

项目合同编号：25-87K

## 陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

# 合 同 书

项目名称： 混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究

承担单位： 陕西交控桥隧有限公司

项目负责人： 王海渊

通讯邮编、地址： 710061 陕西省西安市碑林区长安北路高速大厦

传真、电话： 029-85250919

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：25-87K

## 陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

# 合 同 书

项目名称： 混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究

承担单位： 陕西交控桥隧有限公司

项目负责人： 王海渊

通讯邮编、地址： 710061 陕西省西安市碑林区长安北路高速大厦

传真、电话： 029-85250919

起止年限： 2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制



## 一、项目主要研究内容

### 1. 主要研究内容

本项目在研究伸缩装置故障产生多场耦合作用机理的基础上，分析伸缩装置故障的表征特征，拟提出利用振动传感器、声音传感器等，应用多传感器融合技术，实现对桥梁伸缩装置故障信息的自动采集和传输。将传感器所采集的数据保存并上传后，进行数据处理从而确保数据质量，之后提取有用的特征，设计一种基于深度学习的预测算法，以实时检测传感器数据并进行预测。所设计的微振动智能检测仪能够在确保桥梁的安全运营并减少桥梁维护成本的同时，高效地对桥梁伸缩装置进行检测，所获取的检测数据精确度高，能够实现大范围桥梁伸缩装置高可靠性的检测。主要包括以下方面的内容：

#### (1)伸缩装置故障产生机理研究及故障类别特征分析

桥梁运营过程中，交通流量提升与重载车辆增多导致冲击作用增强，伸缩装置关键构件易发生疲劳损伤、连接松动等问题，从而显著缩短服役寿命；同时昼夜/季节温差导致伸缩装置长期处于频繁伸缩变形状态，易诱发早期损伤；此外雨雪水渍、泥沙杂物侵入、环境腐蚀等长期作用会加剧材料老化与结构退化。因此本项目拟研究一种基于多场随机耦合作用的分析方法，通过多种疲劳试验和环境试验研究伸缩装置的破坏机理，建立起损伤模型，为解析其诊断原理提供基础。

#### (2)伸缩装置故障演化的多源信息获取关键技术研究。

监测数据是伸缩装置故障检测与预测的基础，但在工程实际中，伸缩装置可观测指标多、作用因素复杂，若采用全量、多点、长时间的数据采集方式，容易导致系统结构复杂、数据冗余、运行成本增加，反而不利于工程长期稳定应用。因此，如何在保证诊断有效性的前提下，实现关键状态信息的高质量获取，是伸缩装置早期故障诊断面临的重要问题。据此拟研究并提出采用多源异构数据分析的方法获取伸缩装置的多源数据演化和表现特征，采用信息融合、大数据分析、数据挖掘、模式识别等，通过对数据解耦、融合、特征提取等方法将多种不精确数据结合为一种更高精度的数据，进而实现对伸缩装置的故障早期诊断。



### **(3)伸缩装置故障检测系统硬件设计关键技术研究**

为保障伸缩装置故障诊断系统在复杂工程环境下的长期稳定运行，本项目围绕多源传感信息获取与处理需求，将开展伸缩装置故障检测系统硬件设计与工程化应用研究，重点解决在车辆冲击频繁、环境干扰强及长期户外运行条件下，系统稳定性与可靠性不足的问题。

### **(4)基于人工智能的多源传感器数据处理与故障识别算法研究**

在多源信息获取和硬件系统稳定运行的基础上，本项目围绕桥梁伸缩装置早期故障识别与状态预测需求，开展多源传感数据处理与智能诊断算法研究，重点解决复杂工况和少样本条件下故障识别稳定性不足的问题。

针对工程监测数据中普遍存在的噪声干扰、工况差异大和数据质量不均衡等特点，研究多源数据的预处理与特征构建方法，通过异常数据剔除、趋势项消除和特征归一化等手段，提高数据一致性和可用性。在此基础上，结合时域、频域及时频域特征分析，构建能够综合反映伸缩装置运行状态变化的融合特征表达，为智能诊断提供有效输入。

### **(5)伸缩装置故障诊断原理样机设计、设备调试与性能测试**

在前述多源信息获取、硬件系统设计及智能诊断算法研究的基础上，本项目将开展伸缩装置故障诊断原理样机的集成设计与工程化实现，重点验证所构建技术体系在实际运行条件下的可行性、稳定性和诊断效果。

项目拟对多源传感器、数据采集与传输单元以及诊断分析模块进行系统集成，完成伸缩装置故障诊断原理样机的设计与调试，并依托试验条件及实际工程场景开展在线监测应用。通过采集伸缩装置运行过程中的多源监测数据，构建覆盖不同工况和典型状态的数据集，为系统性能评估和算法验证提供基础数据支撑。完成伸缩装置故障诊断原理样机的功能验证和性能评估，形成可用于项目验收和工程示范的测试结果，为后续工程应用和技术推广奠定基础。

## **2. 技术关键**

伸缩装置早期故障智能检测技术是利用多源传感器技术获取受到故障影响的力学和外界环境参数变化表现的基础上，动态实时测量伸缩装置故障，可以随时反映出伸缩装置负载力以及自然因素对伸缩装置结构的影响；可以及时判断是否会加速恶化故障状态，实现对伸缩装置的早期低成本养护，为伸缩装



置的设计和生产提出改善优化的措施。本仪器不受工程所处地理环境的限制均可以对伸缩装置多项参数进行高精度的检测，测量系统自动记录并存储各个伸缩装置的故障信息参数，并根据所建立的解算模型，解算出伸缩装置的隐性病害，通过智能算法预测伸缩装置的安全状态。将数据无线传输至远程云端进行数据分析处理，建立和地理信息对应的伸缩装置故障数字化管养档案系统。因此，系统拟解决的关键技术主要包含：

(1) 复杂环境中伸缩装置的多要素耦合损伤机理和简化模型构建，建立基于多源异构传感器的伸缩装置故障早期预测模型；

(2) 基于多点异构传感器的数据获取和故障诊断传感器的优化选择和布设方法；

(3) 系统的原理样机中的嵌入式实时故障信息处理算法和系统硬件、软件设计实现；

(4) 研究基于多传感器信息融合与人工智能算法的伸缩装置故障智能检测算法，实现智慧桥梁伸缩装置故障监测预警系统。

### 3. 依托工程（依托工作）

本课题依托工程为韩城市 2026 年 628 国道（原 S201）危旧桥梁改造工程，具体依托桥梁为解家沟桥。该桥位于韩城市 628 国道 K172+235 处，对应原省道 201 沿黄公路 K669+118 位置，于 2013 年建成通车。桥梁全长 256.16m，桥面宽度为净 11m+2×0.5m，上部结构采用 6×40m 装配式预应力混凝土先简支后连续小箱梁，下部结构采用柱式墩、薄壁空心墩及桩基础，桥台为 U 型组合式桥台及桩基础；设计荷载为公路—I 级，设计洪水频率为 1/100。原桥在 0 号台和 6 号台各设置一道 D160 型伸缩缝，具有较为典型的混凝土公路桥梁梁端构造特征，能够为伸缩缝服役状态感知与故障识别研究提供明确的工程对象。

从既有病害发展过程看，该桥梁病害具有持续演化和多因素耦合的突出特点。2017 年日常养护过程中即发现桥梁受土推力影响出现墩台异常，检测结果表明，桥梁当时已出现伸缩缝堵塞、锚固区混凝土开裂、橡胶条局部破损脱落等典型伸缩缝病害，同时还伴随主梁裂缝、支座挤压变形及下部结构局部损伤等问题。随后虽实施了相应的加固处治措施，但桥梁病害并未完全终止，而是继续在服役过程中发展。



至 2021 年定期检查时,该桥技术状况评定为 2 类桥,桥面系仍存在伸缩缝堵塞、型钢断裂变形、橡胶条老化开裂、排水孔局部堵塞等问题。到 2025 年定期检查及专项检测时,桥梁技术状况已进一步恶化并被评定为 4 类桥梁。检测表明,该桥伸缩缝病害并非孤立发生,而是与梁体位移、支座失效、墩台变位及基础受力异常密切耦合。

从现状病害分布来看,该工程与本课题研究内容具有高度契合性。桥面系方面,0 号台处伸缩缝橡胶条破损,锚固区存在 4 条纵向裂缝,6 号台处伸缩缝存在砂土堵塞,锚固区存在 8 条纵向裂缝;上部结构方面,主梁共发现 55 条纵向裂缝,总长达 702.3m。设计文件进一步明确指出,桥下 2 号桥墩处 10~20m 厚松散回填土在降雨作用下含水率升高、抗剪强度降低,对桥墩形成持续侧向推力,进而引发墩柱偏移、梁墩错位、挡块破碎、支座滑移以及伸缩缝失效,并在温度应力作用下诱发主梁纵横向位移。也就是说,该桥已形成“环境荷载—基础与墩台变位—支座异常—梁体位移—伸缩缝损伤”的连续病害传递链,这为伸缩缝异常响应的感知机理分析和早期故障诊断提供了真实而完整的工程背景。

本次改造设计也为课题实施提供了较好的工程条件。方案提出清除 2 号桥墩承台以上虚填土,实施全桥六孔整体竖向顶升及横向同步复位,统一更换全桥支座,修补主梁裂缝,拆除原桥伸缩缝并重做伸缩缝,同时在 2 号桥墩顺桥向承台前后各增设 2 根直径 2.0m、桩长 30m 的钻孔灌注桩,并完善桥下排水设施;加固完成后,还将在 1 号、2 号桥墩及桥下边坡设置永久观测点,开展后续定期检查。依托工程因此不仅具有伸缩缝病害显著、演化过程清晰、致因关系明确的特点,还具备结构维修前后对比和持续监测条件,能够为混凝土桥梁伸缩缝自感知、状态识别、特征提取及早期故障诊断方法验证提供可靠的工程载体。



## 二、考核指标

### 1.预期目标

本项目面向混凝土桥梁伸缩缝多病害耦合场景，预期在同类桥梁伸缩装置早期故障感知、诊断与预警的工程化应用方面形成技术补充和示范，对省内桥梁养护数字化、精准化发展具有较强的推广价值。

项目通过研究基于接触式测量、数据传输和数据处理算法的伸缩装置故障检测原理系统模型，设计原理样机，并通过现场实验检测、观察、记录实验数据完善检测系统。通过硬件设计实现对桥梁伸缩装置信息的自动采集和传输，并通过采集信号的判断能够对桥梁伸缩装置的损伤情况做出评价，及时防止损伤的进一步扩大，并对桥梁伸缩装置进行维修养护。所设计的基于深度学习的桥梁伸缩装置故障检测系统能够在确保桥梁的安全运营并减少桥梁维护成本的同时实现大范围桥梁高可靠性的检测。具体可以分解为以下：

- (1)研究开发桥梁伸缩装置检测系统，完成对桥梁伸缩装置故障信号的检测。
- (2)开发桥梁伸缩装置故障检测平台，完成硬件结构设计和搭建。
- (3)设计针对故障信号处理的检测算法，以实时检测传感器数据并进行预测。
- (4)解决伸缩装置故障参数远程网络化的数据传输和分析问题，并建立基于检测数据建立桥梁伸缩装置结构安全状态评估和危险状态预警系统。

### 2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

- (1) 测量精度： 1mm；
- (2) 伸缩装置故障识别率：大于等于 97%；
- (3) 嵌入式系统载荷：<2KG；
- (4) 供电方式：锂电池供电；
- (5) 续航时间：>=8h；
- (6) 传输方式：无线传输；
- (7) 工作方式：自动检测。

### 3.经济和社会效益

#### (1) 经济效益

本项目成果在桥梁养护与运行管理领域的经济效益可实现多维度量化落



地：传统模式下，桥梁伸缩缝突发损坏的单次应急维修直接费用达数万元至十余万元，叠加交通管制带来的物流延误、公众出行时间损失等间接成本，单次故障综合损失可达数十万元；而项目构建的自感知早期诊断体系，通过连续监测实现潜在病害提前预警，以预防性维护替代突发抢修，不仅能减少直接维修支出，更可规避间接损失，将降低伸缩缝相关养护成本。同时，传统“人工巡查-发现故障-封闭排查-维修”模式存在疏漏多、重复作业等问题，单次维修工期通常需3天左右，依托项目智能诊断结果开展精准维护，可减少无效检测与施工环节，预计单次维修工期缩短20%，以年开展50次维修作业测算，每年可节省约30天交通管制时长，同步降低交通疏导、设备闲置等管理成本。此外，项目成果还能提升管养单位的智能装备水平与技术服务能力，助力其向“智慧管养”转型并承接更多区域项目；随着技术在普通国省干线、高速公路的规模化推广，系统设备单位生产成本将随量产降低，形成“设备销售+技术服务”的双重收益，为相关单位带来持续营收增长与利税贡献，拓展长期盈利空间。

## （2）社会效益

本项目的实施将从多层面释放显著社会效益：桥梁伸缩缝病害易引发跳车、异响，突发损坏更可能导致爆胎、追尾等交通事故，项目成果通过及时识别早期病害并处置，既降低了安全隐患、提升了桥梁运行安全性，也改善了行车平顺性，同时减少因突发维修导致的临时交通封闭，避免高峰时段拥堵，让公众通勤、出行的时间更稳定，切实提升交通服务的获得感。而传统伸缩缝维修的长时间交通封闭，往往造成路网局部拥堵，增加物流车辆运输时效成本，项目将单次维修工期缩短20%，可同步减少20%的拥堵时长，提升国省干线、高速路网的通行效率。同时，项目推动桥梁养护从“经验驱动、被动抢修”转向“数据驱动、主动预防”，系统生成的病害趋势数据能支撑交通运输主管部门制定精准养护计划，提升管养工作的规范化、标准化水平，助力区域交通治理向“智慧交通”升级；且项目形成的智能监测技术方案具备可复制性，可为同类桥梁设施提供标准化智能管养路径，带动行业内技术升级的同时，助力区域培育智能交通技术人才，推动交通基础设施智能化建设普及，具有显著的行业示范与社会推广价值。

## 4.成果提供形式



- (1) 基于深度学习的桥梁伸缩装置故障检测系统 1 套；
- (2) 申报专利 2 项；
- (3) 发表高水平论文 2-5 篇，其中被 SCI/EI 检索 1-3 篇；
- (4) 配套项目示范试验检测数据若干；
- (5) 混凝土桥梁伸缩装置故障检测研究总结报告 1 份；

#### 4. 其他考核指标

(1) 人才培养：开展企业技术人员专项培训 1 次，确保参训人员掌握基础技术应用能力，培养青年骨干教师 1 名。

(2) 技术交流：参加行业技术研讨会 1 次，围绕桥梁伸缩缝故障诊断技术前沿动态、多源信息融合应用等主题，与行业专家、同行开展交流。

(3) 宣传报道：在单位官方网站发布项目相关宣传稿件不少于 1 篇，内容聚焦项目进展、技术创新点或实验阶段性成果；在行业内刊/公众号发布技术科普或项目动态稿件，面向行业从业者普及桥梁伸缩缝自感知技术的应用价值与发展前景；配合地方行业主管部门宣传平台完成报道，内容围绕项目对地方桥梁养护技术提升的支撑作用，助力技术成果的行业推广。

### 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 3 月-2026 年 6 月   | 1.计划内容：完成伸缩装置故障机理与类别特征分析、国内外技术调研；完成多源传感器选型与布设优化。<br>2.考核目标：<br>1) 参加学术会议 1 次；<br>2) 项目调查研究报告和实验分析报告 1 份。 |
| 2026 年 7 月-2026 年 9 月   | 1.计划内容：伸缩装置故障产生机理研究及故障类别特征分析。<br>2.考核目标：<br>1) 实验报告 1 份；<br>2) 给出一种基于多长随机耦合作用的桥梁伸缩缝病害分析方法报告。             |
| 2026 年 10 月-2026 年 12 月 | 1.计划内容：构建故障早期预测简化模型，开展数据预处理方法研究，撰写论文。<br>2.考核目标：<br>1) 论文 1 篇；<br>2) 通过多种疲劳试验和环境试验研究伸缩装置的破坏机理，建立起损伤模型。   |
| 2027 年 1 月-2027 年 3 月   | 计划内容：伸缩装置故障演化的多源信息获取关键技术研究，撰写专利申报。<br>2.考核目标：<br>1) 申报专利 1 项；<br>2) 采用多源异构数据分析的方法获取伸缩装置的多源数据演化和表现特征规律。   |



|                         |                                                                                                                                                     |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2027 年 4 月-2027 年 6 月   | <p>1.计划内容：研发多源数据融合特征的构建方法，完成论文撰写。</p> <p>2.考核目标：给出多源数据融合方法，论文投稿 1 篇。</p>                                                                            |
| 2027 年 7 月-2027 年 9 月   | <p>1.计划内容：设计深度学习故障识别算法</p> <p>2.考核目标：</p> <p>1) 发表论文 1 篇；</p> <p>2) 利用桥梁裂伸缩缝病害识别方法，并进行精度分析</p>                                                      |
| 2027 年 10 月-2027 年 12 月 | <p>1.计划内容：伸缩装置故障检测系统硬件设计关键技术研究，完成故障检测系统硬件设计搭建。</p> <p>2.考核目标：</p> <p>1) 伸缩装置故障检测系统 1 套；</p> <p>2) 完成实用新型或专利申报 1 项。</p>                              |
| 2028 年 1 月-2028 年 3 月   | <p>计划内容：</p> <p>1) 集成调试原理样机，完善远程数据传输与预警系统，</p> <p>2) 完成成果总结、推广宣传、技术培训与行业交流</p> <p>2.考核目标：样机精度 1mm、识别率<math>\geq 97\%</math>，提交全套成果，完成技术培训与行业交流。</p> |

#### 四、项目经费

项目总经费：73 万元  
交通运输厅补助：19.9 万元  
自筹资金：53.1 万元

经费支出预算表

| 科 目                             | 总经费<br>(单位：万元) | 厅补经费<br>(单位：万元) |
|---------------------------------|----------------|-----------------|
| (一) 直接费用                        | 66             | 17              |
| 1. 设备费                          | 17             | 7               |
| (1) 购置设备费                       | 10             | 5               |
| (2) 试制设备费                       | 4              | 2               |
| (3) 设备改造与租赁费                    | 3              | 0               |
| 2. 业务费                          | 36             | 8               |
| (4) 材料支出                        | 17             | 4               |
| (5) 测试化验实验加工支出                  | 8              | 0               |
| (6) 燃料及动力支出                     | 2              | 0               |
| (7) 差旅支出                        | 2              | 1               |
| (8) 会议支出                        | 2              | 1               |
| (9) 国际合作与交流支出                   | 2              | 0               |
| (10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/<br>印刷支出 | 3              | 2               |
| (11) 其他支出                       | 0              | 0               |
| 3. 劳务费                          | 13             | 2               |
| (12) 劳务性支出                      | 8              | 2               |
| (13) 咨询专家支出                     | 5              | 0               |
| (二) 间接费用                        | 7              | 2.9             |
| 4. 管理费                          | 5.6            | 2               |
| 5. 绩效支出                         | 1.4            | 0.9             |
| 合 计                             | 73             | 19.9            |



## 五、项目绩效目标

| 一级指标类别 | 二级指标类别 | 明细指标            | 指标值 |
|--------|--------|-----------------|-----|
| 产出类指标  | 知识产权   | 1.专利授权数（项）      | 2   |
|        |        | （1）授权发明专利       | 1   |
|        |        | （2）实用新型         | 1   |
|        |        | （3）外观设计         | 0   |
|        |        | 2.软件著作权授权数（项）   | 1   |
|        |        | 3.发表论文（篇）       | 4   |
|        |        | （1）其中 SCI 索引收录数 | 1   |
|        |        | （2）其中 EI 索引收录数  | 1   |
|        |        | （3）其他           | 2   |
|        |        | 4.著作（部）         | 0   |
|        |        | 5.制订标准数（项）      | 1   |
|        |        | （1）国际标准         | 0   |
|        |        | （2）国家标准         | 0   |
|        |        | （3）行业标准         | 0   |
|        |        | （4）地方标准         | 0   |
|        |        | （5）企业标准         | 0   |
|        |        | （6）科技报告         | 1   |
|        | 其他成果   | 1.填补技术空白数       | 1   |
|        |        | （1）国际           | 0   |
|        |        | （2）国家           | 0   |
|        |        | （3）省级           | 1   |
|        |        | 2.获奖项数          | 0   |
|        |        | （1）国家奖项         | 0   |
|        |        | （2）部、省奖项        | 0   |
|        |        | （3）地市级奖项        | 0   |
|        |        | 3.其他科技成果产出      | 2   |
|        |        | （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）      | 1   |
|        |        | （5）平台/基地/示范点    | 1   |
|        |        | （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）          | 是    |
|           |        | （3）小批量               | 否    |
|           |        | （4）规模化生产             | 否    |
|           | 人才引育   | 1. 引进高层次人才           | 2    |
|           |        | （1）博士、博士后            | 1    |
|           |        | （2）硕士                | 1    |
|           |        | 2. 培养高层次人才           | 3    |
|           |        | （1）博士、博士后            | 1    |
|           |        | （2）硕士                | 2    |
|           |        | 3. 培训从事技术创新服务人员（人次）  | 0    |
|           |        | 4. 是否设立科研助理岗位        | 否    |
|           | 产业化情况  | 1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等） | 0    |
|           |        | 2. 科研仪器设备利用率（%）      | 0    |
|           |        | 3. 孵化科技型企业（个）        | 0    |
|           |        | 4. 转化科技成果（个）         | 1    |
| 效果类指标     | 经济效益   | 1. 新增产值（万元）          | 50.0 |
|           |        | 2. 新增销售（万元）          | 50.0 |
|           |        | 3. 新增出口创汇（万美元）       | 0.0  |
|           |        | 4. 新增利润（万元）          | 20.0 |
|           | 社会效益   | 1. 新增税收（万元）          | 5.0  |
|           |        | 2. 新增就业人数            | 2    |
|           |        | 3. 就业培训（人次）          | 2    |
|           |        | 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）         | 1    |
|           |        | 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

本项目由陕西交控桥隧有限公司、陕西高速公路工程试验检测有限公司、韩城市公路局、长安大学联合承担，王海渊任项目负责人。项目按照责任制的原则进行管理，以各自的业务为单位，确定任务分工。

陕西交控桥隧有限公司主要参与项目的工程应用与示范支撑工作，结合桥梁伸缩装置工程应用经验，配合开展相关系统集成、现场应用验证及成果工程化推广工作，提升项目成果的工程适用性。公司聚焦桥隧新材料与装备研发、智慧监测与数字管养、绿色低碳建造、工程运维一体化四大核心领域，主攻高性能支座、伸缩缝、特种铺装等关键产品，依托 BIM、数字孪生、物联网等技术，构建桥梁结构健康监测与隧道安全防控体系，推动预防性养护与智能运维落地。

陕西高速公路工程试验检测有限公司：负责项目总体管理、组织协调与进度把控。

韩城市公路局作为项目承担单位和工程依托单位，主要负责项目的组织实施、工程依托条件落实及现场协调管理工作，全权负责辖区桥梁伸缩缝现状现场踏勘、病害普查、基础数据建档，筛选典型病害桥梁布设监测设备；配合开展监测设备安装、现场调试与日常运维，保障监测系统稳定运行；落实监测数据实时采集、初步研判与上报，建立病害预警闭环处置机制；牵头开展预警病害应急处置、小修保养与效果验证，同步做好项目实施期间交通管制、安全保障及群众协调工作；提供辖区桥梁历史养护资料、工程参数，支撑监测模型优化与标准落地。

长安大学主要负责本项目的技术研究与方法支撑工作，围绕混凝土桥梁伸缩缝早期故障诊断开展相关理论研究、技术方案设计及智能诊断方法研究，为项目技术路线的形成和关键技术实现提供理论与技术支持。长安大学公路学院、陕西省公路桥梁与隧道重点实验室在桥梁伸缩缝领域具备全链条科研与技术服务能力。可承担伸缩缝结构设计、材料研发、车 - 桥 - 缝耦合仿真、施工监控、健康监测、病害诊断与加固、标准编制等任务。

