行填补,从而保证数据序列的完整性。在完成数据清洗后,对不同来源的监测数据进行统一尺度处理与归一化,使其能够在同一数据空间内进行表达。经过上述处理后,可获得高质量、标准化的桥梁监测数据集,为后续特征提取与模型构建提供稳定可靠的数据输入。

在特征提取与多源信息融合阶段,以预处理后的桥梁监测数据为基础,提取能够反映桥梁结构状态变化的关键特征信息。对于结构响应类数据,重点提取振动频率特征、能量谱特征以及应变变化特征,以反映桥梁在荷载作用下的动力学行为变化;对于环境监测数据,则提取温度变化趋势及环境荷载变化特征,用于分析环境因素对结构响

应的影响；对于桥梁图像数据，则通过图像处理方法提取裂缝形态特征、裂缝长度及宽度等表观病害信息。在完成单源特征提取后，通过特征融合方法将不同来源的数据特征进行统一整合，构建能够全面反映桥梁健康状态的多源融合特征向量，从而实现结构响应信息与表观病害信息的综合表达。该阶段的输出结果为桥梁健康状态特征数据，为后续智能检测模型提供输入。

在桥梁病害智能检测阶段，以融合后的桥梁健康状态特征数据为输入，构建轻量化深度学习模型实现桥梁病害的自动识别与检测。考虑到桥梁监测系统在实际工程中的实时性需求和计算资源限制，本研究在模型设计中重点采用轻量化网络结构，通过优化网络层数、减少模型参数规模以及引入高效卷积结构，提高模型运行效率和计算速度。在模型结构上，首先通过特征输入层接收多源融合特征数据，然后通过卷积特征提取模块对输入特征进行深层表达学习，并通过特征融合层进一步强化不同特征之间的关联关系，最终通过分类输出层实现桥梁病害类别的识别。模型训练过程基于历史监测数据和现场采集数据进行，通过训练集与验证集的划分实现模型参数优化，并利用准确率、精确率、召回率及 F1-score 等指标对模型性能进行评估。同时，将所提出的轻量化深度学习模型与传统机器学习方法进行对比分析，以验证该方法在检测精度、计算效率及工程适用性方面的优势。该阶段实现了从桥梁监测数据到病害识别结果的自动转换，是整个技术体系的核心环节。

在工程应用验证阶段，将所构建的轻量化桥梁病害检测模型应用

于南沟大桥实际监测系统中,对桥梁运行过程中采集的实时数据进行自动分析,并输出桥梁病害检测结果。通过将模型识别结果与人工巡检记录进行对比验证,可评估模型在实际工程环境中的识别精度与稳定性。同时结合桥梁长期监测数据,对模型进行持续优化与迭代更新,使其能够适应桥梁结构状态变化及环境变化带来的数据分布变化,从而提高模型在长期运行中的可靠性与适用性。最终形成一套适用于桥梁健康监测系统的轻量化病害检测技术方法,实现桥梁病害信息的快速识别与数字化管理。

通过上述技术路线的实施,本项目形成了从桥梁多源监测数据采集、数据预处理与特征提取,到轻量化深度学习病害检测及工程应用验证的完整研究体系。多维监测系统为桥梁状态分析提供持续稳定的数据来源,数据处理与特征融合实现了桥梁多源信息的统一表达,而轻量化深度学习模型则实现了桥梁病害的自动识别与智能分析。整个技术体系既体现了桥梁监测数据智能分析方法的研究创新,又兼顾工程实施需求,形成从数据采集、算法研究到工程应用验证的系统化技术方案,可为南沟大桥及类似桥梁结构的智能运维提供可靠技术支撑。

3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接

为保证本项目研究成果能够在工程现场落地并形成长期运维能力,须将算法与方法、软硬件及试验验证成果有序衔接到技术改造与基础建设中。下文按成果可用化、试点工程化、规模推广化及运行维护与产业化逻辑给出衔接要点,突出可操作性与工程成熟性指标,便

于作为后续改造、采购与验收的依据。

(1) 成果可用化

交付物（软件）：故障评估模块和趋势预测模块。所有模块需提供可执行镜像、部署说明与接口文档。

流程与文件：运维与巡检规范、人员培训大纲。

验证包：包含南沟大桥试验数据子集、模型验证报告、测试用例集与回归测试脚本。

(2) 试点工程化

在南沟大桥完成设计、安装、联调和验证的端到端工程化示范：按成果交付物布设传感网；开展运行态验证，形成完整的故障检测和趋势预测。试点验收要点包括：数据完整性指标、故障检测、预测可信度评估、系统运行稳定性、人工操作兼容性（与现有维护流程的衔接）。

(3) 运行维护与持续优化

在线学习与策略更新机制：建立模型性能监测与反馈回路，定义模型退化触发与再训练标准，形成监测、触发、验证和上线的在线迭代闭环。

人员与能力建设：制定分层培训计划和能力认证标准，确保运维团队能执行校准、故障处置与模型基本调优。

(4) 标准化、规范与资质对接

议对接国家/行业有关桥梁监测、轨道/公路/桥梁安全的技术规范，规划方案满足相关认证与检测试验要求。

(5) 风险与缓解措施

数据质量风险：通过冗余传感器布设、在线健康检测与定期校准缓解。

模型泛化风险：采用多源数据增强、领域自适应与试点再训练策略，并将模型不确定性输出纳入决策阈值。

组织与制度风险：推动制定或更新维护责任划分与预算保障机制，确保长期运维投入。

3.5 技术经济指标

为确保项目成果的科学性、可验证性与工程应用价值，本项目拟从技术指标与经济指标两方面设定具体考核目标。本项目技术经济指标中提出总体识别准确率 $\geq 92\%$ 和平均绝对百分比误差 $\leq 8\%$ ，其设定依据主要包括：一是参考国内外相关桥梁健康监测与故障诊断研究成果，当前深度学习及多源融合方法识别准确率普遍在 $90\% \sim 95\%$ ，预测误差在 $5\% \sim 10\%$ 区间；二是基于南沟大桥历史监测数据进行先期分析，验证在实际数据条件下模型能够达到或接近该性能水平；三是结合桥梁工程实际需求，该指标能够保证病害及时识别和趋势预测精度，满足维护决策和风险管理的工程要求，从而具有合理性和可实现性。考核指标如表3所示。

表3 本项目技术经济考核指标

序号	指标内容	目标
1	《桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究》	形成《桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究》

	研究报告一份	研究报告一份
2	"多维度传感器的南沟桥梁全方位监测技术" 方案 1 套	提交 "多维度传感器的南沟桥梁全方位监测技术" 方案 1 套
3	"南沟桥梁故障诊断和评估技术算法库" 1 套	提交 "南沟桥梁故障诊断和评估技术算法库" 1 套
4	"多参数融合下基于多尺度深度模型的南沟桥梁趋势预测算法库" 1 套	提交 "多参数融合下基于多尺度深度模型的南沟桥梁趋势预测算法库" 1 套
5	南沟桥梁故障诊断和评估与趋势预测集成软件系统 1 套	南沟桥梁故障诊断和评估与趋势预测集成软件系统 1 套
6	故障诊断准确率	总体识别准确率 $\geq 92\%$
7	性能退化预测误差	平均绝对百分比误差 $\leq 8\%$ 。
8	专利与软件著作权	申请国家专利 ≥ 1 项, 软件著作权 ≥ 1 项
9	论文发表	发表高水平科技论文 2 篇
10	工程技术人员培养	培养工程技术人员 ≥ 2 名

四、项目承担单位概况

4.1 单位概况

长安大学 (以下简称 "本校") 直属中华人民共和国教育部, 是国家首批 "211 工程" 重点建设高校、承担国家 "985 优势学科创新平台" 建设任务、高校 "双一流" 建设高校。学校突出交通运输、土木工程、桥梁与隧道工程等优势学科, 构建了跨学科、多平台融合

