

项目合同编号：25-79X

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用

承担单位：陕西交控桥隧有限公司

项目负责人：宋世杰

通讯邮编、地址：陕西省西安市碑林区长安北路高速大厦 27 层

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：25-79X

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用

承担单位：陕西交控桥隧有限公司

项目负责人：宋世杰

通讯邮编、地址：陕西省西安市碑林区长安北路高速大厦 27 层

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

本项目以保障桥梁运营期的安全性、桥梁服役过程中受偶发极端自然灾害天气影响下应急处置的及时性、提高中小跨梁体的管养效率为目标，以影响桥梁结构健康、安全的重要构件为研究对象，通过协同创新、多学科交叉融合研发基于智能构件和多传感器融合的桥梁结构健康监测及现场应急简易触发感知告警处置及联动报警一体化装备，实现桥梁结构健康感知+及时应急处置和报警一体化系统，解决其中的关键技术难题，具体研究内容如下：

(1) 复杂环境下基于桥梁构件智能感知的轻量化监测模型研究

建立复杂环境下承载装置的变形模型，研究嵌入式支承支座压力传递机制，解析压力传感器受力和外界交变载荷之间的耦合关系；建立多传感器信息感知状况下桥梁伸缩缝的损伤感知模型，探究平衡归一化空间复用状态下的伸缩缝多源状态蠕变和损毁感知的系统设计准则。

(2) 基于桥梁支撑装置构件感知的轻量化检测装备研发

研发设计智能感知桥梁支座，实现桥梁支座的多点受力、振动状况的实时感知，研究集成压力传感器、振动传感器支座的高精度压力检测电路、信号滤波电路和实时数据采集处理和通信一体化单元集成电路，形成多点高精度的集成智能支座构件设备，设计基于多源信息融合的伸缩构件装置损伤和损毁智能构件装备；

(3) 基于激光基准的梁体多维变形轻量化监测模型研究及结构变形监测方法研究

研发基于激光基准的桥梁结构轻量化实时检测装置，设计基于 FPGA 的轻量化光斑中心解算模型，以实时获取梁体结构的变形信息，并实现梁体变形数据的实时上报；

(4) 极端天候灾害威胁下基于边缘计算的桥梁损毁轻量化简易联动现场告警方法及装备研发

研发极端外界灾害威胁下基于智能构件的集成一体化的中小跨桥群群头快速简易触发多级联动告警装置，设计基于多源数据融合+边缘计算和实时桥

梁现场智能测控、联动触发定一体的简易感知装置，实现极端灾害威胁下的现场“硬连接”和远程报警的“软连接”，并实现报警信息的实时下发；

(5) 极端天候灾害威胁下的硬件边缘出发视频联动抓拍机制研究

研发具有边缘端硬件联动触发功能的现场灾毁视频抓拍装置，针对极端自然灾害天候下的低能见度复杂现场，采用偏振多模视觉成像技术，提升抓拍图像的像质，并及时上传到终端，从而满足极端天气状况、不同场景、不同对象的高精度动态抓拍需求。

(2) 技术关键

桥梁结构轻量化健康监测预警和应急处置系统，是保障桥梁运营期的安全性、桥梁在服役过程中受到偶发极端自然灾害天气影响下处置的实时性、提高管养效率的重要研究内容。本课题研究设计的桥梁轻量化健康监测预警和应急处置系统，旨在解决当前人工定期巡检、试验检测、专家评估过程中自动化、效率低下、应急措施不完善等等缺陷。本项目拟研究一套集结构健康监测、全时空预警和极端外界环境应急处置于一体的轻量化桥梁结构监测与应急处置系统。其关键的技术主要包括以下几个方面：

(1) 基于桥梁构件嵌入多参数轻量化感知的桥梁结构健康智能监测与结构安全评估关键技术

针对目前桥梁模块化设计的现状，以桥梁结构易损受力构件为研究对象，通过向单体构件中“植入”多种智能感测设备，形成多种智能感知桥梁结构标准化构件，构件整个桥梁结构健康感知的“**神经末端**”，获取桥梁结构服役过程的实时状态，进而为桥梁服役过程的健康状况进行实时“**把脉**”，当在极端外界环境影响下结构发生危险状况时，“**神经末端**”感知单元会出现明显的信息突变，亦可为桥梁的应急处置提供触发依据。

(2) 基于激光基准的桥梁结构宏观变形轻量化实时监测关键技术

针对大多数的连续多跨度桥梁结构支撑桥梁自重与荷载的重量的特点，以多跨结构整体为研究对象，提出基于激光基准的桥梁结构宏观变形的轻量化监测技术，通过分析各点外界因素对监测系统的影响，构建激光基准桥梁结构高精度变形实时监测的模型，设计激光基准桥梁结构宏观变形的实时监测系统，

并将变形数据作为系统的关键指标纳入桥梁结构的健康状况评价的关键技术指标中，当桥梁受到外界影响引起桥梁结构的损毁时候，宏观变形监测系统也可以为应急处置系统提供触发信息源。

(3) 基于轻量化智能构件及整体变形参数的桥梁结构健康状况评价关键技术研究

将边缘端所获得的桥梁服役状态可靠传输，通过系统的冗余的多模式通信将桥梁的多源传感器数据传送到云端后台，在云端进行存储，并且在 Web 端，App 端进行显示，方便管理人员实时查看相关数据，并且，在云端基于大数据统计模型将多源传感器数据进行融合，送入人工智能模型进行结构运行状况的评价实时感知桥梁结构的健康状况，当结构出现异常时候可进行预警，提醒管理养护人员进行必要的干预，实时结构养护、加固等，且可以对这些实时构件和整体数据实施分析，评价桥梁关键构件和梁体结构的损伤状况，指导设计人员优化构件及梁体结构的设计参数。

(4) 现场前端应急触发和处置告警一体化关键技术研究

现场前端应急触发多级处置告警单元是本系统的现场执行终端，是极端状况下发生桥梁损毁时的应急处置的执行机构，在突发极端外界灾害环境影响情况下当桥梁局部或者整体发生损毁时，现场前端的应急触发装置直接通过传感器的硬件通路被“触发”并启动三级紧急告警装置，防止管理部门未及时到场而产生的二次事故，进而，同时触发启动现场的视觉抓拍装置，抓拍现场的交通状况并传回管理部门，在发生事故后，可以用于追溯事故地点的现场情况，这对于研究桥梁结构安全事故应急处置及结构健康养护具有重要现实意义。

(5) 依托工程（依托工作）

保障桥梁在服役运营过程中的安全性和可靠性，特别是在偶发极端自然灾害天气影响下危险安全事故处置的及时性、提高管养效率，已成为交通基础设施管理养护部门及工程界共同面临的巨大挑战，因此桥梁运营服务期间特别是健康监测、安全评估、极端灾害天候下的应急快速处置告警具有促进经济发展和保障生命安全、社会稳定的双重战略意义。

本项目针对传统人工巡检周期长、效率低、反馈慢、长期成本高的问题，结合当今人工智能、自动化技术和信息处理技术发展的需求，提出桥梁的轻量化桥梁基础设施安全智能结构健康监测预警及应急处置一体化系统，提供了全寿命周期数字化营运管养的前沿技术的空白开展深入研究，实际依托工程情况如下：

西安东站是铁路包头至海口主通道的关键节点与西安“四主一辅”铁路枢纽体系中的重要一环，集多种交通方式于一体的大型综合性交通枢纽； 本项目聚焦于西安东站高架快速路系统及节点立交工程EPC项目1标段。旨在通过本项目的建设，实现西安市与高铁东站的快速衔接，为枢纽提供交通功能的基础保障。本标段主要包括如下各工程：（1）新兴南路-东绕城高速立交：本立交由A匝道桥和B匝道桥构成，A匝道桥全长489m，B匝道桥全长1199m，两条匝道桥全桥墩台均采用正交 90° ，下部结构采用花瓶墩，钻孔灌注桩基础。（2）新兴南路高架：新兴南路高架桥全长955m，桥面宽度为25.5~47.8m。全桥墩台除11、12、13、14号墩外，均采用正交 90° ，下部结构采用柱式花瓶墩，钻孔灌注桩基础。（3）神鹿大道高架（含地面道路、平行匝道）：神鹿大道高架桥全长1614.5m，桥面宽度为24.5~42.06m。神鹿大道地面辅道桥包含A4匝道桥、B4匝道桥2条平行匝道。A4匝道桥全桥长234m，B4匝道桥全桥长167m。（4）4、长鸣路-神鹿大道立交：包含A2匝道桥、B2匝道桥、C2匝道桥、D2匝道桥、E2匝道桥、F2匝道桥、G2匝道桥7条匝道桥。

二、考核指标

1.预期目标

本项目以保障桥梁运营期的安全性、桥梁服役过程中受偶发极端自然灾害天气影响下应急处置的及时性、提高中小跨梁体的管养效率为目标，以影响桥梁结构健康、安全和的重要构件为研究对象，通过协同创新、多学科交叉融合攻克桥梁结构健康监测及应急处置一体化关键技术，研发基于智能构件和多传感器融合的桥梁结构健康监测及现场应急轻量化触发感知告警处置及联动报警一体化装备，并在现场开展实际示范应用，实现桥梁结构健康感知+及时应急处置和报警一体化系统，解决公路桥梁轻量化全时空、自动化、多参数智能监测，实现结构健康状况智能性能评估系统、全生命周期数字化建档和管理难题，提供桥梁受偶发自然灾害损毁情况的现场应急处置方案及装置，满足养护管理部门对公路桥梁基础设施营运过程的自动化巡检、数字化养护管理的迫切需求。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

技术指标：

- （1）压力感知灵敏度 mV/V：1.5± 20%,直线度(L)%FS:<0.5%）;长期稳定性(S)%FS: <0.1；重复性(R)%FS: <0.2;温度补偿范围(T)℃:-10℃+50℃;(多点感知)
- （2）位移感知灵敏度：0.05%，直线度(L)%FS:0.5;重复性%FS: 0.2(可定制);
- （3）振动感知：1000 mV/g(可定制);测量分辨率：0.1mV；频率范围：0.2Hz～2000Hz；数据输出：均方根（RMS）、特征频率（频谱）、振动模态（可选）(可定制);
- （4）角度感知：灵敏度 0.005° ；感知范围：-15～15° ；
- （5）挠度感知：挠度范围±60mm,距离±60m；感知精度：±0.01@10m；
- （6）温度感知：0.5℃；感知范围：-40～100℃；
- （7）告警准确率：100%；虚警概率：0%；
- （8）抓拍响应延迟：不大于 1ms；复杂天气增强：具备；
- （9）灾毁现场联动触发处置告警延迟：不大于 5ms;多传感器信息融合告警：

边缘具备；

(10) 灾毁远程预警延迟：不大于 10s； 多功能远程预警方式：具备；

(11) 现场设备自供电：太阳能+设备压力自发电+风机自发电。

3.经济和社会效益

经济效益：

本项目将研制成功植入式智能传感器的桥梁智能支承装置构件、低成本轻量化桥梁挠度仪、桥梁损毁现场应急阻拦和告警一体化系统及监测与安全评估系统样机将多所示范应用桥梁中投入使用，后期将进一步完善系统，并小批量正式投产推广至其他中小跨度桥梁工程中得以应用，实现更大的经济和社会效益。此外，本项目拟集成开发的桥梁外部智能感知装备，并结合智能感知构件实现桥梁结构服役安全状态及应急处置一体化系统对各类大中小型桥梁具有普遍的适用性，可实现对多座桥梁支座的实时在线监测、安全评估和多级预警，并具备智能化的风险对策分析和功能，具有扩容功能。该系统将有效解决现有桥梁健康监测系统监测桥梁单一、监测目标多而杂、数据处理效率低下、维护费用高、智能化程度低，特别是缺少极端外部环境影响下桥梁损毁的应急处置等问题，产品的问世将带来巨大的社会效益、具备良好的产业前景和市场潜力。

根据市场调研及反馈，桥梁结构轻量化监测预警处置系统成套装备市场售价为 6 万元（含税）/套，根据市场需求情况，前期每年预计推广 20 套，新增销售收入 120 万元/年。养护维护和后续数据处理费用为 2000 元/桥，根据市场需求情况，新增销售收入 4 万元/年，总体产生收益 124 万元/年。

社会效益：

保障桥梁在服役运营过程中的安全性和可靠性，特别是在偶发极端自然灾害天气影响下危险安全事故处置的及时性、提高管养效率，已成为交通基础设施管理养护部门及工程界共同面临的巨大挑战，因此桥梁运营服务期间特别是的健康监测、安全评估、极端灾害天候下的应急快速处置告警具有促进经济发展和保障生命安全、社会稳定的双重战略意义。