七、项目参加人员表

|                                       |     |         |                  |        |            |                                                                                                    |
|---------------------------------------|-----|---------|------------------|--------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 项目承担单位：陕西交控桥隧有限公司                     |     |         |                  |        |            |                                                                                                    |
| 参与单位（排序）：陕西高速公路工程试验检测有限公司，韩城市公路局，长安大学 |     |         |                  |        |            |                                                                                                    |
| 项目负责人                                 |     |         |                  |        |            |                                                                                                    |
| 序号                                    | 姓名  | 出生年月    | 工作单位             | 职称/职务  | 专业         | 在项目中担任具体工作<br><br>签名                                                                               |
| 1                                     | 王海渊 | 1980.07 | 陕西高速公路工程试验检测有限公司 | 正高级    | 交通工程       | 项目负责人，方案研究。<br>   |
| 主要研究人员                                |     |         |                  |        |            |                                                                                                    |
| 2                                     | 宋世杰 | 1972.12 | 陕西交控桥隧有限公司       | 高级工程师  | 交通运输工程领域工程 | 项目总体负责<br>        |
| 3                                     | 侯亚民 | 1974.3  | 韩城市公路局           | 高级工程师  | 桥梁工程       | 各单位协调与资源统筹<br>   |
| 4                                     | 王伟  | 1981.03 | 陕西交控桥隧有限公司       | 工程师    | 材料成型及控制工程  | 各单位协调与资源统筹<br>  |
| 5                                     | 张红维 | 1975.4  | 韩城市公路局           | 正高级工程师 | 桥梁工程       | 现场统筹<br>        |
| 6                                     | 张喆  | 1986.5  | 陕西交控桥隧有限公司       | 工程师    | 公路工程       | 现场检测实施与数据采集<br> |



|    |     |         |            |        |         |             |     |
|----|-----|---------|------------|--------|---------|-------------|-----|
| 7  | 耿兰  | 1987.6  | 韩城市公路局     | 高级工程师  | 道路工程    | 现场检测后勤保障    | 耿兰  |
| 8  | 王会峰 | 1976.03 | 长安大学       | 正高级工程师 | 控制科学与工程 | 课题技术方向指导与把控 | 王会峰 |
| 9  | 高荣  | 1987.11 | 长安大学       | 高级工程师  | 交通工程    | 检测技术研发与算法优化 | 高荣  |
| 10 | 辛向阳 | 1980.02 | 陕西交控桥隧有限公司 | 工程师    | 土木工程    | 课题成果工程应用验证  | 辛向阳 |
| 11 | 严威  | 1969.9  | 韩城市公路局     | 高级工程师  | 道路工程    | 现场检测        | 严威  |
| 12 | 王晓艳 | 1979.06 | 长安大学       | 副高级    | 信息化     | 检测数据分析与特征提取 | 王晓艳 |
| 13 | 刘盼芝 | 1980.07 | 长安大学       | 副高级    | 控制科学与工程 | 样机测试        | 刘盼芝 |
| 14 | 郭焕焕 | 2002.11 | 长安大学       | 技术员级   | 电子信息    | 嵌入式系统硬件设计   | 郭焕焕 |

## 八、信息表

|                   |                                                                                                                        |                                                   |      |                |                        |      |                   |            |   |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------|----------------|------------------------|------|-------------------|------------|---|
| 项目合同编号            | 25-87K                                                                                                                 | 密级                                                | /    |                | A: 机密 B: 秘密 C: 内部      |      |                   |            |   |
| 项目名称              | 混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究                                                                                                  |                                                   |      |                |                        |      |                   |            |   |
| 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             | 73                                                                                                                     |                                                   | 厅 拨  |                | 19.9                   |      |                   |            |   |
| 第一承担单位            | 单位名称                                                                                                                   | 陕西交控桥隧有限公司                                        |      |                |                        |      |                   |            |   |
|                   | 所在地                                                                                                                    | 陕西省西安市                                            |      |                |                        |      | 代码                | 610100     |   |
|                   | 通讯地址                                                                                                                   | 陕西省西安市碑林区长安北路高速大厦                                 |      |                |                        |      | 邮编                | 710061     |   |
|                   | 单位性质                                                                                                                   | (3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他                       |      |                |                        |      | 代码                |            |   |
| 参与单位              | 序号                                                                                                                     | 单 位 名 称                                           |      |                |                        |      |                   |            |   |
|                   | 1                                                                                                                      | 陕西高速公路工程试验检测有限公司                                  |      |                |                        |      |                   |            |   |
|                   | 2                                                                                                                      | 韩城公路局                                             |      |                |                        |      |                   |            |   |
|                   | 3                                                                                                                      | 长安大学                                              |      |                |                        |      |                   |            |   |
| 项目负责人             | 姓 名                                                                                                                    | 王海渊                                               |      | 性别 (1) 1.男 2.女 |                        | 出生年份 |                   | 1980-07-20 |   |
|                   | 学 历                                                                                                                    | (1) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其他                     |      |                |                        |      |                   |            |   |
|                   | 职 称                                                                                                                    | (1) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其他                           |      |                |                        |      |                   |            |   |
|                   | 联系电话                                                                                                                   | 18092299890                                       |      |                | 电子邮箱                   |      | 77344536@gg.com   |            |   |
| 项目联系人             | 姓名                                                                                                                     | 王会峰                                               |      |                | 性别                     |      | 男                 |            |   |
|                   | 联系电话                                                                                                                   | 029-62630023<br>13571811126                       |      |                | 电子邮箱                   |      | hfwang@chd.edu.cn |            |   |
| 项目组人数             | 14                                                                                                                     | 高级                                                | 9    | 中级             | 3                      | 初级   | 2                 | 其他         | 0 |
| 主要内容<br>(100 字以内) | 本项目研究桥梁伸缩装置故障机理及特征, 利用振动、声音等多源传感器实现故障信息自动采集与传输。通过多源数据融合与特征提取, 构建基于深度学习的故障识别与预测算法, 并设计智能检测硬件系统与原理样机, 实现伸缩装置早期故障诊断与状态监测。 |                                                   |      |                |                        |      |                   |            |   |
| 成果属性              | F                                                                                                                      | A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学<br>F: 装备 G: 其他 |      |                |                        |      |                   |            |   |
| 成果形式              | A、B                                                                                                                    | A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他  |      |                |                        |      |                   |            |   |



## 九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

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

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

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

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

6.合同正本一式拾份，甲方单位伍份，承担单位伍份。

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）

2016年3月27日

联系人：（签字）

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）

陕西交控桥隧有限公司

单位负责人：（签字）

2016年3月27日

项目负责人：（签字）

（公章）

电 话：029-85250919

财务负责人：（签字）

杨政

账 户 名：陕西交控桥隧有限公司

开户银行：建行西安金泰假日花城支行

账 号：61001865800052500108



# 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：

2016年3月27日



项目编号：25-87K

## 2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称： 混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究  
申请单位： 陕西交控桥隧有限公司  
联系人： 王会峰  
电 话： 13571811126



---

陕西省交通运输厅制

2025 年 12 月



# 目 录

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 一、项目研究的背景和必要性.....                    | 1  |
| 1.1 项目的研究背景和意义.....                   | 1  |
| 1.2 研究目的.....                         | 3  |
| 1.3 项目概要.....                         | 4  |
| 1.4 市场需求前景或推广应用领域.....                | 5  |
| 二、前期科研及工作基础.....                      | 6  |
| 2.1 项目领域发展状况及技术水平分析.....              | 6  |
| 2.1.1 国内外桥梁伸缩故障监测与诊断技术研究现状分析.....     | 6  |
| 2.1.2 相关技术研究水平与发展趋势分析.....            | 7  |
| 2.1.3 现有技术存在的问题及本项目拟解决的关键技术难点.....    | 8  |
| 2.2 项目前期科研及现有工作条件.....                | 9  |
| 2.2.1 支撑条件.....                       | 9  |
| 2.2.2 前期工作基础.....                     | 11 |
| 2.2.3 获奖情况.....                       | 18 |
| 2.2.4 现有试验手段（设施、设备）.....              | 23 |
| 2.2.5 研究团队及协作情况.....                  | 27 |
| 2.3 参考文献.....                         | 28 |
| 三、实施方案.....                           | 30 |
| 3.1 拟解决的关键问题.....                     | 30 |
| 3.2 主要研究内容及实施方案.....                  | 32 |
| 3.3 技术路线.....                         | 36 |
| 3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接.....             | 38 |
| 3.5 有关技术经济指标.....                     | 39 |
| 四、项目承担单位及参加单位概况.....                  | 41 |
| 4.1 单位概况.....                         | 41 |
| 4.2 技术力量及人员构成.....                    | 42 |
| 4.3 各自承担的主要工作.....                    | 43 |
| 4.4 项目主要负责人情况.....                    | 44 |
| 五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件.....          | 46 |
| 5.1 依托工程（工作）概况.....                   | 46 |
| 5.2 投资来源.....                         | 46 |
| 5.3 工程进度与项目科研进度的配合.....               | 48 |
| 5.4 组织管理形式.....                       | 49 |
| 六、项目经费估算及资金筹措情况.....                  | 53 |
| 七、项目绩效指标.....                         | 54 |
| 八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益（对应合同中的考核指标）..... | 56 |
| 8.1 项目预期目标（项目的考核目标）.....              | 56 |
| 8.2 提交的研究成果及其形式.....                  | 56 |
| 8.3 经济、社会、环境效益分析.....                 | 57 |
| 九、其它需要说明的问题.....                      | 60 |
| 十、申请单位意见.....                         | 60 |

# 一、项目研究的背景和必要性

## 1.1 项目的研究背景和意义

在我国经济高质量发展的推动下，“交通强国”“一带一路”等战略持续推进，公路桥梁建设实现跨越式增长。我国公路桥梁建设持续保持高强度投入与大规模推进态势，在役桥梁数量与规模实现跨越式增长，构筑起贯通城乡、连接区域的重要交通命脉。根据交通运输部发布的《2024年交通运输行业发展统计公报》，截至2024年底，全国公路桥梁总数达110.81万座，总长度达10197.58万延米，较2023年分别增加2.87万座和668.76万延米，大型桥梁占比亦持续提升。但同时值得关注的是，桥梁数量与总长度的增幅处于明显收窄态势，行业发展重心正在由“快速建设”转入“建养并重”，桥梁管理的核心矛盾逐步从“有没有”转向“好不好、稳不稳、久不久”。

在这一转型背景下，桥梁运维面临着严峻的现实挑战：桥梁点多面广、结构类型复杂、服役环境差异大，加之交通荷载持续增长且重载比例上升，结构状态呈现累积性、随机性与突发性并存的退化规律。对管理单位而言，如何在有限的人力、经费与交通组织资源下，实现更高覆盖率、更高时效性的状态掌握与风险控制，已成为桥梁管养工作的关键课题。

而在桥梁运维体系中，伸缩装置（伸缩缝）虽属附属构件，却往往是桥面系最先暴露问题的薄弱环节。伸缩装置长期直接承受车轮反复冲击、砂石磨耗、雨水侵蚀等作用，且构造上涉及多材料界面、多连接节点与多自由度变形，服役过程中易出现锚固松动、橡胶条老化开裂、钢构件疲劳裂纹、局部破碎脱落等病害。一旦伸缩装置失效，轻则引发桥面不平顺、车辆“跳车”和噪声增大，重则破坏桥面防水体系并形成渗漏通道；密封功能下降后，水、盐等介质更易沿此处侵入结构内部，诱发梁端、支座及铺装层的连锁劣化。因此，将伸缩装置作为重点治理对象，尽早识别其早期退化并及时干预，通常能以较小处治代价换取更大的耐久性收益，对运营安全与管养效率提升具有直接意义。

在工程实践中，伸缩装置病害不仅会造成行车舒适性下降、桥梁结构耐久性受损，其构件翘起、脱落等突发失效情况，更可能直接诱发交通事故并导致道路通行中断。例如，2024年“五一”期间，郑州南四环高架紫荆山路附近路段



发生伸缩缝钢板脱落事故，脱落的钢板横置车道，因夜间光线昏暗，其颜色与路面相近难以辨识，多辆过往车辆来不及避让而爆胎抛锚，交警部门紧急封闭车道并开展清障处置，严重影响了道路正常通行，凸显出伸缩装置突发失效对行车安全的即时威胁。2024年7月，上海S32申嘉湖高速近嘉闵高架路段出现路面伸缩缝型钢翘起问题，致使多辆机动车受损抛锚，相关部门连夜组织抢修，才恢复道路通行；相关报道同时指出，该高速在一年内已发生第二起类似事件，若伸缩装置的早期松动与构造件变形问题无法被及时识别并采取干预措施，极易在高交通荷载作用下演变为“突发性路面障碍”。国外亦存在同类风险案例：澳大利亚维多利亚州Princes高速公路因维护作业中覆盖伸缩缝的钢板未妥善固定而脱落，引发多车连环碰撞事故，并造成严重交通拥堵，相关主管部门后续对受损车辆进行了损失补偿，这一事件反映出伸缩缝及其相关构造件的失效，不仅会威胁道路通行安全，还会产生显著的通行管理与经济赔付成本。由此可见，面向实际运行工况开展伸缩装置早期监测与预警工作，对防控交通安全事故、保障道路畅通运行具有重要的现实价值。

但在现役混凝土桥梁模数式伸缩装置运维实践中，现有检测手段仍难满足“连续、实时、早期、可靠”的诊断需求。目前主要依赖人工巡检与定期检查，受人力组织、交通管制与作业窗口限制，检查周期往往较长，难以捕捉高频退化过程；同时巡检结论对个人经验依赖较强，对松动、微裂缝等隐蔽问题的量化能力不足。敲击、超声等传统无损检测虽可对局部缺陷提供补充证据，但通常需要近距离接触或专项作业，常伴随封道组织，成本高、对交通影响大，也难以形成长期连续的状态追踪。总体而言，现有手段在可达性、时效性、经济性与可重复性方面均存在短板，难以支撑伸缩装置病害从“早期识别—趋势预警—精准养护”的闭环管理。

近年来，桥梁运维逐步进入全生命周期管理阶段，行业技术路线也从“发现问题再检测”的被动模式，转向“长期在线感知—状态评估—风险预警”的主动模式。这一转变一方面源于健康监测体系的工程化应用，另一方面也得益于智能传感、无线通信、边缘计算与云端智能等技术条件的成熟。对于点多面广、数量庞大的附属构件而言，建设“可持续、可扩展、少封道”的轻量化监测体系，更符合实际运维条件，也更能支撑精细化、数字化管养的需求。

在上述框架下，“自感知”的基本思路是利用结构在真实运营工况下的响应



变化来表征状态退化：伸缩装置的松动、间隙变化、裂纹扩展与锚固区退化等早期问题，会直接体现在车辆过缝过程中的冲击振动、能量分布、频谱特征以及异响特征中。通过布设振动与声音等多源传感器，长期获取运行响应并结合诊断算法进行识别与归因，可在尽量不影响交通的条件下，将诊断窗口前移到“早期内部退化”阶段，为预防性养护提供依据。尤其是车辆通行本身就是稳定的自然激励源，可持续提供真实工况数据，为在线识别与趋势预警提供数据基础。

基于上述行业需求与技术条件，本项目聚焦在役混凝土桥梁模数式伸缩装置“早期损伤隐蔽、演化快、影响范围大、养护干扰强”等痛点，拟提出一种全新的无损检测方法，在节约人力物力的同时，可以更加直观简易的进行混凝土桥梁伸缩装置故障检测。本方法可以对混凝土桥梁伸缩装置的整体损伤情况做出精准的测量，同时配合多传感器协同采集，可扩大测量的适用范围。在符合伸缩装置故障检测检测精度要求的前提下，保障检测人员的生命安全，极大的削减劳动力成本及经济成本，对混凝土桥梁模数式伸缩装置全周期寿命大大增加，节约养护成本。同时传感器的安装不会对桥面交通造成阻碍，降低了对公共交通资源的占用。伸缩装置故障检测平台不单单具有重要的现实意义，还被赋予了结构检测与评估、设计验证和研究与发展三方面的意义，在推动和发展智能化、数字化和信息化桥梁工程中必将起到积极的作用。

## 1.2 研究目的

本项目面向在役混凝土桥梁伸缩缝易损坏、早期病害隐蔽性强、人工检测效率低且安全风险高等突出问题，以保障桥梁结构安全运营和提升养护管理水平为核心目标，开展混凝土桥梁伸缩缝早期故障诊断技术研究。通过引入多源传感器与智能分析方法，构建适用于复杂交通环境下的伸缩缝状态感知与故障识别技术体系，实现对伸缩缝早期损伤和潜在故障的及时发现与科学评估。

围绕桥梁伸缩缝在车辆荷载、环境作用及材料性能退化等多场耦合作用下的损伤演化规律，系统研究伸缩缝典型故障的产生机理及其表征特征，明确不同故障类型在振动和声学多源信息中的响应特性。在此基础上，探索多源异构传感信息的高效获取与协同感知方法，为伸缩缝早期故障的精准识别和状态判定奠定可靠的理论基础和数据基础。

项目研究以工程应用为导向，研发集信号采集、调理、无线传输与智能分析



于一体的桥梁伸缩缝故障检测系统，突破多传感器布设、信号调理及抗干扰等关键技术，形成结构合理、稳定可靠、易于部署的硬件系统方案。同时，通过嵌入式与云端协同的数据处理架构，实现伸缩缝运行状态数据的自动化采集、远程传输与集中管理，提高检测工作的连续性与可靠性。

依托深度学习等人工智能技术，构建面向多源传感数据的伸缩缝故障识别与预测模型，实现对伸缩缝健康状态的智能判别和早期预警。通过原理样机研制、现场试验验证和性能测试，形成可推广应用的桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术，为桥梁养护决策提供科学依据，降低养护成本，延长伸缩缝及桥梁整体服役寿命，全面提升公路桥梁的安全性及智能化管养水平。

### 1.3 项目概要

桥梁模数式伸缩缝作为保障桥梁结构安全与行车舒适性的关键构件，长期承受车辆反复荷载、温度变化及环境侵蚀作用，易发生疲劳损伤、构件断裂、松动和老化等病害，是桥梁运营期内故障高发部位之一。现阶段桥梁伸缩缝状态评估主要依赖人工巡查和定期检查，存在检测效率低、隐蔽病害识别能力不足、作业安全风险高及养护成本大的问题，难以满足在役桥梁精细化、数字化和智能化养护管理的需求。本项目围绕混凝土桥梁模数式伸缩缝早期故障难以感知和精准诊断的工程难题，在系统分析伸缩缝故障产生机理及其多场耦合演化特征的基础上，研究基于多源传感器的伸缩缝运行状态信息获取与协同感知方法，构建适用于复杂交通环境的伸缩缝自感知监测体系。项目拟采用振动、声学、视觉等多种传感手段，对伸缩缝运行过程中的关键特征信息进行实时采集，并通过信号调理与无线传输，实现数据的稳定获取与远程传输。

针对获取的多源监测数据，研究高效的数据预处理与融合方法，提取能够表征伸缩缝早期损伤和故障演化的关键特征参数；在此基础上，引入深度学习等人工智能技术，构建伸缩缝故障识别与早期预测模型，实现对不同类型故障状态的智能判别与风险预警。同时，研制桥梁伸缩缝故障检测原理样机，并通过实验室试验与工程现场应用，对系统的可靠性、识别精度和工程适用性进行验证。通过本项目研究，形成一套可推广应用的混凝土桥梁伸缩缝早期故障诊断技术与检测系统，建立桥梁伸缩缝健康状态数字化监测与评估方法，为桥梁养护管理提供科学依据，有效降低养护成本，减少突发性病害风险，提升桥梁结构运营安全性和



公路基础设施智能化管养水平。

#### 1.4 市场需求前景或推广应用领域

随着我国公路交通网络规模的持续扩大和大量桥梁进入集中养护阶段,桥梁运行安全与设施耐久性问题日益凸显。桥梁伸缩缝作为桥梁结构中服役环境最为复杂、病害发生最为频繁的构件之一,其运行状态直接影响桥梁整体安全和行车舒适性。当前,各级交通主管部门和运营单位对伸缩缝运行状态的实时掌握和早期风险预警需求不断增强,推动了伸缩缝检测技术由人工巡查向智能感知和在线监测方向发展。

从市场需求规模看,相关行业调研数据显示,2023年我国桥梁伸缩缝及相关监测技术市场规模约为12.8亿元,预计到2025年将增长至约17.9亿元,年均复合增长率超过18%;同时,全球桥梁伸缩缝监测市场也保持稳定增长态势,显示出较强的长期需求基础。市场需求的持续扩大,为伸缩缝智能检测技术的工程应用和成果转化提供了现实条件和广阔空间。

在此背景下,本项目针对现有伸缩缝检测手段中存在的人工依赖度高、隐蔽病害识别能力不足、检测效率低等问题,提出混凝土桥梁伸缩缝早期故障诊断技术,重点突破多源信息获取、智能分析和工程化集成等关键环节。项目研究成果在技术路线和产品形态上,均与当前桥梁养护领域对“低干扰、可长期在线运行、智能化决策支持”的工程需求高度契合,具备直接工程转化条件。

在成果转化形式上,项目可形成桥梁伸缩缝智能检测硬件设备、故障诊断与预警软件系统以及配套的数据管理平台。相关设备采用模块化和标准化设计,适用于新建桥梁的同步安装,也可在既有桥梁中实施快速加装与升级改造;配套软件平台可实现监测数据的远程传输、集中分析和可视化展示,为桥梁养护决策提供量化依据,便于在公路运营管理体系中推广应用。

在产业化推广方面,项目成果可优先在高速公路、普通国省干线公路及交通流量较大的市政桥梁中开展示范应用,通过工程验证不断优化系统性能和应用模式,逐步形成可复制、可推广的技术方案。依托桥梁养护市场和智慧公路、智慧桥梁建设需求,项目成果有望与现有桥梁结构健康监测系统和数字化养护平台实现融合应用,拓展其在桥梁智能运维领域的应用深度和广度。

总体来看,本项目成果具有明确的工程应用场景、清晰的转化路径和良好的



产业化基础。通过推广应用,可有效减少桥梁伸缩缝突发性病害和应急维修频次,降低养护成本和交通运行影响,提升桥梁设施运行安全水平,同时对推动桥梁养护装备智能化、促进相关检测与运维产业发展具有积极作用,具备良好的经济效益和社会效益。

## 二、前期科研及工作基础

### 2.1 项目领域发展状况及技术水平分析

#### 2.1.1 国内外桥梁伸缩故障监测与诊断技术研究现状分析

桥梁伸缩缝作为桥梁结构中直接承受车辆荷载冲击和温度变形协调的关键构件,其服役环境复杂、受力条件恶劣,是桥梁运营期病害和功能退化的高发部位。尤其是模数式大位移伸缩装置,因其结构构件多、连接形式复杂,在长期服役过程中易出现构件松动、焊缝疲劳开裂、锚固区损伤、弹性元件劣化及缝宽异常等问题<sup>[1]</sup>。围绕上述工程痛点,国内外学者从动力响应机理、长期监测评估和智能诊断方法等方面开展了系统研究。

国外研究较早关注模数式伸缩缝在车辆作用下的动力异常特征。Ancich、Chirgwin 和 Brown 针对模数式伸缩缝的动力行为开展研究,揭示了伸缩缝在结构状态变化时会表现出明显的动态异常响应,为基于振动和动力信号识别伸缩缝状态提供了早期理论依据<sup>[2]</sup>。随后, Ni Y.Q. 等基于实桥长期位移与温度监测数据,提出利用位移—温度关系对伸缩缝运行状态进行评估的方法,明确了温度效应在伸缩缝响应分析中的主导作用,奠定了“环境工况建模—状态评估”的研究框架<sup>[3]</sup>。

在国内,邓扬、李爱群、丁幼亮等依托大跨桥长期监测系统,对伸缩缝运行数据进行分析,实现了基于长期监测数据的损伤识别与异常判别,推动了我国伸缩缝状态评估由经验判断向数据驱动分析的转变<sup>[4]</sup>。随着工程需求的提升,国内研究逐渐由方法探索向工程系统构建延伸。岳军、周强、吴鸿等提出了桥梁大位移模数式伸缩装置智能监测系统,集成了现场数据采集、远程传输与状态分析功能,体现了伸缩缝监测向系统化、工程化应用发展的趋势<sup>[5]</sup>。

在损伤识别与诊断方法方面,文峰以模数式伸缩装置为研究对象,系统开展了基于振动分析的损伤识别研究,通过试验与信号分析充分验证了振动响应对伸



伸缩缝损伤状态的敏感性,为振动信号在模数式伸缩缝诊断中的应用提供了直接证据<sup>[6]</sup>。陈昌柏则从工程实践角度总结了模数式桥梁伸缩装置的常见病害类型及其成因,指出病害多集中于连接构件和锚固部位,进一步凸显了早期监测与诊断的重要性<sup>[7]</sup>。

在智能诊断与在线预警方面,Miao C.Q.等提出基于长期监测数据的新颖性检测方法实现伸缩缝损伤报警,解决了故障样本不足条件下的异常识别问题<sup>[8]</sup>; Ni Y.Q.等进一步引入贝叶斯推断方法,将不确定性纳入评估过程,实现概率意义下的状态评估与损伤报警,更符合桥梁运营期风险管理需求<sup>[9]</sup>。在多源感知方向,Jiang T.Y.等利用压电陶瓷传感器开展模数式伸缩缝疲劳损伤监测研究,验证了主动感知技术在疲劳损伤识别中的可行性<sup>[10]</sup>; Li J.等、Zhang X.等分别从声学信号特征提取和系统级健康状态监测角度,探索了基于声音信号的伸缩缝损伤检测与监测方法<sup>[11]</sup>; Dong Y.等进一步引入声纹识别技术,对在役伸缩缝故障进行检测,拓展了声学诊断方法的应用深度<sup>[12]</sup>。在机理层面,李瑞琪、宋晓东等通过有限元方法研究模数式伸缩缝振动噪声特性,为病害机理解释和监测指标选取提供了理论支撑<sup>[13]</sup>。

总体而言,国内外在伸缩缝动力响应分析、长期监测评估和多源感知诊断方面已形成较为丰富的研究成果,但现有研究多集中于病害发生后的识别与评估,对复杂工况下伸缩缝早期微损伤的稳定识别能力仍有待进一步提升。

### 2.1.2 相关技术研究水平与发展趋势分析

从整体技术水平看,桥梁伸缩缝监测与诊断技术正由传统的人工巡查和定期检测,逐步向在线感知、智能分析和风险预警方向发展。以 Ni Y.Q.等提出的基于长期位移—温度数据的状态评估方法为代表,伸缩缝运行状态的连续监测和环境工况影响建模已具备一定技术基础<sup>[2]</sup>; Miao 等提出的新颖性检测方法在缺乏故障样本的条件下仍能实现异常识别,为工程在线预警提供了可行路径<sup>[8]</sup>。