的高水平科研体系。在师资与人才队伍方面,学校现有中国科学院/中国工程院/新加坡工程院院士 3 人;教授、副教授共计逾 1,400 人;博士生导师 433 人、硕士生导师 1,113 人。承担国家重点研发计划、国家重大工程项目的各类杰出人才逾百人。在校全日制本科生约 2.5 万余人,硕博士研究生累计约 1.2 万余人,来华留学生约 1,700 余人。在科研平台与资源条件方面,学校建有国家级实验教学中心 5 个(包括 3 个国家级虚拟仿真实验教学中心)、省部级实验教学中心 19 个;设有国家工程研究中心 2 个、国际联合实验室 1 个、省部级重点研究基地 91 个,并联合共建了陕西国家应用数学中心。年度科研经费突破 9.6 亿元,牵头承担国家重点研发计划项目 13 项、课题 42 项,近年来获得国家科学技术进步奖一等奖、二等奖 23 项,年度授权专利逾 1,000 件。

作为一所以工程为主体、工学为特色的学府,长安大学在工程技术和土木工程领域积淀了雄厚的实力,尤其在桥梁领域更是享有亚洲第一的声望。学校注重结合我国公路桥梁的发展需求,特设旧桥检测与加固技术交通运输行业重点实验室,致力于开展旧桥检测与加固的关键技术研究,形成了多个特色鲜明的研究方向。在桥梁领域,学校注重解决实际工程中的技术难题。通过在“桥梁结构优化与承载性能分析”、“旧桥检测与监测技术”、“桥梁养护管理与加固改造技术”、“桥梁承载能力评定与耐久性评估”等四个研究方向的深入研究,学校取得了在国际上领先或先进水平的研究成果。

学校设立的桥梁结构安全技术国家工程实验室成为科技创新的

平台。通过开展应用基础研究和解决重大关键技术问题，该实验室在“桥梁结构安全技术”的研究中取得了显著的进展。实验室与我国公路桥梁的发展现状紧密结合，以应用基础研究、重大关键技术、前瞻性技术和公益性技术研究为主线，为交通现代化建设提供有力支持。学校以其在桥梁领域的雄厚实力，通过解决港珠澳大桥、沪通大桥等重大桥梁基础设施建设及维修技术难题，为桥梁建设和交通行业发展提供了强有力的技术支撑和保障。

综上，本校具备雄厚的师资力量、先进的实验室设备、完备的科研平台、丰富的桥梁工程研究储备，为本项目“桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究”提供坚实的依托与保障。

4.2 技术力量及人员构成

序号	姓名	性别	工作年限	工作单位	专业	职称或资格证书	拟在本项目中担任的工作
1	赵轲	男	3	长安大学	机械工程	讲师	项目负责人，负责总体设计与组织实施
2	卫党委	男	12	咸阳市公路局	交通运输工程领域工程	高级工程师	技术负责人，负责桥梁结构与监测系统统设计
3	王瑞欣	女	3	长安大学	人工智能科学与技术	副教授	故障诊断与退化趋势预测算法设计

4	李嘉	男	8	长安大学	桥梁工程	副教授	桥梁结构健康监测系统的设计
5	陈丽俊	男	5	长安大学	桥梁工程	副教授	数据与算法研究
6	贾峰	男	6	长安大学	机械工程	副教授	信息化与平台构建
7	任刘珍	女	3	长安大学	人工智能科学与技术	讲师	桥梁结构健康监测系统的设计实施
8	任江卓	男	3	长安大学	养护运营技术	工程师	桥梁养护运营
9	田金波	男	35	咸阳市公路局	机械工程	高级工程师	技术支持
10	程师云	男	27	咸阳市公路局	土木工程	高级工程师	技术支持
11	姚建荣	男	19	咸阳市公路局	道路工程	高级工程师	桥梁养护运营
12	刘讲会	男	12	咸阳市公路局	道路工程	工程师	桥梁养护运营

4.3 各自承担的主要工作

本项目各团队成员分工明确，形成科研、工程、管理协同推进的工作体系：项目负责人赵轲主持项目总体设计与组织实施，负责制定技术路线、把控研究方案、审核成果并指导推广应用，确保项目按计划高质量推进。桥梁结构与监测研究团队卫党委、王瑞欣、李嘉等负

责桥梁结构健康监测系统的设计与实施,包括传感器选型、测点布设、监测数据采集、数据预处理及系统功能实现,保证多维数据的可靠性和可用性。数据与算法研究团队陈丽俊、田金波等负责多源监测数据融合算法设计、故障诊断与诊断算法开发、深度学习模型训练、评估指标构建及模型验证,形成桥梁故障诊断与趋势预测的核心算法体系。工程验证与应用团队程师云、任刘珍、任江卓等负责现场监测系统安装与调试、运行维护、桥梁实际监测及台架或试验验证,推动诊断方法工程化应用,评估系统实际运行效果。管理与保障团队刘讲会负责项目经费预算与使用、设备采购、合同管理、校企及施工单位协调、交通安全管理及成果转化推广等保障性工作,为项目顺利实施提供制度和资源支持。通过上述分工与协作,项目形成了科研设计、数据分析、工程实施和管理保障的全流程团队体系,能够确保从理论研究、算法开发到工程验证的系统化推进和成果落地。

4.4 项目主要负责人情况

项目负责人赵轲,现任职于长安大学,长期从事人工智能技术在复杂工程系统诊断与趋势预测领域的理论与应用研究,在多源数据融合、结构状态识别、故障诊断与性能预测等方面积累了系统而深入的研究基础。近年来,申请人以第一作者和通讯作者在国际重要学术期刊发表 SCI 论文 16 篇,其中包括 ESI 热点论文 2 篇、ESI 高被引论文 2 篇,发表中文 EI 论文 1 篇、国际会议论文 1 篇。按 2023 年 12 月中国科学院 SCI 期刊分区统计,二区及以上论文 12 篇,其中 10 篇发表于一区 Top 期刊,学术成果具有显著国际影响力。申请人已

获授权发明专利 1 项。2023 年和 2024 年连续两年入选全球前 2% 顶尖科学家榜单，谷歌学术引用次数已达 1700 余次，在本领域具有良好的学术声誉与学术影响力。

在桥梁工程与智能运维领域，申请人已开展了一系列与本项目高度相关的前期研究工作，重点围绕多源监测数据驱动的结构状态识别、智能诊断与性能趋势预测模型构建等关键问题，形成了较为系统的研究框架与技术积累。同时，申请人深度参与了西北工业大学与陕西交控联合承担的《高速公路无人智慧巡检技术研发与平台化产品应用研究实施方案》，在实际桥梁与道路工程场景中开展智能巡检、病害识别与运维决策等应用研究，积累了丰富的工程实践经验，为本项目的顺利实施奠定了坚实的技术与应用基础。

上述研究成果与工程实践经验为本项目在桥梁数字化运维、智能诊断评估与趋势预测等关键技术方向的深入开展提供了可靠保障，充分证明项目负责人具备扎实的理论基础、丰富的工程经验和较强的组织实施能力，能够有效保障本项目研究目标的顺利实现。