桥梁健康轻量化多参数智能监测预警及应急处置一体化系统的研究成功可极大的缓解目前护栏基础设施的检测方面面临的人力、物力不足等问题，最

大程度的保障人民及生命财产的安全，促进我国智能制造和研发水平达到国际一流水平，带动包括政府交通管理部门、检测部门、养护部门、电信运营商、内容-服务-应用等提供商的行业联盟和产业的快速发展，建造一个面向基础设施的智能化运营平台，形成基础设施的信息物理和智能一体化服务模式。

在社会经济发展水平和安全事故的损失大小成正比，在当今经济高速增长、人口日益膨胀的情况下，基础设施安全对公共安全的影响越来越大，已成为影响公共安全的重要因素。交通基础设施是国民生活的物质基础，是为生产奠定了物质基础，能够为经济的发展带来成倍增长的助推力，因此基础设施的安全和完善以及公共服务的到位程度是判断其经济是否持续稳定发展的基础。改善运营手段离不开强大的技术力量，未来交通设施着重于智慧信息平台的建设，只有建设共同互联能动的信息处理平台，才能将信息转化为大数据，进行数字化的安全管理。

建立一体化的信息基础设施成为未来信息物理系统发展的必然趋势。构建互联网、移动通信网等全面融合的一体化的基础设施信息网络对国民经济、国防安全有深远影响，是提升我国信息服务能力的有效途径。一体化网络具有典型的大时空尺度属性，在任何复杂气候条件、任何时间段、任何地段均可以接入，其智能控制和处理、快速反应、高效应对等鲜明特征。

构建适应万物互联、智能化社会的新一代互联网基础设施，对于促进信息技术与实体经济融合、保障信息基础设施的安全有着重要意义。未来智能化网络将具备更简单、更灵活和更开放的特点。我们相信，信息基础设施将与人工智能等技术深度结合并广泛应用于经济社会的方方面面，未来其将不断向全要素、全天候、全时空、高质量和强智能等方向加速演进，最终发展可能会大大超出我们的想象。

4.成果提供形式

本项目针对传统人工巡检周期长、效率低、反馈慢、长期成本高的问题，结合当今人工智能、自动化技术和信息处理技术发展的需求，提出桥梁的轻量化桥梁基础设施安全智能结构健康监测预警及应急处置一体化系统，提供了全寿命周期数字化营运管养的前沿技术的空白开展深入研究，拟取得以下研究成

果:

1. 桥梁结构健康轻量化智能感知预警及应急处置系统相关技术行业发展趋势报告 1 份;
2. 发表学术论文不少于 5 篇,其中核心期刊 2 篇,SCI/EI 检索不少于 1 篇;
3. 一体化的桥梁基础设施多参数智能检测、应急处置集成一体化系统样机 1 套(示范应用桥梁安装);
4. 轻量化桥梁结构健康智能监测平台软件 1 套(配使用说明书);
5. 申请国家专利不少于 2 项;
6. 申请软件著作权不少于 1 项;
7. 培养 1 名博士研究生,2 名以上硕士研究生.

5. 其他考核指标

(1) 项目执行期内,开展行业媒体宣传报道不少于 3 次,面向交通管养行业开展技术交流与成果推广活动不少于 1 次;

(2) 完成不少于 1 座桥梁的示范应用,形成可复制的中小跨径桥群监测系统部署与运维技术报告 1 份。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
第一阶段 2026 年 1 月至 2026 年 12 月	1) 深入调研国内外关于轻量化桥梁结构健康监测预警及应急处置当前发展和建设现状、轻量化桥梁结构基础设施检测装备研发的公司、高校及研究所，检测单位，对比相关技术需求，制定轻量化桥梁结构健康监测预警及应急处置一体化系统关键技术及技术路线； 2) 研究并创新中小跨径桥梁结构构件植入参数获取和检测关键技术，深入了解行业需求； 3) 根据制定的技术路线研发基于智能构件+外置传感器的多传感器桥梁结构智能监测预警及应急处置硬件系统； 4) 研究开发基于硬件平台的数据获取方法和相关信号滤波算法，设计数据采集和获取硬件电路；
第二阶段 2027 年 1 月至 2027 年 12 月	1) 设计基于智能构件（伸缩缝+支座）的桥梁结构健康智能监测系统，研究构件状态参数采集和归一化标定技术； 2) 深入研究基于自感知伸缩装置的桥梁结构健康智能监测预警系统模型，设计基于深度学习理论的伸缩缝早期故障提取算法，研究其中的获取关键技术； 3) 研发设计激光基准的轻量化桥梁变形实时监测系统，并研究复杂外界环境影响下的靶标图形处理方法，进行传感器一体化标定方法研究，以实现变形值的测量； 4) 开展多点激光基准的轻量化桥梁变形实时监测系统试验，研究参数解算算法； 5) 研究基于外置传感器的桥梁结构健康智能感知系统测原理，设计多传感器桥梁状态智能感知电路系统； 6) 构建多模态现场通信单元，进行联调，并且利用所构建的通信切换机制验证系统的可靠性；
第三阶段 2028 年 01 月至 2028 年 12 月	1) 设计研发极端外界环境影响下的现场多级联动预警系统，并和通信系统进行联调验证； 2) 设计开发基于云平台的软件系统，构建结合地址信息的大数据结构健康评价软件系统，形成桥梁结构据养护溯源的数字档案系统，并进行综合性能进行测试，并根据问题进行修改； 3) 现场安装系统测试，总结问题，进行项目阶段性考核与方案调整，修改轻量化监测系统及网络平台软件系统的结构和组成，并进行优化； 4) 构建基于网联平台的桥梁结构健康监测预警及应急处置一体化基础设施全生命周期数字化养护管理档案，形成桥梁基础设施演化的评估的成套解决方案； 5) 探讨系统的产业化应用和服务提供方案，联合相关部门开展商业化推广方案； 6) 申请国家专利和发表相关学术论文。

四、项目经费

项目总经费：60 万元
交通运输厅补助：19.9 万元
自筹资金：40.1 万元

经费支出预算表

科 目	总经费 (单位：万元)	厅补经费 (单位：万元)
(一) 直接费用	60.0	19.9
1. 设备费	6.0	2.0
(1) 购置设备费	2.0	1.0
(2) 试制设备费	2.3	0.3
(3) 设备改造与租赁费	1.7	0.7
2. 业务费	27.5	7.5
(4) 材料支出	14.0	4.0
(5) 测试化验实验加工支出	6.3	1.5
(6) 燃料及动力支出	1.2	0
(7) 差旅支出	3.5	2
(8) 会议支出	0.0	0.5
(9) 国际合作与交流支出	0.0	0.0
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	2.5	0.0
(11) 其他支出	0.0	0.0
3. 劳务费	20.5	7.5
(12) 劳务性支出	19	7.0
(13) 咨询专家支出	1.5	0.5
(二) 间接费用	6	2.9
4. 管理费	4.7	2.7
5. 绩效支出	1.3	0.2
合 计	60.0	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）	3
		（1）授权发明专利	1
		（2）实用新型	2
		（3）外观设计	0
		2.软件著作权授权数（项）	1
		3.发表论文（篇）	5
		（1）其中 SCI 索引收录数	1
		（2）其中 EI 索引收录数	1
		（3）其他	3
		4.著作（部）	0
		5.制订标准数（项）	1
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	1
	其他成果	1.填补技术空白数	0
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	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	3
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	1
		（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）	0
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
		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牵头,联合陕西高速公路工程试验检测有限公司、中路高科交通检测检验认证有限公司、长安大学共同实施,各单位具体分工如下:

陕西交控桥隧有限公司(牵头单位、应用单位): 负责智能感知支座、伸缩缝等构件的生产加工与性能测试;负责系统样机的试制、集成与标准化设计;负责样机性能检测与质量管控;提供桥梁构件生产、安装的技术支撑;负责项目成果的产业化转化与市场推广。落实项目配套经费与依托工程协调;负责项目现场试验、示范应用落地与推广;提供项目实施所需的工程现场、管养数据等支撑条件;负责项目成果在辖区公路桥梁的落地应用。

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。

中路高科交通检测检验认证有限公司: 负责项目产品试验检测。

长安大学(核心技术研发单位): 负责项目总体规划与技术方案设计;开展核心理论研究、算法开发与模型构建;负责智能感知构件、激光监测单元、边缘计算模块、云端平台的研发与调试;开展室内试验与样机性能优化;负责学术论文、专利、软著等知识产权申报;负责人才培养工作。

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，中路高科交通检测检验认证有限公司，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 签名
1	宋世杰	1972.12	陕西交控桥隧有限公司	高级	交通运输工程领域工程	项目总体负责 宋世杰
主要研究人员						
2	王伟	1981.03	陕西交控桥隧有限公司	中级	交通工程（安全设施）	项目协调设计 王伟
3	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。 王海渊
4	李明	1983.11	中路高科交通检测检验认证有限公司	正高级	桥梁与隧道工程	检测总负责 李明
5	张喆	1986.5	陕西交控桥隧有限公司	中级	公路工程	现场检测实施与数据采集 张喆
6	辛向阳	1980.02	陕西交控桥隧有限公司	中级	其他	评价测试 辛向阳
7	王会峰	1976.03	长安大学	正高级	信息化	项目规划 王会峰

8	谢进财	1977.06	中路高科交通检测检验认证有限公司	助理工程师	桥梁检测	产品检测	谢进财
9	张伟	1982.12	中路高科交通检测检验认证有限公司	助理工程师	道路工程	数据采集	张伟
10	曹志远	1984.07	中路高科交通检测检验认证有限公司	助理工程师	机械	数据分析	曹志远
11	靳明洋	1988.11	中公高科养护科技股份有限公司	高级工程师	道路工程	现场指导	靳明洋
12	高荣	1987.11	长安大学	副高级	信息化	软件设计	高荣
13	骆巧叶	1990.05	陕西交控桥隧有限公司	中级	机械设计	产品设计	骆巧叶
14	侯柄江	1992.02	陕西交控桥隧有限公司	中级	工程力学	产品试验	侯柄江
15	刘盼芝	1980.06	长安大学	副高级	交通工程（机电工程）	项目协调设计	刘盼芝
16	杨丁	1982.09	陕西交控桥隧有限公司	中级	桥梁工程	现场实施	杨丁
17	罗宇涛	1984.04	陕西交控工程技术有限公司	副高级	桥梁工程	现场实施	罗宇涛
18	关丽敏	1987.11	长安大学	副高级	信息化	算法研究及软件设计	关丽敏
19	李政嫻	2001.07	长安大学	技术员级	信息化	硬件设计	李政嫻
20	贺东兴	1999.10	长安大学	技术员级	信息化	算法研究	贺东兴
21	张成艳	1996.09	长安大学	技术员级	信息化	软件设计	张成艳

八、信息表

项目合同编号		25-79X		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部	
项目名称		桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用							
项目实施所在地		陕西		起止年限		2026 年 1 月至 2028 年 12 月			
总 经 费		60.0		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		
	通讯地址	陕西省西安市碑林区长安北路 8 号陕西高速大厦					邮编	714000	
	单位性质	(4) 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	中路高科交通检测检验认证有限公司							
	3	长安大学							
项目负责人	姓 名	宋世杰		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1972.12	
	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	18209287191 /029-85250919			电子邮箱		598960780@qq.com		
项目联系人	姓名	王会峰			性别		男		
	联系电话	13571811126 /029-62630023			电子邮箱		hfwang@chd.edu.cn		
项目组人数	22	高级	9	中级	5	初级	6	其他	8
主要研究内容 (100 字以内)	项目多学科交叉融合研发基于智能构件和多传感器融合的桥梁结构健康监测及现场应急简易触发感知告警处置及联动报警一体化装备。具体分为：(1) 研发设计智能感知桥梁支座，形成集成智能支座构件；(2) 研发设计智能感知伸缩缝桥梁构件，集成一体化信息采集；(3) 研发基于激光基准的桥梁结构轻量化实时检测装置；(4) 研发基于智能构件的中小跨桥群群头快速简易多级联动告警装置；(5) 研发现场灾毁视频抓拍装置，满足高精度动态抓拍需求。								
成果属性	A,D	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他							
成果形式	A,B,C,D	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 10 份，甲方单位伍份，承担单位 5 份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

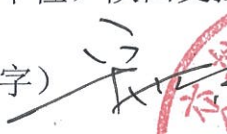
合同甲方：陕西省交通运输厅

负责人：(签字)  2020年3月27日

联系人：(签字)  (公章)

电 话：029-88869067

合同乙方：(承担单位) 陕西交控桥隧有限公司

单位负责人：(签字)  2020年3月27日

项目负责人：(签字)  (公章)

电 话：

财务负责人：(签字) 

账 户 名：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：

2020年3月27日



项目编号: 25-79X

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用

申请单位: 陕西交控桥隧有限公司 (盖章)