在数据与信号层面,振动信号已成为伸缩缝诊断的重要信息来源。文峰的研究表明,车辆通过伸缩缝时产生的冲击振动对结构状态变化具有较高敏感性,基于振动分析的损伤识别方法具有良好的工程可行性<sup>[7]</sup>。围绕振动信号处理,叶婉玲、饶瑞系统总结了振动信号数据预处理方法,为提高信号质量、增强损伤特征提供了方法支撑<sup>[14]</sup>。与此同时,声学信号因对冲击、松动等故障更加敏感,逐



渐成为研究热点。Li J.等提出基于声信号和 SVDD 的损伤检测方法<sup>[11]</sup>, Zhang X.等构建了基于声学传感器的伸缩缝健康状态监测系统并引入渐进式分类机制<sup>[15]</sup>, Dong Y.等通过声纹识别提升了在役伸缩缝故障检测的判别能力<sup>[13]</sup>, 体现了声学诊断由单一方法向系统化应用的发展趋势。

在智能诊断方法方面, 多源信息融合与少样本学习成为重要发展方向。尽管部分研究以机械设备为对象, 李雅鑫在少样本条件下开展声振信息融合故障诊断研究, 验证了多源融合在样本不足条件下提升识别可靠性的优势, 为伸缩缝等故障样本稀缺构件的诊断方法提供了有益借鉴<sup>[16]</sup>; 白健从信号预处理与模型融合角度开展研究, 表明多模型协同有助于提升复杂工况下故障识别的稳定性<sup>[17]</sup>。

在工程应用与标准化方面, 伸缩装置监测与养护正逐步纳入规范化管理。JTJ/T 5532—2023明确了桥梁支座与伸缩装置养护和更换的技术要求, 为监测评价与处治流程提供了制度依据<sup>[18]</sup>; JT/T 327—2016对伸缩装置产品提出通用技术条件<sup>[19]</sup>, JTG(交通)161—2020对伸缩装置试验系统提出计量检定要求<sup>[20]</sup>, 为监测系统的工程应用和验收提供了基础支撑。与此同时, 丁勇等开展的模数式伸缩缝疲劳寿命分析与结构优化研究, 明确了典型易损部位并提出优化方案, 为“诊断一定位一处治”闭环提供了结构层面的依据<sup>[21]</sup>。此外, 俞俊勇等提出融合无人机贴近摄影和自适应DIC技术的桥梁振动参数快速识别方法, 为未来难接近部位和大跨桥梁的监测提供了新的技术手段<sup>[22]</sup>。

综合来看, 当前技术发展呈现出环境工况建模不断完善、多源信息融合持续深化、智能诊断方法向工程系统演进以及标准体系逐步健全的趋势, 为开展面向伸缩缝早期故障诊断的工程化研究奠定了良好基础。

### 2.1.3 现有技术存在的问题及本项目拟解决的关键技术难点

尽管国内外在桥梁伸缩缝监测与诊断方面已取得一定进展, 但从工程实践和规模化应用角度看, 仍存在若干关键问题亟需解决。首先, 伸缩缝早期病害通常表现为局部松动、微裂纹或轻微刚度退化, 其引起的响应变化幅度小, 且易被温度变化、交通荷载随机性等工况因素掩盖<sup>[5]</sup>, 导致现有方法在复杂运营环境下的诊断鲁棒性不足。即便引入新颖性检测或贝叶斯概率评估方法来提高报警的可靠性<sup>[8]</sup>, 对早期弱损伤的稳定识别仍存在误报和漏报风险。

其次, 现有研究多集中于单一信号或单一模型的验证, 缺乏面向工程应用的



多源融合诊断体系。虽然振动监测<sup>[7]</sup>、声学监测<sup>[11]</sup>和主动感知技术<sup>[10]</sup>分别在损伤识别中显示出潜力，但在多源数据同步、特征融合一致性、诊断结果可解释性以及诊断结论与结构部位、处治措施之间的映射关系方面仍存在不足。结构层面的疲劳寿命与易损部位研究虽能明确关键构件和薄弱环节<sup>[21]</sup>，但其成果尚未与在线诊断结果形成有效联动。

此外，伸缩缝故障样本获取困难，病害类型多样、发展路径差异大，制约了数据驱动方法的模型训练和泛化应用。少样本条件下如何充分利用多源信息、提高诊断稳定性和可靠性，仍是工程应用中面临的重要技术难题<sup>[16]</sup>。与此同时，行业标准和规范对监测系统的可靠性、可维护性和可验收性提出更高要求<sup>[18-20]</sup>，科研成果必须从“算法可行”走向“系统可用”。

基于上述问题，本项目拟面向混凝土桥梁模数式伸缩缝的实际服役工况，重点攻克复杂工况下基于振动及多源信息的早期故障特征增强与融合诊断方法，构建具有工程可部署性、诊断结果可解释性和风险分级能力的伸缩缝自感知监测与早期诊断技术体系。通过将前期研究成果、工程实践经验与规范要求相结合，有望实现伸缩缝病害由“被动维修”向“主动预警和科学养护”的转变，为桥梁安全运行和精细化管养提供有力技术支撑。

## 2.2 项目前期科研及现有工作条件

### 2.2.1 支撑条件

韩城市公路局为公益性事业单位，主要承担韩城市境内国省干线公路的养护管理、路产保护、应急保畅及相关技术管理工作，长期负责在役公路及桥梁设施的运行维护和安全管理工作。单位在公路日常养护、养护工程实施、公路桥梁检测与维护以及应急处置等方面积累了丰富的工程实践经验，具备扎实的现场组织和工程实施能力。近年来，韩城市公路局持续推进公路养护管理的信息化和智能化建设，积极开展新技术、新方法在公路桥梁养护中的应用探索，具备将科研成果与实际工程相结合的良好基础。依托日常养护和在役工程管理工作，单位能够为本项目提供稳定的工程应用场景、现场条件及管理支撑，保障项目研究、示范应用和成果推广的顺利实施。

申请单位陕西交控桥隧有限公司目前拥有交控桥隧高性能产品制造基地，该基地是陕西交控集团制造集群科技成果转化落地的第一个实体新兴产业项目，是



交通装备制造重点打造的“交控制造”产业链，是集科研成果转化、建设工程质量、桥梁管养标准、桥隧装备制造于一体的科技型、服务式、制造化产业综合体，经营业态包括产品营销、专业安装和制造业教学等。

其所拥有的伸缩装置生产基地总占地 30 余亩，建筑面积 3000 平方，拥有 2 条智能化、标准化生产线，主要生产模数式、梳齿板式伸缩缝，加强型无螺栓梳齿式免维护式、GM 无缝式、毛勒加梳齿板式、预制装配式等桥梁伸缩装置，年产能 3 万延米。并在新建高速、运营路段得到广泛应用，为推动养护工程管理标准化、施工简易化、成本节约化，提升养护工程质量，实现降本增效目标打下坚实基础。为本项目的实施提供了保障。

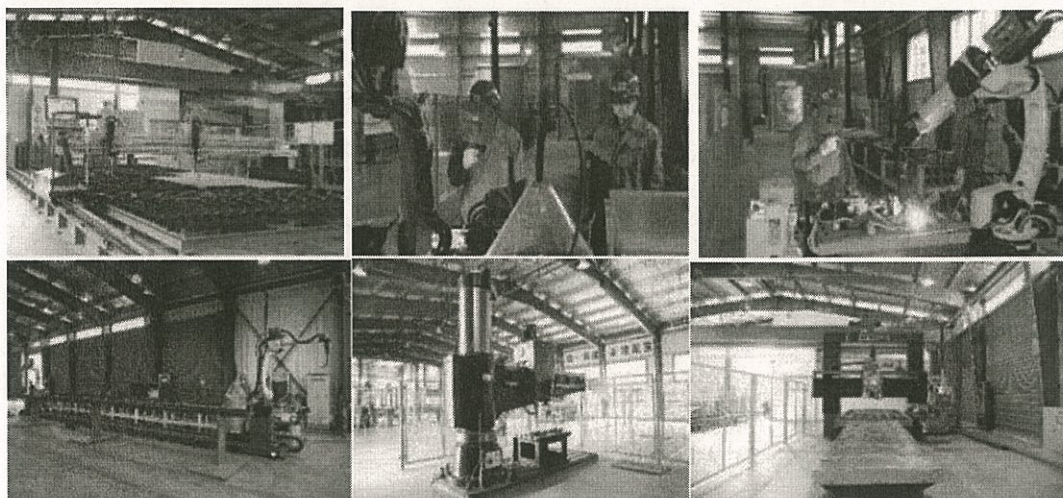


图 2.1 陕西交控桥隧有限公司伸缩装置生产基地

合作单位长安大学平台条件完善，现有 3 个国家级实验教学中心、15 个省级实验教学示范中心，2 个国家工程实验室，1 个国际联合实验室，1 个国家应用数学中心和 62 个省部级重点研究基地。国内高校唯一的“车联网与智能汽车试验场”，被交通运输部认定为全国三大“自动驾驶封闭场地测试基地”之一。长安大学为本项目的研究人员提供理论学习、实验测试、科学实践等相关科研活动的仪器室、办公室、准备室、工作室等配套设施，以及相关水、暖气、车辆的供给。除此之外，长安大学拥有进行相关研究所需的书籍和网上查阅相关电子刊物的必要条件(拥有 IEEE、ScienceDirect、ASCE、CSA、Elsevier SDOL、CNKI、中国优秀硕博论文库、维普科技期刊全文数据库、万方等数据库)，可向全校开放查阅。

本项目依托长安大学所在的“陕西省道路交通智能检测与装备工程技术研究



中心”、“桥梁结构智能检测与评估工程技术研究中心”，“西安市结构损伤智能检测重点实验室”，“陕西省电工电子实验示范中心”，研究中心在交通基础设施智能检测领域和机器视觉方面的有深厚的积累和显著的特色，具有“智能测控系统研究开发平台”、“机器视觉开发平台”、“基础设施智能检测仿真实验平台”等多个实验平台，可以为申请者提供各种与之相关的其它实验。另外具有一批从事交通基础设施智能检测与评估方面的高级科研人员和工程技术人员，具有承担国家级及省部级重点科研项目的力量。利用中心的现有设备，可完成室内模拟仿真试验。

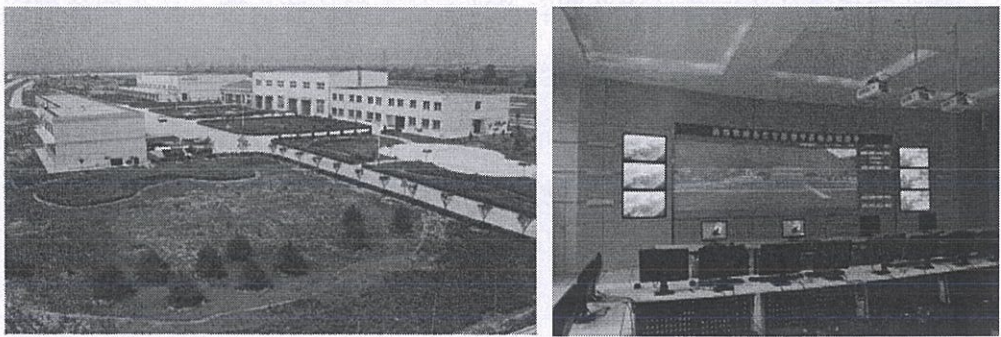


图 2.2 道路交通智能检测与装备工程研究中心

长安大学智能测控技术研究团队隶属于长安大学结构损伤智能检（监）测实验室，长期深耕于基础设施智能检（监）测及作业机器人技术，在业内享有盛誉，近年来针对基础设施的智能化检（监）测进行多个项目和产品的研发和市场推广，已经获得较多的市场应用案例，部分产品填补了国内的空白。团队现有教授 3 人，副教授（高级工程师）7 人，讲师（工程师）3 人，博士生 8 人，硕士生 40 余人。课题组研究方向依托交通运输工程国家一级重点学科，长期对交通基础设施智能检测领域的关键性难题和共性技术。

### 2.2.2 前期工作基础

本课题研究团队前期研制的激光基准智能网联结构变形监测系统、钢筋焊缝结构光扫描智能检测系统、环形框架多足攀爬视觉扫描桥墩病害智能检测系统已经进行了专利转让，并投入生产，效果良好。申请人的专利“透射式靶标图像的光斑中心检测方法及桥梁挠度图像式检测装置”进行了转化，已经成功应用在陕西多座桥梁、公路边坡、隧道和建筑的结构变形自动化网联化监测系统中。另外，申请人十分注重产学研相结合，将科研成果转化到教育教学改革中，自制了多种教学实验装置，取得了良好的教学效果。申请人于2023获国交通运输协会科技进



步二等奖1项，2021年指导的“兆易创新杯”中国研究生电子设计竞赛，获得国家一等奖，并进入全国TOP10研电之星决赛阶段，2018年获得国家级教学成果二等奖1项。2018年获得了陕西省科技工作者创新创业计划金奖，这些都为项目的应用和推广提供了支持和基础。

在与本项目相关的研究基础方面，申请人已开展的前期研究工作和取得的成果如下：

●本团队提出了一种低成本的基于智能支承装置构件和自感知伸缩缝装置的桥梁运营智能监测和灾毁快速感知告警快速应急处置装置（含演示示范模型），解决了桥梁结构运营健康监测和极端自然灾毁快速告警一体化智能网联装置，正在撰写相关的专利。

该方法系本团队联合陕西交控桥隧有限公司首次提出，对桥梁结构的运营的安全的自动化监测和桥梁损毁的现场应急一体化处置，保障桥梁的安全和面对极端灾害下的防灾减灾具有重要意义，目前已经申报了专利2项，正在撰写相关的论文。

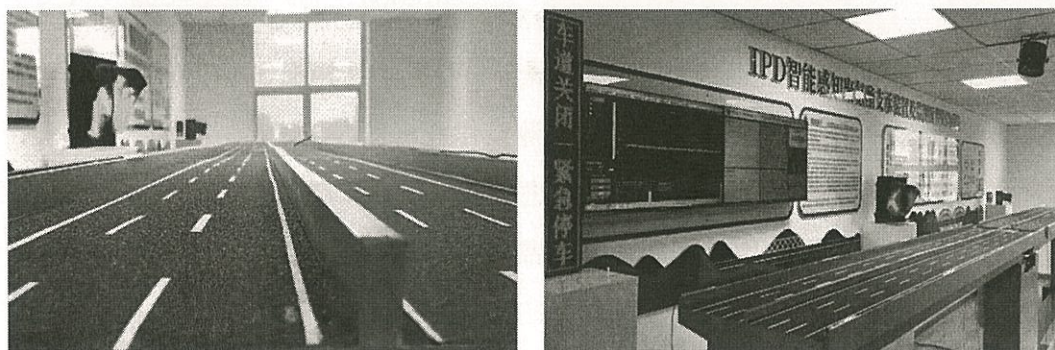


图 2.3 聚氨酯智能感知支承装置及应急处置模型

●本研究团队提出了一种基于激光基准的桥梁挠度智能网联监测方法，并设计了原理样机，在合阳金水沟九龙大桥和合阳沿黄观光路跨东雷一级站进行了外场测试实验，获得了良好的效果

该方法系申请人首次提出，对桥梁结构的变形检测具有重要意义，部分成果发表在核心期刊《激光与红外》、《仪表技术与传感器》上，申请人获得了专利2项，该方法也是首次应用于交通基础设施的监测中，目前撰写了发明专利，已经受理公开，正在审核，如图 2.3，2.4 所示。项目组对其中的关键技术进行了深入的前期研究，并获得了良好的效果，本项目即为该项目的进一步研究工作。



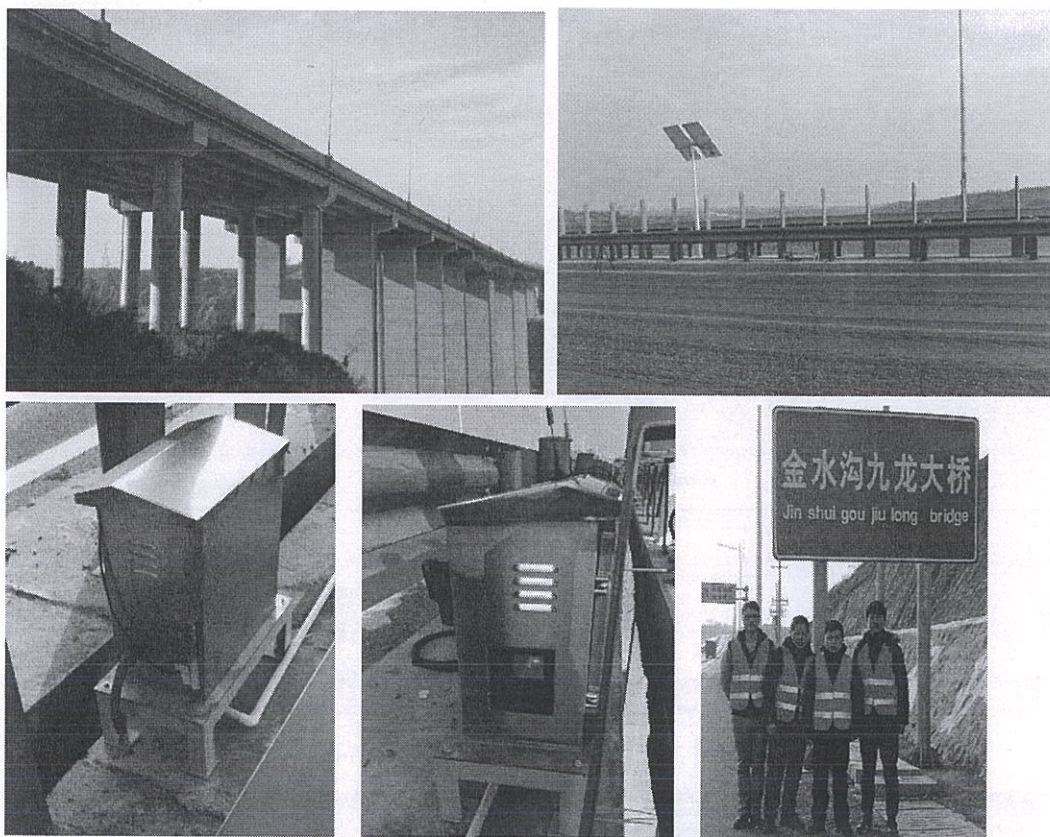


图 2.4 激光基准桥梁挠度动态检测系统

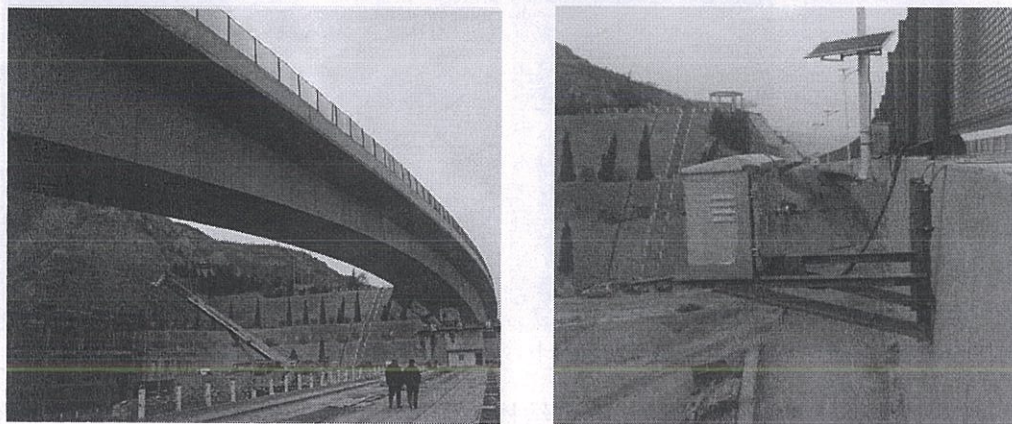


图 2.5 沿黄观光路跨东雷一级站大桥设备安装现场

●项目组基于物联网技术采集了桥梁挠度数据并进行了基于云服务器的数据分析软件系统开发

项目组基于 4G/NB-IOT 研发了桥梁挠度数据采集系统，开发了数据采集云端软件，构建了数据库软件，实现了数据的远程云端传输、存储、显示，客户端网页、APP 查看，如图 2.6,2.7 所示。并且基于云服务器探索了桥梁结构健康与安全方面的相关算法。该系统的开发对本项目成功开展具有重要的意义，项目的



软件可以该软件为基础继续深化开发，集成且可以进一步构智慧桥梁建管理云。



图 2.6 系统云平台客户端软件界面

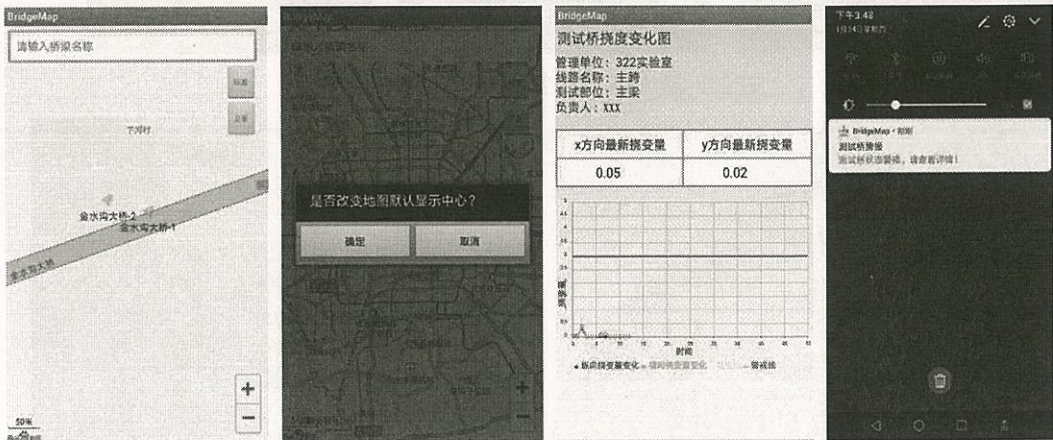


图 2.7 系统云平台手机 APP 界面

●项目团队已设计出了一套建筑结构三维变形激光检测装置，利用该装置可以对建筑结构三维变形进行高精度的实时测量

建筑结构多维沉降及变形智能网联激光监测系统是项目组自主研发的低功耗、高精度实时监测系统，具有自主知识产权（专利产品），可以全天候实时监测建筑结构沉降及变形数据（还可以扩展其他更多监测），评估建筑结构的健康状况并进行预警。该系统可以作为构建智慧工地的核心产品，已经成功应用于榆林三馆建筑结构变形监测和东沙文体馆基坑变形监测工程中，且以该项目为支撑获得了陕西省科技工作者创新创业大赛金奖。如图 2.8 所示，同时项目组成员还



研究并提出了基于复杂靶标运动模型的“变形监测系统”并撰写了论文。

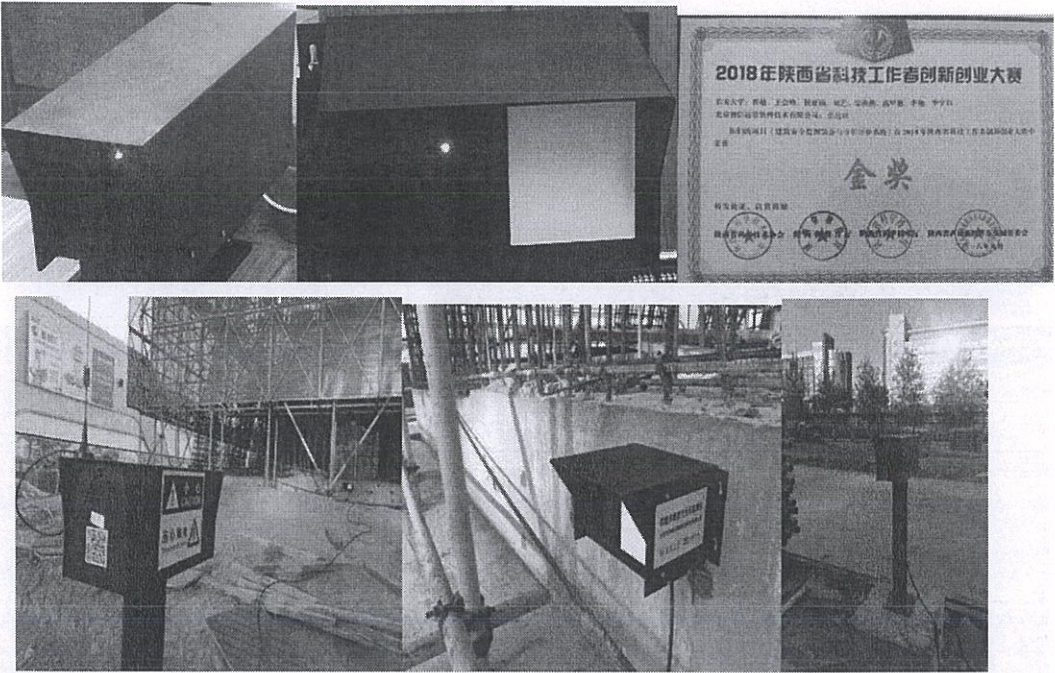


图 2.8 建筑结构三维变形监测系统及获奖

●针对传统的桥梁检测中存在的自动化程度低、检测效率低、检测成本高和检测人员的生命安全缺乏保障等问题，项目组提出了一种基于系留式飞爬机器人的桥梁底部裂缝检测系统。

在分析了裂缝图像特点及桥梁底部裂缝检测工作的工程需求后，以飞爬机器人的机构设计、裂缝全景图像的拼接、裂缝目标的自动识别、桥梁底部裂缝自动识别和测量等关键技术进行了研究，设计了能自动检测桥底裂缝的视觉检测装置，并通过实验分析了其有效性和测量误差。项目组制定了通过系留式飞爬机器人平台获取桥梁底部图像，结合深度学习和图像处理技术识别裂缝的检测方案。对于获取的桥梁底部图像，提出了一种通过均匀化的 ORB 算子提取特征点，并通过随机抽样一致性和 LM 优化仿射变换矩阵的裂缝图像拼接算法，以实现桥梁底部裂缝图像的拼接。然后针对拼接后的裂缝全景图像提出了一种两段式的深度学习模型，能够完成裂缝图像的分割并判断该图像是否包含裂缝目标。基于深度学习得到的包含裂缝目标的图像，提出了一种通过深度学习结果为灰度图像加权的自适应阈值分割方法和裂缝参数计算方法，并通过实验比较了该方法与人工测量结果，验证了其有效性和准确度。该技术属于国内首创，是交通基础设施作业机器人的典型应用。该成果已经发表在本学科的 TOP 期刊，Automation In