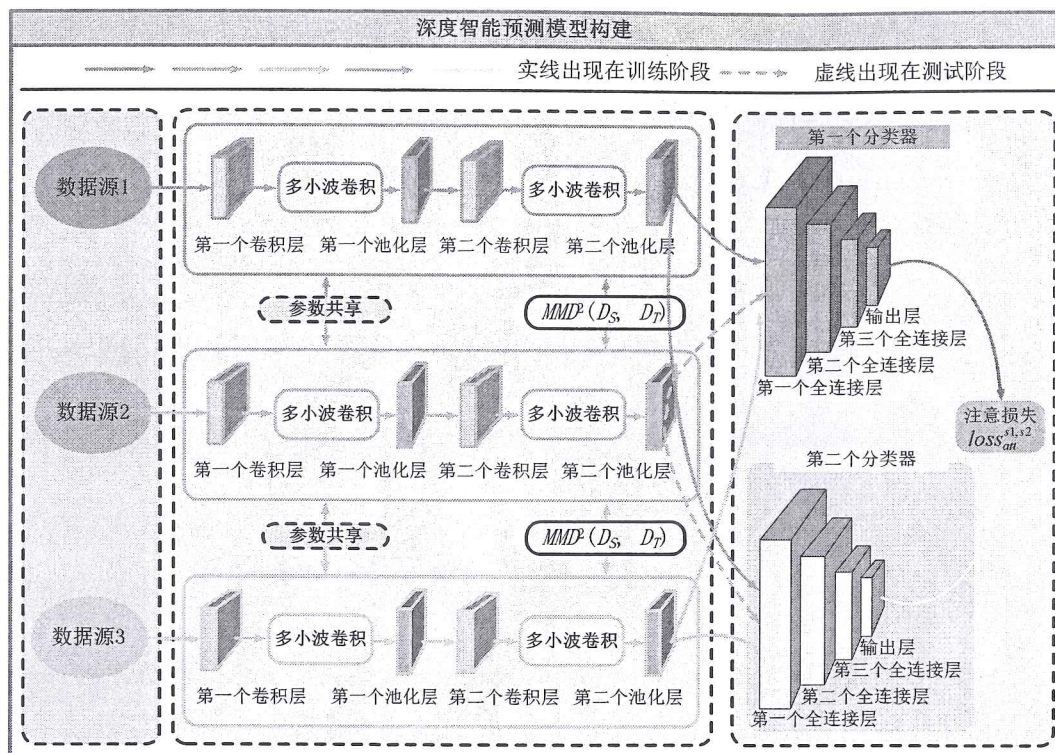


图 8 面向多源异构数据的深度智能预测模型

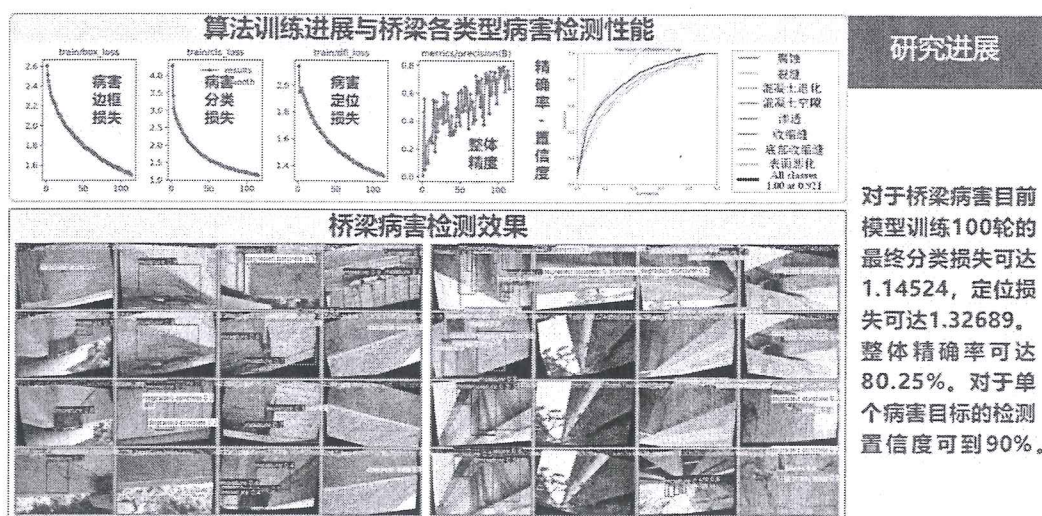


图 9 桥梁故障诊断效果

面向多源异构数据的深度智能预测模型构建研究: 针对数据集不同来源存在异构性, 以及难以进行预测任务的问题, 申请人构建了一种类别感知对抗多小波卷积神经网络 (图 8)。首先设计了一种类别

感知分类机制来自主感知不同源的预测效果并提高分类器的区分度。随后,提出了一种基于类别感知分类机制的对抗域自适应方法,借助改进的强化条件分布对齐策略,在类级别精确对齐不同源特征。最后,引入多个小波卷积核代替传统的卷积核,并构建多小波卷积神经网络作为特征提取器来提取隐含的特征信息。该成果发表在期刊 IEEE Transactions on Industrial Informatics, 并于 2025 年 3 月入选 ESI 高被引论文。【IEEE Trans. Ind. Inform., 2024, 20: 4492 - 4503.】。



图 10 已成功开发的高速公路病害智能识别系统

五、项目依托工程(工作)情况及其他必要支撑条件

5.1 项目依托工程(工作)情况

南沟大桥位于 G312 国道, 原为太(峪镇)火(石咀煤矿)二级汽车专用公路, 桥梁运营桩号为 K1669+883。桥梁全长 276m, 于 1998 年建成通车。2022 年实施维修工程, 主要内容为更换桥面铺

装、护栏、伸缩缝和支座。设计荷载：汽车-20级，挂车-100。桥型布置：上部3×3-30m装配式预应力混凝土连续箱梁，下部结构1#、8#墩为柱式桥墩桩基础、3#~7#墩为钢筋混凝土空心薄壁墩；柱式桥台、挖孔桩基础。桥面宽度：0.5m（护栏）+净9m（行车道）+0.5m（护栏）。设计纵坡：3%。该桥自建成通车以来已安全运营二十余年，是连接郴州市城区与周边交通干线的重要通道，在区域交通运输体系中发挥着关键作用。然而，长期服役过程中，受车辆荷载反复作用、温度应力变化、混凝土碳化及氯离子侵蚀等多重因素影响，桥梁上、下部结构已出现不同程度的病害现象，包括箱梁裂缝、支座老化、伸缩缝破损、墩台混凝土剥落及局部钢筋锈蚀等。随着结构性能的逐步退化，桥梁的承载能力及服役安全性面临潜在威胁。针对上述问题，迫切需要引入数字化监测与智能诊断技术，对桥梁运行状态进行长期、连续、精确的监测与评估，为后续养护维修提供科学依据。本项目以南沟大桥为依托工程，开展桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究，具有重要的工程现实意义和推广价值。

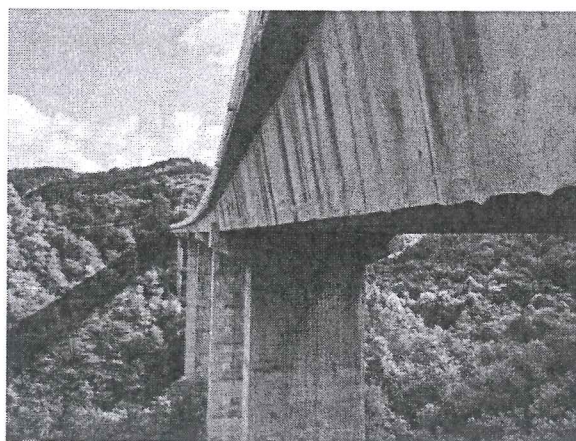
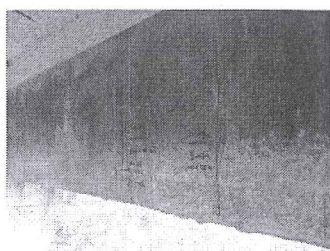
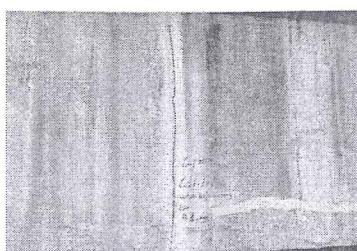