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.....	5
1.3 项目概要.....	5
1.4 市场需求前景或推广应用领域.....	6
二、前期科研及工作基础	8
2.1 分析与评价.....	8
2.1.1 轻量化健康监测理论与方法研究现状.....	8
2.1.2 轻量化健康监测手段与设备研究现状.....	9
2.1.3 中小跨径桥梁健康状态评估及预警平台研究现状.....	11
2.2 项目前期科研及现有工作条件.....	13
2.2.1 支撑条件.....	13
2.2.2 前期工作基础.....	15
2.2.3 获奖情况.....	22
2.2.4 现有试验手段（设施、设备）	26
2.2.5 研究团队及协作情况.....	31
2.3 参考文献.....	32
三、实施方案.....	37
3.1 拟解决的关键问题.....	37
3.2 主要研究内容及实施方案.....	38
3.3 技术路线.....	39
3.3.1 多传感器梁体结构服役状态智能感知构件单元研究.....	41
3.3.2 基于链式激光基准的梁体多点轻量化监测单元设计.....	42
3.3.3 多模可靠数据传输通信“神经线”单元设计	48
3.3.4 现场前端应急触发多级处置告警单元.....	49
3.3.5 云端数据分析、存储与智能预警单元.....	51

3.3.6 多模系统供电单元.....	55
3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接.....	55
3.5 有关技术经济指标.....	56
四、项目承担单位及参加单位概况.....	57
4.1 单位概况.....	57
4.2 技术力量及人员构成.....	60
4.3 各自承担的主要工作.....	62
4.4 项目主要负责人情况.....	62
五、项目依托工程情况及其他必要支撑条件	62
5.1 依托工程概况.....	64
5.2 投资来源.....	65
5.3 工程进度与项目科研进度的配合.....	65
5.3.1 核心配合模式.....	65
5.3.2 关键写作机制.....	66
5.4 组织管理形式.....	67
六、项目经费估算及资金筹措情况.....	69
七、项目绩效指标	70
八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益	72
8.1 项目预期目标.....	72
8.2 提交的研究成果及其形式.....	73
8.3 经济、社会、环境效益分析.....	73
8.3.1 经济效益.....	74
8.3.2 社会效益.....	74
九、其它需要说明的问题	76
十、申请单位意见	77

一、项目研究的背景和必要性

1.1 项目的研究背景和意义

近年来，我国桥梁基础设施建设的发展如火如荼，许多重大工程项目如雨后春笋般蓬勃兴建，桥梁作为智慧城市和公共交通系统重要的基础设施组成部分，承担着大量的交通流量和人员负载。经过几十年建设的快速发展，我国已一跃成为世界上桥梁数量最多的国家。根据2023年交通运输部行业发展统计公报，截至2023年底全国公路桥梁107.93万余座，9528.82万延米，其中，中小跨径公路桥梁89.14万座，占比82.59%，且大约40%的中小跨径桥梁服役已经超过20年，已进入服役期运营养护的高峰期，现在及未来我国将长期面临艰巨的桥梁运营期的管养问题。如何保障桥梁运营期的安全性、桥梁在服役过程中偶发极端自然灾害天气影响下处置的实时性、提高管养效率，已成为交通基础设施管理养护部门及工程界共同面临的巨大挑战，因此桥梁运营服务期间特别是健康监测、安全评估、极端灾害天候下的应急快速处置告警具有促进经济发展和保障生命安全、社会稳定的双重战略意义。

桥梁基础设施，特别是高速公路桥梁设施，其服役过程中，随着车辆、温度、风等环境载荷作用、钢筋腐蚀、冻融循环、碱集料反应、疲劳效应、腐蚀效应和材料老化等不利因素的反复作用和影响，正如人有生老病死一样，桥梁基础设施也一样，其结构也不可避免地产生承载能力下降、损伤累积、耐久性降低等衰减；同时，在遭受地震、洪水、飓风、爆炸等自然或人为灾害时，桥梁基础设施结构也可能受到不同程度的损伤，这些损伤如果不能得到及时发现，严重时甚至会发生灾难性的垮塌事故，表1-1为国内外一些桥梁倒塌或者失效的事故。另外，现代桥梁设施正在向更轻柔、结构形式和功能日趋复杂的方向发展，虽然在设计阶段已经进行了结构性能模拟试验科研工作，然而由于大型结构的力学和结构特点以及其所处的特定外界环境，要在设计阶段完全把握和预测桥梁在各种复杂环境和运营条件下的结构特性和行为是非常困难的。

表1-1桥梁坍塌失效事故

桥名	桥型	事故年份	事故情况	失效原因
----	----	------	------	------

		(年)		
(美国)Tabulate桥	钢梁桥	1877	倒塌	压杆屈曲, 疲劳脆断
(英国) Cay桥	钢梁桥	1879	倒塌	设计和维护不足
(加拿大)魁北克桥	钢梁桥	1907/1916	倒塌	压杆屈曲/强度不足
(加拿大)尼加拉瓜 Upper Steal Arch桥	钢拱桥	1938	倒塌	结冰破坏
(美国)旧Tacoma桥	悬索桥	1940	倒塌	风致动力失稳
(美国)Peace River桥	悬索桥	1957	倒塌	主缆抛锚固端滑动
(美国)Kings桥	钢桥	1962	倒塌	疲劳脆断
(美国)Point Pleasant桥	悬索桥	1967	倒塌	疲劳脆断
(美国)Mi anus River桥	梁桥	1983	倒塌	维护不足
(英国)Yuys-ygwas桥	混凝土桥	1985	倒塌	预应力钢筋锈蚀
(美国)乔治·华盛顿桥	吊桥	1992	主缆腐蚀	主缆腐蚀
(德国)Kohl brand Estuary桥	斜拉桥	1977	斜拉索更换	腐蚀、断裂
(韩国)圣水大桥	斜拉桥	1994	中孔崩塌	疲劳断裂
(帕劳)Koori-Babel桥	混凝土桥	1996	倒塌	受力筋锈蚀
广州海印大桥	斜拉桥	1995	斜拉索更换	斜拉索锈蚀、断裂
济南黄河公路大桥	斜拉桥	1995	斜拉索更换	斜拉索锈蚀严重
重庆彩虹大桥	拱桥	1999	倒塌	施工质量低下
宜宾小南门桥	拱桥	2001	局部倒塌	吊杆断裂
(美国)I-40桥	混凝土梁桥	2002	局部倒塌	船只撞击
辽宁盘锦田庄台大桥	混凝土桥	2004	局部倒塌	裂缝严重
湖北钟祥汉江大桥	混凝土桥	2005	拆除重建	裂缝严重、材料裂化
贵州小尖山大桥	混凝土梁桥	2005	支架垮塌	支架问题
抚顺大桥	混凝土梁桥	2005	局部倒塌	洪水冲击
辽宁营口熊岳大桥	混凝土梁桥	2006	局部倒塌	洪水冲击
(美国)I-35W密西西比河大桥	拱桥	2007	倒塌	桥梁养护不足
广东九江大桥	斜拉桥	2007	局部倒塌	船只撞击
湖南凤凰堤溪沅江大桥	拱桥	2007	倒塌	设计建造不规范

株洲红旗路高架桥	混凝土梁桥	2009	局部倒塌	拆除风险
黑龙江铁力市西大桥	混凝土梁桥	2009	局部倒塌	车辆超载
河南伊河汤营大桥	拱桥	2010	倒塌	洪水冲击
浙江钱江三桥引桥	混凝土梁桥	2011	局部倒塌	设计承载力不足
福建武夷山公馆大桥	拱桥	2011	局部倒塌	车辆超载
哈尔滨阳明滩大桥主桥	混凝土梁桥	2012	局部倒塌	车辆超载
江西河东桥	拱桥	2012	局部倒塌	桥梁养护不足
湖北十堰市铁路桥	铁路桥	2013	局部倒塌	车辆撞击
山东淄博市南大桥	混凝土梁桥	2013	局部倒塌	车辆超载
四川绵阳老青莲大桥	混凝土梁桥	2013	倒塌	洪水冲击
杭州绕城高速桥梁	混凝土梁桥	2015	桥梁断裂	施工推土处置不当
如皋新柴桥	混凝土梁桥	2015	局部倒塌	施工质量不合格
粤赣高速城南匝道桥	混凝土梁桥	2015	局部倒塌	施工质量不合格
湖北107国道赤壁马家湾桥	混凝土梁桥	2015	桥台塌陷	车辆超载
黑龙江齐齐哈尔塔哈河大桥	混凝土梁桥	2015	局部倒塌	车辆超载
江西泰和大桥	混凝土梁桥	2016	倒塌	拆除中倒塌
杭州欢喜永宁桥	拱桥	2017	局部倒塌	冲刷
陕西柞水永宁桥	混凝土梁桥	2024	倒塌	洪水冲击
雅康高速隧间桥	混凝土梁桥	2024	倒塌	洪水冲击

因此，为确保桥梁基础设施、特别是占比更多的中小跨径桥梁结构的服役安全、实施经济合理的监测、实现安全经济的运行，查明不可接受的响应原因，实时监测和性能预报，及时发现和估计桥梁结构内部损伤的位置和程度，在经历了导致损伤的事件后，立即对它们的健康状况做出评估是非常必要的。这对保障桥梁服役安全、提高结构的运行效率、乃至保障人民的生命和财产安全具有极其重大的意义。

20世纪80年代以来，针对特大跨桥梁健康状况的监测、评估和预警技术已成为学术界、工程界的研究热点，并且在一些特殊桥梁工程中取得了一定范围的应用。但是目前普通中小跨桥梁管养维护仍普遍采用人工定期巡检、试验检测、专家评估的方式进行。传统上，桥梁结构健康状况评估是通过人工目视检查或者借

助便携式测量仪得到的信息进行的。人工检查可分为经常检查、定期检查和特殊检查。但人工检查方法在实际应用中有很大的局限性，美国联邦公路局的最新调查表明，由人工目测检查做出的评估结果有56%是不恰当的。传统检测方式不足之处主要表现在以下几个方面：（1）需要投入大量的人力、物力、财力并有诸多检查盲点；（2）主观性强，难以量化；（3）缺少整体性；（4）影响正常交通运行；（5）周期长实时性差。传统检查方法的诸多缺点和限制使其越来越难以满足占比更多的中小跨桥梁结构健康状况检查的需求。实践证明，传统的桥梁运营管理手段存在诸多痛点，如中小跨桥梁的信息化管理缺失、人工管养工作量大、费时费力，效率低下，自动化程度低、没有针对极端状况下的突发应急防灾减灾处置装置、数字化管理体系不完善、智能化程度不高等。且现有传统中小跨径桥梁结构安全监测系统由于传感器、数据分析、损伤识别等方面理论和技术上的局限性，智能化程度较低，尚不能满足多数桥梁的智慧化、实时应急处置管理的需求。因此，针对山洪、泥石流、滑坡等极端外部自然灾害威胁监测告警和现场处置需求，提高桥梁灾毁的快速感知和现场告警应急处置能力、是保障桥梁运维安全、提升管养技术水平、保障人民生命财产安全的迫切需求，为解决以上痛点提供了有效手段。

目前，只是针对桥梁的监测数据获取的硬件平台或者应用于损伤定位的深度学习算法做出的优化和改进，具有一定的局限性，并没有将这些硬件平台的搭建和深度学习算法综合运用到桥梁监测的全过程中，没有形成一个完整的监测系统，另外，传统的桥梁健康监测终端采集方式、传输方式相对比较落后，数据采集多基于电缆进行传输，传输策略耗费时间且安装费用昂贵，同时存在一个单点桥梁监测采用上百个传感器的情况，其数据量庞大，导致桥梁健康监测系统往往难以获得理想的监测结果，对突发事件的反应不及时，给交通安全带来了不小的威胁。

最近几年，由于极端自然环境灾害、交通流量及不规范超载现象而造成的重大桥梁塌陷事故不胜枚举，为避免类似的事故再次发生，实现数量更多的中小跨桥梁结构状态的轻量化长期监测，并将监测数据实时传输给监管部门，并针对性地进行中小跨桥梁的评估和安全预警、现场快速应急处置具有非常重要的意义。当桥梁健康预警时，维护人员能够及时维修，从而降低桥梁结构体的进一步损坏

而引发安全事故，当由于极端外界环境引起严重桥梁事故时能够现场进行应急及时处置、补救，避免由于恶性事故引起的二次伤害事故。因此，研发占比更多的中小跨径桥梁的轻量化的集监测、风险评价、极端事故现场应急快速处置于一体的健康监测系统意义重大而深远、任务迫在眉睫。

1.2 研究目的

结构健康监测系统相当于为结构增加了一套神经系统，通过各种传感器感知结构损伤信息，并通过有线、无线的网络传回给后方计算机，再通过分析得出结论。相较于传统的人工检查，结构健康监测提高了对突发性损伤的发现度，使得累积损伤的发展推演成为可能，可以实现对隐蔽部位的观察，在大的损伤和异常事件发生时及时报警处置，同时可以利用数据验证设计，并指导后续的桥梁设计。