Construction》(SCI 中科院 1 区)。

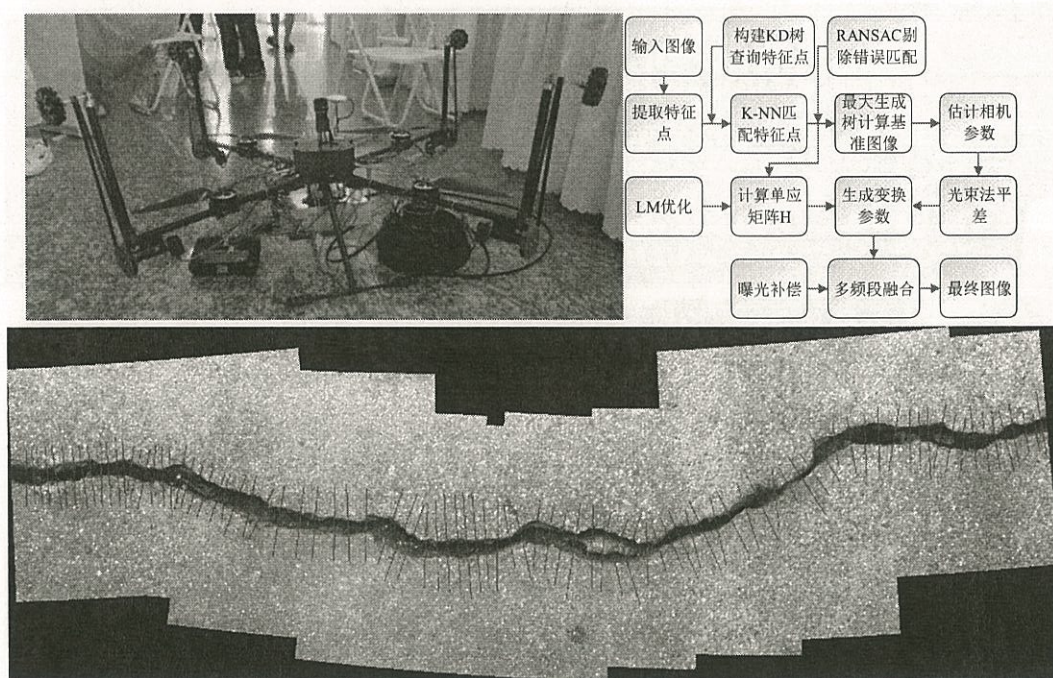


图 2.9 基于系留式飞爬机器人平台的桥梁底部裂缝检测系统

●本研究团队针对传统高墩柱结构表观病害检测过程中的局限性，提出了一种可用于墩柱结构表观病害检测的环形轨道视觉扫描的环形框架攀爬检测机器人系统。实现了高墩结构表观病害识别和高精度测量，建立表观病害的数字化档案信息。利用所搭建的样机，在西安广运大桥、安徽寿春桥和成都神仙树立交、成都青龙场立交进行了现场对比试验，获得了良好效果。

首先，根据攀爬作业机器人的功能需求，设计了一种多足协同的攀爬检测作业机器人平台。可通过上位机设定机器人作业过程的运行参数，攀爬过程中，利用安装在环形框架上的多个陀螺仪实时采集机器人的姿态信息，通过所设计的系统算法实时校正爬行姿态和精度。其次，设计了一种可搭载作业平台的基于环形可重构的作业轨道及轨道车，轨道车携带扫描像机、照明系统和高精度行走编码器，在高精度伺服电机的驱动下沿着轨道行走，实现对攀爬作业机器人所行走高度图像的扫描获取和存储。最后，利用机器人系统所采集的图像进行了表观病害识别和高精度测量，建立表观病害的数字化档案信息。如图2.10, 图2.11所示。



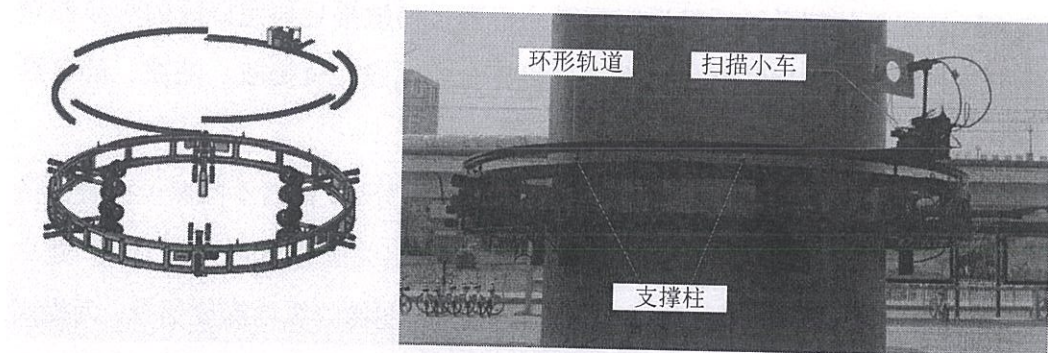


图 2.10 墩柱结构智能检测环带视觉扫描攀爬作业机器人系统

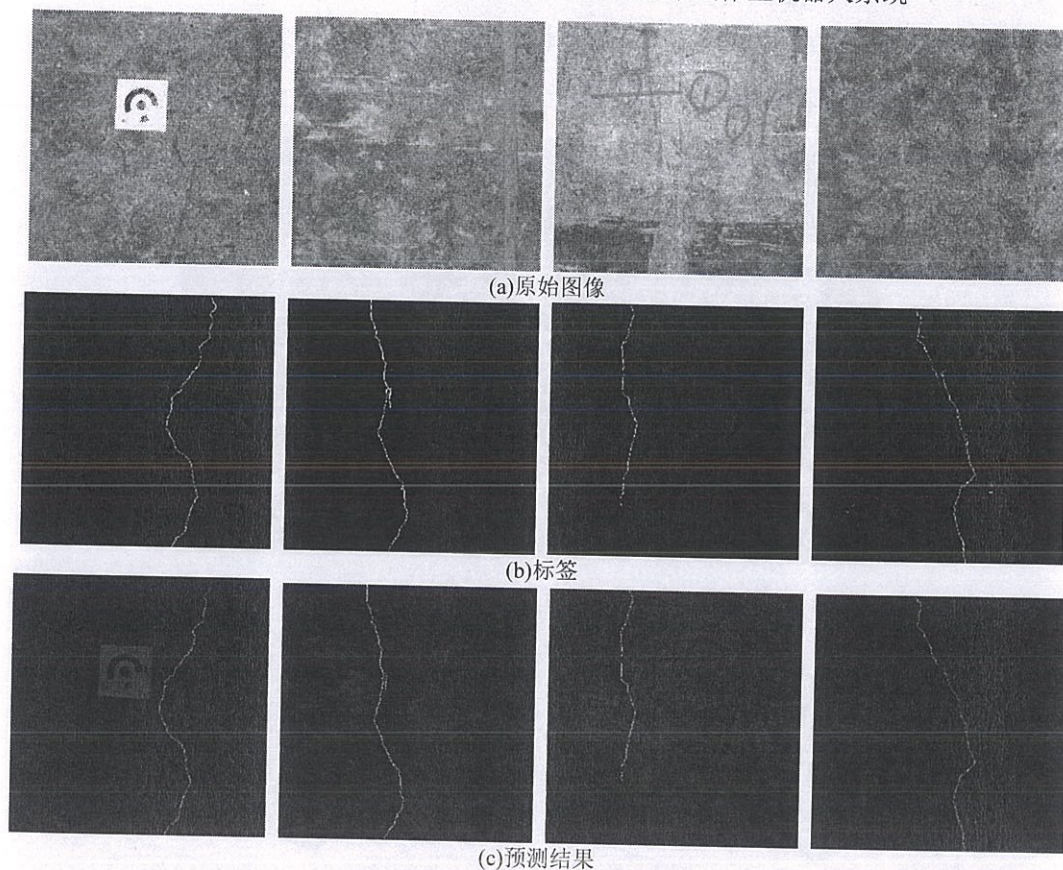


图 2.11 基于深度学习的墩柱表面病害识别与测量

●针对现有的路面构造深度测量中存在的效率低、精度低等缺陷，通过对激光散斑特性及散斑计量方法和路面构造深度结构的研究，本项目组提出了一套基于激光散斑和数字图像处理的道路路面构造深度三维测量的方法。

为面向混凝土隐性缺陷的现场快速识别需求，本文以“便携式大视场光学系统+ 噪声条件下可靠相位恢复+ 缺陷定量可视化”为主线，围绕光路结构、噪声相位质量评价、相位滤波、相位解包裹与软件平台集成开展研究，构建了一套适用于混凝土隐性裂缝和空洞等缺陷检测的便携式 DSSPI 技术方案，通过热载



荷和加压载荷等外部激励诱发近表层微小形变，使缺陷处与完好区的响应差异在相位场中形成可识别特征，并在上位机平台中完成相位提取、滤波、解包裹与离面应变的可视化输出。

该方法首先对激光散斑计量的相关特性进行了分析，根据不同深度位置的散斑信息，采用数字散斑相关算法（DSCM），通过相关运算中的峰值坐标，建立三维图像与构造深度的数学解析关系，最终解算出图像的纵向深度信息，为提高系统的效率，我们对解算过程中的搜索方式进行了优化，最后，得到路面构造深度的三维点云信息。该技术属于激光技术在公路基础设施检测中应用的典型案例，可为本项目提供技术支撑。

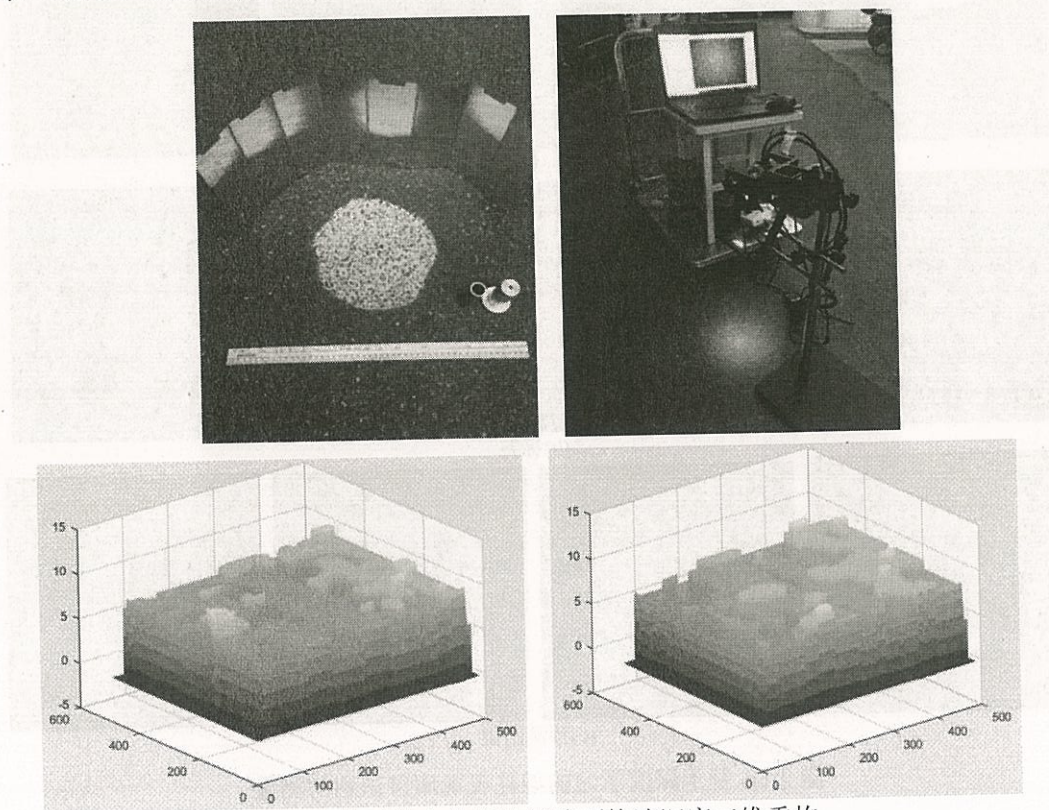


图 2.12 基于激光散斑法的路面构造深度三维重构

### 2.2.3 获奖情况

研究团队主要围绕基础设施智能检测技术、物联网大数据技术、人工智能缺陷检测识别技术、结构状态评估技术、光电检测与质量评价技术的仿真和试验研究，并与知名专家共同进行攻关，结合国家物联网重大示范工程项目、国家自然科学基金项目、陕西省重点项目等一批项目，开展相关的研究工作，目前已取得了一批标志性成果。承担了多项陕西省重点研发计划等科技计划项目，而且研发



成果多次获得省市科学技术奖。

与合作企业广泛开展了“中小跨桥梁状态智能感知”、“聚氨酯支撑装置智能感知”、“光纤传感桥梁坍塌告警及应急处置”，“桥梁智能检测及作业机器人控制系统”，“钢筋焊缝智能检测装置”的研究，多个产品已在陕西交控集团、中铁西南院集团、中铁一局集团等单位进行了应用，产生了较好的经济和社会效益，深受合作企业的欢迎。

近年来，本团队在国内外发表多篇学术论文，获国家授权专利若干项，含多项发明专利。

(1) 申请的部分国家专利

表 2.1 申请的部分国家专利

| 序号 | 专利名称                             | 授权专利号             |
|----|----------------------------------|-------------------|
| 1  | 一种用于墩塔结构检测的攀爬作业机器人控制方法           | ZL202110900138.7  |
| 2  | 一种边坡稳定性三维变形监测装置及方法               | ZL202110588051.0  |
| 3  | 透射式靶标图像的光斑中心检测方法<br>及桥梁挠度图像式检测装置 | ZL201811614380.2  |
| 4  | 一种基于线结构光扫描高频电阻焊毛刺形貌三维检测装置        | ZL201711079863.2  |
| 5  | 一种基于深度学习的 HF-ERW 焊接状态检测方法及装置     | ZL201810903938.2  |
| 6  | 一种用于桥梁的链式激光挠度检测系统                | ZL202222561645.5  |
| 7  | 一种基于线结构光的便携式钢筋焊缝图像采集装置           | ZL202021836178.7  |
| 8  | 一种基于图像拼接的桥梁底部裂缝检测装置              | ZL202021225786.4  |
| 9  | 一种用于墩塔结构检测的攀爬作业机器人               | ZL202121826929.1  |
| 10 | 一种用于桥梁底部裂缝检测的作业机器人               | ZL202221552926.8  |
| 11 | 用于墩体结构病害的环带视觉扫描检测系统              | ZL202121996375.X  |
| 12 | 一种边坡稳定性三维变形辅助监测装置                | ZL202121187201.9  |
| 13 | 一种用于测量桥梁动挠度的装置                   | ZL202221052011.0  |
| 14 | 激光基准桥梁多点挠度视觉检测装置                 | ZL2 01820805651.1 |
| 15 | 激光基准桥梁单点挠度视觉检测装置                 | ZL2 01820805726.6 |
| 16 | 一种用于半导体激光器的恒功率驱动装置               | ZL202221052009.3  |
| 17 | 一种手持钢筋焊缝形貌检测装置                   | ZL 202321485523.0 |

(2) 发表的的部分论文、专著

[1] Huifeng WANG\*, Lei ZHAI, He HUANG, Limin GUAN, Kenan MU, Guip



- ing WANG. Measurement for Cracks at the Bottom of Bridges Based on Tethered Creeping Unmanned Aerial Vehicle[J].Automation in Construction, 2020,119:103330(SCI,中科院1区;TOP期刊).
- [2] Hui-feng WANG\*,Yun-fei WANG, Jia-Jia ZHANG, Jing CAO.Laser Stripe Center Detection under the Condition of Uneven Scattering Metal Surface for Geometric Measurement[J].IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2020, 69(5): 2182 -2192(SCI,中科院 1 区;TOP 期刊).
- [3] Hao Du,Hui-Feng WANG\*, Yuan-He Shan, Ze-Feng Pan ,Yun-Mei Jiao, Rong Gao, He Huang. Automated Intelligent Detection of Defects on Bridge Piers Using a Climbing Operation Robot and Vision Mamba[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2025,74:5036018(SCI,中科院 2 区;TOP 期刊).
- [4] Hui-feng WANG\*,Hao DU, Xiao-Wei ZHANG, Yuanhe SHAN,Yunmei JIAO, Zefeng PAN,Chengyan ZHANG, He HUANG , Rong GAO. Defect detection in CFRP reinforced concrete structures by digital shearography [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2025(15):1065-1079.(SCI,中科院 2 区).
- [5] Huifeng Wang\*,Cheng haoyi, Jiao yunmei, Huang he, Wu zejian, Song shangzhen.A Slope Deformation Measurement Method Based on Laser Datum and Complex Target Motion Model[J]Measurement, 2022,199 ,111526 (SCI,中科院 2 区;TOP 期刊).
- [6] Du H,Huifeng Wang\*,Jiao Y ,et al. Self-supervised deep hash image deduplication algorithm for visual inspection of concrete[J].Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2025(15)::2261–2278(SCI,中科院 3 区).
- [7] Huifeng WANG\*, Zejian WU, Zhucai HE, Rong GAO, He HUANG. Detection of HF-ERW Process by 3D Bead Shape Measurement with Line-Structured Laser Vision[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7681- 7690( 中科院 2 区).
- [8] Hao Du,Hui-feng WANG\*, Xiao-Wei Zhang,Haonan Peng, Rong Gao, Xueyan Zheng, Yaxiong Tong, Yuanhe Shan, Zefeng Pan, He Huang. Automated Intelligent Measurement of Cracks on Bridge Piers Using a Ring-climbing Vision Scanning Operation Robot[J]. Measurement,2024,(237): 115197.(SCI,中科院 2

区;TOP 期刊).

- [9] Xiao-Wei Zhang, Hui-Feng Wang\*, Hao-Nan Peng, Hao Du, Yun-Mei Jiao, Shao-Qiang Li, Jin-Xi Zhang, Ze-Feng Pan, He Huang, Yong-Feng Ju. A DSSPI phase unwrapping method for improving the detection efficiency of CFRP-reinforced concrete defect[J]. Optics and Laser Technology.2024,168:109862.( SCI,中科院2区;TOP期刊).
- [10] JiaoYunmei, Wang Huifeng\*, Cheng Haoyi, Yang Bei, He Zhihui, Song Shang zhen,Wen Limin, Huang He. Multi-point detection method of dynamic deflection of super long-span bridge based on chain laser model [J] . Measurement, 2023,209,112535(SCI,中科院2区;TOP期刊).
- [11] 王会峰, 杜浩, 高荣\*, 仝亚雄, 彭璐, 赵煜, 黄鹤.基于环带视觉扫描的墩柱结构表观病害攀爬检测作业机器人系统 [J]. 中国公路学报,2024,37(2):40-52.(EI,A 区)
- [12] Dan Zhao, Huifeng Wang\*, Hao Du, Haoyi Cheng,Lu Peng,Yaru Liang,He Huang. An Intelligent Bridge Multi-Dimension Deflection IoT Monitoring System Based on Laser Datum and Imaging[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2025,12(2):269-287(SCI,中科院 2 区).
- [13] Xiaowei Zhang\*, Huifeng Wang\*, Hao Du , et.al. A phase filtering method to improve the efficiency of DSSPI non-destructive detection. Measurement, 2025, 256, 118404(SCI,中科院 2 区).
- [14] Hao Du, Hui-feng WANG\*, Yue-yuan Guan, He Huang,Rong Gao,Xiao-wei Zhang, Ke-nan Mu, Yun-mei Jiao. Extraction of Structured Light Stripes Center from Non-uniform Scattering Surfaces Fused with Deep Learning[J].Optics and Lasers in Engineering. 2024,177,108129( SCI,中科院 2 区).
- [15] Xiaowei Zhang\*, Huifeng Wang\*, He Huang. Detection of Hidden Defects in Reinforced Concrete Based on DSSPI and a Multi-Scale Multi-Branch Residual Convolutional Network[J].Optics and Lasers in Engineering. 2025.10(Accepted SCI,中科院 2 区).
- [16] 王会峰,何柱材\*,李云梦,黄鹤,王晓艳,高荣.采用自适应可靠因子的联合双边



- 散斑条纹滤波方法[J].仪器仪表学报, 2021,42 (12) :18-29(EI,B 区).
- [17] Huifeng Wang, Zhucai He\*, Rong Gao, Ruixin Qiu, Huang He, Limin Guan. Three-dimensional measurement method for pavement texture depth using an optimized digital speckle correlation method[J]. Optical Engineering, 2021, 60(9):094105. (SCI,EI)
- [18] 王会峰,何柱材,李云梦,李晋赓,王鹏雁,郝婷,黄鹤. 散斑干涉条纹 Kaiser-Hamming 窗口傅里叶快速滤波方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(03): 166-174. (CSCD,B 区).
- [19] 仝亚雄,王会峰\*,何波,杨蓓,宋尚真,黄鹤. 基于环视多通道图像采集的桥墩病害检测[J]. 电子器件, 2023,46(04):1134-1139.
- [20] 徐安帝,王会峰\*,余炳伟,何华阳,宋尚真. 基于车载 LiDAR 点云的道路提取方法[J]. 光学技术, 2023,49(05):67-71+139.
- [21] 赵宏伟, 宋云峰,王会峰\*,何娜娜,黄鹤, 关丽敏, 穆柯楠. 激光基准桥梁挠度成像检测系统[J]. 激光与红外, 2019,49(03):282-290.
- [22] 赵宏伟, 宋云峰, 王会峰\*,黄鹤,关丽敏, 穆柯楠. 激光基准桥梁挠度检测图像处理算法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2019,9:90-95.
- [23] 黄鹤, 王会峰, 黄莺, 高涛等. 空中机器人控制系统原理与设计-四旋翼无人机[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2024.