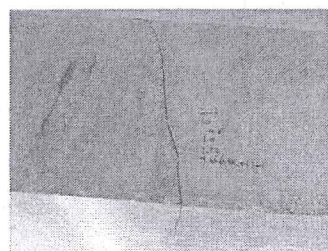
图8 南沟大桥示意图



(a) 腹板竖向裂缝

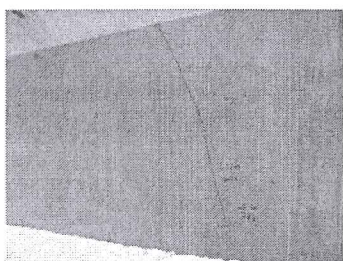


(b) 腹板竖向裂缝



(c) 腹板延伸至

底板 L 型裂缝



(d) 腹板斜向裂缝



(e) 底板纵向裂缝



(f) 底板空

洞露

图 9 南沟大桥结构损伤示意图

5.2 投资来源

为保障本项目顺利实施与研究目标的全面实现,项目经费拟由陕西省交通厅科技专项资金和咸阳市公路局配套投入等多渠道共同保障。其中,交通厅科技专项资金主要用于支持本项目核心关键技术攻关,包括桥梁智能诊断与趋势预测模型研发、系统集成与示范应用等内容,咸阳市公路局配套资金主要用于多源传感数据采集与处理平台建设、工程示范建设、现场部署实施及相关应用验证工作多元化的经费来源结构能够有效保障项目实施过程中的持续投入和风险分担,为本项目研究任务的按期高质量完成提供稳定可靠的资金保障。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

为确保科研工作与现场工程活动紧密耦合、相互促进，本项目拟在 24 个月的实施期内将工程现场工作与科研任务按阶段协同推进。下述安排以项目总周期 24 个月为基准，明确时间节点、现场配合要求、数据采集窗口与验收里程碑，确保实验数据的完整性、模型训练的时序性以及工程验证的可操作性。

表 4 分阶段配合安排

阶段	月份 (项目月)	主要工程活动 (现场)	主要科研任务	现场配合/要求	交付成果 / 验收指标
A. 前期准备与基线监测准备	1-3	场勘、监测点位最终确定、设备采购与标定、申请现场作业许可、交通组织方案确认	监测方案细化、数据管理方案、边缘节点与云平台搭建	施工允许时间窗口、试验区安全布控、临时电源与通信保障	监测点位图、设备清单、标定报告
B. 传感器安装与基线数据采集	4-6	传感器与采集箱安装、链路调试、首轮标定校验	连续基线数据采集 (≥ 2 个月)、初步数据清洗与同步	夜间或非高峰期安装；确保传感器二次固定与防护	基线数据集、数据质量报告、初步特点分析
C. 台架/受	7-12	在许可窗口进行局部加载/振动	特征工程、信号处理算法、初始故障	需要短时交通管制或局	台架试验报告、算法初版

控加载 试验与 算法初 验		试验或台架试验 (与工程方协 调)	检测模型训练与 验证	部封闭, 提前 发布通告	与性能报告
D. 算 法迭代 与现场 在线验 证	13-18	正常运营下的长 时验证与小规模 调试、可能的维 护/更换作业配 合	多源融合算法与 故障分离模型优 化接入实时数据	与运维单位 配合在既有 维护窗口同 步采集“前中 后”数据	在线模型性 能报告、数字 孪生初版
E. 平 台集 成、示 范运行	19-21	平台功能切换到 示范运行模式, 完成最终的现场 部署	平台功能切换到 示范运行模式, 完 成最终的现场部 署	平台功能切 换到示范运 行模式, 完成 最终的现场 部署	平台功能切 换到示范运 行模式, 完成 最终的现场 部署
F. 总结 评估与 推广准 备	22-24	无需大规模现场 施工; 组织成果 培训与技术交底	最终评估、寿命预 测与维护优化建 议书撰写、论文与 专利整理	编制技术指 南与培训材 料, 组织示范 培训	结题报告、技 术手册、专利 /软件著作权 材料、示范工 程推广方案

5.4 组织管理形式

为确保项目目标顺利实现和各项研究任务高质量完成, 本项目将建立统一领导、分工负责、协同推进、动态管控的组织管理体系。项

目由项目负责人全面统筹，负责总体技术路线把控、研究计划制定、资源配置协调及关键技术决策；设立项目管理办公室，具体负责项目日常组织协调、进度管理、经费管理、成果归档及对外联络等工作；各研究任务设立专题负责人，分别承担相应研究方向的组织实施、技术攻关与阶段成果交付责任，形成“目标清晰、责任明确、协同高效”的项目运行机制。在项目实施过程中，建立定期例会与阶段评估制度，通过月度工作汇报、季度技术评审和年度总结考核，及时发现并解决项目推进中的技术与管理问题；对关键节点和重大技术风险实行专项论证与动态调整机制，确保项目进度、质量与经费使用的规范可控。同时，依托长安大学及咸阳市公路局的协同优势，建立产学研用联合协作机制，通过技术交流、联合试验、成果共享与工程示范，促进科研成果向工程应用的高效转化，保障项目整体实施效果和示范推广价值。

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	19.89	合 计	50.0	19.89	30.11
工程配套研究经费	0	1.设备费	11.0	0.0	11.0
单位自筹	0	（1）购置设备费	6.0	0.0	6.0
其他经费	30.11	（2）设备改造与租赁费	5.0	0.0	5.0
		2.业务费	16.5	8.0	8.5
		（1）材料费	4.0	1.5	2.5
		（2）测试化验实验加工费	3.0	1.5	1.5
		（3）燃料动力费	2.0	1.0	1.0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	3.0	2.0	1.0
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	3.0	1.0	2.0
		（6）其他费用	1.5	1.0	0.5
		3.劳务费	8.0	3.89	4.11
		（1）专家咨询费	2.0	1.0	1.0
		（2）聘用人员劳务费	3.5	2.0	1.5
		（3）其他劳务费	2.5	0.89	1.61
		（二）间接费用	14.5	8.0	6.5
		4.管理费	7.0	3.0	4.0
		5.绩效支出	7.5	5.0	2.5

七、项目绩效指标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1、专利授权数（项）	1
		（1）授权发明专利	1
		（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）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	0
		（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）	1
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	1
	其他成果	1、填补技术空白数	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）	2
		（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	是
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	0
	人才引育	1、引进高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2、培养高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	2
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	2
		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			

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）

本项目以提升桥梁数字化运维水平与智能诊断能力为核心目标，围绕“结构状态精准感知—智能诊断识别—健康评估预测—决策优化支撑”的总体思路，构建桥梁全寿命周期的智能检测与评估体系。项目实施后，预计实现以下目标：建立面向桥梁全寿命周期的数字化监测与智能诊断理论框架，阐明多源耦合荷载作用下桥梁结构性能退化与损伤演化机理；构建融合力学机理与数据驱动的健康状态评估模型，实现从被动检测到主动感知的理论转变；提出适用于复杂环境条件下的桥梁健康评估与趋势预测模型，提升评估结果的科学性与可解释性；研发多源异构数据融合与异常识别技术，实现桥梁结构关键响应参数的高精度提取与噪声抑制；开发基于深度学习的智能故障诊断算法，实现多类型损伤的自动识别、定位与定量化评估；在南沟大桥完成系统测试与验证，实现桥梁结构运行状态的实时监测与智能诊断。

8.2 提交的研究成果及其形式

- (1) 形成《桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究》研究报告一份；
- (2) 提交多维度传感器的南沟桥梁全方位监测技术方案 1 套；
- (3) 提交南沟桥梁故障诊断和评估技术算法库 1 套；
- (4) 提交多参数融合下基于多尺度深度模型的南沟桥梁趋势预测算法库” 1 套；

- (5) 提交南沟桥梁故障诊断与趋势预测集成软件系统 1 套
- (6) 申请国家专利 1 项、软件著作权 1 项;
- (7) 发表高水平科技论文 2 篇;
- (8) 培养工程技术人员 2 名及以上。

8.3 经济社会效益

本项目在理论创新与技术实现之外, 具有明显的经济与社会价值。通过智能化监测与预测性维护替代高频人工巡检和被动维修, 预计长期运维成本可下降 20%—30% (依据桥梁运维历史数据与智能策略实施后的工单减少率测算)。优化维护时机与策略可减少应急维修与重复作业, 传感器及相关设备平均使用寿命得到显著提高, 从而降低替换及维护投入。通过早期识别与处置病害, 避免重大结构失效造成的高额维修或重建费用, 事故相关直接经济损失预期下降 $\geq 50\%$ (基于历史事故平均处置成本估算)。