本项目以保障桥梁运营期的安全性、桥梁服役过程中受偶发极端自然灾害天气影响下应急处置的及时性、提高中小跨梁体的管养效率为目标，以影响桥梁结构健康、安全运营的重要构件为研究对象，通过协同创新、多学科交叉融合攻克桥梁结构健康监测及应急处置一体化关键技术，研发基于智能构件和多传感器融合的桥梁结构健康监测及现场应急轻量化触发感知告警处置及联动报警一体化装备，并在现场开展实际示范应用，实现桥梁结构健康感知+及时应急处置和报警一体化系统，解决公路桥梁轻量化全时空、自动化、多参数智能监测，实现结构健康状况智能性能评估系统、全生命周期数字化建档和管理难题，提供桥梁受偶发自然灾害损毁情况的现场应急处置方案及装置，满足养护管理部门对公路桥梁基础设施营运过程的自动化巡检、数字化养护管理的迫切需求。

1.3 项目概要

根据2023年交通运输部行业发展统计公报，截至2023年底全国公路桥梁107.93万余座，9528.82万延米，其中，中小跨径公路桥梁89.14万座，占比82.59%，且大约40%的中小跨径桥梁服役已经超过20年，已进入服役期运营养护的高峰期，现在及未来我国将长期面临艰巨的桥梁运营期的管养问题。如何保障桥梁运营期的安全性、桥梁在服役过程中偶发极端自然灾害天气影响下处置的实时性、提高管养效率，已成为交通基础设施管理养护部门及工程界共同面临的巨大挑

战。因为极端自然环境灾害、交通流量及不规范超载现象而造成的重大桥梁塌陷事故不胜枚举，为避免类似的事故再次发生，实现数量更多的中小跨桥梁结构状态的轻量化长期监测，并将监测数据实时传输给监管部门，并针对性地进行中小跨桥梁的评估和安全预警、现场快速应急处置具有非常重要的意义。当桥梁健康预警时，维护人员能够及时维修，从而降低桥梁结构体的进一步损坏而引发安全事故，当由于极端外界环境引起严重桥梁事故时能够现场进行应急及时处置、补救，避免由于恶性事故引起的二次伤害事故。因此，研发占比更多的中小跨径桥梁的轻量化的集监测、风险评价、极端事故现场应急快速处置于一体的健康监测系统意义重大而深远、任务迫在眉睫。

1.4 市场需求前景或推广应用领域

如何保障桥梁在服役运营过程中的安全性和可靠性，特别是在偶发极端自然灾害天气影响下危险安全事故处置的及时性、提高管养效率，已成为交通基础设施管理养护部门及工程界共同面临的巨大挑战，因此桥梁运营服务期间特别是健康监测、安全评估、极端灾害天候下的应急快速处置告警具有促进经济发展和保障生命安全、社会稳定的双重战略意义。

本项目已经研制成功的植入智能传感器的桥梁智能支承装置及支承装置和桥梁伸缩缝构件状态感知及监测与安全评估系统样机已在示范应用桥梁中投入使用，前期研究开展顺利，后期将进一步完善系统，并正式投产及推广至其他桥梁工程中应用，实现更大的经济和社会效益。此外，本项目拟集成开发的桥梁外部智能感知装备，并结合智能感知构件实现桥梁结构服役安全状态及应急处置一体化系统对各类大中小型桥梁具有普遍的适用性，可实现对多座桥梁支座的实时在线监测、安全评估和多级预警，并具备智能化的风险对策分析和功能，具有扩容功能。该系统将有效解决现有桥梁健康监测系统监测桥梁单一、监测目标多而杂、数据处理效率低下、维护费用高、智能化程度低，特别是缺少极端外部环境的影响下桥梁损毁的应急处置等问题，产品的问世将带来巨大的社会效益、具备良好的产业前景和市场潜力。

根据市场调研及反馈，桥梁结构轻量化监测预警处置系统成套装备市场售价为6万元（含税）/套，根据市场需求情况，按每年产销2000套来算，新增销售收

入1.2亿元/年。养护维护和后续数据处理费用为2000元/桥，根据市场需求情况，新增销售收入400万元/年，总体产生收益1.24亿元/年。

保障桥梁在服役运营过程中的安全性和可靠性，特别是在偶发极端自然灾害天气影响下危险安全事故处置的及时性、提高管养效率，已成为交通基础设施管理养护部门及工程界共同面临的巨大挑战，因此桥梁运营服务期间特别是健康监测、安全评估、极端灾害天候下的应急快速处置告警具有促进经济发展和保障生命安全、社会稳定的双重战略意义。

桥梁健康轻量化多参数智能监测预警及应急处置一体化系统的研究成功可极大地缓解目前护栏基础设施的检测方面面临的人力、物力不足等问题，最大程度地保障人民生命财产的安全，促进我国智能制造和研发水平达到国际一流水平，带动包括政府交通管理部门、检测部门、养护部门、电信运营商、内容-服务-应用等提供商的行业联盟和产业的快速发展，建造一个面向基础设施的智能化运营平台，形成基础设施的信息物理和智能一体化服务模式。

社会经济发展水平和安全事故的损失大小成正比，在当今经济高速增长、人口日益膨胀的情况下，基础设施安全对公共安全的影响越来越大，已成为影响公共安全的重要因素。交通基础设施是国民生活的物质基础，是为生产奠定了物质基础，能够为经济的发展带来成倍增长的助推力，因此基础设施的安全和完善以及公共服务的到位程度是判断其经济是否持续稳定发展的基础。改善运营手段离不开强大的技术力量，未来交通设施着重于智慧信息平台的建设，只有建设共同互联能动的信息处理平台，才能将信息转化为大数据，进行数字化的安全管理。

建立一体化的信息基础设施成为未来信息物理系统发展的必然趋势。构建互联网、移动通信网等全面融合的一体化的基础设施信息网络对国民经济、国防安全有深远影响，是提升我国信息服务能力的有效途径。一体化网络具有典型的大时空尺度属性，在任何复杂气候条件、任何时间段、任何地段均可以接入，其智能控制和处理、快速反应、高效应对等鲜明特征。

构建适应万物互联、智能化社会的新一代互联网基础设施，对于促进信息技术与实体经济融合、保障信息基础设施的安全有着重要意义。未来智能化网络将具备更简单、更灵活和更开放的特点。我们相信，信息基础设施将与人工智能等技术深度结合并广泛应用于经济社会的方方面面，未来其将不断向全要素、全天

候、全时空、高质量和强智能等方向加速演进，最终发展可能会大大超出我们的想象。

二、前期科研及工作基础

2.1 分析与评价

2.1.1 轻量化健康监测理论与方法研究现状

我国重建设而轻养护的公路桥梁管理模式，加快了桥梁老化的速度，容易造成安全隐患。采取有效手段对桥梁进行健康监测对确保公共交通的安全和正常运行具有十分重要的作用，长期以来受到了国内外学术界、工程界的广泛关注，并且在健康监测理论与方法上取得了一些优秀的研究成果。

在桥梁裂缝检测、损伤识别及评估方法方面，孙亮等^[1]提出了基于自适应阈值Canny算法的裂缝检测方法，该算法解决了需要人工设置阈值的缺陷；由Bradford等^[2]提出的深度卷积生成式对抗网络（DCGAN）是人工智能领域的一个研究热点，已经被成功用于生成全新图像；王盟等^[3]提出了一种基于时变模态振型小波变换的结构损伤识别方法，通过小波系数的极大值的时间及出现的位置识别出结构的损伤时间与损伤位置；Oliver H等^[4]提出了一种基于机器学习的方法Crack，利用图像块中灰度值的平均值和标准差作为裂缝检测的二维特征空间进行无监督学习。魏文龙等^[5]为了快速检测桥梁表面有无裂缝及出现裂缝的类型，提出一种基于移动端视觉的智能检测方法；颜永逸等^[6]提出通过对自回归模型系数进行模糊C均值聚类（Fuzzy C-Algorithmic, FCM）实现损伤识别；梁杰明等^[7]在MPCA基础上提出了一种特征向量差方向角作为结构损伤指标，并将其作为机械学习的输入建立智能损伤识别模型。张永平等^[8]提出一种结合突变点检测和稳健回归的自适应基线校正方法，从桥梁结构安全评估的需求出发，分析在役桥梁挠度成分特点及信号特征；余文勇等^[9]考虑到工业应用场景缺陷样本的复杂性和稀缺性，提出一种基于重构网络的缺陷检测方法（Reconstituted network detection, Benet-D）；徐衍亮等^[10]提出了一种基于轻量化监测的桥梁加固改造后评估方法，能够有效地检验桥梁加固改造后的技术指标，填补了当前加固改造桥梁在定性评价方面的空白。杨书仁等^[11]采用桥梁应变影响线理论，建立了一种基于应变

比的桥梁损伤识别与评估方法，从而对桥梁健康状况进行有效评价，解决桥梁结构监测数据分析利用方面存在的实用性不强的问题。

在桥梁监测数据的处理与计算方面，单德山等^[12]基于统计敏感性分析，讨论多个结构参数对主梁线形标高的敏感性，确定影响桥梁结构线形状态的主要因素和次要因素；刘来君等^[13]探讨施工过程中温度应力的产生原因，提出温度应力的实用计算方法，分析温度应力对桥梁主梁线形的影响。Bhang等^[14]提出了一种基于支持向量回归增量学习算法的数据处理方法，该方法在处理受干扰感知时表现出较高的准确性。Bhang等^[15]提出了基于倾斜摄影技术的桥梁施工进度管理方法，通过建立武汉沌口长江大桥施工进度可视化管理平台，论证了该技术在桥梁施工进度管理中具有广泛的应用前景。

对桥梁进行模态分析方面，Yang等^[16]开发了一种确定性随机子空间识别方法（DSSI），提高了在列车荷载作用下铁路桥梁的模态可识别性；Yang等^[17]针对具有异步响应的桥梁模态分析，提出了一种增强Ext，通过采用两阶段时滞技术同步多通道响应，并基于有限元模型及实测数据验证了该方法的有效性。

分析总结以上理论与方法，现有的轻量化健康监测规范、指南只针对大跨径桥梁，缺乏对中小跨径桥梁轻量化健康监测的系统规范和理论研究，同时监测方法多种多样没有系统的评价标准，并且许多方法理论部分比较冗杂，难以理解，这些问题都亟须解决。

2.1.2 轻量化健康监测手段与设备研究现状

桥梁结构异常变形测量、线型测量、挠度测量、应变测量等是对中小跨径桥梁进行轻量化健康监测的重要指标。

目前，常见的桥梁变形监测手段主要包括全站仪、激光干涉仪、GPS 技术、精密水准仪、合成孔径雷达技术、近景摄影测量^[18-19]，其中应用最为广泛的是精密水准测量方法，但其缺点也逐渐凸显比如，通过全站仪、精密水准仪和 GPS 等仪器获取的目标测点十分有限，而且测点离散性较高，无法完整展现桥梁的整体空间变形情况等；近景摄影测量技术测量质量不稳，精度较低，难以达到桥梁变形分析的精度要求^[20]。三维激光扫描技术突破了传统测量中单点采集的缺陷，能够快速高精扫描目标的三维形态，不受光线限制，并可快速转换数据。该技术已经在文物古迹保护、建筑监测、规划、土木工程、工厂改造、室内设计、交

通事故处理、船舶设计、灾害评估、地形勘测、数字城市、虚拟现实等各个方面得到广泛的应用。

近年来,已有很多学者将三维激光扫描技术用于桥梁变形监测。在数据获取方面,大多采用静止式激光扫描仪,姚明博等通过选取变形测点代表整体桥梁变形,再利用特征点云数据曲线拟合,获得桥梁整体变形情况,再利用提取特征数据进行点云数据曲线拟合,从而得知变形测点来表示整体桥梁变形方法,再利用提取特征数据进行点云数据曲线拟合,从而得知桥的整体变形情况^[21],这中间并没有充分利用获取的点云数据,只选取了部分边界特征数据来代表整体桥梁变形。陈红权等使用10个喷涂式标靶^[22]进行面状扫描,结果分析只对10个监测点进行了变形分析没有从整体对桥梁进行监测。由于激光扫描仪采样的非连续性,使得设定的变形监测点未能成为激光扫描仪的采样点,导致变形监测点失效。王红霞针对某拱桥模型进行扫描,拱轴线为抛物线,净跨2.90m,桥面净宽0.57m,中吊杆长为0.59m,矢跨比1/5;王红霞根据加载前、后的点云坐标值,选取一定的点,将其坐标值变化与有限元建模施加荷载后坐标变形值进行对比^[23],分析了纵梁的竖向坐标值变化情况。卢颖利用扫描仪对长300 cm,宽15cm,高12 cm的简支梁扫描。扫描过程根据现场情况判断,比较随机地进行了测站布置。上述扫描对象都是较小的模型和构件,扫描方法与数据处理过程对误差与精度的影响较小,与实际应用还有一定差距。在国外,已经开始探究从试验模型到实体模型的应用、Park等人利用三维激光扫描技术,对简支钢梁模型的变形进行试验研究,最大变形量小于1mm,与线性位移传感器直接测得的变形误差为1.6%^[24]。Armresto等人在古建筑拱桥的变形监测中利用三维激光扫描技术获取数据,并采用统计非参数方法处理点云数据、以获取拱的精确几何尺寸来分析拱的变形^[25]。