## (2) 近年来获得的部分奖励

- [1] 2025 年陕西公路交通微创新大赛二等奖, 获奖项目“基于光纤断线检测的桥梁边坡轻量化监测与应急告警系统”;
- [2] 2023 年中国交通运输协会科技进步二等奖, 获奖项目“桥梁结构监测系统智能感知及量值保障技术研究与应用”;
- [3] 2023 年广东省人工智能产业协会科技进步二等奖, 获奖项目“基于人机交互智能的道路交通应急处置技术”;
- [4] 2023 年陕西省科技工作者创新创业大赛,三等奖, 获奖项目“高速公路波形防撞护栏多参数智能检测机器人系统”;
- [5] 2022 年陕西省科技工作者创新创业大赛,三等奖, 获奖项目“墩柱结构病害环形视觉扫描检测攀爬作业机器人及数字孪生管养系统”;



- [6] 2021 年陕西省科技工作者创新创业大赛,三等奖, 获奖项目“公路基础设施检测装备及网络化安全评价”;
- [7] 2018 年陕西省科技工作者创新创业大赛, 金奖, 获奖项目“建筑安全监测装备与分析评价系统”;
- [8] 2017 年陕西省科技工作者创新创业大赛, 银奖, 获奖项目“基于物联网的安全生产智能化装备与管理系统”;
- [9] 2021 年指导“兆易创新杯”中国研究生电子设计竞赛获得**国家级团体“一等奖”1 项 (TOP10)**, 并获得西北赛区“一等奖”2 项;
- [10] 2025 年指导“TI 杯”全国大学生电子设计竞赛获得**国家级“二等奖”1 项**, 并获得陕西省“**一等奖**”1 项, 同时, 获得陕西省“**二等奖**”2 项, “**三等奖**”3 项;
- [11] 2023 年指导“挑战杯黑科技”展示活动获得**国家级“行星级奖”1 项**;
- [12] 2023 年指导“兆易创新杯”中国研究生电子设计竞赛获得**国家级团体“三等奖”1 项**;

#### 2.2.4 现有试验手段 (设施.设备)

长安大学智能测控技术研究团队先后完成了“基础设施智能检测技术与装备”、“道路智能检测技术与装备”、“交通信息检测技术与装备”三个方向实验设备的采购及试验环境建设工作。近几年, 陆续搭建了“综合交通信息处理与共享平台”、“交通信息云计算和云存储平台”、“桥梁隧道半实物仿真测试平台”、“道路交通智能测控、仿真与预警技术平台”。良好的设备和实验环境为完成项目的仿真实验、现场实验、数值计算奠定了良好的基础。为项目进行的数据获取、平台共享和外场试验提供了强有力的保障。

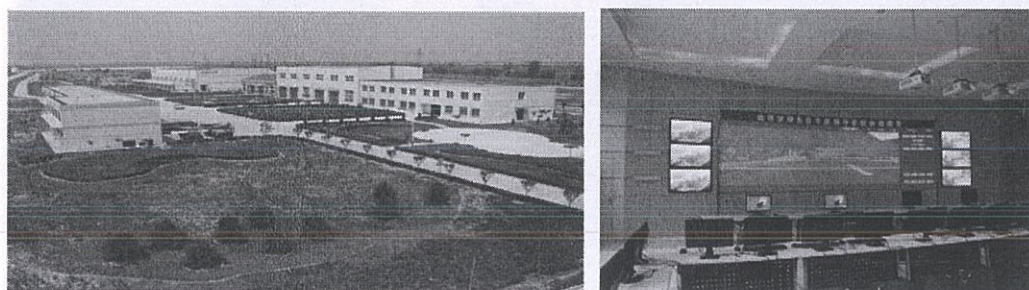


图 2.13 道路交通智能检测与装备工程研究中心



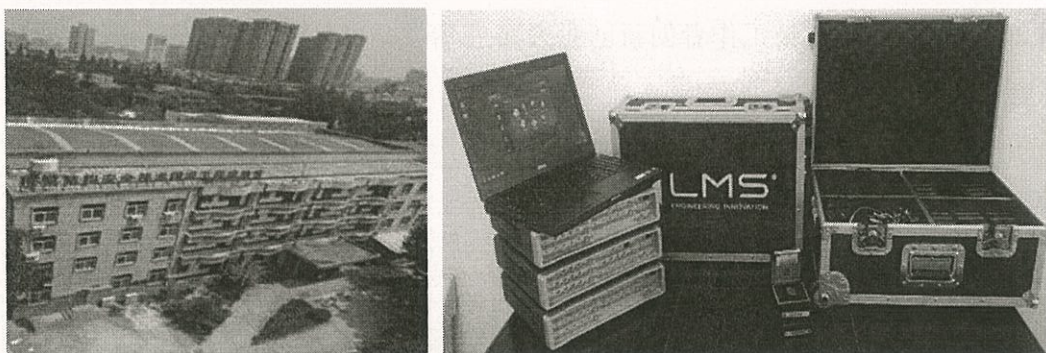


图 2.14 桥梁结构安全技术工程实验室

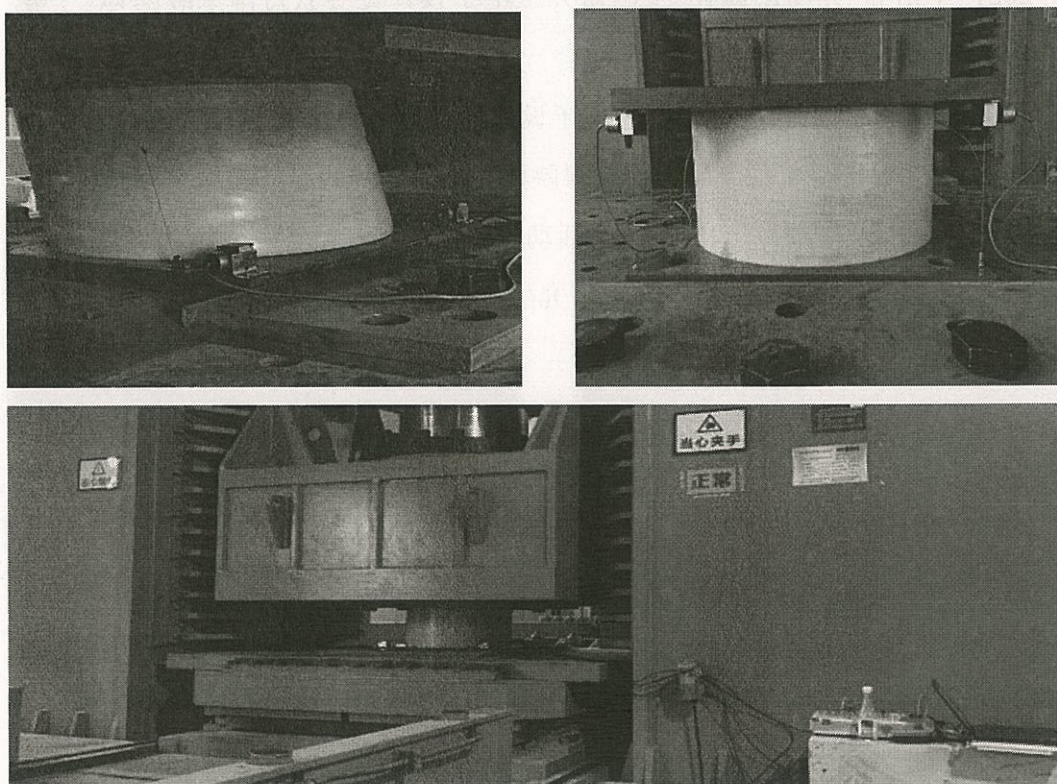
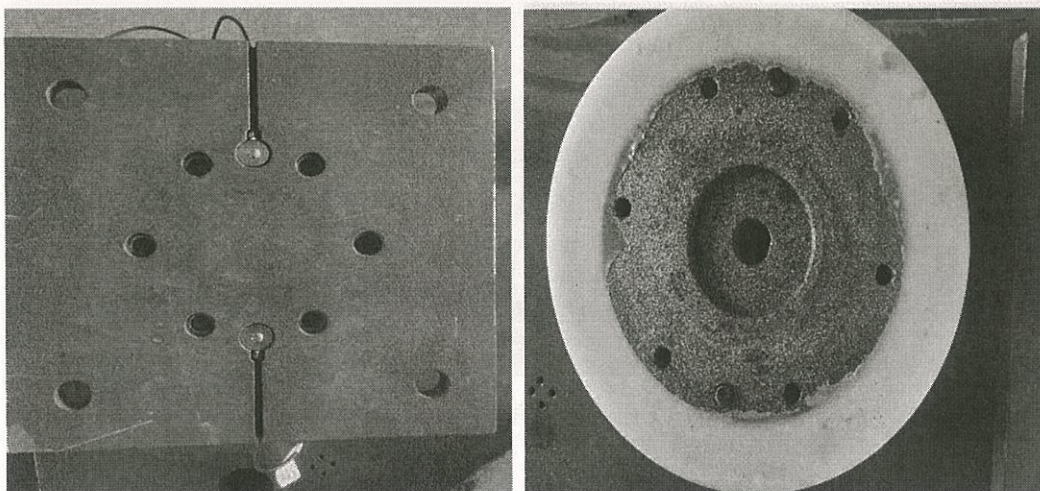


图 2.15 聚氨酯支撑装置位移传感器试验装置





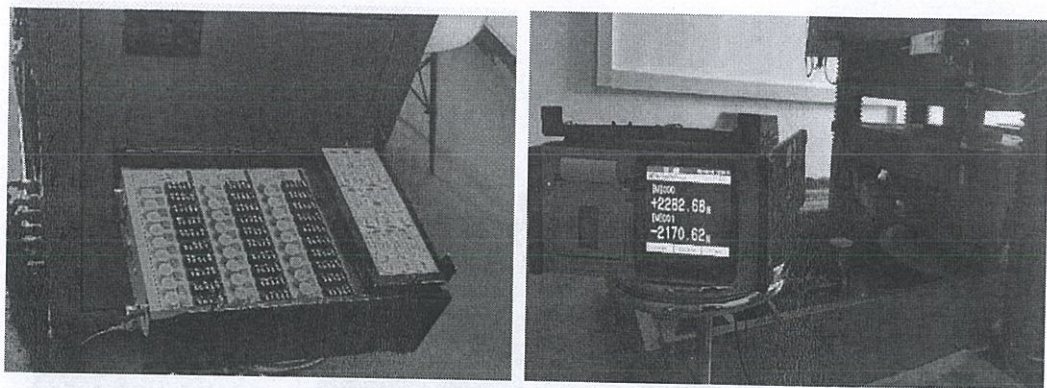


图 2.16 支撑装置力感器试验平台

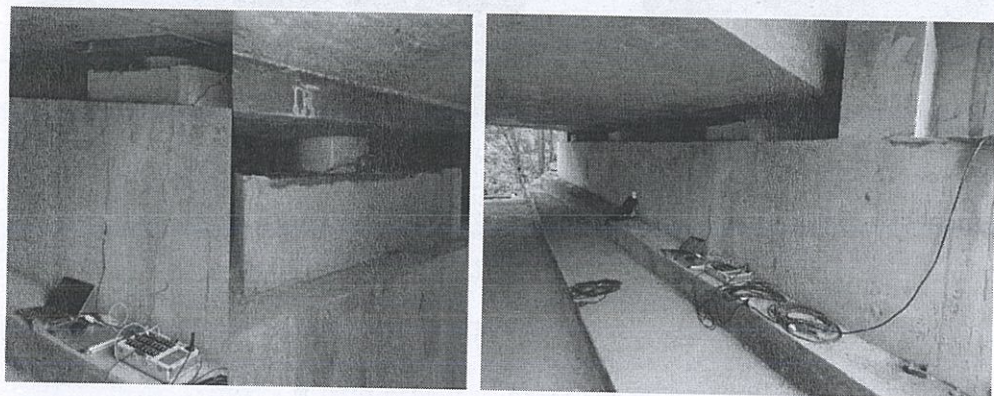
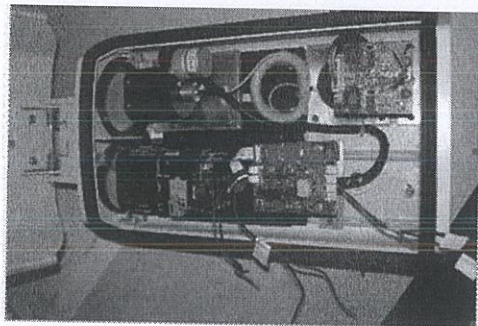


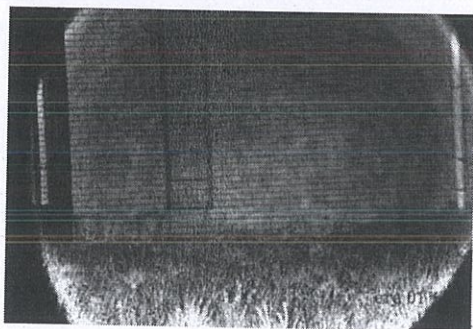
图 2.17 汉中宁强龙家沟桥梁工程(可测量型号, 现场监测)

项目研究团队根据研究需要自主研发了基础设施智能测控系统集成平台, 并对其环境及状态感知、数据融合、通信等关键技术进行了系统深入研究。**本项目组在长期的积累中已具备如下的实验设备:**

●近红外光谱激光照明成像装置: 实验室自行研制, 激光器采用普通 CCD 较为敏感的 850nm 波段, 最大出瞳功率 30W, 出瞳视场角可调, 采用光纤耦合, 装置如图 2.18(a)所示, 利用装置在夜间拍摄的目标图像如图 2.18(b)所示。可用于多模成像光学特性的实验研究。



(a)



(b)

图 2.18 主动照明成像装置和夜视图像



●机器视觉和图像处理实验装置（图 2.19）：实验室自行研制，有单目标定和双目成像方式，配以高速实时信号处理机，可完成激光靶标自动识别高速信号处理算法相关研究。

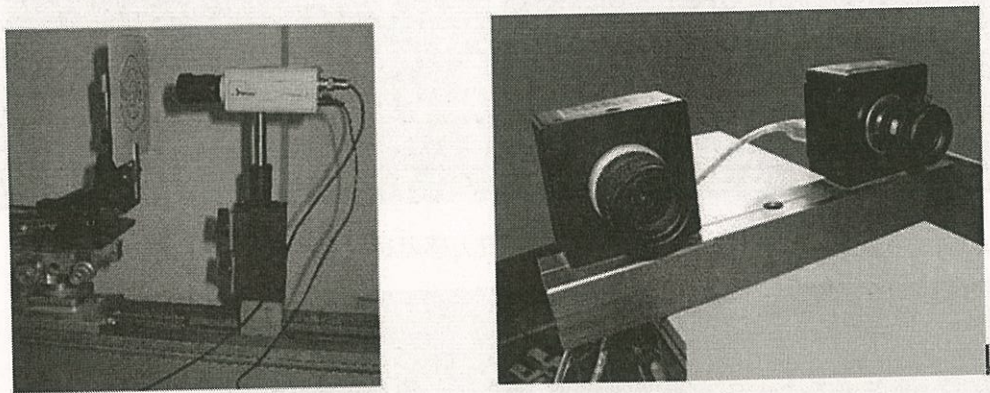


图 2.19 激光靶标光斑图像快速图像处理装置

●检测用半导体激光器稳恒功率控制系统：项目组自行研制专利设备，针对当前高精度检测对半导体激光器稳恒输出功率的严格要求，通过对半导体激光器 P-I 特性和温度特性的分析，提出一种多闭环的半导体激光器稳恒功率驱动和控制系统，系统利用单片机作为核心控制单元，通过对电流、功率、温度三个参数的控制，实现了半导体激光器的稳恒功率输出控制。

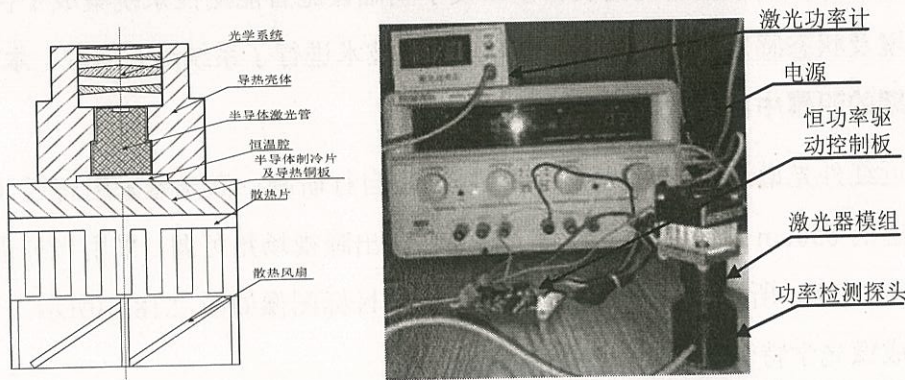


图 2.20 半导体激光器的功率驱动系统

●激光靶标测量和高速图像处理装置（图 2.21）：该装置为实验室自行研制，采用 DM642 高性能图像处理器，实现对激光光斑信息的实时解算，可以用在本项目中研究激光目标散射和大气湍流特性的研究。



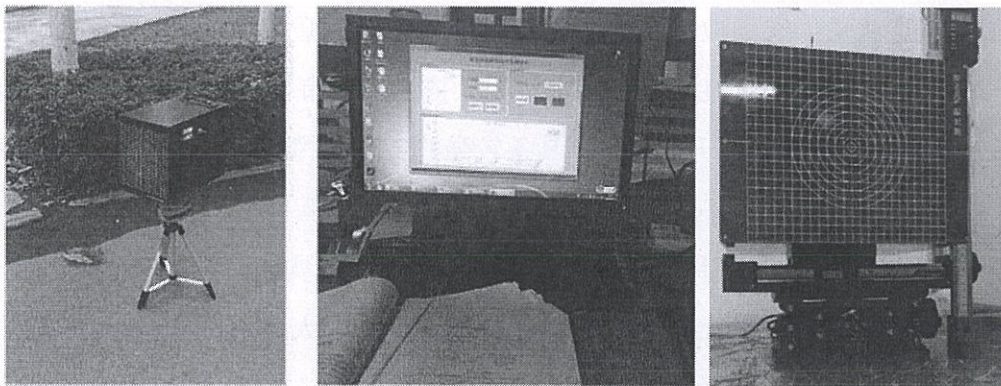


图 2.21 激光靶标光斑图像快速图像处理装置

●视觉成像质量检测装备：实验室自行研制，采用高速彩色 CCD 作为采集工具，辅以保护镜、偏振片、散热系统、标定软件和图像处理软件、观测架等，装置如图 2.22(a)所示，利用该装置在现场拍摄的目标实时图像如图 2.22(b)所示。该装置可用于复杂环境光学特性的前期研究和实验研究。

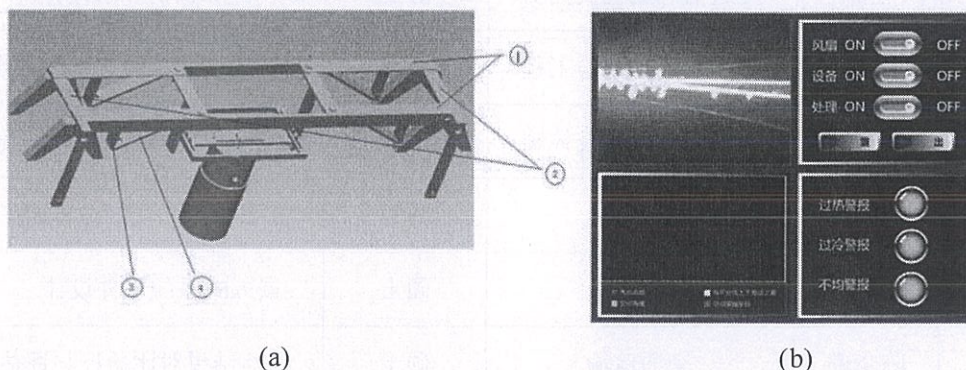


图 2.22 图像获取观测架及现场获取的焊接区图像

●光学照度仪、光功率计、偏振片、光谱分析仪器、逻辑分析仪器、购置仪器等，可完成光学参数的测量、电学参数的测量以及完成多模成像视觉生成相关实验研究,为改进产品结构、不断提高产品性能和研究开发新产品提供可靠的科学依据。

上述技术设备条件为本项目的完成提供了坚实的基础和可靠的保障。需要增加的仪器设备如高性能数据处理设备、信号采集卡、激光功率模拟试验模型、实验用氦氖激光器、外围器件及耗材等，由本项目申请经费来补充。

## 2.2.5 研究团队及协作情况

为开展本项目研究，组建了一支由桥梁工程、桥梁检测、结构分析、交通信息、自动化、嵌入式系统与智能感知等多专业人员组成的交叉研究团队，能够覆



盖“工程病害认知—现场检测校验—结构响应分析—多源数据融合—智能诊断—系统集成与示范验证”全过程研究需求。团队依托韩城市公路局、陕西交控桥隧有限公司和长安大学协同开展研究，具备较强的工程支撑能力、技术研发能力和成果转化条件。通过桥梁工程、桥梁检测、结构分析与智能感知算法协同，可有效提升本项目研究的工程针对性、诊断可靠性和成果可实施性。

项目组共 29 人，包含高级职称 4 人，中级职称 11 人，初级职称 3 人。其中博士 8 人，硕士 17 人，学士 4 人。除此之外，还配有多名博士研究和硕士研究生辅助项目实施，如表 2.2 所示。

表 2.2 项目研究生

| 序号 | 姓名  | 专业        | 学历 | 任务分工         |
|----|-----|-----------|----|--------------|
| 1  | 杜浩  | 交通信息工程及控制 | 博士 | 故障识别算法设计     |
| 2  | 张志杰 | 智能控制理论与工程 | 博士 | 多源监测数据融合算法实现 |
| 3  | 焦云梅 | 交通信息工程及控制 | 博士 | 伸缩装置状态评估模型搭建 |
| 4  | 贺东兴 | 自动化       | 博士 | 故障特征提取与指标计算  |
| 5  | 王杰  | 电子信息      | 硕士 | 嵌入式系统硬件设计    |
| 6  | 陈晓璐 | 交通运输      | 硕士 | 诊断结果对比验证与评估  |
| 7  | 郭焕焕 | 电子信息      | 硕士 | 嵌入式系统设计与调试   |
| 8  | 仝曦  | 电子信息      | 硕士 | 智能诊断模型训练与调试  |
| 9  | 杨睿  | 电子信息      | 硕士 | 嵌入式系统集成与功能测试 |
| 10 | 李颖  | 电子信息      | 硕士 | 监测数据预处理与样本构建 |

2.3 参考文献

[1] 陈昌柏. 模数式桥梁伸缩装置病害总结与预防策略[J]. 山西建筑, 2020, 46(18): 149 - 151.

[2] ANCICH E J, CHIRGWIN G J, BROWN S C. Dynamic anomalies in a modular bridge expansion joint[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006.

[3] NI Y Q, HUA X G, WONG K Y, et al. Assessment of bridge expansion joints using long-term displacement and temperature measurement[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2007, 21(2): 143-151.



- [4] 岳军, 周强, 吴鸿, 等. 桥梁大位移模数式伸缩装置智能监测系统研究[J]. 公路, 2024, 69(11): 125 - 130.
- [5] 文峰. 基于振动分析的模数式伸缩装置损伤识别研究[D]. 湘潭大学, 2022.
- [6] MIAO C Q, DENG Y, DING Y L, et al. Damage alarming for bridge expansion joints using novelty detection technique based on long-term monitoring data[J]. Journal of Central South University, 2013, 20: 226-235.
- [7] 邓扬, 李爱群, 丁幼亮, 孙鹏. 基于长期监测数据的大跨桥梁结构伸缩缝损伤识别[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(2): 336 - 341.
- [8] NI Y Q, WANG Y W, ZHANG C. A Bayesian approach for condition assessment and damage alarm of bridge expansion joints using long-term structural health monitoring data[J]. Engineering Structures, 2020, 204: 110520.
- [9] JIANG T Y, ZHANG Y W, WANG L, et al. Monitoring fatigue damage of modular bridge expansion joints using piezoceramic transducers[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3973.
- [10] LI J, YANG C, CHEN J. Sound damage detection of bridge expansion joints using a support vector data description[J]. Sensors, 2023, 23(7): 3564.
- [11] ZHANG X, CHEN Z, DING Y, et al. Progressive classifier mechanism for bridge expansion joint health status monitoring system based on acoustic sensors[J]. Sensors, 2023, 23(11): 5090.
- [12] 李瑞琪, 宋晓东, 陈素华, 等. 基于有限元分析的模数式伸缩缝振动噪声研究[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025.
- [13] 叶婉玲, 饶瑞. 振动信号数据预处理方法[J]. 广州建筑, 2024, 52(05): 11 - 15.
- [14] 李雅鑫. 少样本条件下基于声振信息融合的轴承故障诊断研究[D]. 中南大学, 2024.
- [15] DONG Y, WANG D, PAN Y, et al. Fault detection of in-service bridge expansion joint based on voiceprint recognition[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2024.
- [16] 白健. 基于信号预处理与模型融合的故障诊断研究[D]. 太原理工大学, 2024.
- [17] 丁勇, 韩凌霞, 吕建华, 等. 模数式桥梁伸缩缝疲劳寿命分析与结构优化[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 265 - 275.
- [18] 交通运输部. 公路桥梁支座和伸缩装置养护与更换技术规范: JTG/T 5532—2023[S].
- [19] 交通运输部. 公路桥梁伸缩装置通用技术条件: JT/T 327—2016[S].
- [20] 交通运输部. 公路桥梁伸缩装置试验系统: JJG(交通)161—2020[S].
- [21] 丁勇, 韩凌霞, 吕建华, 诸葛萍, 王博, 俞丹波. 模数式桥梁伸缩缝疲劳寿命分析与结构优化. 中国公路学报, 2021, 34(2): 265-275. DOI: 10.19721/j.cnki. 1001-7372. 2021.02.015.
- [22] 俞俊勇, 王一丹, 杨永超, 等. 融合无人机贴近摄影和自适应 DIC 技术的大跨桥梁振动参数快速识别[J]. 中国公路学报, 2025, 38(9): 283 - 293.