改进后的桥梁运维体系将提升道路通行可靠性与公共安全感, 增强公众对交通基础设施管理的信任。预测性维护可避免不必要的大规模维修作业, 减少材料消耗与施工交通干扰, 降低施工带来的碳排放与环境影响, 有助于实现基础设施运维的可持续发展目标。此外, 项目将培养桥梁数字化运维领域的工程技术人员与研究生, 为行业输送应用型人才, 并通过论文提升学术与行业影响力。

九、其它需要说明的问题

为确保本项目顺利实施、成果可用且具有长期工程价值, 特补充说明如下若干事项:

(1) 施工安全与人员资质：现场安装、调试和台架试验将按照国家工程建设安全规范执行；所有现场作业人员须具备相应资质并接受专项安全技术交底。项目组将制定详细的安全管理方案与应急处置预案，并配备必要的个人防护与救援设备，确保人员与设备安全。

(2) 数据管理与隐私保护：项目在数据采集、传输、存储与共享方面将建立严格的数据管理制度：包括数据采集标准、时钟同步、数据加密传输、本地冗余备份、访问控制与日志审计。对含有敏感信息（如道路通行视频中可识别个人信息）的数据采用匿名化/模糊化处理或仅在获得许可的条件下用于研究，确保符合相关法律法规与隐私保护要求。

(3) 知识产权与成果归属：本项目产生的研究成果、软件著作权、专利申请与数据集的归属按照承担单位（长安大学）与合作单位事先签订的合同或科技成果归属协议执行。项目实施期内将及时进行专利布局与软件著作权登记，确保成果的合法保护与后续产业化转化。

(4) 环境影响与文明施工：现场设备安装、试验及后续工程活动将贯彻环境保护与文明施工要求，减少噪声、粉尘与施工废弃物的影响。在进行无人机巡检、声呐或其他环境感知工作时，将遵守相关环保与用电、无线电频段使用管理规定，必要时办理相应审批。

(5) 质量控制与试验标准：项目将依托国家与行业标准制定监测设备验收、传感器标定、数据质量控制与台架试验规范，并形成内部质量控制手册（包含标定报告模板、数据质量评估指标与验收标

准), 确保科研数据与工程结论的可重复性与可信度。

(6) 经费管理与变更控制: 项目预算执行将遵循国家财政与校内经费管理规定, 建立严格的预算执行与变更控制流程。若现场不可预见因素导致试验或设备采购变更, 将按变更管理流程提交变更申请, 确保经费使用规范透明并留有适度预备金应对可能的调整。

(7) 后期维护、移交与持续运营: 在项目结题后, 将与桥梁管理单位签订技术移交与维护协议, 包含系统运行维护手册、操作规程、培训计划与必要的技术支持期。对关键设备与软件提供升级与维护方案, 确保示范系统实现长期稳定运行并逐步推广到更多桥梁。

(8) 培训与能力建设: 项目将组织面向桥梁管理与运维人员的培训与现场演示, 形成可复制的培训教材与现场操作手册, 培养 1-2 名现场工程技术人员作为后续运维负责人, 提高地方单位对数字化运维体系的接受度与使用能力。

十、申请单位意见

经认真审议, 本单位认为该项目目标明确、技术路线清晰、研究内容系统完整, 紧密契合桥梁数字化运维与智能化管理的发展需求, 具有显著的工程应用价值与社会效益。项目研究团队结构合理, 项目负责人及骨干成员具有扎实的科研基础和丰富的工程实践经验, 具备顺利完成本项目研究任务的能力与条件。

本单位将本项目作为重点支持科研项目, 已落实项目依托工程与实验条件, 包括桥梁监测现场、实验平台及相关配套设施; 同时, 已落实咸阳市公路局配套经费与人员保障措施, 确保项目实施所需经

费、设备、场地及技术支持按计划到位。项目组织管理体系完善，实施方案可行，风险可控，具备良好的实施基础。

综上所述，本单位同意推荐该项目申报，并将全力保障项目顺利实施和预期目标高质量完成。



单位负责人：(签字)

年 月 日 科研项目专用章

桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究 大纲评审意见

2026年3月12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“桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究”（项目编号：25-77K）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、项目研究内容较全面，研究目标较明确，技术路线基本可行。

二、项目研究人员较合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，依托工程落实，经费预算符合规定，具备开展研究工作的条件。

三、预期成果覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架契合。

与会专家原则同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

- 1、深化研究内容，细化技术路线；
- 2、聚焦所研究结构类型；
- 3、优化项目组参与人员。

主任委员：王拴柳

2026年3月12日

专家审查意见表

项目名称	25-77K 桥梁数字化运维下智能检测与诊断评估方法研究				
专家姓名	王登科	职务/职称	正高级工程师	专 业	桥梁与隧道
专家单位	陕西省铁路集团公司			联系电话	13709260508

评 审 意 见

本项目研究必要，前期研究成果和研究支撑条件满足研究，实施方案及技术路线可行，依托工程落实，预期目标成果明确，大纲内容^{基本}~~完整~~齐全。同意项目立项研究。

建议：

- 1、研究内容范围偏宽，偏大，宜对研究范围按桥梁结构类型，或桥梁上下部结构件类型予以限定。
- 2、补充数字化下智能检测与诊断的采集及判定方法的技术突破点和采样的精度。
- 3 研究人员补充桥梁结构分析及设计和养护运营维护人员。

评审专家（签字）：

王登科

2026 年 3 月 12 日

（本意见入档，填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究				
专家姓名	中亮	职务/职称	正高	专业	桥梁工程
专家单位	中交一公局			联系电话	13991801018

评审意见

1. 建议对主桥梁结构受力重译修与研究, 研究如战时结构应和战时桥梁结构规模相衔接。
2. 建议明确异常数据检测机制位置设置位置, 明确检测数据予以处理流程。
3. 增加不同桥型, 不同桥型类型记录数据, 明确检测机制与检测机制设计。
4. 明确检测机制也要有良好界面, 与现有设备予以数据对接。
5. 检测机制应明确, 明确明确明确明确, 明确明确明确明确。
6. 明确明确明确明确, 明确明确明确明确, 明确明确明确明确。

评审专家(签字):

中亮

2016年3月12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	桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究				
专家姓名	柴唐焰	职务/职称	正高	专 业	桥梁工程
专家单位	中铁第一勘察设计院集团有限公司			联系电话	13991256879

评 审 意 见

一、本项目以提升桥梁数字化运维水平与智能诊断能力为目标，通过相关研究，构建桥梁全寿命周期的智能检测与评估体系，选题明确，研究内容针对性强，预计实现目标清晰，契合桥梁数字化运维与智能化管理的发展需求，具有较好的社会、经济和工程应用价值，研究意义较高。

同意研究大纲。

二、建议

1. 文中列举的中外相关桥梁的坍塌案例，与案例揭示了传统检测体系的局限性等相关描述的关联性偏弱，建议修改完善。
2. 文中关于现有桥梁健康监测系统在多个方面存在的突出问题的描述偏于繁琐，建议精简。
3. 文中关于技术研究方面的论述，理论化的内容偏多，直观性偏弱，建议修改。
4. 技术经济目标中关于总体识别准确率 $\geq 92\%$ 和平均绝对百分比误差 $\leq 8\%$ ，有无依据，建议补充。

评审专家（签字）：

柴唐焰

2016年3月12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	桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究				
专家姓名	惠迎新	职务/职称	教授	专 业	桥梁工程
专家单位	宁夏交通建设股份有限公司/宁夏大学			联系电话	18100956939

评 审 意 见

本项目紧扣桥梁数字化运维发展需求，针对现有桥梁健康监测系统存在的结构状态感知不足、多源数据质量低且融合不足、诊断评估与预测智能化水平低等行业痛点，以南沟大桥为依托工程，从综合多维信息的监测技术、基于深度学习的诊断评估技术、多参数融合的趋势预测技术三大方向开展研究，整体研究方向契合交通运输行业基础设施智能化运维的发展趋势，技术路线围绕“感知 - 诊断 - 预测”构建，整体可行，研究内容与工程实际结合紧密，预期成果具有明确的工程应用价值。项目技术先进，具有较强的创新性，研究方向明确，技术路线可行，建议项目组根据以下意见和建议，对研究大纲资料做进一步的修改和完善。