线型测量是判断桥梁结构健康状态的重要依据,通过监测桥梁线型变化,可以及时掌握桥梁使用过程中各关键截面的挠度变化,进一步可以掌握桥梁在结构安全、行车条件、耐久性等方面的变化。现有桥梁线型测量手段主要依靠水准测量方法,使用水准仪或全站仪测量各关键点相对的高程坐标,画出断面图得到桥梁线型,该方法是一种传统的方法,精度高却效率较低。Pee^[26]等使用无人机倾斜摄影技术建立了一座两跨石拱桥的三维点云模型,基于工业基础类标准定义材

料本构, 进而重建了桥梁有限元模型。刘琼琼^[27]等使用非测量相机近景摄影测量方法开展了桥梁线型监测, 使用实验场检校法对实桥进行实测, 计算的误差为 0.235 m。张绍成^[28]等采用 GPS 和北斗的实时差分动态 (RTK) 与高精度光纤惯性测量系统 (INS) 的紧组合解决方案, 利用 INS 辅助 RTK 在信号失锁的时间内, 实现了对桥梁线型的准确测量。何聪^[29]使用倾角传感器对倾角状态进行监测, 通过差分处理滤除影响测量精度的共模噪声干扰, 采用微处理器对倾角电压信号进行过采样和温度补偿处理, 实现对桥梁线型状态的实时监测。

应变信号是反映桥梁状态的重要物理量之一, 桥梁是一种重要的基础设施, 投资巨大, 使用寿命长, 传统的桥梁应变监测采用有线监测, 这种方式布线复杂、成本高, 且维护困难, 近年来, 无线传感器网络^[30-31]在结构监测、智能家居、环境监测等领域得到了广泛的应用, 无线监测技术克服了传统有线方法的种种弊端, 在小型化、低成本和智能化方面具有突出优势, 具有巨大的发展潜力^[32]; Lynch J P 等人将其团队研制的监测系统部署在韩国金堂大桥上, 监测桥梁在卡车施加载荷的情况下桥梁的振动响应^[33]; Nguyen Aha-Buy 等人采用基于 Imote2 平台的监测系统以 25HZ 的采样频率监测了 Hwamyung 桥梁基体和吊索的加度信号^[34], 设计高精度、高可靠性、多测点的无线传感器监测方案成为桥梁监测领域研究的热点。

分析以上设备与技术国内外研究现状发现: 桥梁变形监测手段获取的目标测点十分有限, 而且测点离散性较高, 无法完整展现桥梁的整体空间变形情况, 难以达到桥梁变形分析的精度要求; 现有桥梁线型测量手段精度高却效率较低。桥梁应变监测采用有线监测, 这种方式布线复杂、成本高, 且维护困难。监测手段工作量大、成本高、风险大, 易受主观影响, 一致性较差。

2.1.3 中小跨径桥梁健康状态评估及预警平台研究现状

桥梁健康状态评估是整个桥梁健康监测中最为关键的一环, 主要对传感器采集到的数据进行处理和分析, 包括数据处理、桥梁演化模型指标和安全评估三部分。

近年来, 针对老旧桥梁的监测问题, 国内外学者广泛采用传感器监测、GPS 监测以及移动车辆监测等方式, 同时随着深度学习算法的不断优化, 也逐渐开始有学者将深度学习应用于健康状况的评估诊断中。庞珂等^[35]利用多分类卷积

神经网络在挠度、北斗定位等独特优势应用到太原龙城大桥健康状况的评估；Lee等^[36]学者提出了在桥墩倾斜度监测中应用全球导航卫星系统；刘康旭^[37]开发了一套基于FPGA和Linux的桥梁健康实时大数据分析系统；张青春等^[38]人设计了一种基于Arduino单片机和云服务器的桥梁健康状态在线监测预警系统；杨李东等^[39]学者结合物联网和GIS技术开发了城市桥梁健康监测系统；杜立婵等^[40]学者基于NB-IOT开发了桥梁健康远程监测系统；黄志贤^[41]提出了一种基于NB-IT通信技术的桥梁健康监测方案；申志宇^[42]利用STM32和FPGA搭建了硬件控制平台，上位机则采用C#编写各控制功能来完成桥梁健康状态评估；Bhang等^[43]提出了基于倾斜摄影技术的桥梁施工进度管理方法，通过建立武汉沌口长江大桥施工进度可视化管理平台，论证了该技术在桥梁施工进度管理中具有广泛的应用前景；徐哲能等^[44]基于微服务架构，搭建了一套从桥梁基本信息管理、结构监测数据自动采集，到数据分析、自动预警的桥梁健康管理平台；贺效鹏^[45]通过融合前端新一代公路桥梁智能监测仪器、升级后端以云平台为核心的公路桥梁健康监测与安全预警系统，搭建形成集公路桥梁AloT开放平台（Paan）、公路桥梁健康监测与安全预警系统（Maas）于一体的新型公路桥梁健康监测与安全预警云平台。

国内外学者利用试验数据与深度算法相结合建立了实用评估模型，对桥梁的评估提供了一种简便有效的方法。周敦^[46]利用钢筋混凝土单梁结构动力特性与承载力之间的关系，建立了动力法评估模型，并通过九座典型公路钢筋混凝土简支梁桥进行了验证；赵煜等^[47]针对开裂损伤后的在役预应力混凝土简支箱梁桥，建立了基于主要裂缝统计特征参数的开裂预应力混凝土箱梁损伤计算模型；郭琦等^[48]研究了预应力混凝土桥梁有效预应力与各主要影响因素之间复杂的非线性关系，应用改进BP神经网络建立了混凝土桥梁服役期内预应力衰减的神经网络评估模型。MosbehKaloop等^[49]采用小波变换去噪法对GPS测量值进行滤波，此外，还利用GPS和加速度计监测系统对桥梁的振动性能进行了评估，证明提出的ANFIS运动预测性能模型完全足以保证桥梁的安全。

科学的桥梁技术状况评估方法是桥梁安全受控的重要理论依据，能准确地反映桥梁结构实际技术状态，目前国内外学者采用更加简单、概念明确、容易实施的方法对桥梁进行评估。王凌波^[49]利用从荷载试验设计到残余承载能力计算

全过程，提出了在役中小跨径预应力梁桥承载能力评估方法，并验证了该计算方法的有效性；赵煜等^[51]建立了截面平衡迭代格式和截面损伤刚度表达式提出了基于裂缝特征的预应力混凝土简支梁损伤刚度评估方法，并进行了实桥验证；贺拴海等^[52]利用四片板梁和四片T梁模型室内试验结果以及开裂截面的几何关系和裂缝开展理论，建立了以裂缝特征统计参数推测结构配筋率的方法，达到有效评估结构性能的目的；贺拴海等^[53]基于模型桥的静、动力交替试验研究，提出了多梁式结构预测评估的动力分解法，并得到了模型实验成果的验证；郭琦^[54]根据四片板梁模型从完整到破坏不同荷载等级作用下室内静、动力试验成果，并结合桥梁结构动力学理论，应用非线性回归方法，进而可以根据得到的经验公式来评估钢筋混凝土单梁的结构性能；贺拴海等^[55]提出了粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土简支T型梁的抗弯承载力计算方法，并通过对实桥模型的试验进行了验证；郭琦等^[56]以单束可控测点处的应力测值为已知条件，结合钢束沿程有效预应力分布状况的隶属模式判别，完成了名义损失参数识别，实现了复杂几何型式钢束实际有效预应力沿程分布规律的统一模拟；张鹏飞^[57]利用遗传算法优化BP神经网络对桥梁状态进行评估。

目前，只是针对桥梁的监测数据获取的硬件平台或者应用于损伤定位的深度学习算法做出的优化和改进，具有一定的局限性，并没有将这些硬件平台的搭建和深度学习算法综合运用到桥梁监测的全过程中，没有形成一个完整的监测系统，另外，传统的桥梁健康监测终端采集方式、传输方式相对比较落后，数据采集多基于电缆进行传输，传输策略耗费时间且安装费用昂贵，同时存在一个单点桥梁监测采用上百个传感器的情况，其数据量庞大，导致桥梁健康监测系统往往难以获得理想的监测结果，对突发事件的反应不及时，给交通安全带来了不小的威胁。

2.2 项目前期科研及现有工作条件

2.2.1 支撑条件

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。

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、Redirection、ASCE、CSA、Levier 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”、“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他实验。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。

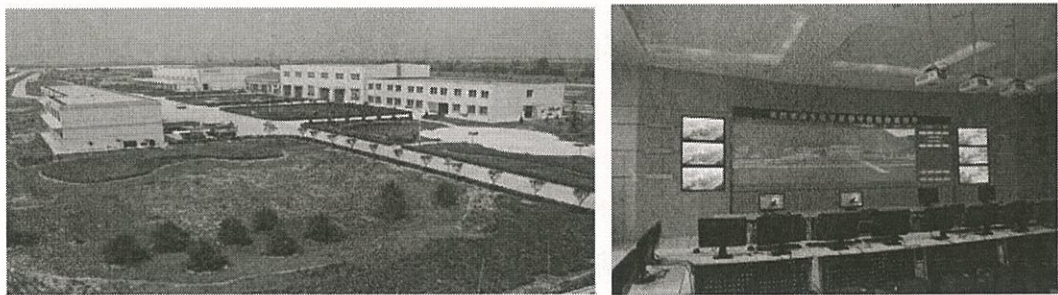


图2.1 道路交通智能检测与装备工程研究中心

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。**

另外团队与中铁大桥局、长大公路工程检测有限公司、西安公路研究院、中交第一勘察设计院、陕西交控集团、西北工业大学、西安交通大学在基础理论研究和应用方面进行了广泛的合作，取得了一定的研究成果，积累了丰富的理论和实践经验，拥有先进的仿真实验平台和检测仪器与手段，为本研究理论和实验实施创造了有利条件。

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获中国交通运输协会科技进步奖二等奖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，对桥梁结构运营安全的自动化监测和桥梁损毁的现场应急一体化处置，对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。

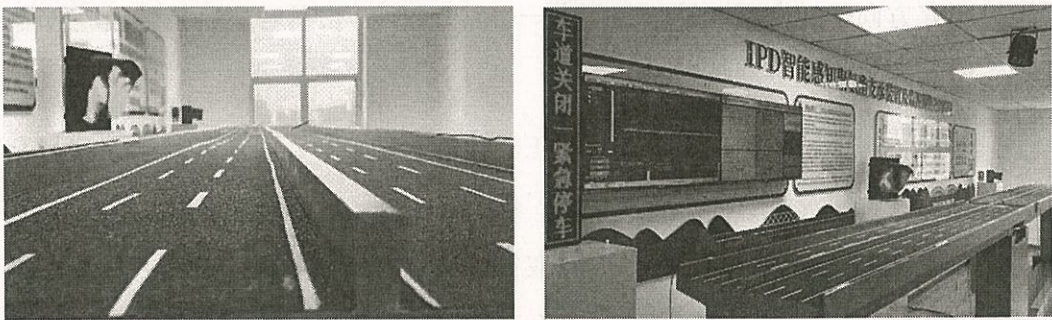
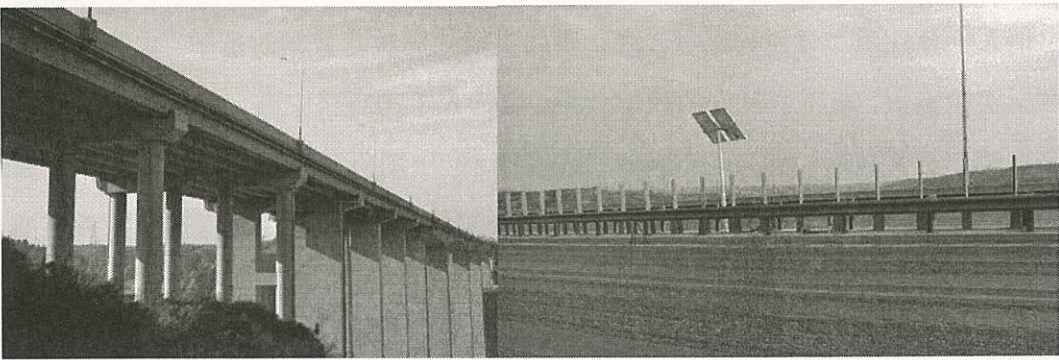


图2.2 聚氨酯智能感知支承装置及应急处置模型

- 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，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。