### 三、实施方案

#### 3.1 拟解决的关键问题

混凝土桥梁模数式伸缩装置(伸缩缝)是桥梁结构中承受车辆冲击最为频繁、服役环境最为复杂的关键构件之一,其运行状态直接关系到桥梁整体安全性和行车舒适性。在长期运营过程中,伸缩装置同时受到车辆荷载反复冲击、温度变形频繁变化、环境侵蚀及材料老化等多种因素的共同作用,故障具有早期特征微弱、发生部位隐蔽、失效后果严重等特点。当前桥梁伸缩装置检测仍以人工巡查和定期检查为主,缺乏连续在线监测和智能预警手段。针对上述工程实际需求,本项目围绕“自感知监测—多源信息融合—智能诊断与预测”的总体技术路线,拟重点解决制约伸缩装置早期故障诊断工程应用的以下三个关键问题。

##### **(1) 多因素耦合作用下模数式伸缩装置早期故障机理不清、特征难以稳定识别的问题**

在实际运营条件下,模数式伸缩装置不仅承受车辆轴载和车速变化引起的冲击作用,还受到昼夜及季节温差变化导致的反复伸缩变形,同时叠加雨水侵蚀、杂物堆积及构件老化等不利因素,呈现出多因素叠加、随机性强的服役特征。早期故障阶段,伸缩装置常出现中梁或横梁连接部位轻微松动、焊缝微裂纹萌生及局部刚度退化等问题,此类损伤尚未引起明显的几何或功能失效,但在车辆反复冲击作用下具有快速演化为严重病害的风险。

在现有工程检测与研究中,对伸缩装置早期损伤的形成机理、演化规律及其在监测信号中的响应特征仍缺乏系统认识。同时,早期故障引起的振动或声学响应变化幅度较小,易受温度变化、交通流量及车辆类型差异等工况因素影响,导致难以建立稳定、可靠的早期故障表征指标。因此,有必要系统研究多因素耦合作用下伸缩装置早期故障的机理及其多源监测信号特征,为后续自感知监测和智能诊断提供理论依据和特征基础。

##### **(2) 多源异构传感信息获取与融合条件复杂,诊断结果稳定性不足的问题**

桥梁伸缩装置运行状态可由振动、声学等多种物理信息共同反映,车辆通过伸缩装置瞬间产生的冲击信号中蕴含着丰富的结构状态信息。但在工程应用条件下,不同类型传感器在采样频率、信号幅值、噪声特性及时间同步等方面差异明显,现场环境复杂、干扰因素多,导致监测数据质量和一致性难以保证。



现有研究多集中于单一信号或单一传感方式的损伤识别,缺乏面向长期工程运行的多源协同诊断方案。多源信息若简单叠加或独立分析,易导致诊断结果不稳定,甚至出现相互矛盾的判断结论。因此,本项目需要重点解决面向桥梁伸缩装置工程应用场景的多源异构传感信息高质量获取、信号调理与融合分析问题,构建能够在复杂工况和长期运行条件下稳定反映伸缩装置状态变化的多源信息融合诊断机制。

### **(3) 智能诊断与预测模型工程适应性不足,难以直接服务养护决策的问题**

近年来,数据驱动的智能诊断方法在故障识别方面展现出一定优势,但桥梁伸缩装置故障具有样本数量有限、故障类型不均衡、工况差异显著等特点,直接套用通用模型往往面临泛化能力不足、对工况变化敏感等问题。同时,部分模型诊断结果缺乏工程可解释性,难以明确对应的故障类型、发生部位及发展趋势,无法直接指导养护决策。

此外,伸缩装置监测系统需在户外复杂环境下长期稳定运行,对算法的实时性、计算效率及系统可靠性提出了较高要求。因此,本项目亟需构建面向桥梁伸缩装置实际运行工况的智能诊断与预测模型,在少样本和复杂工况条件下实现稳定可靠的故障识别与发展趋势预测,并将诊断结果转化为工程人员可理解、可执行的风险等级和预警信息,为后续养护决策和预防性维护提供直接依据。

综上所述,本项目围绕混凝土桥梁模数式伸缩装置早期故障诊断的工程实际需求,重点针对早期故障机理与特征表征、多源信息融合诊断以及智能预测模型工程化应用等关键问题开展研究,通过协同突破上述难点,构建适用于实际桥梁运营环境、具备工程可部署性和长期运行能力的伸缩装置自感知监测与早期故障诊断技术体系,实现伸缩装置病害由“事后维修”向“主动预警、科学管养”的转变。

### **(4) 少样本条件下故障识别精度不足的问题**

在桥梁伸缩装置早期故障诊断过程中,少样本条件下故障识别精度不足是本项目需重点解决的关键技术问题之一。在役桥梁伸缩装置早期故障具有发生概率低、演化过程隐蔽、可获取现场标注样本有限等特点,导致典型故障样本总体数量不足;与此同时不同类型故障在形成机理、响应形式及出现频次上存在差异,易造成样本分布不均衡。另一方面,桥梁伸缩装置长期服役于车辆荷载、环境温度变化和结构耦合振动等复杂工况下,监测信号中多源响应相互叠加,故障特征



易与环境扰动、工况波动相混叠，增加了早期微弱异常特征提取与有效辨识的难度。在此条件下，传统依赖大量标注样本的诊断模型易出现训练不充分、特征学习能力不足及跨工况泛化性能下降等问题，难以满足工程现场对早期故障精准识别的需求。因此，面向少样本、弱特征、强干扰条件下的高可靠故障诊断方法研究，是本项目亟需突破的关键问题之一。

3.2 主要研究内容及实施方案

本项目在研究伸缩装置故障产生多场耦合作用机理的基础上，分析伸缩装置故障的表征特征，拟提出利用振动传感器、声音传感器等，应用多传感器融合技术，实现对桥梁伸缩装置故障信息的自动采集和传输。将传感器所采集的数据上传至上位机后，处理数据从而确保数据质量，针对多源数据开展数据增强与样本重构，提取有用的特征（包括振动信号，声音信号等），设计一种基于深度学习的预测算法，以实时检测传感器数据并进行预测。所设计的微振动智能检测仪能够在确保桥梁的安全运营并减少桥梁维护成本的同时，高效地对桥梁伸缩装置进行检测，所获取的检测数据精确度高，能够实现大范围桥梁伸缩装置高可靠性的检测。主要包括以下方面的内容：

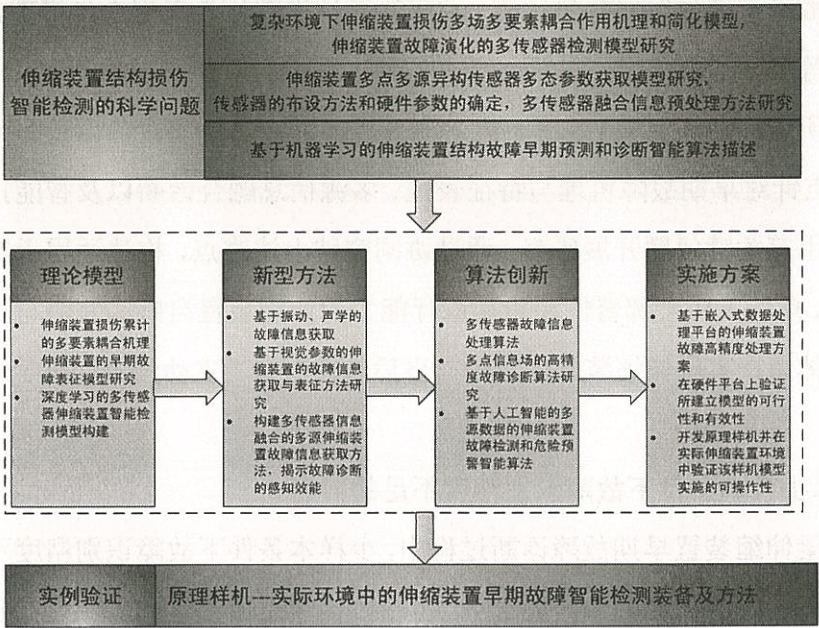


图 3.1 项目研究内容总体图

(1) 伸缩装置故障产生机理研究及故障类别特征分析

桥梁运营过程中，交通流量提升与重载车辆增多导致冲击作用增强，伸缩装置关键构件易发生疲劳损伤、连接松动等问题，从而显著缩短服役寿命；同时昼



夜和季节温差导致伸缩装置长期处于频繁伸缩变形状态，易诱发早期损伤；此外雨雪水渍、泥沙杂物侵入、环境腐蚀等长期作用会加剧材料老化与结构退化。

本项目拟建立“车辆冲击—温度变形—环境侵蚀”多场耦合作用下的故障形成与演化分析框架，针对典型故障模式（如构件松动、焊缝微裂纹、局部刚度退化、锚固区损伤等）开展疲劳试验与环境试验，构建损伤、退化模型与故障类别特征库，形成故障表征模型与诊断判据，为后续伸缩装置监测指标选取、传感器布设方案设计、多源信息特征提取以及智能诊断模型构建提供理论基础和工程发现依据。

## **(2) 伸缩装置故障演化的多源信息获取关键技术研究。**

监测数据是伸缩装置故障检测与预测的基础，但在工程实际中，伸缩装置可观测指标多、作用因素复杂，若采用全量、多点、长时间的数据采集方式，容易导致系统结构复杂、数据冗余、运行成本增加，反而不利于工程长期稳定应用。因此，如何在保证诊断有效性的前提下，实现关键状态信息的高质量获取，是伸缩装置早期故障诊断面临的重要问题。

针对上述工程需求，本项目结合伸缩装置结构受力特点、运动约束条件及典型工况特征，研究“关键测点—关键指标—关键工况”的多源信息获取方法，重点采集能够反映故障演化过程的振动、冲击等力学响应信息，并根据需要引入温度等环境参数，避免无效或冗余信息采集，提升监测系统的工程适用性和可靠性。

在此基础上，针对多源异构传感数据在采样频率、信号幅值、噪声特性及时间同步等方面存在差异的问题，研究多源数据的同步采集、信号调理与预处理方法，通过去噪、归一化及特征筛选等手段，提高数据质量和一致性。进一步开展多源信息融合分析研究，综合利用信息融合与模式识别等方法，将来自不同传感器的多维信息转化为对伸缩装置运行状态具有更高置信度的综合表征结果，实现对伸缩装置早期故障的稳定感知与可诊断。

通过上述研究，形成面向工程应用的多源信息获取与融合技术方案，为后续智能诊断算法构建和系统工程化实现提供连续、可靠的数据支撑。

## **(3) 伸缩装置故障检测系统硬件设计关键技术研究**

为保障伸缩装置故障诊断系统在复杂工程环境下的长期稳定运行，本项目围绕多源传感信息获取与处理需求，开展伸缩装置故障检测系统硬件设计与工程化



应用研究，重点解决在车辆冲击频繁、环境干扰强及长期户外运行条件下，系统稳定性与可靠性不足的问题。

项目将结合伸缩装置结构特点和现场布设条件，研究多源传感器的系统集成与优化布设方法，合理配置传感器类型和数量，确保在不影响桥梁正常运营和结构安全的前提下，稳定获取反映伸缩装置运行状态变化的关键信息。在硬件系统设计方面，围绕数据采集与传输全过程，重点研究信号调理与抗干扰技术，通过放大、滤波、隔离和屏蔽等措施，提高系统对复杂环境噪声和电磁干扰的抑制能力。同时，针对多传感器协同工作的需求，研究多源数据同步采集与一致性控制方法，确保不同信息源在时间和空间上的协调性，提高融合分析结果的可靠性。在系统运行层面，结合工程长期运行需求，研究硬件系统的容错与自诊断机制，提升系统在局部异常或单点故障情况下的持续运行能力，增强整体系统的工程适应性和运行可靠性。

通过上述研究，形成适用于桥梁伸缩装置工程现场的故障检测硬件系统设计方

案，为多源信息融合分析和智能诊断算法的稳定运行提供可靠的硬件支撑。

#### **（4）基于人工智能的多源传感器数据处理与故障识别算法研究**

在多源信息获取和硬件系统稳定运行的基础上，本项目围绕桥梁伸缩装置早期故障识别与状态预测需求，开展多源传感数据处理与智能诊断算法研究，重点解决复杂工况和少样本条件下故障识别稳定性不足的问题。

针对工程监测数据中普遍存在的噪声干扰、工况差异大和数据质量不均衡等特点，研究多源数据的预处理与特征构建方法，通过异常数据剔除、趋势项消除和特征归一化等手段，提高数据一致性和可用性。在此基础上，融合时域、频域、时频域及多传感器关联特征，提高早期微弱故障识别能力，构建能够综合反映伸缩装置运行状态变化的融合特征表达，为智能诊断提供有效输入。

针对现场故障样本稀缺、样本分布不均衡及复杂工况下故障特征易混叠等问题，项目拟围绕少样本条件下的智能诊断算法开展针对性研究。重点通过多源感知信息融合、特征增强、样本扩增、迁移学习/少样本学习等方法，提高模型对早期微弱故障的辨识能力和跨工况泛化能力

在智能诊断算法方面，结合伸缩装置运行数据的时间序列特征，研究适用于长时间序列建模的深度学习方法，实现对伸缩装置运行状态的异常识别与短期发



展趋势预测。同时，针对实际工程运行中温度变化、交通流波动等工况差异因素，引入相关工况信息作为辅助特征，提高模型对复杂运行环境的适应能力和诊断结果的稳定性。在算法工程化应用层面，重点关注模型的计算效率、稳定性和可部署性，研究面向工程应用的诊断结果输出方式，将智能分析结果转化为工程人员易于理解和使用的状态评估指标、风险等级或预警信息，为桥梁伸缩装置的养护决策和预防性维护提供直接技术支撑。

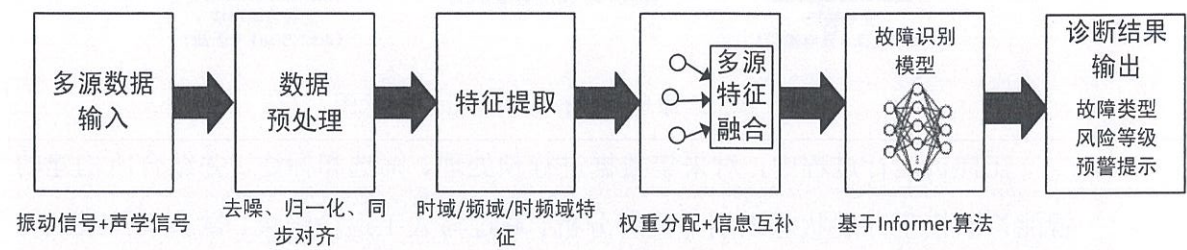


图3.2 深度学习模型结构流程图

通过上述研究，形成面向工程应用的多源数据智能诊断与预测方法，为伸缩装置故障诊断系统的整体性能提升和工程示范应用奠定算法基础。

### （5）伸缩装置故障诊断原理样机设计、设备调试与性能测试

在前述多源信息获取、硬件系统设计及智能诊断算法研究的基础上，本项目将开展伸缩装置故障诊断原理样机的集成设计与工程化实现，重点验证所构建技术体系在实际运行条件下的可行性、稳定性和诊断效果。同时，结合工程应用需求，开展模型轻量化设计与嵌入式适配研究，从模型结构、参数规模、推理效率和资源占用等方面进行优化，提升算法在边缘端和嵌入式硬件上的部署可行性，为后续原理样机集成与现场应用验证提供支撑。

项目将对多源传感器、数据采集与传输单元以及诊断分析模块进行系统集成，完成伸缩装置故障诊断原理样机的设计与调试，并依托试验条件及实际工程场景开展在线监测应用。通过采集伸缩装置运行过程中的多源监测数据，构建覆盖不同工况和典型状态的数据集，为系统性能评估和算法验证提供基础数据支撑。



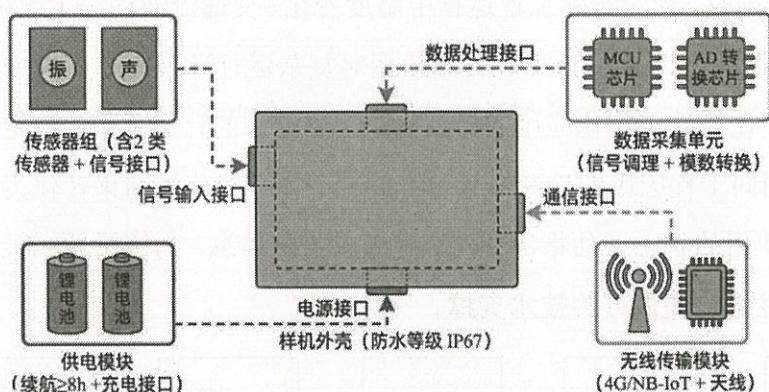


图3.3 原理样机核心模块拆解示意图

在样机运行过程中，对采集数据进行预处理、筛选和标注，并结合所构建的智能诊断模型开展状态识别与预警分析。通过与人工巡检结果、试验条件或既有检测手段的对比验证，系统评估原理样机在不同工况和不同故障模式下的诊断准确性、稳定性以及误报和漏报情况，形成系统性能测试与验证结果。

#### (6) 成果凝练与推广应用研究

结合项目研究与工程示范成果，形成面向在役混凝土桥梁模数式伸缩装置的研究总结报告、参数与指标体系、诊断方法、原理样机及手册式应用指南。进一步梳理项目成果对桥梁伸缩装置预留、安装、监测布设和后期养护的指导作用，形成适用于推广应用和工程实践参考的技术成果。

### 3.3 技术路线

本项目面向混凝土桥梁模数式伸缩装置在长期服役过程中早期故障难以发现、诊断手段不足的工程实际问题，以工程应用为导向，构建“机理分析—特征提取—多源融合—智能诊断—系统集成—工程验证—推广应用”相结合的技术路线，逐步形成适用于在役桥梁条件下的伸缩装置自感知监测与早期故障诊断技术体系。

#### (1) 伸缩装置早期故障机理分析与特征认知

首先，针对混凝土桥梁模数式伸缩装置在实际运营过程中承受车辆冲击、温度变形及环境侵蚀等多因素共同作用的服役特点，开展伸缩装置早期故障形成机理与演化规律研究。通过分析典型运行工况下伸缩装置关键构件的受力特征和变形行为，明确构件松动、焊缝微裂纹、局部刚度退化等早期故障的产生原因及其发展趋势。



在此基础上,研究不同类型早期故障在结构动力响应中的表现形式,识别能够反映伸缩装置状态变化的关键响应特征,为后续监测指标选择、信息感知方式确定以及诊断模型构建提供理论依据。

#### (2) 基于多源信息的伸缩装置运行状态感知

在故障机理与特征认知的基础上,面向工程现场应用需求,构建以多源信息采集为核心的伸缩装置运行状态感知路径。结合伸缩装置结构特点和工程布设条件,合理确定监测位置和监测内容,重点获取能够反映伸缩装置运行状态和早期故障演化过程的振动、冲击等力学响应信息,并根据需要引入相关环境信息作为辅助参数。

通过构建面向工程应用的多源信息采集方案,实现对伸缩装置运行状态的连续监测,为后续数据处理与诊断分析提供基础数据支撑。

#### (3) 多源监测数据预处理与特征提取

针对工程监测数据中普遍存在的噪声干扰、工况差异大和数据质量不均衡等问题,开展多源监测数据的预处理与特征提取研究。通过数据清洗、异常剔除和趋势项处理等方法,提高监测数据的一致性和可靠性。

在此基础上,从时域、频域及时频域等多个角度提取能够反映伸缩装置运行状态变化的特征信息,并对不同来源的数据进行统一表达和规范化处理,为多源信息融合和智能诊断提供高质量输入。

#### (4) 多源信息融合与智能诊断分析

在完成多源数据特征提取的基础上,研究多源信息融合方法,将来自不同传感信息源的特征进行综合分析,形成对伸缩装置运行状态更为全面、可靠的综合表征结果。

进一步结合时间序列分析和智能诊断方法,构建伸缩装置早期故障识别与发展趋势预测模型,实现对异常状态的自动识别和风险评估。通过将诊断结果转化为工程人员易于理解的状态指标和预警信息,使诊断分析结果能够直接服务于桥梁伸缩装置的养护决策。

#### (5) 系统集成与工程示范验证

在前述研究基础上,开展伸缩装置故障诊断系统的集成与工程化应用研究,将多源信息采集、数据处理与智能诊断等功能进行系统整合。依托实际桥梁工程



条件，开展系统部署与示范应用，对技术路线的可行性、稳定性和工程适用性进行验证。

通过对比分析系统监测结果与现场检查情况，对诊断效果进行评估与优化，形成成熟、稳定、可推广的伸缩装置早期故障诊断技术方案。

### 3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接

项目核心成果包括伸缩装置故障检测系统（硬件+软件）、多源传感器融合数据采集技术、基于 Informer 算法的深度学习故障诊断模型及配套故障特征数据库，与公路交通领域技术改造需求、桥梁建设与养护基本建设计划高度契合，具备明确的应用场景和成熟的落地基础。项目成果可直接替代传统人工巡检模式，适配国省干线公路、高速公路、市政桥梁等不同场景，尤其针对韩城市公路局辖养的 148.026 公里干线公路（含 87 座桥梁）、陕西交控集团 6000 多公里高速公路（含西安绕城高速、西长高速等重点路段）的伸缩缝监测需求，无需重构现有信息化架构即可实现功能升级，与既有路网智能巡检系统、监控平台的通信协议和数据格式完全兼容。

在现有技术改造衔接方面，项目成果可深度融入普通国省干线公路养护工程、327 国道道路安全提升工程等依托项目，在伸缩缝检修环节加装振动、声学、视觉多源传感器，替换传统人工目视检测与抽样破损检查模式，结合项目达到的  $\geq 97\%$  故障识别率和 1mm 测量精度，可精准捕捉隐蔽性、早期性故障，避免类似广澳高速伸缩缝型钢断裂引发的安全事故。同时，通过对现有红外热成像、激光扫描等无损检测设备进行算法升级和数据预处理模块集成，可提升复杂环境下的故障检测抗干扰能力；依托 4G DTU 无线通信模块实现检测数据实时传输，解决传统设备“数据孤岛”问题，配合韩城市公路局将伸缩缝故障检测数据纳入公路养护数字化档案，可显著节约人工检测成本，降低养护总成本。

在基本建设计划衔接上，项目成果可纳入新建桥梁设计与施工环节，在预制装配式桥梁建设中预留传感器安装基座、通信线路预埋通道及锂电池供电接口，实现“出厂预装、现场调试”，与陕西交控桥隧有限公司年产 3 万延米的伸缩缝生产基地形成一体化生产能力，提升施工效率以上。同时，结合“百里绿色廊道”建设、智慧公路示范工程，将伸缩缝故障预警信号与道路可变信息板、路网应急指挥系统联动，实现“故障预警-交通疏导-应急抢修”闭环管理，在 327 国



道安全提升、公路安全设施精细化提升等工程中，构建“多维度、全场景”桥梁安全监测体系。针对桥梁隧道集中的沿黄公路、山区高速公路路段，采用“单点检测+区域组网”模式，可支撑路网级养护资源优化配置，减少交通占道检测时间，降低对公共交通资源的占用。

项目成果的成熟性得到前期技术积累和工程实践验证：长安大学已具多项授权发明专利和实用新型专利的技术储备，前期研发的激光基准桥梁挠度监测系统、建筑结构三维变形激光检测装置已成功应用于榆林三馆建筑结构变形监测、东沙文体馆基坑变形监测等工程，并获得陕西省科技工作者创新创业大赛金奖；韩城市公路局“侯亚民公路养护创新工作室”已完成多项公路养护技术革新项目，具备成熟的现场应用与运维能力。从市场需求来看，我国现有各类桥梁超100万座，伸缩缝年均更换率达8%-12%，单条伸缩缝更换成本5万-20万元，全国每年伸缩缝养护支出超百亿元，项目成果可有效缩短故障处置时间50%，延长伸缩缝使用寿命30%，市场需求刚性且迫切。

后续衔接实施将分三阶段推进：在示范期，结合依托工程，完成桥梁的检测系统加装与技术改造，验证成果适配性；推广期在陕西省内高速公路网、国省干线公路网扩大应用范围，完成桥梁技术改造与新建桥梁预装，形成地方技术标准；之后进入产业化期，联合伸缩缝生产企业实现“智能伸缩缝”量产，对接全国公路养护市场。在成果落地应用方面，项目拟通过依托工程示范应用，逐步总结不同桥梁条件下的部署方式、运行效果和养护适配模式，形成可推广的应用方案和手册式指南。相关成果定位于服务桥梁养护管理和工程推广应用，不作为标准或强制性规范使用。

### 3.5 有关技术经济指标

本项目围绕混凝土桥梁模数式伸缩装置早期故障监测与诊断需求，形成一套面向工程应用的自感知监测与智能诊断技术成果。相关技术性能指标和技术经济指标具体如下。

#### （1）技术性能指标

项目形成的伸缩装置故障监测与诊断系统在技术性能方面应具备以下主要技术性能：

- ①适用于在役混凝土公路桥梁模数式伸缩装置的状态感知与早期故障诊断；



- ②具备振动、声学及必要环境信息的自动采集、传输和处理能力；
- ③能够识别构件松动、焊缝微裂纹、局部刚度退化、锚固区损伤等典型早期故障状态；
- ④具备较好的复杂工况适应能力和现场运行稳定性；
- ⑤通过工程对比验证，形成识别准确率、误报率、漏报率等量化评价结果；
- ⑥系统结构紧凑，嵌入式端运行稳定，便于现场安装部署，不影响桥梁正常使用和交通运行。

## (2) 技术经济指标

- ①可减少对高频人工巡检的依赖，提高伸缩装置状态检测的连续性和时效性；
- ②可通过早期识别和预防性维护降低突发性病害引发的应急处置频次；
- ③结合依托工程示范应用，对误报率、漏报率、维护工作量变化和成本节约效果开展量化测算；
- ④形成适用于桥梁养护管理部门使用的诊断方法和应用指南，提高成果的推广应用价值。

综合而言，本项目技术经济指标不单纯追求过高数值，而强调基于工程验证形成真实、可核验、可推广的评价结果，以增强项目成果的可信度和工程说服力。在技术指标设置上，除满足伸缩装置早期故障识别与状态判别要求外，还将重点考虑模型工程部署需求。诊断模型应兼顾识别精度与运行效率，在少样本、复杂工况条件下具备较好的准确率和泛化能力，同时满足一定的数据处理时效性、故障响应及时性、模型轻量化程度及嵌入式硬件适配要求，控制误报与漏报水平，支撑后续原理样机集成和现场工程验证。