1、技术路线部分表述较为简略，仅分点列出三大关键技术，未清晰体现全流程逻辑关系，也未明确各研究内容之间的技术衔接节点，建议重新梳理技术路线，以流程图或分阶段递进的方式，明确各环节的输入、输出及技术关联，突出技术路线的系统性和逻辑性。

2、研究内容二“基于深度学习的桥梁诊断和评估技术研究”将故障诊断流程划分为“故障检测—故障分离—故障评价”，但现有描述偏方法罗列，缺少对模型结构、输入输出、训练策略与验证方式的具体说明。建议明确深度学习模型的网络结构、特征提取机制、融合策略与评估指标，并与传统方法形成对比，突出本项目在精度、鲁棒性、可解释性方面的优势。

3、业务费中的材料费为0，而项目涉及传感器安装、现场试验等工作，建议补充说明材料费为0的原因，或根据实际需求完善经费测算，确保经费分配与研究任务相匹配。

4、项目依托工程为南沟大桥，大纲中已明确其存在的病害类型，但未结合该桥梁的具体结构特点（如装配式预应力混凝土连续箱梁、空心薄壁墩），针对性分析监测点位的布设优先级和模型训练的重点关注参数，未明确监测数据与病害演化的关联分析方法，建议结合南沟大桥的结构特征和病害实际，细化研究内容的工程针对性，提升研究成果在依托工程的落地性。

评审专家（签字）：

2026年3月12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	□25-77K 桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究				
专家姓名	□王玉银	职务/职称	党委书记 教授	专...业	□结构工程
专家单位	□哈尔滨工业大学土木工程学院			联系电话	□13766831066

评·审·意·见

项目依托南沟大桥（桥梁全长 276m，桥型布置为上部 3×3-30m 装配式预应力混凝土连续箱梁），而项目名称为“桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究”，题目比较大，研究内容宽泛，不聚焦。建议针对依托工程的桥型特点，进行针对性的研究。

□

评审专家（签字）：王玉银

年...月...日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

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	王登科	陕西省铁路集团有限公司	路桥工程	路桥工程	正高工	王登科
2	委员	牛宏	中交第一公路勘察设计有限公司	桥梁工程	桥梁工程	正高工	牛宏
3	委员	柴唐焰	中铁第一勘察设计院	桥梁工程	桥梁工程	正高工	柴唐焰
4	委员	王玉银	哈尔滨工业大学	桥梁工程	桥梁工程	教授	王玉银
5	委员	惠迎新	宁夏交通建设股份有限公司	桥梁与隧道工程	桥梁与隧道工程	教授	惠迎新

专家意见处理表

项目名称：桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究（项目编号：25-77K）

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	王登科	研究内容范围偏宽、偏大、宜对研究范围按桥梁结构类型, 或桥梁上下部结构件类型予以限定。	感谢专家提出的宝贵意见。针对“研究内容范围偏宽、偏大, 建议对研究范围按桥梁结构类型或桥梁上下部结构件类型进行限定”的意见, 项目组已对研究对象和研究范围进行了进一步梳理与优化。在修订后的研究方案中, 项目将研究对象明确限定为混凝土箱梁桥结构, 并结合该类型桥梁的结构形式与受力特点, 对研究内容进行针对性聚焦。具体而言, 研究重点将围绕桥梁上部结构关键受力部位(如主梁、桥面板等)以及典型表面病害(如裂缝、剥落等)开展轻量化病害检测技术研究, 以提高研究内容的工程针对性和可实施性。同时, 在监测与分析过程中, 将优先关注桥梁关键结构部位的监测数据和表面损伤信息, 通过多源监测数据与图像信息的融合分析, 实现对上述典型病害的自动识别与检测。通过对研究范围的适度收敛与聚焦, 本项目能够在保证研究深度的同时, 提高技术方案的可操作性与工程应用价值。通过上述调整, 研究内容由原先相对宽泛的桥梁健康诊断与评估研究, 进一步聚焦为面向南沟大桥关键结构部位的轻量化病害检测方法研究, 从而使研究目标更加明确, 研究范围更加合理, 也更加符合实际工程应用需求。

2	王登科	补充数字化智能检测与诊断的采集及判定方法的技术图片点和采样精度。	根据评审建议,项目组对数字化智能检测与诊断系统的数据采集参数和采样精度进行了进一步补充和完善,并在技术方案中增加了相关说明。具体如下:为保证桥梁监测数据的准确性、稳定性和可靠性,本项目在监测系统设计中,对关键传感器的测量精度及采样策略进行了明确规定。结构应变监测采用光纤光栅应变传感器,其测量精度可达到 $\pm 1 \mu \varepsilon$, 能够满足桥梁结构微小应变变化的监测需求。振动响应监测采用高灵敏度振动加速度传感器,采样频率设置为 100 - 200 Hz,可有效捕捉桥梁结构在车辆荷载及环境作用下的动态响应特征。桥梁位移及变形监测采用高精度位移传感器,其监测精度可达到 0.1 mm,能够实现对桥梁关键结构部位变形状态的精细化监测。在数据采集策略方面,本项目结合桥梁结构关键部位及监测需求,采用分级采样机制。对于桥梁关键受力部位及重点监测区域,采用实时连续采集方式,以保证对结构状态变化的及时感知;对于一般监测区域,则采用周期采集方式,通过设定合理的数据采集周期实现长期状态跟踪,在保证监测效果的同时提高系统运行效率。通过上述监测精度和采样策略的设计,可有效保证桥梁监测数据的高精度采集和稳定获取,为后续的桥梁检测、状态评估及趋势预测算法提供可靠的数据基础。相关技术参数及说明已在修订后的技术方案中进行了补充。 感谢专家提出的宝贵意见。根据评审建议,项目组对研究团队结构进行了进一步优化和补充,在原有机械工程、人工智能及桥梁监测研究人员基础上,增加了桥梁结构分析及设计及桥梁养护运营维护方面的专业技术人员。其中,来自咸阳市公路局的桥
3	王登科	研究人员补充桥梁结构分析及设计和养护运营维护人员。	

			梁工程与道路工程领域高级工程师及工程技术人员参与项目实施,主要负责桥梁结构分析、现场监测系统工程实施、桥梁养护运营管理及工程应用验证等工作。同时,长安大学桥梁工程相关研究人员参与桥梁结构健康监测监测系统设计与结构分析工作,从理论研究与实践两个层面共同支撑项目实施。
4	柴唐焰	文中列举的中外相关桥梁的坍塌案例,与案例揭示了传统检测体系的局限性等相关描述的关联偏弱,建议修改完善。	根据评审建议,项目组对相关内容进行了修改与完善,在修订稿中进一步强化了桥梁坍塌案例与传统检测体系局限性之间的逻辑关联。具体而言,在原有案例描述的基础上,补充分析了桥梁坍塌事故发生前监测与检测手段的不足,如监测手段单一、人工巡检周期较长、数据连续性不足以及缺乏智能化诊断与预警能力等问题,并结合这些问题进一步阐述了传统桥梁检测体系在结构状态识别和风险预警方面的局限性。同时,在案例分析之后新增了过渡性说明,将事故案例与本项目研究内容进行了紧密衔接,明确指出开展多维度传感监测、智能病害识别和趋势预测技术研究的必要性,从而突出本项目在提升桥梁监测智能化水平、提高病害识别能力和实现早期风险预警方面的研究意义。通过上述修改,使案例分析与研究目标之间形成更加清晰的逻辑关系,进一步增强了相关论述的针对性和说服力。相关修改内容已在修订稿相应章节中进行了补充和完善。
5	柴唐焰	文中关于现有桥梁健康监测系统在多个方面存在的突出问题的描述偏于繁琐,建议精简。	感谢专家提出的意见。根据建议,项目组对现有桥梁健康监测系统存在的问题描述进行了精简与归纳,保留核心内容,突出主要技术瓶颈和局限性,同时去掉重复和冗长表述。目前现有桥梁健康监测系统在数据采集、处理及应用方面仍存在显著局