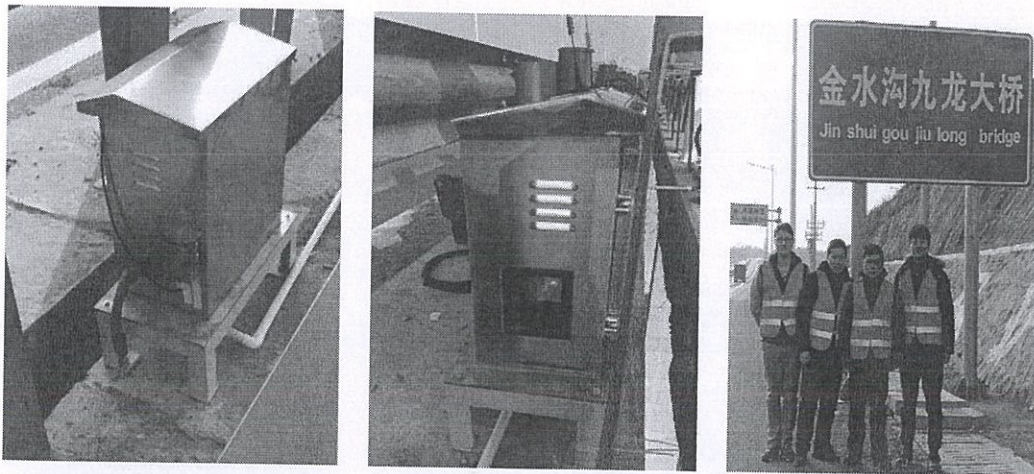


图2.3 激光基准桥梁挠度动态检测系统

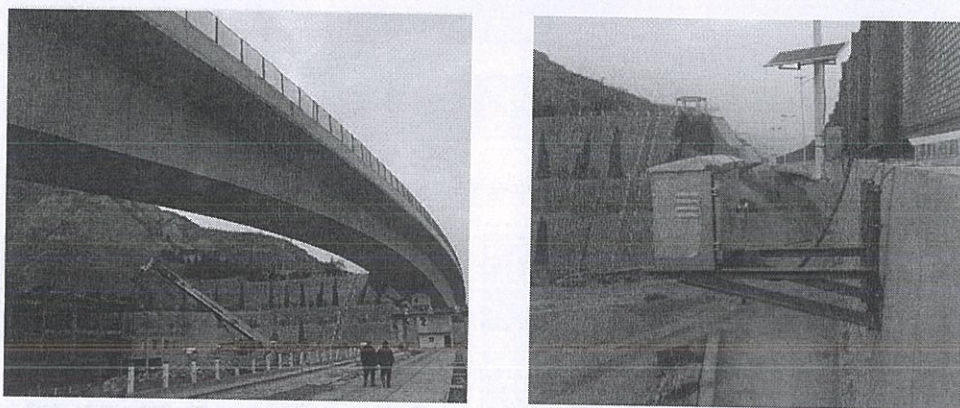


图2.4 沿黄观光路跨东雷一级站大桥设备安装现场

- 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2.5,2.6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建智慧桥梁建设管理云。



图2.5 系统云平台客户端软件界面

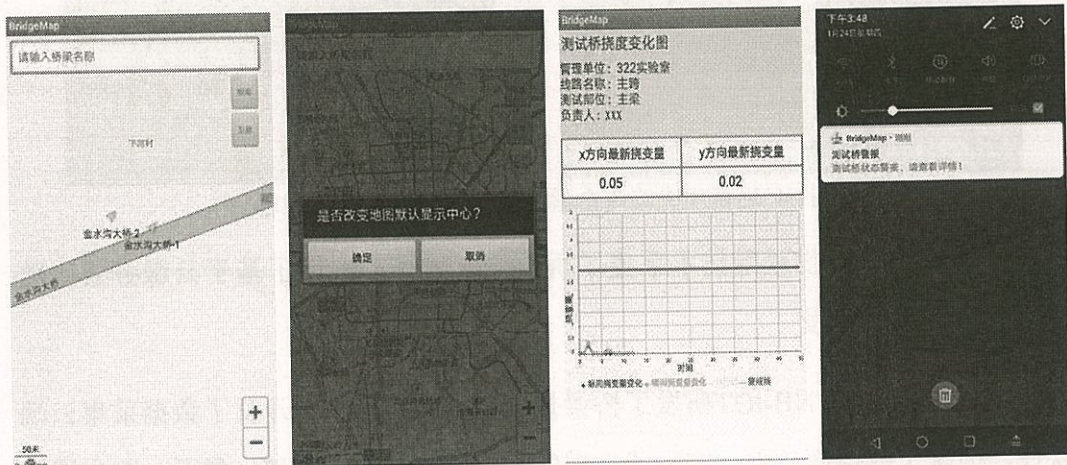


图2.6 系统云平台手机APP界面

● 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^[61]。

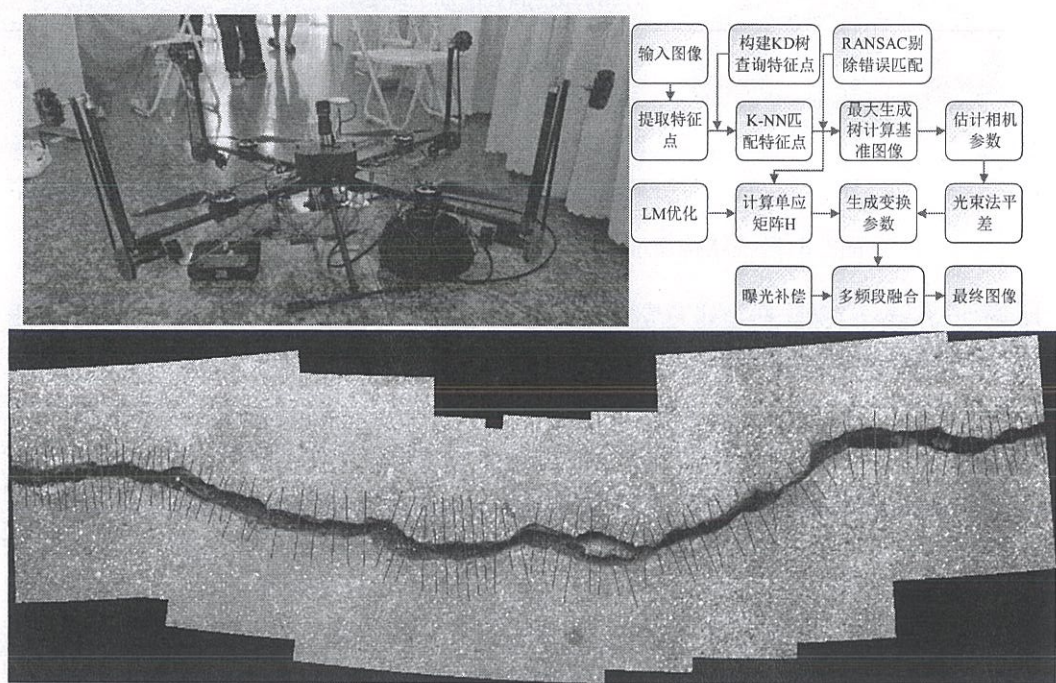


图2.7 基于系留式飞爬机器人平台的桥梁底部裂缝检测系统

● 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，轨道车携带扫描相机、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^[62-64]。如图2.8, 2.9所示。

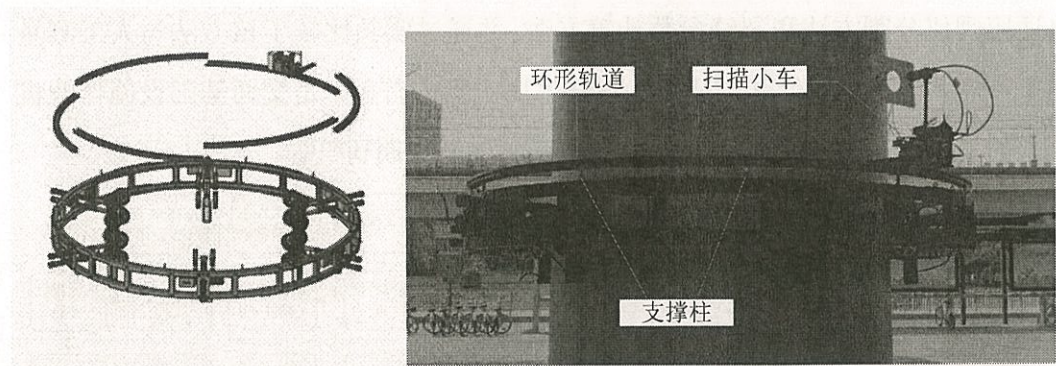


图2.8 墩柱结构智能检测环带视觉扫描攀爬作业机器人系统

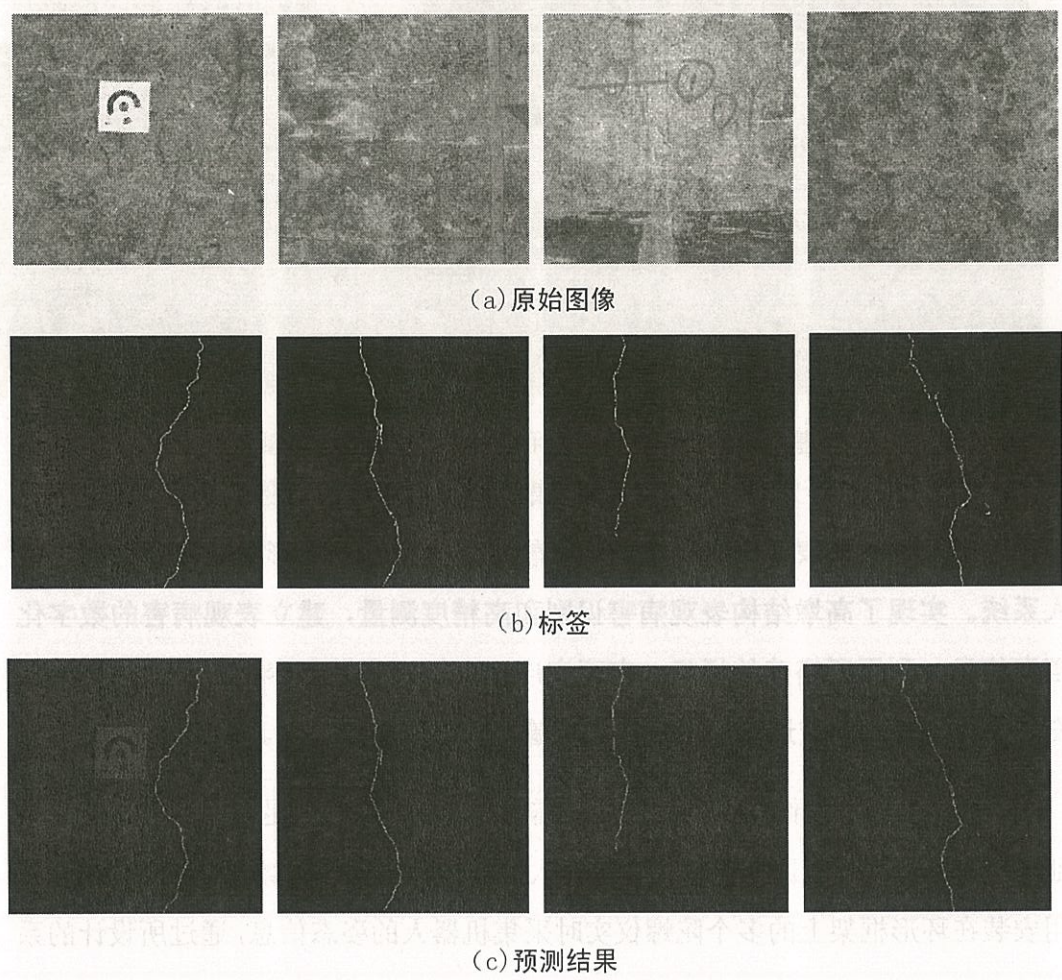


图2. 9基于深度学习的墩柱表面病害识别与测量

●针对现有的混凝土隐形缺陷检测中存在的问题，通过对激光散斑特性及散斑统计特性和结构缺陷无损检测的研究，本团队提出了一套基于激光剪切散斑干涉的混凝土隐形缺陷检测方法，并设计了一套基于剪切散斑干涉测量的便携式检测装备，并针对其中的关键问题发表了多篇高水平的论文。