## 四、项目承担单位及参加单位概况

### 4.1 单位概况

#### (1) 陕西交控桥隧有限公司（原陕西高速桥梁伸缩缝工程有限公司）

公司成立于 2005 年 2 月，是陕西交控集团下辖全资子公司。公司注册资本 3000 万元，经营范围覆盖金属构件的加工和销售、支座橡胶类产品的销售，新型材料的研发、生产与销售，桥梁结构的加固和维修、公路管理与养护、建筑工程施工等。公司设综合管理部、财务审计部、市场营销部、生产管理部、陕西交控桥隧高性能产品制造基地 5 个部门。其交控桥隧高性能产品制造基地，位于陕西省渭南市华州区高塘镇，生产厂房四千平方米。公司为西北地区规模较大专业生产桥梁伸缩缝装置的企业；可以生产和加工各型单缝、双缝、多缝及异型缝，形成年生产安装 2-3 万米桥梁伸缩装置的生产规模。

公司自成立以来已经为延安-安塞高速公路、西安机场高速公路、西安-汉中高速公路、黄陵-延安高速公路、勉宁高速公路生产和安装桥梁伸缩装置数万米。并承担了西安-宝鸡、西安-潼关高速公路桥梁伸缩装置的维修及更换任务。因其产品质量可靠，安装专业水平高，得到了业主单位的广泛好评。其始终坚持科学管理、技术先进、质量为本、顾客满意的方针；力为我国公路桥梁工程建设做出了贡献。

#### (2) 陕西高速公路工程试验检测有限公司

陕西高速公路工程试验检测有限公司是陕西交控集团下属的高新技术企业。公司前身系 1987 年组建于陕西三原的西安至三原一级公路监理工程师中心试验室，是我国第一家按 FIDIC 模式设立的公路工程试验室。2004 年 1 月，正式注册成立具有独立法人资格的有限公司，注册资本 5000 万元。公司建有独立、现代化的试验室 9000 平方米，现场检测道路、桥梁、岩土、隧道、交通工程等试验场十余处，拥有各类先进的仪器设备 2200 余台（套），可满足公路、铁路、建筑、市政、机电和环境工程试验检测。公司旗下有陕西高速公路工程咨询有限公司、陕西恒通工程咨询有限责任公司、陕西交控长通信息技术有限公司、陕西高速星展科技有限公司、陕西交控桥隧有限公司、陕西交控飞行技术有限公司、陕西交控数字科技有限公司 7 家权属公司，华南、华东、丝路、山东 4 家省外分公司。业务领域已覆盖陕西、海南、福建、青海、广东、山东等 32 个省、市、自治区。



### (3) 韩城市公路局

2016年一月由陕西省渭南公路管理局韩城管理段整体划转成立。主要负责韩城境内国省干线公路的养管、统计、路产保护工作；管理、使用公路养护资金、国有资产；紧急救援、应急救援和路网监控调度等公路保畅工作，同时做好科技进步和信息化建设等工作。系公益性一类事业单位。现有在册职工50人，借调13人，内设7个科室、2个道班、10个交通流量观测站、1个养护中心。目前，管辖养护韩城境内G108、G327干线公路及S201沿黄公路共计148.026公里，其中一级公路61.638公里，二级公路63.839公里，三级公路22.549公里。辖有桥梁16233.71延米/87座，隧道5120m/4座，涵洞246道。

### (4) 长安大学

直属国家教育部，是国家首批“211工程”重点建设大学、国家“985优势学科创新平台”建设高校、国家“双一流”建设高校。学校现有9个一级学科博士点，33个一级学科硕士点。有9个博士后科研流动站。工程学、地球科学、材料科学、环境科学与生态学等4个学科进入ESI全球前1%。现有82个本科专业，其中23个专业入选国家“双万计划”一流建设专业，17个专业通过国家工程教育认证。学校稳居中国大学百强，土木与交通学科位列U.S. News全球大学第44名，被誉为公路交通人才培养的“黄埔军校”、科技创新的“金名片”。学校设有23个学院（系），具备覆盖工学、理学、管理学、经济学、哲学、法学、文学7大门类，贯通学士、硕士、博士教育培养全过程的学位授予体系。新时代面向国家重大战略，设立了现代交通研究院、秦岭生态环境研究院、黄河研究院、川藏铁路工程研究院、杭州研究院和雄安现代产业研究院等一批实体研究院。现有中国科学院、中国工程院、新加坡工程院院士4人，教授、副教授1400余人，其中博士生导师366人、硕士生导师1041人。拥有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。

## 4.2 技术力量及人员构成

项目组已形成桥梁工程、结构分析、传感监测、嵌入式开发与智能诊断交叉融合的研究基础，具备从故障机理分析、监测方案设计、算法研发到现场测试与工程验证的全过程实施能力，可为本项目顺利推进和成果落地提供有力支撑。

主要参与人员名单如下表：



| 姓 名 | 单 位                      | 性别 | 年龄 | 技术<br>职称 | 专业             | 在项目中担任<br>具体工作      |
|-----|--------------------------|----|----|----------|----------------|---------------------|
| 王海渊 | 陕西高速公路<br>工程试验检测<br>有限公司 | 男  | 46 | 正高级工程师   | 交通工程           | 项目总体规划              |
| 宋世杰 | 陕西交控桥<br>隧有限公司           | 男  | 52 | 副高级      | 道路运输           | 软件设计与<br>调试         |
| 侯亚民 | 韩城市公路<br>局               | 男  | 50 | 副高级      | 桥梁工程           | 项目总体负<br>责          |
| 王伟  | 陕西交控桥<br>隧有限公司           | 男  | 43 | 中级       | 交通工程<br>(机电工程) | 各单位协调<br>与资源统筹      |
| 张红维 | 韩城市公路<br>局               | 女  | 49 | 正高级      | 桥梁工程           | 现场统筹                |
| 张喆  | 陕西交控桥<br>隧有限公司           | 男  | 30 | 工程师      | 公路工程           | 现场检测实<br>施与数据采<br>集 |
| 耿兰  | 韩城市公路<br>局               | 男  | 37 | 中级       | 道路工程<br>(路面)   | 现场检测后<br>勤保障        |
| 王会峰 | 长安大学                     | 男  | 48 | 正高级      | 交通工程<br>(机电工程) | 硬件设计与<br>调试         |
| 高荣  | 长安大学                     | 男  | 37 | 副高级      | 交通工程<br>(安全设施) | 样机调试                |
| 辛向阳 | 陕西交控桥<br>隧有限公司           | 男  | 44 | 中级       | 土木工程           | 桥梁结构分<br>析          |
| 严威  | 韩城市公路<br>局               | 男  | 55 | 中级       | 道路工程(路<br>面)   | 现场检测                |
| 王晓艳 | 长安大学                     | 女  | 45 | 副高级      | 信息化            | 数据特征<br>提取          |
| 刘盼芝 | 长安大学                     | 女  | 45 | 副高级      | 控制科学与<br>工程    | 样机测试                |
| 郭焕焕 | 长安大学                     | 女  | 23 | 技术员级     | 电子信息           | 嵌入式设计               |

#### 4.3 各自承担的主要工作



本项目由陕西交控桥隧有限公司、陕西高速公路工程试验检测有限公司、韩城市公路局、长安大学联合承担，王海渊任项目负责人。实行项目负责人负责制和分工协同机制，以各自的业务为单位，确定开发内容和考核指标。韩城市公路局作为项目承担单位和工程依托单位，主要负责项目总体组织实施、依托工程协调、现场检测与病害调查组织、桥梁养护资料调取、人工巡检与专项检测结果对比、工程示范应用保障等工作，并依托实际桥梁养护场景为项目研究提供验证条件和应用环境。陕西交控桥隧有限公司主要负责模数式伸缩装置构造特征分析、工程应用需求梳理、样机系统工程适配、现场安装调试配合、结构构件与装置层面工程经验支撑，以及成果工程化推广与应用转化等工作；其中，桥梁结构分析人员重点参与梁端构造受力分析、故障机理研判、诊断结果与结构病害机理的对应验证等工作。长安大学主要负责本项目的技术研究与方法支撑工作，围绕桥梁伸缩缝早期故障诊断开展相关理论研究、技术方案设计及智能诊断方法研究，为项目技术路线的形成和关键技术实现提供理论与技术支持。

#### 4.4 项目主要负责人情况

**王海渊**，男，2003年毕业于长安大学公路学院，正高级工程师，注册土木工程师，桥梁检测师，现任陕西高速公路工程试验检测有限公司副总经理、省人事厅正高级工程师评审组委员、陕西公路学会专家委员会委员、交通运输厅环境保护专家和长安大学专业学位研究生指导教师。参加工作 20 多年来，一直在生产一线从事公路工程勘察设计、科研和咨询等工作。作为专业负责人、技术负责人主持完成了青兰高速、黄延扩能高速公路、平镇高速、湫旬高速、曲太高速、大锦高速、黄店一级、洋县至华阳二级公路等各类公路勘察项目的设计、咨询审查（含代交通运输厅、代交通运输部）30多项，累计里程约3300公里。工作作风过硬、锐意进取，获省部级奖11项。其中一等奖2项，二等奖6项，三等奖3项。主持和参与地标、团体标准和指南编制10项，获得国家专利12项，第三届“陕西省公路学会优秀工程师”称号。作为项目负责人主持的《钢梁桥用新型高等级桥梁护栏研发》《高速公路护栏与声屏障协同防护系统研发》课题成果填补了国内公路行业桥梁护栏“过载保护”功能和声屏障兼具防护和隔声为一体的技术空白，应用效果良好。

**宋世杰**，男，汉族，高级工程师，硕士研究生。毕业于长安大学公路交通运



输工程领域工程专业，现任陕西交控桥隧有限公司执行董事兼总经理。

**侯亚民，韩城市交通运输局党组成员、公路局局长，高级工程师。**从业以来始终扎根公路系统，深耕公路养护管理与养护工程建设领域，实操经验扎实，曾负责推进多个公路建设及养护重点项目，全面统筹韩城市国省干线公路建设、养护、管理等核心工作。善于学习公路交通方面新政策、新技术、新理念，结合实际情况总结思考公路养护发展方向。曾带领创新团队主持完成“全面提升普通国省干线交通安全水平对策研究”“韩城市智慧公路技术框架研究”等重点科研项目，为区域公路安全提升与智慧化发展提供了重要的理论支撑和实践路径，有力推动韩城市公路养护管理、工程建设质量持续提升，助力区域交通运输事业高质量发展。其先后获得多项荣誉表彰，2000年2月获得渭南市二级网化工程建设先进个人，2022年获得全国公路行业“百名优秀政研工作者”。

**王会峰，男，工学博士（博士后），教授，博士/硕士生导师，长安大学省级电工电子基础教学及实验示范中心主任，检测技术与自动化装置学科带头人。**主要从事智能测控及嵌入式系统应用、机器视觉与图像处理、交通基础设施智能网联检测与作业机器人感控、车路协同智能车辆环境感知与群体控制、基于 **DSP** 和 **FPGA** 的实时测控技术、三维数字化测量装配与质量控制、大地智能感知与精密测量等方面的研究。目前兼任陕西省仪器仪表学会理事、陕西省仪器仪表学会工业物联网专委会副主任委员、陕西省电工学研究会副理事长、武汉大学学报自然科学版编委、IEEE 会员、中国自动化学会会员、中国公路学会高级会员、中国光学工程学会会员、中国仪器仪表学会会员、中国人工智能学会智能交通专委会委员，并兼任长安大学渭南高新区智能制造与自动化研究院副院长。担任 IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on Instrument & Measurement, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Measurement, Optics and Laser Technology 等多个杂志审稿人。2025年荣登全球前 2% 顶尖科学家榜单，现主持包含国家自然科学基金面上项目、装备预研基金项目、中国博士后科学基金特别资助等在内的科研项目 17 项，在国内外重要期刊发表学术论文 70 余篇，其中 SCI 检索 19 篇, EI 检索 31 篇。



## 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

本课题依托工程为韩城市 2026 年 628 国道（原 S201）危旧桥梁改造工程，具体依托桥梁为解家沟桥。该桥位于韩城市 628 国道 K172+235 处，对应原省道 201 沿黄公路 K669+118 位置，于 2013 年建成通车。桥梁全长 256.16m，桥面宽度为净 11m+2×0.5m，上部结构采用 6×40m 装配式预应力混凝土先简支后连续小箱梁，下部结构采用柱式墩、薄壁空心墩及桩基础，桥台为 U 型组合式桥台及桩基础；设计荷载为公路—I 级，设计洪水频率为 1/100。原桥在 0 号台和 6 号台各设置一道 D160 型伸缩缝，具有较为典型的混凝土公路桥梁梁端构造特征，能够为伸缩缝服役状态感知与故障识别研究提供明确的工程对象。

从既有病害发展过程看，该桥梁病害具有持续演化和多因素耦合的突出特点。2017 年日常养护过程中即发现桥梁受土推力影响出现墩台异常，检测结果表明，桥梁当时已出现伸缩缝堵塞、锚固区混凝土开裂、橡胶条局部破损脱落等典型伸缩缝病害，同时还伴随主梁裂缝、支座挤压变形及下部结构局部损伤等问题。随后虽实施了桥下堆土清除、桥墩复位、全联顶升横向复位、支座更换、挡块修复及边坡防护等加固处治，但桥梁病害并未完全终止，而是继续在服役过程中发展。

至 2021 年定期检查时，该桥技术状况评定为 2 类桥，桥面系仍存在伸缩缝堵塞、型钢断裂变形、橡胶条老化开裂、排水孔局部堵塞等问题。到 2025 年定期检查及专项检测时，桥梁技术状况已进一步恶化并被评定为 4 类桥梁。检测显示，主梁发生绕 6 号台梁端顺时针旋转，0 号台伸缩缝前后护栏发生错位，各墩顶支座普遍存在剪切变形、开裂、脱空、串动等病害，其中 2 号墩位置最为严重，最大串动达 20cm，已存在主梁支撑失效风险；与此同时，2 号盖梁右侧挡块受挤压开裂破碎，2 号墩顶部错位最大值达 36cm，承台相对竣工状态发生 27cm 偏位，最大墩柱竖直度偏差达 58mm，桩身关键截面应力已显著超过规范规定的混凝土抗压强度设计值，结构安全储备严重不足。上述现象表明，该桥伸缩缝病害并非孤立发生，而是与梁体位移、支座失效、墩台变位及基础受力异常密切耦合。

从现状病害分布来看，该工程与本课题研究内容具有高度契合性。桥面系方



面，0号台处伸缩缝橡胶条破损，锚固区存在4条纵向裂缝，6号台处伸缩缝存在砂土堵塞，锚固区存在8条纵向裂缝；上部结构方面，主梁共发现55条纵向裂缝，总长达702.3m；支座方面，全桥共计54个支座存在开裂、剪切变形、串动、脱空等病害；桥下还存在大量填土堆积，排洪沟被掩埋且局部损毁。设计文件进一步明确指出，桥下2号桥墩处10~20m厚松散回填土在降雨作用下含水率升高、抗剪强度降低，对桥墩形成持续侧向推力，进而引发墩柱偏移、梁墩错位、挡块破碎、支座滑移以及伸缩缝失效，并在温度应力作用下诱发主梁纵横向位移。也就是说，该桥已形成“环境荷载—基础与墩台变位—支座异常—梁体位移—伸缩缝损伤”的连续病害传递链，这为伸缩缝异常响应的感知机理分析和早期故障诊断提供了真实而完整的工程背景。

本次改造设计也为课题实施提供了较好的工程条件。方案提出清除2号桥墩承台以上虚填土，实施全桥六孔整体竖向顶升及横向同步复位，统一更换全桥支座，修补主梁裂缝，拆除原桥伸缩缝并重做伸缩缝，同时在2号桥墩顺桥向承台前后各增设2根直径2.0m、桩长30m的钻孔灌注桩，并完善桥下排水设施；加固完成后，还将在1号、2号桥墩及桥下边坡设置永久观测点，开展后续定期检测。依托工程因此不仅具有伸缩缝病害显著、演化过程清晰、致因关系明确的特点，还具备结构维修前后对比和持续监测条件，能够为混凝土桥梁伸缩缝自感知、状态识别、特征提取及早期故障诊断方法验证提供可靠的工程载体。

## 5.2 投资来源

本项目研究经费来源明确、结构合理，能够满足项目实施和研究任务完成的资金需求。项目总投资为73.0万元，资金来源主要包括省级交通运输科研补助经费和工程配套研究经费两部分。其中，陕西省交通运输厅科研项目补助经费20.0万元，主要用于支持项目关键技术研究、仪器设备购置与试制、试验测试及成果凝练等科研活动；工程配套研究经费53.0万元，由依托工程单位统筹安排，主要用于项目实施过程中相关材料消耗、现场试验检测、劳务支出及工程示范应用等费用支出。

项目研究经费在项目承担单位统一管理下，实行专款专用、单独核算，严格按照批准的预算科目和经费管理相关规定执行。各项资金来源已落实，能够保障项目研究工作的顺利开展和预期目标的实现。



5.3 工程进度与项目科研进度的配合

本项目坚持“**科研服务工程、工程反哺科研**”的实施原则，将科研任务与桥梁伸缩装置实际工程运行和养护需求紧密结合，贯穿项目实施全过程，形成“**工程问题牵引—科研攻关—工程验证—持续优化**”的协同推进机制，确保科研成果具有明确工程指向性和可落地性。图 5.1 给出了了本项目的科研与实际工程配合的模式：

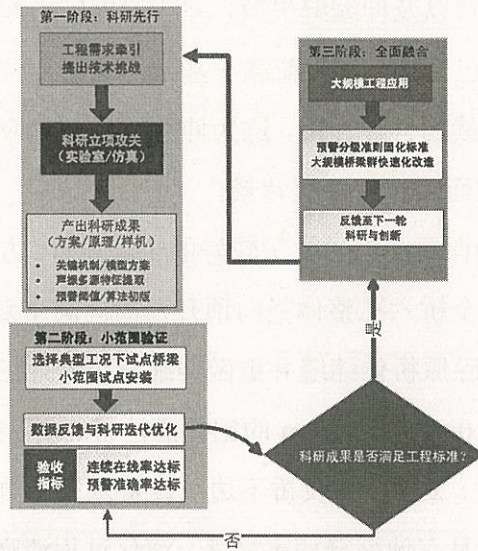


图 5.1 项目进度与科研配合流程图

基于上述框架，两者在各个阶段的配合体现在以下几个层面：

（1）前期：科研进度与工程调研同步推进。依托既有桥梁伸缩装置的运行现状和养护工程安排，项目团队在工程单位配合下开展现场踏勘与病害调研，系统收集不同类型伸缩装置的结构形式、服役年限、病害类型及养护记录等工程资料。科研工作重点围绕工程中暴露出的典型问题开展机理分析和需求梳理，为后续传感器布设方案、监测指标选择和系统总体设计提供工程依据，避免科研方案脱离实际工况。在工程立项或预研阶段，明确需要攻克的技术瓶颈（**工程需求牵引科研**）。科研团队通过理论研究、仿真模拟和实验室样机，验证技术可行性，输出方案、参数和原型，为工程设计提供依据（**科研提供解决方案**）。

（2）中期：科研试验与工程实施紧密耦合。随着工程单位对部分桥梁伸缩装置开展日常检测、维修或试验性更换，项目同步在具备条件的伸缩装置上布设传感器和原理样机，开展在线监测和数据采集。科研人员通过对工程运行数据的实时分析，不断修正故障特征提取方法和诊断模型参数；工程现场则为科研提供



真实、多工况的运行数据，实现科研模型在实际工程环境下的迭代优化和性能验证。

(3) 后期：科研总结与工程推广协同开展。项目在完成科研任务和技术指标验证的同时，结合工程应用情况，总结系统在不同桥梁条件下的部署方式、运行效果和维护需求，形成可复制、可推广的工程应用模式。科研成果通过工程示范、技术指南和应用建议等形式向实际养护管理部门转化，实现科研成果从“原理验证”向“工程应用”的有效过渡。

通过上述工程进度与科研进度的协同安排，本项目能够实现科研工作与桥梁伸缩装置实际工程需求的紧密衔接，使科研成果在真实工程环境中不断验证和完善，确保项目研究具有明确工程支撑和推广价值。

## 5.4 组织管理形式

### (1) 项目组织与管理机制

本项目实行“项目负责人负责制”与“分工协作、协同推进”的组织管理模式，建立科学、规范、高效的项目管理机制，确保科研任务按计划、有质量地完成，并与工程应用紧密衔接。

项目由项目负责人统一组织和总体协调，全面负责项目技术路线把控、研究进度安排、关键技术决策以及对外沟通与成果汇总等工作。项目负责人对项目研究目标、阶段成果和最终成果质量负总责，确保项目实施过程符合立项要求和相关技术规范。

在具体实施过程中，项目组根据研究内容划分若干研究与实施单元，明确各参与人员的职责分工。围绕伸缩装置故障机理分析、多源传感监测系统设计、数据处理与智能诊断算法研发、原理样机集成与工程验证等核心任务，分别设立相应的技术负责人，负责对应模块的技术实施、进度控制和成果质量把关，形成职责清晰、分工明确的工作体系。

为保证科研工作与工程实际的紧密结合，项目建立科研单位与工程应用单位协同推进机制。工程单位负责提供桥梁伸缩装置现场条件、运行数据及配合开展现场布设与测试；科研团队根据工程反馈及时调整研究方案和技术参数，实现科研成果在真实工程环境中的验证和优化。

项目实施过程中实行阶段性检查与内部评审制度，定期召开项目工作会议，



对研究进展、存在问题和下一阶段计划进行集中研讨。对关键技术节点和重要成果，组织专家进行内部技术评估，确保研究方向和技术路线始终符合项目目标要求。

在经费和成果管理方面，严格按照项目管理和财务管理相关规定执行，确保经费使用规范、透明、高效。项目成果统一由项目负责人组织归口管理，按照要求完成阶段成果提交、结题验收和成果推广工作。

通过上述组织管理形式的实施，本项目能够实现人员分工合理、科研与工程协同推进、过程管理规范有序，为项目顺利实施和高质量完成提供可靠保障。

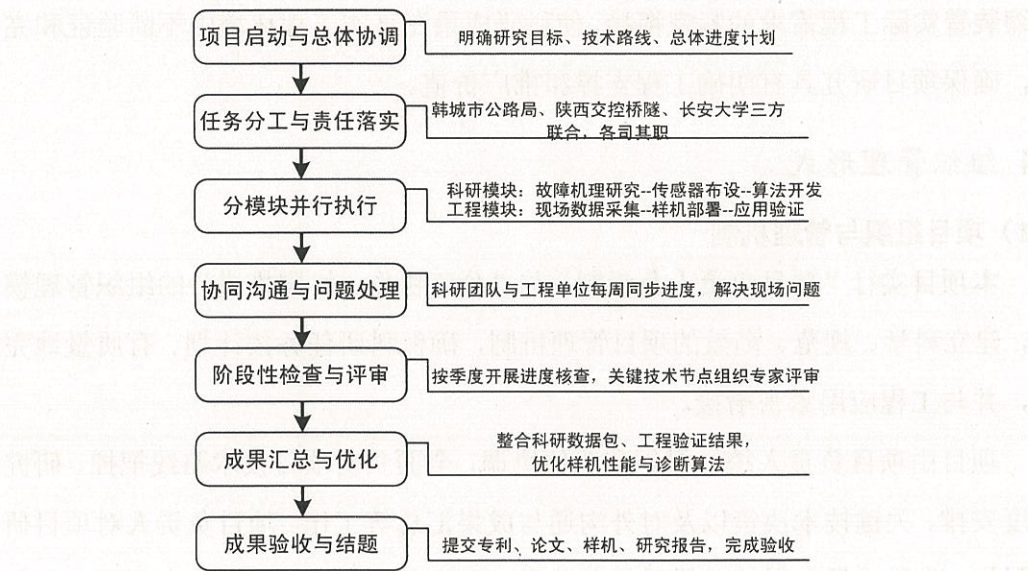


图 5.2 项目组织管理全流程框图

### （2）技术实施与质量保障原则

本项目围绕桥梁伸缩装置早期故障智能检测的工程需求开展研究，在系统设计与技术实现过程中遵循以下主要原则。

①坚持工程需求导向原则。以桥梁伸缩装置在实际运营中存在的检测效率低、早期故障难识别等问题为核心，确保研究目标、技术路线和系统方案紧密服务于工程应用需求，提升成果的实用性和可落地性。

②坚持多源感知与融合分析原则。通过多源信息协同获取伸缩装置运行状态，结合信息融合方法，提高故障特征表征能力和诊断结果的稳定性，增强早期故障识别的可靠性。

③坚持系统稳定性与长期运行原则。在硬件选型、信号调理、供电与通信设计中优先考虑系统的可靠性和环境适应性，确保设备能够在复杂工况下长期稳定



运行。

④坚持智能算法工程适配原则。在引入智能诊断算法的同时，注重算法的工程适用性和可解释性，使诊断结果能够以风险等级和趋势判断等形式直接服务于桥梁养护决策。

⑤坚持分阶段验证与持续优化原则。通过实验室验证与工程应用相结合的方式，对系统性能进行持续评估和优化，确保研究目标高质量实现。

**(3) 全过程质量控制与运行保障措施**

为保障伸缩装置故障智能检测系统在工程应用中的可靠性和稳定性，项目在系统生产、施工部署及运行使用阶段建立全过程质量控制机制。

在生产与集成阶段，系统各硬件模块严格按照设计要求和相关技术标准进行检测与校验。对传感器、信号调理模块、数据采集与通信单元等关键部件进行功能和性能测试，确保其满足设计指标。系统集成完成后，开展整机联调测试，验证数据采集、处理和传输等功能的稳定性。