			限：监测手段单一，难以全面反映桥梁结构状态；数据连续性和可靠性不足，无法支持长期趋势分析；智能化诊断能力有限，病害识别多依赖人工巡检；早期风险预警功能弱，难以满足桥梁维护管理的实时性需求。这些问题限制了传统监测系统在实际应用中的效果。 根据建议，项目组对技术研究部分进行了修改，重点从以下几个方面增强直观性与可操作性：增加流程性描述对各技术环节（多源数据采集、特征提取与融合、深度学习病害检测、趋势预测、工程验证）进行了全流程衔接描述，明确各环节的输入、输出和相互关系，使技术路线从概念理论向实际实施转化更加清晰。突出关键技术环节与实例说明在特征融合、深度学习模型设计和工程应用环节加入直观说明，描述特征类型、传感器布设、采样精度、模型结构及实际工程应用效果，提高技术内容的可感知性。通过南沟大桥案例或监测点实例，将抽象算法与实际数据采集和病害识别过程联系起来，使技术论述更直观。对关键技术指标和实验参数（如传感器精度、采样频率、数据处理周期等）进行量化说明，提高可操作性与直观感。
6	柴唐焰	文中关于技术研究方面的论述，理论化的内容偏多，直观性偏弱，建议修改。	本项目技术经济指标中提出总体识别准确率$\geq 92\%$和平均绝对百分比误差$\leq 8\%$，其设定依据主要包括：一是参考国内外相关桥梁健康监测与病害检测研究成果，当前深度学习及多源融合方法识别准确率普遍在$90\% \sim 95\%$，预测误差在$5\% \sim 10\%$区间；二是基于南沟大桥历史监测数据进行先期分析，验证在实际数据条件下模型能够达到或接近该性能水平；三是结合桥梁工程实际需求，该指标能够保证病害及时识别和趋势预测精度，满足维护决
7	柴唐焰	技术经济目标中关于总体识别准确率$\geq 92\%$和平均绝对百分比误差$\leq 8\%$，有无依据，建议补充。	

			策和风险管理的要求,从而具有合理性和可实现性。
8	牛宏	本项目立足桥梁结构多源监测数据的智能化分析,研究思路较为明确,研究内容具有一定的前瞻性和应用价值,建议进一步细化技术路线和研究内容。	根据评审意见,项目组对技术路线和研究内容进行了进一步细化与完善,主要措施如下:将技术路线明确划分为多维度传感监测、数据预处理与特征提取、多源特征融合、轻量化深度学习病害检测、多参数趋势预测及工程应用验证六个环节。明确每个环节的输入、输出及关键技术手段,保证从数据采集到算法分析再到工程验证形成闭环,突出项目研究的可操作性及系统性。明确结构响应、环境工况及图像数据的特征类型和融合方法,突出特征级融合机制在病害识别和趋势预测中的作用。细化多尺度卷积神经网络和门控循环网络的设计思路、训练及验证流程,同时提出轻量化方案以满足工程实施需求。说明多参数融合特征序列的构建、预测模型设计及与人工巡检结果的对比验证方法。明确在南沟大桥监测系统部署、运行及实际监测与台架验证步骤,确保研究成果可落地。强调前瞻性与应用价值项目在智能化、自动化和实时化监测方面具有创新性,通过病害识别与趋势预测为桥梁维护和管理提供科学决策支持。
9	牛宏	建议明确故障诊断流程中各环节的输入、输出关系以及算法训练与验证流程,使技术路线更加清晰。	据评审建议,项目组对故障诊断技术路线进行了进一步明确和优化,重点从各环节输入输出、算法训练及验证流程三个方面进行了梳理,使技术路线更加系统、直观。具体措施如下:明确各环节输入输出关系。数据采集与预处理环节:输入为桥梁多源监测数据,包括结构响应、环境工况及图像数据;输出为去噪、异常值处理和规整后的高质量特征数据,为特征提取与算法建模提供可靠输入。特征提取与融合环节:输入为预处理后的监测数据,输出

			为结构响应特征、环境工况特征及图像特征的融合向量，为深度学习模型训练提供多源信息支持。故障识别与诊断环节：输入为融合特征向量，输出为病害类别、位置及严重程度，实现对桥梁结构异常的智能化识别。算法训练与验证流程训练阶段：利用历史监测数据和人工标注的故障样本训练深度学习模型，包括多尺度卷积神经网络用于特征抽象，门控循环网络用于趋势预测。训练过程中采用交叉验证和早停策略，防止过拟合，并通过性能指标（准确率、召回率、F1-score）评估模型效果。验证阶段：在独立测试集及现场实时监测数据上进行验证，输出模型性能评估结果，并与人工巡检记录进行对比，实现模型可靠性和工程适用性验证。技术路线优化整个流程形成闭环。过明确输入输出关系和算法训练验证步骤，使技术路线逻辑清晰、环节衔接紧密，同时为工程应用提供可操作依据。
10	牛宏	建议补充深度学习网络结构设计，进一步说明特征融合机制，并明确评价指标，同时与传统方法进行对比分析。	根据建议，项目组对深度学习网络设计、特征融合机制和评价指标进行了补充，并在技术方案中增加了与传统方法的对比说明。具体措施如下：深度学习网络结构设计多尺度卷积神经网络特征提取模块：通过不同卷积核尺寸提取桥梁结构响应信号和图像的多尺度特征，实现局部与全局特征的有效捕获。网络采用轻量化设计，减少参数量和计算复杂度，以满足现场实时监测需求。门控循环网络趋势预测模块：用于学习时间序列特征，捕捉桥梁结构状态随时间演化的非线性规律，实现病害发展趋势预测。网络设计中考虑输入序列长度、隐藏层单元数及 Dropout 正则化策略，提高模型鲁棒性。特征融合机制将结构响应特征、环境与工况特征以及图像表特征通过特征级融合方法整合为统一特

		征向量。在融合过程中,采用加权或注意力机制突出关键特征,提高对病害敏感信息的识别能力。融合后的多源特征既包含时域、频域信息,又包含空间表征,形成桥梁健康状态的综合表征,为深度学习模型输入提供高质量信息。评价指标病害检测性能:准确率(Accuracy)、召回率(Recall)、F1-score。趋势预测性能:平均绝对百分比误差(MAPE)。 通过这些指标对模型性能进行量化评估,并可用于与传统方法对比。传统方法如阈值判断、时域/频域特征分析或简单回归模型,存在检测精度低、噪声敏感、难以捕捉非线性特征和长期趋势的局限性。本项目方法通过多源特征融合与深度学习建模,能够实现自动化、非线性特征捕捉及趋势预测,综合性能明显优于传统方法。对比实验将在历史监测数据和现场数据上进行验证,确保结果可量化、可对比。
11	牛宏	根据建议,项目组对研究内容进行了优化和补充,重点从工程特点结合、传感器布置方案、监测数据与病害演化关系三个方面进行了明确:结合南沟大桥工程特点,南沟大桥结构跨度大、承载车辆荷载高、桥面板与主梁连接复杂,受环境因素影响明显。针对桥梁主梁、支座、伸缩缝及桥面板等关键部位,研究内容明确针对结构弱点和易损区域开展多源监测,确保数据采集覆盖桥梁整体健康状态及局部病害敏感区域。明确传感器布置方案。结构响应监测:在主梁跨中、支座区及关键连接节点布设振动传感器和光纤光栅应变计,采样频率 100 - 200 Hz,应变测量精度 $\pm 1 \mu \epsilon$。位移与变形监测:在桥面板、伸缩缝及关键支座布设高精度位移传感器(精度 0.1 mm),定期或实时采集位移与变形 研究内容应结合南沟大桥的工程特点,明确传感器布置方案,并说明监测数据与结构病害演化之间的关系。