本装备以“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。

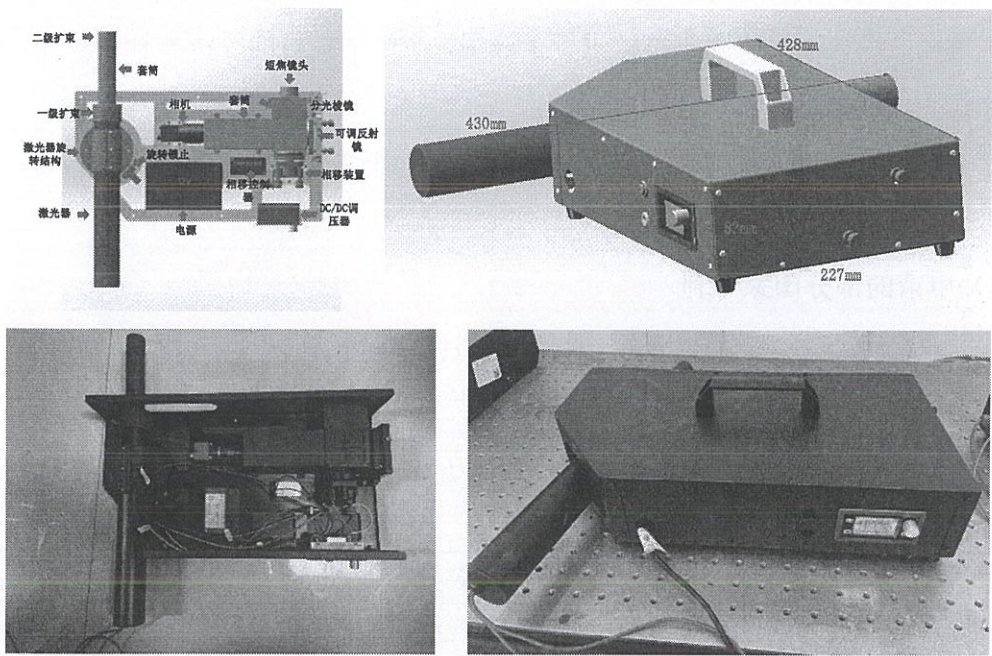


图2. 10基于激光剪切散斑干涉测量的便携式混凝土隐形缺陷检测装备

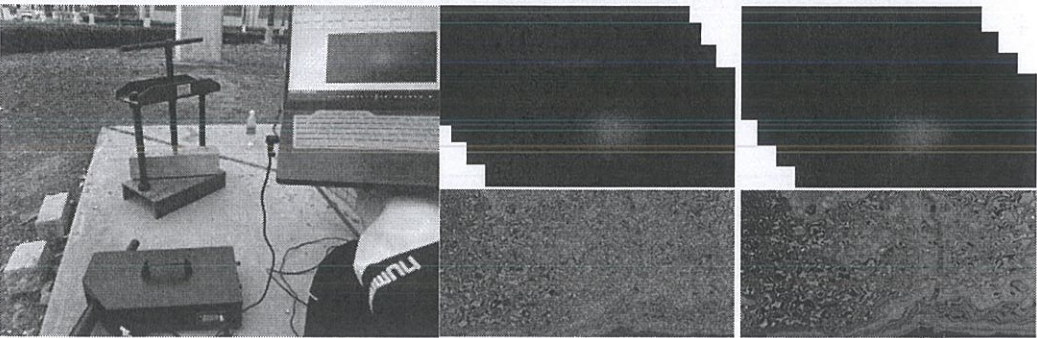


图2.11 基于激光散斑法混凝土隐形病害检测系统

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学术期刊发表论文30余篇，获国家授权专利17项，其中发明专利5项。

(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-ER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) 发表的部分论文、专著

[1] Kaifeng WANG, Lei ZHAI, He HUANG, Li min GUAN, Henan MU, Gripping WANG. Measurement for Cracks at the Bottom of Bridges Based on Tethered Creeping Unmanned Aerial Vehicle[J].Automation in Construction,2020,119: 103330(SCI,中国科学院1区; TOP期刊).

[2] Guofeng WANG,Yunnan WANG, Jim-jams ZHANG, Ding CAO.Laser Stripe Center Detection under the Condition of Uneven Scattering Metal Surface for Geometric Measurement[J].IEEE Transactions on Instructional & Measurement,2020, 69(5): 2182-2192(SCI,中国科学院1区; TOP期刊).

[3] Fao Du,Guofeng WANG, Yuan-He San, E-Deng Pan ,Dun-Lei Ciao, Bong Fao, 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,中国科学院2区; TOP期刊).

[4] Guofeng WANG,Fao DU, Ciao-Wei ZHANG, Yuan SHAN,Gunmen JIAO, Zenger PAN,Shenyang ZHANG, He HUANG , Bong GAO. Defect detection in CFRP reinforced concrete structures by digital physiography [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2025(15):1065-1079.(SCI,中国科学院2区).

[5] Kaifeng Wang,Ch eng hairy, Ciao Gunmen, Huang he, Wu zejian, Song shanghai.A Slope Deformation Measurement Method Based on Laser Datum and

- Complex Target Motion Model[J]Measurement, 2022,199 ,111526 (SCI, 中国科学院2区; TOP期刊).
- [6] Du H, Kaifeng Wang, Ciao Y ,ET AL. Self-supervised deep hash image dedication algorithm for visual inspection of concrete[J].Journal of Civil Structural Health Monitoring.2025(15):2261–2278(SCI, 中国科学院3区).
- [7] Kaifeng WANG, Zhejiang WU, Zhukov HE, Bong GAO, He HUANG. Detection of HF-ER Process by 3D Bead Shape Measurement with Line-Structured Laser Vision[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7681- 7690(中国科学院2区).
- [8] Fao Du,Guofeng WANG, Ciao-Wei Bhang,Hainan Deng, Bong Fao, Abeyance Sheng, Xiongnu Tong, Yuan San, Zenger Pan. Automated Intelligent Measurement of Cracks on Bridge Piers Using a Ring-climbing Vision Scanning Operation Robot[J]. Measurement,2024,(237): 115197.(SCI,中国科学院2区; TOP期刊).
- [9] Ciao-Wei Bhang, Guofeng Wang, Fao-Nan Deng, Fao Du, Dun-Lei Ciao, Shad-Xiang Li, Din-Xi Bhang, E-Deng Pan, He Huang, Guofeng J. A DSSPI phase unwrapping method for improving the detection efficiency of CARP-reinforced concrete defect[J]. Optics and Laser Technology.2024,168: 109862. (SCI,中国科学院2区; TOP期刊).
- [10] Ciao Gunmen, Wang Kaifeng, Ch eng hairy, Yang Ba, He Chihuahua, Song Bhang Chen,Wen Li min, Huang He. Multi-point detection method of dynamic deflection of super long-span bridge based on laser model[J].Measurement,2023,209, 112535(SCI,中国科学院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 Chaos, Kaifeng Wang, Fao Du, hairy Ch eng,Lu Deng,Yaar Anglia,He Huang. An Intelligent Bridge Multi-Dimension Deflection IT Monitoring System Based on Laser Datum and Imaging[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2025,12(2):269-287(SCI,中国科学院2区).
- [13] Xiaoping Bhang, Kaifeng Wang, Fao Du , ET.AL. A phase filtering method to

- improve the efficiency of DSSPI non-destructive detection. Measurement, 2025, 256, 118404(SCI, 中国科学院2区).
- [14] Fao Du, Guofeng WANG, Yue-yuan Gan, He Huang, Bong Fao, Ciao-Wei Bhang, Keenan Mu, Dun-Lei Ciao. 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, 中国科学院2区).
- [15] Xiaoping Bhang, Kaifeng Wang, He Huang. Detection of Hidden Defects in Reinforced Concrete Based on DSSPI and a Multi-Scale Multi-Branch Residual Constitutional Network[J]. Optics and Lasers in Engineering. 2025.10(Accepted SCI, 中国科学院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).
- [17] Kaifeng Wang, Zhukov He, Bong Fao, Ruin IUD, Huang He, Li min Gan. 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.
- [19] 全亚雄, 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Li DAR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.

(3) 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奖二等奖, 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奖二等奖, 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。

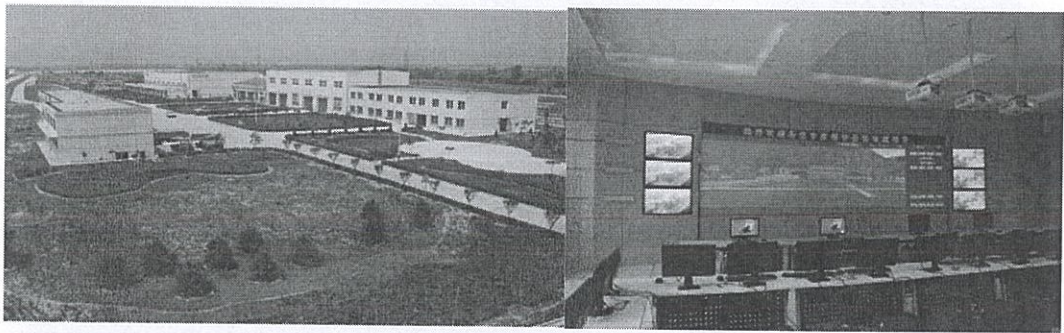


图2.13 道路交通智能检测与装备工程研究中心

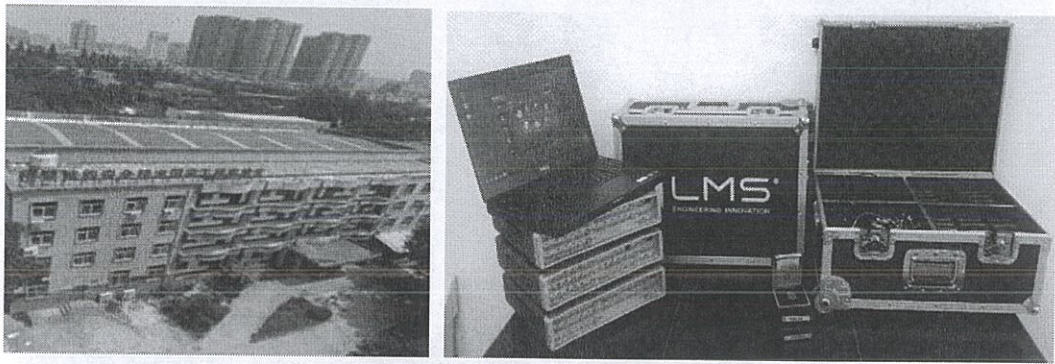
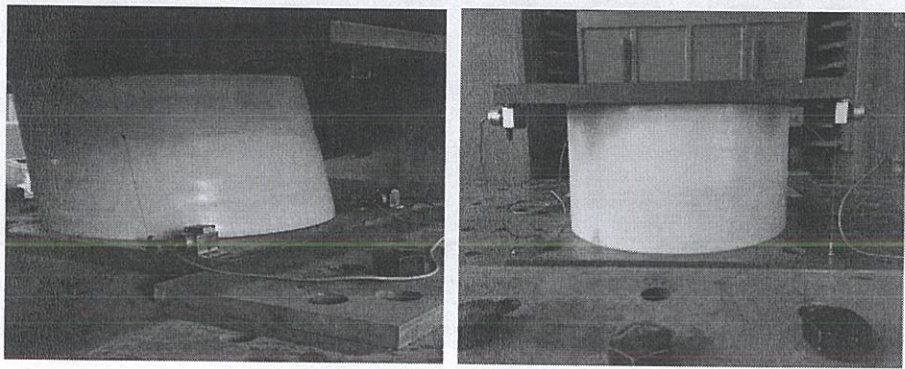


图2.14桥梁结构安全技术工程实验室



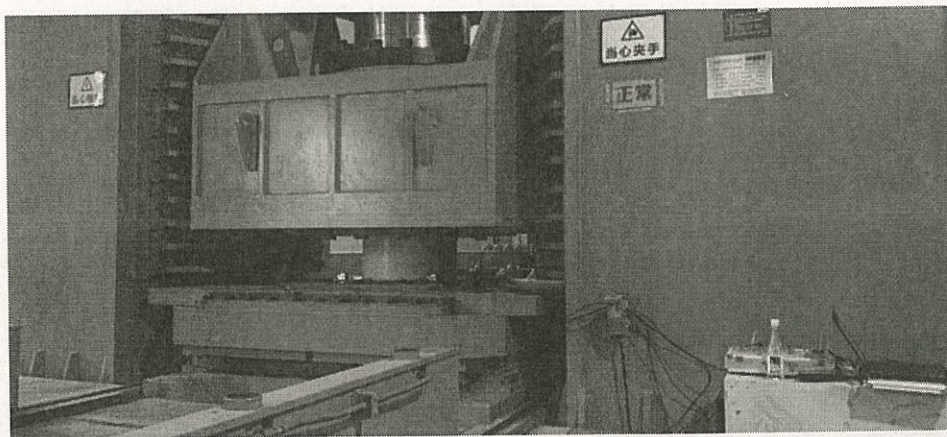


图2.15 聚氨酯支撑装置位移传感器试验装置

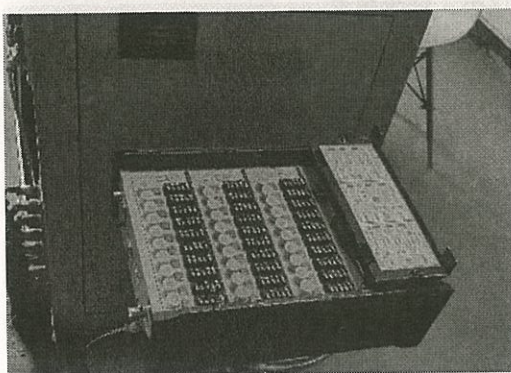
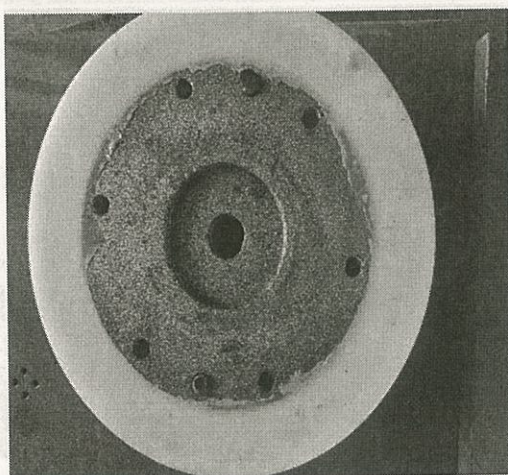
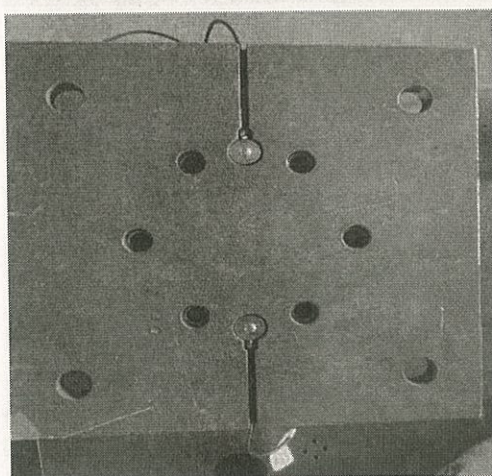