在施工部署阶段，严格按照设计方案和施工工艺要求进行现场安装与调试，重点控制传感器布设位置、安装牢固性及防护措施。通过现场测试和对比校核，验证系统数据采集和测量结果的稳定性与一致性，确保系统满足工程应用要求。

在系统运行阶段，建立持续性的运行质量控制机制，对设备运行状态、数据质量和诊断结果进行动态监测。通过定期巡检、数据质量评估和结果对比验证，及时发现并处理设备异常和性能衰减问题。同时，通过远程维护和程序更新等方式，保持系统长期稳定运行和检测性能。

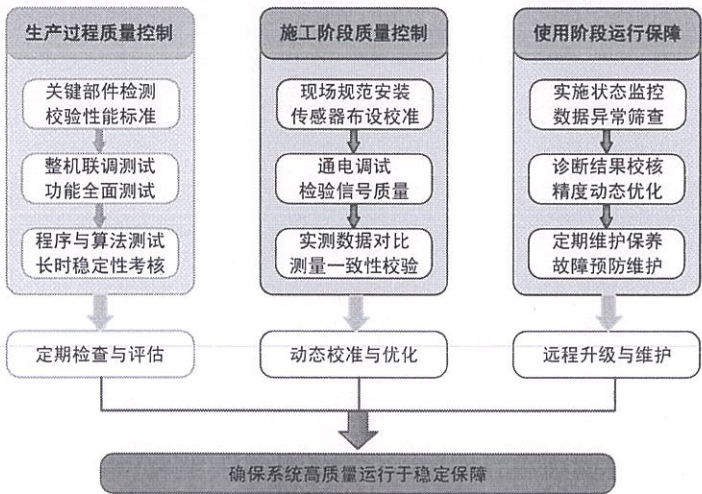


图 5.3 质量控制与运行保障流程图



综上，通过建立以项目负责人负责制为核心的组织管理体系，明确各参与单位和人员的职责分工，配套实施科学合理的技术实施原则和覆盖生产、施工及运行全过程的质量控制机制，本项目在组织管理、技术实施和运行保障等方面形成了较为完善的管理体系。上述组织管理形式能够有效保障项目研究任务有序推进、技术路线稳定实施和研究成果高质量产出，为项目顺利完成既定研究目标并实现工程应用奠定坚实基础。



六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

| 经费投入（万元） |      | 经费支出（万元）             |      |      |      |
|----------|------|----------------------|------|------|------|
| 科 目      | 估算数  | 科 目                  | 总经费  | 厅补经费 | 其他经费 |
| 省交通运输厅补助 | 19.9 | 合 计                  | 73.0 | 19.9 | 53.1 |
| 工程配套研究经费 | 53.1 | 1.设备费                | 17.0 | 7.0  | 10.0 |
| 单位自筹     | 0.0  | （1）购置设备费             | 10.0 | 5.0  | 5.0  |
| 其他经费     | 0.0  | （2）试制设备费             | 4.0  | 2.0  | 2.0  |
|          |      | （3）设备改造与租赁费          | 3.0  | 0    | 3.0  |
|          |      | 2.业务费                | 36.0 | 8.0  | 28.0 |
|          |      | （1）材料费               | 17.0 | 4.0  | 13.0 |
|          |      | （2）测试化验实验加工费         | 8.0  | 0.0  | 8.0  |
|          |      | （3）燃料动力费             | 2.0  | 0.0  | 2.0  |
|          |      | （4）差旅费/              | 2.0  | 1.0  | 1.0  |
|          |      | （5）会议费/              | 2.0  | 1.0  | 1.0  |
|          |      | （6）国际合作与交流费          | 2.0  | 0    | 2.0  |
|          |      | （7）出版/文献/信息传播/知识产权事费 | 3.0  | 2.0  | 1.0  |
|          |      | （8）其他费用              | 0.0  | 0.0  | 0.0  |
|          |      | 3.劳务费                | 13.0 | 2.0  | 11.0 |
|          |      | （1）专家咨询费             | 5.0  | 0.0  | 5.0  |
|          |      | （2）聘用人员劳务费           | 8.0  | 2.0  | 6.0  |
|          |      | （3）其他劳务费             | 0.0  | 0.0  | 0.0  |
|          |      | （二）间接费用              | 7.0  | 2.9  | 4.1  |
|          |      | 4.管理费                | 5.6  | 2.0  | 3.6  |
|          |      | 5.绩效支出               | 1.4  | 0.9  | 0.5  |



## 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）      | 2   |
|        |        | （1）授权发明专利       | 1   |
|        |        | （2）实用新型         | 1   |
|        |        | （3）外观设计         | 0   |
|        |        | 2、软件著作权授权数（项）   | 1   |
|        |        | 3、发表论文（篇）       | 1   |
|        |        | （1）其中 SCI 索引收录数 | 1   |
|        |        | （2）其中 EI 索引收录数  | 1   |
|        |        | （3）其它           | 2   |
|        |        | 4、著作（部）         | 0   |
|        |        | 5、制订标准数（项）      | 1   |
|        |        | （1）国际标准         | 0   |
|        |        | （2）国家标准         | 0   |
|        |        | （3）行业标准         | 0   |
|        |        | （4）地方标准         | 0   |
|        |        | （5）企业标准         | 0   |
|        |        | （6）科技报告         | 1   |
|        | 其他成果   | 1、填补技术空白数       | 1   |
|        |        | （1）国际           | 0   |
|        |        | （2）国家           | 0   |
|        |        | （3）省级           | 1   |
|        |        | 2、获奖项数          | 0   |
|        |        | （1）国家奖项         | 0   |
|        |        | （2）部、省奖项        | 0   |
|        |        | （3）地市级奖项        | 0   |
|        |        | 3、其他科技成果产出      | 2   |
|        |        | （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）      | 1   |
|        |        | （5）平台/基地/示范点    | 1   |
|        |        | （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）        | 是    |
|           |        | (3) 小批量             | 否    |
|           |        | (4) 规模化生产           | 否    |
|           | 人才引育   | 1、引进高层次人才           | 2    |
|           |        | (1) 博士、博士后          | 1    |
|           |        | (2) 硕士              | 1    |
|           |        | 2、培养高层次人才           | 3    |
|           |        | (1) 博士、博士后          | 1    |
|           |        | (2) 硕士              | 2    |
|           |        | 3、培训从事技术创新服务人员（人次）  | 0    |
|           |        | 4、是否设立科研助理岗位        | 否    |
|           | 产业化情况  | 1、开放共享仪器设备数（台/套/只等） | 0    |
|           |        | 2、科研仪器设备利用率（%）      | 0    |
|           |        | 3、孵化科技型企业（个）        | 0    |
|           |        | 4、转化科技成果（个）         | 1    |
| 效果类指标     | 经济效益   | 1、新增产值（万元）          | 50.0 |
|           |        | 2、新增销售（万元）          | 50.0 |
|           |        | 3、新增出口创汇（万美元）       | 0.0  |
|           |        | 4、新增利润（万元）          | 20.0 |
|           | 社会效益   | 1、新增税收（万元）          | 5.0  |
|           |        | 2、新增就业人数            | 2    |
|           |        | 3、就业培训（人次）          | 2    |
|           |        | 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）         | 1    |
|           |        | 8、建立示范基地（亩数）        | 0    |
|           |        | 9、节约资源能源            | 0    |
|           |        | 10、环保效益             | 有效改善 |
| 其他需要说明的情况 |        |                     |      |



## 八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益（对应合同中的考核指标）

### 8.1 项目预期目标（项目的考核目标）

本项目围绕在役混凝土桥梁伸缩缝运行过程中早期损伤不易发现、人工检测效率低、安全风险高、养护成本大的实际问题，以工程应用需求为导向，开展混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断关键技术研究。通过系统研究伸缩缝典型故障的产生机理及其多源信息表征特征，构建面向工程现场的伸缩缝早期故障识别与预测方法，形成可在实际桥梁条件下稳定运行的技术体系。

项目实施期内，拟研制完成一套基于多源传感信息采集、信号调理与数据智能分析的桥梁伸缩缝早期故障诊断系统原理样机，实现对伸缩缝振动、声音等关键运行状态信息的自动化采集、传输与处理，具备伸缩缝早期故障识别与状态评估功能。在此基础上，形成适用于在役桥梁伸缩缝的智能监测与诊断技术方案，并通过现场示范应用验证其工程可行性、稳定性和实用性。

同时，围绕项目关键技术和工程应用过程，系统总结研究成果，形成较为完善的技术路线和应用方法，完成相关技术成果的凝练与转化。项目预期在完成系统研制与示范应用的基础上，达到合同约定的考核目标要求，包括形成1套桥梁伸缩缝故障检测系统原理样机，申报相关专利不少于2项，发表高水平学术论文2~5篇（其中SCI/EI收录论文1~3篇），获取配套工程示范试验检测数据，并形成桥梁伸缩缝早期故障诊断研究总结报告，为后续技术推广与规模化应用奠定基础。

### 8.2 提交的研究成果及其形式

本项目围绕混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断关键技术研究，以工程应用和成果转化为导向，系统开展技术研发、系统研制与工程验证，形成多层次、多形式的研究成果。项目成果涵盖工程应用系统、核心技术方法、知识产权及技术总结等内容，能够全面反映项目研究水平和应用价值，并为桥梁伸缩缝智能监测技术的推广应用提供可靠支撑。项目拟提交的研究成果及其形式主要包括以下几个方面：

- （1）桥梁伸缩缝早期故障诊断系统原理样机。研制完成一套基于多源传感



信息采集、信号调理与智能分析的桥梁伸缩缝早期故障诊断系统原理样机，具备伸缩缝运行状态数据自动采集、传输、处理与早期故障识别功能，并通过实际桥梁工程示范应用验证其稳定性和工程适用性。

(2) 自主知识产权成果。围绕项目关键技术和系统研制过程，系统凝练创新点，完成相关技术成果的知识产权布局，按计划申报发明专利或实用新型专利不少于 2 项，提升项目成果的技术先进性和可保护性。

(3) 学术论文成果。结合理论与工程应用实践，撰写并发表高水平学术论文 2~5 篇，其中 SCI/EI 收录论文 1~3 篇，总结项目在伸缩缝故障机理分析、多源信息融合及智能诊断方法等方面的研究成果，扩大项目的学术影响力。

(4) 工程示范试验与检测数据成果。围绕典型早期故障状态，形成可反映伸缩装置响应特征变化的参数与指标体系，为状态识别、诊断分析和工程判定提供支撑，形成面向混凝土桥梁伸缩装置的多源信息融合诊断方法。

(5) 技术总结与研究报告成果。形成《混凝土桥梁模数式伸缩缝早期故障诊断技术研究总结报告》1 份，为交通运输主管部门和桥梁管养单位提供可参考、可借鉴的技术成果资料；围绕桥梁伸缩装置预留、安装、监测、故障识别和养护应用等内容，形成手册式应用指南，主要用于成果推广应用和工程实践参考。

(6) 培养 1 名博士研究生，2 名以上硕士研究生。

### 8.3 经济、社会、环境效益分析

本项目以提升桥梁运行安全和养护管理水平为核心目标，围绕混凝土桥梁伸缩缝早期故障的智能感知与诊断，形成了面向工程实际、可落地实施的技术成果。项目实施后，可在保障桥梁结构安全和交通运行效率的同时，有效降低桥梁伸缩缝养护与维修成本，缩短维修工期，提升桥梁管养工作的科学化和精细化水平，具备明确的经济效益和良好的推广应用前景。同时，项目成果在减少突发性交通安全风险、提升公众出行安全与服务质量方面具有显著社会效益，并在节约资源、降低施工扰动、减少环境影响等方面体现出积极的环境效益，整体上符合交通基础设施安全运行、绿色低碳和可持续发展的要求。

#### (1) 经济效益

本项目成果在桥梁养护与运行管理领域具有明确且可量化的经济效益。通过构建桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术体系，实现对伸缩缝运行状态的连续监



测与早期预警，可有效减少传统依赖人工巡查和突发抢修的养护模式。据现有工程经验统计，桥梁伸缩缝一旦发生突发性损坏，单次应急维修费用通常在数万元至十余万元不等，且伴随交通管制带来的间接经济损失。项目成果应用后，通过提前识别潜在病害并实施预防性维护，有助于提高检测针对性和维修时效性，降低不必要的维修投入，有效控制桥梁全寿命周期运维费用。

在工程实施效率方面，依托智能化监测与诊断结果开展针对性维修，可显著缩短单次维修工期。与传统“发现—封闭—排查—维修”的模式相比，基于本项目技术的精准维护可减少重复检测和无效施工，预计单次维修作业工期可缩短20%左右，降低交通组织和施工管理成本。同时，项目成果有利于提高桥梁管养单位的技术服务能力和装备水平，为后续规模化应用和生产能力扩展创造条件，具备在普通国省干线公路及高速公路桥梁中的推广基础。

在推广应用层面，随着交通基础设施智能化、信息化建设需求的不断提升，桥梁伸缩缝智能监测与诊断技术具有良好的市场应用前景。项目形成的系统设备和技术方案可在区域范围内逐步推广应用，随着应用规模扩大，单位桥梁的平均监测与维护成本将进一步下降，形成稳定的技术服务和应用收益，为相关单位带来持续的经济回报和利税增长空间。

## **(2) 社会效益**

本项目的实施将产生显著的社会效益。桥梁伸缩缝作为直接影响行车安全和舒适度的重要构件，其早期病害的及时识别与处置，对于防范交通事故具有重要意义。项目成果可有效降低因伸缩缝突发损坏引发的安全隐患，提升在役桥梁运行安全水平，为公众出行提供更加可靠的交通保障。同时，通过减少桥梁突发性维修和长时间交通封闭，降低对社会交通运行的干扰，提升道路通行效率和公众出行体验。

在管理层面，项目成果推动桥梁养护由传统经验型管理向数据驱动、智能决策转变，为交通运输主管部门实施精细化管理和科学决策提供技术支撑，有助于提升公路桥梁管养工作的规范化、标准化和信息化水平。项目在示范应用基础上，可为同类桥梁设施提供可复制、可推广的技术路径，具有良好的行业示范效应和社会推广价值。

## **(3) 环境效益**

本项目在环境保护和资源节约方面具有积极成效。通过早期诊断和精准养



护，减少伸缩缝频繁拆换和大规模维修施工，可有效降低施工过程中产生的建筑废弃物、噪声和粉尘污染，减少对周边生态环境和居民生活的影响。与传统集中式维修相比，项目成果可减少不必要的材料消耗和能源投入，符合节能减排和绿色低碳交通的发展要求。

同时，项目技术在实际应用中无需长时间封闭交通或大规模施工，对道路通行和环境扰动较小，有利于构建安全、高效、绿色的公路交通运行环境。随着项目成果的逐步推广应用，其在节约资源、降低环境负荷方面的综合效益将进一步显现。



## 九、其它需要说明的问题

无



## 十、申请单位意见

配套资金与依托工程均已落实到位。



单位负责人：(签字)

李四生

2016年3月27日



# 混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究

## 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“混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究”（项目编号：25-87K）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、项目研究内容比较全面，研究目标明确，技术路线可行。

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

三、预期成果覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

1. 聚焦混凝土桥梁模数式伸缩缝早期故障检测技术研究。

2. 进一步细化多源传感信息获取与数据处理方法，明确关键技术指标和工程实现路径。

主任委员：王彦彬

2026年3月12日



专家审查意见表

|      |                              |       |        |      |             |
|------|------------------------------|-------|--------|------|-------------|
| 项目名称 | 25-87K 混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究 |       |        |      |             |
| 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，研究大纲内容齐全。

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，或对伸缩缝类型予以限定。
- 2、研究人员中补充桥梁检测和结构分析人员。

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 | 混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究 |       |    |      |             |
| 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、本项目通过围绕混凝土桥梁伸缩缝早期故障智能感知与诊断的研究，拟形成针对工程实际、操作实施性强的技术成果，以提升桥梁运行安全和养护管理水平，选题明确，研究内容针对性强，符合交通基础设施安全运行、绿色低碳和可持续发展的要求，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. 请核查项目编号。~~ 1. 本项目提出的研究成果应紧扣项目课题。

2. 文中关于伸缩装置不同类型早期故障在结构动力响应中的表现形式、识别能够反映伸缩装置状态变化的关键响应特征的相关参数和指标的说明偏少，量化方面内容偏少，建议修改完善。

3. 建议研究目标中增加关于本研究对于桥梁预留伸缩装置和安装伸缩装置的提前指导作用。

4. 依托工程概况中应减少与本项目研究无关内容，补充完善与本项目研究的相关内容。

评审专家（签字）：柴唐焰

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 | 混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究 |       |    |      |             |
| 专家姓名 | 中磊                    | 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. 建议制定多因素耦合作用下伸缩缝的损伤演化规律与敏感特征分析，为系统的采取提供坚实的理论支撑。
2. 建议以迁移学习或自适应策略，提升模型在多种车型条件下的鲁棒性。特别针对不同桥型、交通流环境等。
3. 建议加强硬件可靠性验证，如传感器、电源等。增加恶劣环境与模拟试验。
4. 优化多源信息融合、兼容融合方法。提升伸缩缝故障的识别灵敏度、避免单一信号误判。
5. 完善对比验证，强化漏检率、误检率及成本的计算。增强工程说服力。
6. 聚焦研究伸缩缝的主要模式（~~故障~~ 模式），大位移、小位移，建议增加位移判断对预警安全性的测试与评估。
7. 研究成果要落地，形成手册式指南，便于工程应用。

评审专家（签字）： 中磊

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 | 25-87K 混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究 |       |            |      |             |
| 专家姓名 | 王玉银                          | 职务/职称 | 党委书记<br>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

- 1、项目拟主要采用振动信号和声学信号进行识别，在实际工程中，背景噪音干扰影响很大，如何降噪？在此之前，是否已有前期针对性的预研，证明其可行性？
- 2、在“2.2.2 前期工作基础”中，提到了多项“本研究团队提出了一种。。装置。。。方法”，建议补充相应的原图示意图等内容。
- 3、“本项目拟面向混凝土桥梁模数式伸缩缝的实际服役工况”与项目名称“混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究”的范围不完全一致。建议研究大纲中明确两者之间的关系。

评审专家（签字）：王玉银

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                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究 |       |         |        |             |
| 专家姓名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 惠迎新                   | 职务/职称 | 副总经理/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 |
| <div>评    审    意    见</div> <p>本项目面向在役混凝土桥梁伸缩缝早期病害隐蔽、人工检测效率低、安全风险高等实际工程痛点，围绕“自感知监测—多源信息融合—智能诊断与预测”技术路线，开展伸缩缝早期故障机理分析、多源传感信息获取、硬件系统集成及智能诊断算法研究，目标明确，选题具有较强的工程实用价值和推广前景。项目研究内容较为系统，涵盖机理研究、传感技术、硬件设计、智能算法及样机验证，整体技术路线可行。研究团队结构合理，依托单位具备良好的工程实践基础与科研平台，前期在智能检测、作业机器人、结构监测等领域积累了较丰富的成果，具备完成本项目的能力。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。</p> <p>1、研究内容中“基于人工智能的多源传感器数据处理与故障识别算法研究”，仅提及深度学习方法，未结合伸缩缝故障样本数量有限、故障类型不均衡的工程实际，明确针对少样本场景的算法优化策略，建议补充少样本条件下的算法设计细节，同时明确诊断模型的实时性计算要求（如数据处理延迟），确保算法适配嵌入式硬件的工程部署需求。</p> <p>2、经济指标中提到“减少突发性维修需求，降低养护成本 20%-30%”，但缺乏详细的成本构成分析和测算依据。</p> <p>3、依托工程部分，虽明确了 108 国道改造工程的研究场景，但未确定具体的示范桥梁伸缩缝数量、监测时长，建议补充依托工程中的示范应用方案，明确现场测试的伸缩缝类型、数量、监测周期及效果验证方法，确保工程验证的充分性与代表性。    伸缩缝类型，方法不同</p> <div>评审专家（签字）：<div>惠迎新</div></div> <div>2026 年  3 月  12  日</div> <div>（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）</div> |                       |       |         |        |             |



专家意见处理表

项目名称：混凝土桥梁伸缩缝自感知早期故障诊断技术研究

(项目编号： 25-87K )

| 序号 | 姓名  | 建议内容                                                                                                                                                 | 处理意见<br>(逐条回应，详细说明修改情况)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 王登科 | 1. 建议对研究范围按照桥梁结构类型或对伸缩缝类型进行限定。<br>2. 建议研究人员中补充桥梁检测和结构分析人员。                                                                                           | 1. 对研究对象和适用范围进一步梳理与聚焦，结合桥梁伸缩缝病害发生特点及研究基础，明确将研究对象聚焦限定于混凝土桥梁中的模数式伸缩缝，在研究大纲中将研究对象统一表述为混凝土桥梁模数式伸缩缝。<br>2. 在研究团队中补充桥梁检测和桥梁结构分析相关专业人员，优化调整团队成员专业分工。详见研究大纲 2.2 节和 4.2 节。                                                                                                                                                                                                                |
| 2  | 牛宏  | 1. 建议补充多因素耦合作用下伸缩缝的损伤演化规律与敏感特征分析。<br>2. 建议优化多源信息融合，提高融合方法，提升伸缩装置故障的识别灵敏度，避免单一信号误判。<br>3. 建议完善对比验证，量化误报率，成本节约值，增加成果说服力。<br>4. 建议成果落地，形成手册式指南，仅用于推广应用。 | 1. 在 3.1 节和 3.2 节进一步补充多因素耦合作用机理分析内容，系统梳理其阶段性演化特征，筛选敏感特征参数。增加对关键敏感指标、特征库构建及故障演化分析内容的表述。<br>2. 强化多源信息融合方法及识别灵敏度提升方面的研究设计，突出多源信息融合在故障诊断中的核心作用。在第三章进一步细化多源融合方法的研究内容，强化“多源互证、融合增强、降低单一信号误判”的研究目标<br>3. 对验证方案和评价指标体系进行补充完善，后续将进一步完善验证设计，强化与人工巡检、专项检测、维修前后状态及工程运行效果之间的对比分析，并在依托工程和示范应用基础上，量化系统误报率、漏报率、识别准确性及养护成本节约效果。详见 3.5 节。<br>4. 对成果输出形式进行优化，将“形成手册式指南、服务推广应用”作为成果落地的重要方向。详见 8.2 节。 |



|   |     |                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3 | 柴唐焰 | <p>1. 建议研究大纲中研究成果应紧扣项目课题。</p> <p>2. 建议修改增加伸缩装置在不同类型早期故障在结构动力响应的表现形式，增加可反应伸缩装置响应特征的相关参数和指标。</p> <p>3. 建议增加研究对桥梁预留和安装伸缩装置的指导作用。</p> <p>4. 建议修改依托工程概况，补充完善与研究相关的内容。</p>                            | <p>1. 对研究成果进行系统梳理和调整，进一步强化成果设置与研究目标之间的对应关系。在 8.1 节和 8.2 节对成果与表述进行统一，确保成果与课题研究内容一一对应。</p> <p>2. 增加对伸缩装置不同类型早期故障的分类分析和不同故障状态下伸缩装置动力响应差异分析，见 3.2-3.3 节。</p> <p>3. 对成果应用内容进行扩展，在 3.2 节和 8.2 节进一步增加项目研究成果指导作用表述。</p> <p>4. 对 5.1 节的依托工程相关内容进行补充和完善。</p>    |
| 4 | 惠迎新 | <p>1. 建议明确针对少样本场景的算法优化策略，补充少样本条件下的算法设计细节，同时明确诊断模型的实时性计算要求（如数据处理延迟），确保算法适配嵌入式硬件的工程部署需求。</p> <p>2. 建议增加详细的成本构成分析和测算依据。</p> <p>3. 建议补充依托工程中的示范应用方案，明确现场测试的伸缩缝类型、数量、监测周期及效果验证方法，确保工程验证的充分性与代表性。</p> | <p>1. 补充引入数据增强与小样本学习策略的细节；针对实时性，明确采用轻量化网络结构，控制边缘计算处理延迟时间，确保算法高效适配嵌入式部署需求。详见 3.2 节。</p> <p>2. 完善细化经济指标测算依据，结合历史数据，从多维度进行核算，对比传统模式与预警模式全周期费用，提供严密的量化支撑。详见 3.5 节。</p> <p>3. 拟在研究大纲中进一步补充依托工程示范应用方案，明确现场测试情况，并完善样机测试、现场验证和工程应用之间的衔接关系。详见 3.2 节和 5.1 节</p> |
| 5 | 王玉银 | <p>1. 在实际工程中，背景噪音干扰影响很大，如何降噪？在此之前，是否已有前期针对性的预研，证明其可行性？</p> <p>2. 建议在 2.2.2 节补充相应的原图示意图等内容。</p> <p>3. 建议明确项目面向的研究对象与项目名称之间的对应关系。</p>                                                             | <p>1. 将在硬件层面采用信号调理与屏蔽抗干扰；软件层面运用去噪与特征构建算法。前期团队已有相关研究，可充分证明抗噪可行性。</p> <p>2. 已对 2.2.2 节全面核查。针对提到的各项自研装置与检测方法，规范补充了对应图片。</p> <p>3. 明确研究对象为混凝土桥梁模数式伸缩装置。后续已在研究大纲中进一步明确项目名称、研究对象与研究内容之间的对应关系，修改表达用词，避免混用。</p>                                               |

大纲评审委员会专家（签字）：

王彦科 中岳 惠迎新 柴唐焰 王玉银 项目负责人（签字）：王玉银