			数据。环境监测：布设温度、湿度等环境传感器，辅助分析结构状态变化的环境影响。图像监测：在易出现裂缝、剥落的桥面板及支座处安装高清摄像头，周期性采集图像用于裂缝宽度、长度及形态分析。利用历史监测数据与人工巡检结果建立结构病害演化模型，分析特征指标随时间和工况变化的规律，量化裂缝扩展、结构变形及局部病害发展趋势。 感谢专家提出的宝贵意见。针对深度学习模型在桥梁结构监测与病害诊断中的实际应用问题，项目组在模型设计中充分考虑了轻量化设计与工程实施需求，具体措施如下：轻量化网络设计在多尺度卷积神经网络特征提取模块中，采用小卷积核、深度可分卷积及残差连接等技术，减少参数量和计算复杂度，同时保证多尺度特征提取能力。门控循环神经网络趋势预测模块通过减少隐藏单元数、引入Dropout正则化和序列截断等方式降低计算开销，保证在现场部署时模型可以高效运行。满足工程实施需求。模型结构与传感器采集频率、数据处理周期匹配，保证实时或准实时处理能力。采用轻量化设计后模型可在嵌入式监测设备或边缘计算平台上运行，无需高性能服务器，提高现场部署可行性。模型训练与更新可以与历史监测数据批量训练结合，支持动态迭代优化，保证长期应用性能。通过轻量化设计和工程优化，模型在保证病害识别准确率和趋势预测精度的前提下，显著降低运行资源需求，使算法能够直接应用于南沟大桥现场监测系统，实现从理论研究到工程落地的闭环。
12	牛宏	当前深度学习方法较多，建议在模型设计中考虑轻量化与工程实施需求，提高方法的可应用性。	

13	牛宏	建议在研究过程中加强工程验证,在实际桥梁监测数据上开展测试,提高研究成果的工程落地能力。	针对专家提出的“技术路线表述不够清晰”的意见,项目组对技术路线进行了系统梳理和完善。原有技术路线主要以关键技术分点描述,整体流程逻辑和技术衔接关系体现不够充分。根据专家建议,现对技术路线进行了重新组织,通过分阶段递进的方式明确各研究环节之间的数据流与技术关联,并补充说明各阶段的输入、处理过程及输出结果,同时在文中增加技术路线流程图,以更加直观地展示从数据采集、智能分析到工程验证的完整技术路径,从而进一步强化技术路线的系统性、逻辑性和工程可实施性。
16	惠迎新	技术路线部分表述较为简略,仅分点列出三大关键技术,未清晰体现全流程逻辑关系,也未明确各研究内容之间的技术衔接节点,建议重新梳理技术路线,以流程图或分阶段递进的方式,明确各环节的输入、输出及技术关联,突出技术路线的系统性和逻辑性。	感谢专家提出的宝贵意见。为提升本项目研究成果的工程应用能力,项目组在研究方案中进一步强化了工程验证环节,具体措施如下:在南沟大桥实际监测系统中部署多源传感器,包括振动、应变、位移、环境和图像传感器,实时采集桥梁结构状态数据。将现场监测数据作为模型输入,进行病害检测与趋势预测,验证深度学习模型在真实桥梁环境下识别精度与稳定性。对比人工巡检与历史事件的模型输出结果与人工巡检记录及历史病害事件进行比对,评估模型在裂缝、剥落、变形等病害识别上的准确性与鲁棒性。对预测的结构状态与病害发展趋势进行定量评估,确保模型结果可用于实际养护决策。针对关键结构部位和易损节点,结合桥梁试验台架或局部加载试验,对算法识别结果和趋势预测进行辅助验证,增强结果可靠性。通过现场
17	惠迎新	研究内容二“基于深度学习的桥梁诊断和评估技术研究”将故障诊断流程划分为“故障检测—故障分离—故障评价”,但现有描述偏方法罗列,缺少对模型结构、输入输出、训练策略与验证方式的具体说明。建议明确深度学习模型的神经网络结构、特征提取机制、融合策略与评估指标,并与传统方法形成对比,突出本项目在精度、鲁棒性、可解释性方面的优势	

		测试与验证,进一步优化模型轻量化与实时运行能力,确保算法能够在桥梁健康监测系统中长期稳定运行。实现从数据采集、智能诊断到趋势预测的完整闭环,为桥梁养护管理提供可直接应用的技术方案。
18	惠迎新	业务费中的材料费为0,而项目涉及传感器安装、现场试验等工作,建议补充说明材料费为0的原因,或根据实际情况需求完善经费测算,确保经费分配与研究任务相匹配。
19	惠迎新	项目依托工程为南沟大桥,大纲中已明确其存在的病害类型,但未结合该桥梁的具体结构特点(如装配式预应力混凝土连续箱梁、空心薄壁墩),针对性分析监测点位的布设优先级和模型训练的重点关注参数,未明确监测数据与病害演化的关联分析方法,建议结合南沟大桥的结构特征和病害实际,细化研究内容的工程针对性,提升研究成果在依托工程的落地性。 感谢专家提出的宝贵意见。经项目组重新核算和调整,已对项目经费进行了重新编制,使各项费用分配合理,充分匹配研究任务与现场实施需求,确保经费使用科学、透明且可执行。 根据建议,项目组已对研究内容进行优化,重点从桥梁结构特点、监测点布设、模型训练参数和数据-病害关联分析四方面细化方案,以增强工程针对性和成果落地性:结合南沟大桥结构特点,南沟大桥为装配式预应力混凝土连续箱梁结构,桥墩为空心薄壁墩,跨度大且承载荷载高,桥面板及支座连接复杂。研究内容针对主梁跨中、支座区、伸缩缝及桥面板易损节点,开展多源监测和病害识别。监测点布设与优先级:根据结构弱点和病害敏感性确定布设优先级:高优先级点位,主梁跨中、支座及连接节点,用于关键结构响应监测(振动、应变、位移)。中优先级点位,桥面板及次梁,用于裂缝、剥落等表面病害检测。低优先级点位,环境监测点,如温湿度传感器,用于辅助分析工况影响。模型训练的重点关注参数结构响应特征:振动频率、幅值、能量谱、应变变化。环境及工况特征:温度、湿度、车辆荷载工况。图像特征:裂缝宽度、长度、形态、分布区域。模型训练时重点关注高优先级点位特征和关键病害参数,提高识别准确性和趋势预测可靠性。通过历史监测数据与人工巡检记录建立结构状态-病害演化映射,分析特征指标随时间及工况的

20	王玉银	项目依托南沟大桥（桥梁全长 276m，桥型布置未上部 3×3-30m 装配式预应力混凝土连续箱梁），而项目名称为“桥梁数字化运维下的智能检测与诊断评估方法研究”，题目比较大，研究内容宽泛，不聚焦。建议针对依托工程的特点，进行针对性的研究。	变化规律。利用多源特征融合与深度学习模型，将监测数据与病害发展趋势紧密关联，实现病害演化预测和早期预警。
			项目组已针对南沟大桥的结构特点和工程实际，对研究内容进行了聚焦调整：针对桥型特点开展研究，南沟大桥为装配式预应力混凝土连续箱梁，桥梁跨径为 3×30 m，桥墩为空心薄壁墩。项目研究内容聚焦于该桥梁结构的关键部位，如主梁跨中、支座区及桥面板易损节点，开展多源监测、病害检测与趋势预测。聚焦内容包括：结构响应特征、环境与工况特征、裂缝及剥落等表面病害的图像特征，结合桥梁实际布设监测点进行数据采集。优化技术方案与模型设计模型训练和算法设计将重点关注桥梁主要病害类型和关键监测点，保证诊断与预测结果在依托桥梁上的适用性和精度。特征融合与深度学习方法将以南沟大桥实际数据为基础进行验证，提高研究成果的工程落地能力。通过聚焦南沟大桥关键结构和病害类型，研究内容由宽泛的“桥梁智能检测与诊断”具体化为“装配式预应力连续箱梁的多源数据智能监测与病害预测”，确保技术方法与依托工程紧密结合，提高成果可推广性和应用价值。

大纲评审委员会专家:

钟元

项目负责人（签字）:

陈-29