图2.16 支撑装置力感器试验平台

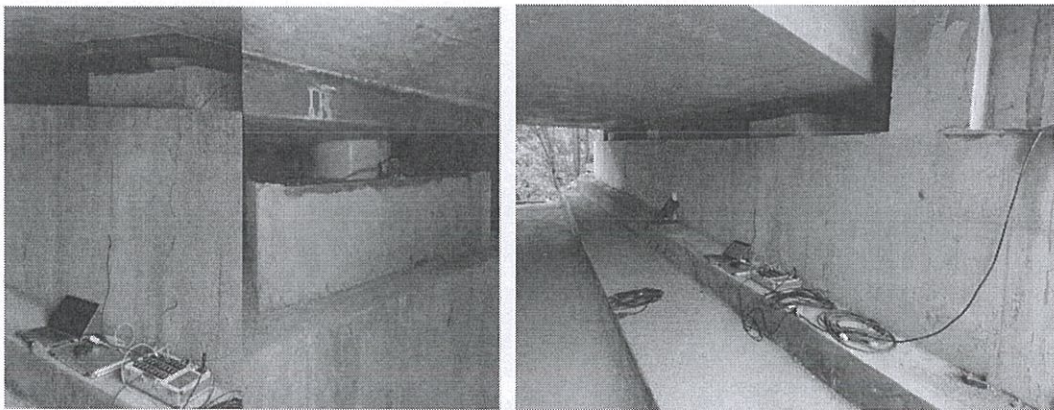
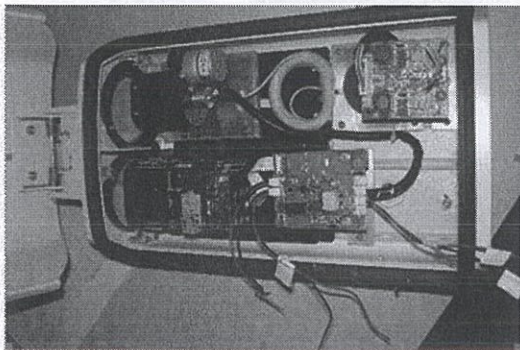


图2.17 汉中宁强龙家沟桥梁工程（可测量型号，现场监测）

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，具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。

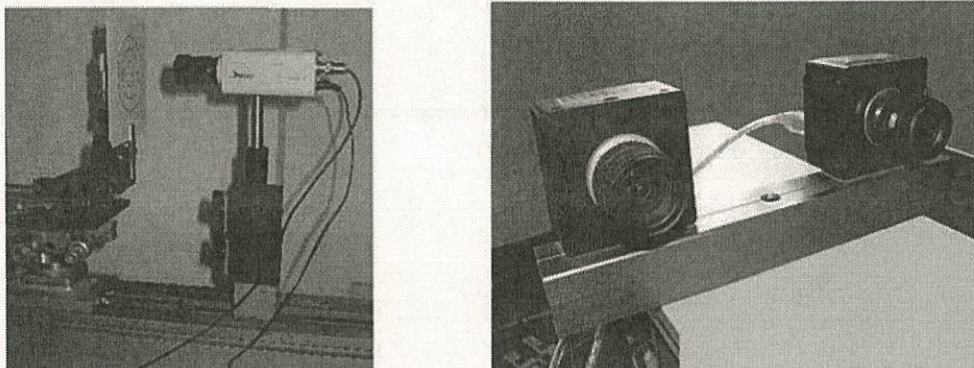


图7.14激光靶标光斑图像快速图像处理装置

● 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。

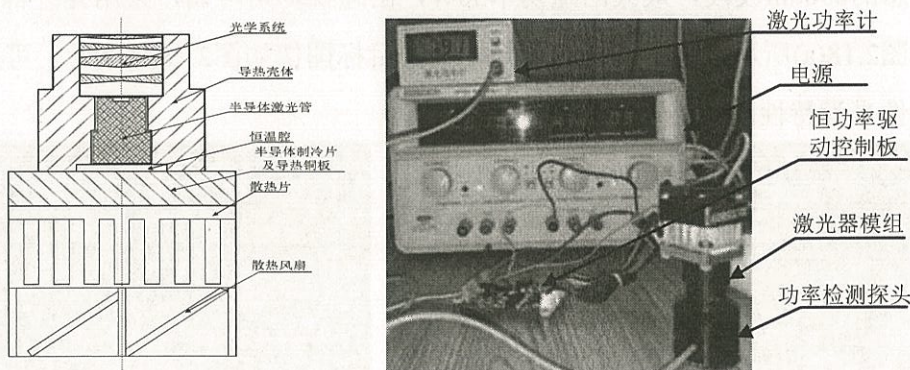


图2.20 半导体激光器的功率驱动系统

● 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。

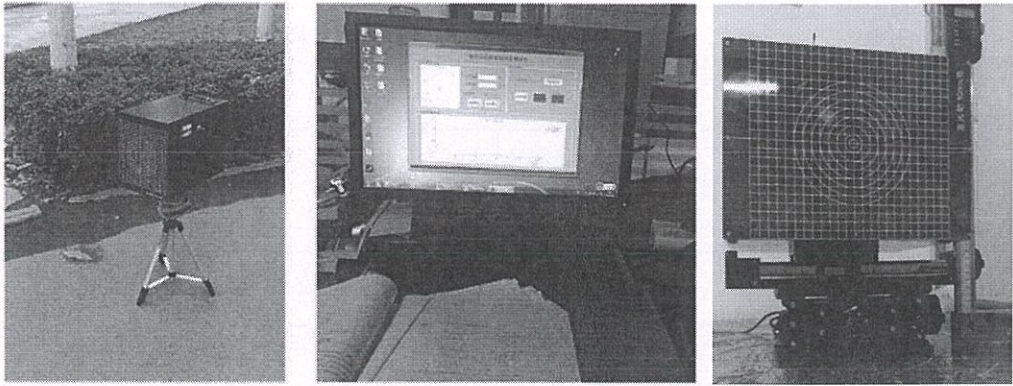


图2.21激光靶标光斑图像快速图像处理装置

● 光学照度仪、光功率计、偏振片、光谱分析仪器、逻辑分析仪、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，组建了一支由土木工程、交通运输工程、交通信息、自动化、机械制造等专业人员组成的学科交叉型学术团队及专业的汽车研发、生产、测试的技术人员，在基础设施智能检测及灵巧传感器研发相关领域有着深厚的技术积淀和优势，本项目还将面向社会招聘嵌入式系统研发测试工程师和管理人员，形成桥梁基础设施智能检测的研究、开发、测试、产业化推广等多样化的人才队伍。

项目组共25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生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	桥梁智能检测信息感知系统构建
2	张晓伟	交通信息工程及控制	博士	基于激光散斑的混凝土隐性病害智能检测
3	焦云梅	交通信息工程及控制	博士	轻量化智能感知算法
4	贺东兴	自动化	博士	检测算法研究
5	罗富强	控制工程	硕士	嵌入式系统硬件设计
6	谢佳奇	控制工程	硕士	硬件设计
7	李政姗	电子信息	硕士	聚氨酯智能感知系统
8	仝曦	电子信息	硕士	基于智能算法的结构健康评价
9	王杰	电子信息	硕士	攀爬作业机器人硬件
10	陈晓璐	交通运输	硕士	专用测试装备开发

2.3 参考文献

[1] 孙亮, 邢建春, 谢立强, 等. 基于自适应阈值Canny算法的裂缝检测方法研究[J]. 微型机与应用, 2017, 36(05): 35-37+41.

[2] Bradford A, Met L, Chin tala S. Unsupervised representation learning with deep Constitutional generative adversarial networks[C] // International Conference on Learning Representations 2016 (ICLR 2016), May 2-4, 2016, San Juan, Puerto Rico. New York: Cornell University Library, 2016: 1511. 06434.

[3] 王盟, 翁顺, 余兴胜, 等.基于时变模态振型小波变换的结构损伤识别方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 10-19.

[4] Oliver H, Correlate P L. Automatic road crack detection and characterization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 14 (1): 155-168.

[5] 魏文龙, 刘森森. 基于轻量化神经网络的桥梁裂缝识别检测[J]. 南方农机, 2020, 51(21): 125-126.

[6] 颜永逸. 基于模糊聚类和时间序列的结构损伤识别方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.

[7] 梁杰明, 刘逸平, 陈敬松等. 基于移动主成分分析特征的智能损伤诊断方法[J].

- 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(12): 1662-1667.
- [8] 张永平, 王润建. 基于挠度监测数据的在役桥梁结构安全状态评估方法研究[J]. 中外公路, 2022, 42(01): 173-177.
- [9] 余文勇, 张阳, 姚海明, 等. 基于轻量化重构网络的表面缺陷视觉检测[J]. 自动化学报, 2022, 48(09): 2175-2186.
- [10] 徐衍亮. 基于轻量化监测的桥梁加固改造后评估方法研究[J]. 运输经理世界, 2022(24): 114-116.
- [11] 杨书仁, 丁松. 基于应变比的桥梁损伤识别与评估方法[J]. 公路交通科技, 2021, 38(01): 87-96+111.
- [12] 单德山, 董皓, 顾晓宇. 大跨度斜拉桥施工控制的多元统计敏感性分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(12): 68-79.
- [13] 刘来君, 贺拴海, 宋一凡. 大跨径桥梁施工控制温度应力分析[J]. 中国公路学报, 2004(01): 57-60.
- [14] Bhang J, Cato T. Support vector regression for on-line health monitoring of large-scale structures[J]. Structural Safety, 2006, 28(4): 392-406.
- [15] Bhang J, H Q W. A visualization progress management approach of bridge construction based on mixed panoramic and oblique photographer [C]//2018 26th International Conference on Geo informatics. June 28-30, 2018. Kunming. New York: IEEE, 2018: 1-6.
- [16] Yang X M, Bi T H, Bu C X, ET AL. Performance assessment of a high-speed railway bridge through operational modal analysis[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2021, 35(6): 04021091.
- [17] Yang X M, Bi T H, Bu C X, ET AL. Modal identification of bridges using asynchronous responses through an enhanced natural excitation technique[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2021, 147(12): 04021106.
- [18] 马勇. 三维激光扫描技术在桥梁变形中的应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [19] 邓晓隆. 基于三维激光扫描的桥梁结构变形检测及数据分析[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2018.
- [20] 王勋. 基于三维激光扫描的桥面变形监测技术应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [21] 姚明博. 三维激光扫描技术在桥梁变形监测中的分析研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
- [22] 陈红权, 郭威. 三维激光扫描技术在桥梁形变监测中的应用[J]. 现代测绘,

- 2016, 39(1): 36-39, 57.
- [23] 王红霞. 三维激光扫描技术在桥梁监测中的应用[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012.
- [24] Park H S, Lee H Y, ADELII H, ET AL. A New Approach for Health Monitoring of Structures: Terrestrial Laser Scanning[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2007, 22(1): 19-30.
- [25] Armrest J, Coca-Cardinals J, Lorenzo H, ET AL. Modelling Masonry Arches Shape Using Terrestrial Laser Scanning Data and Non parametric Methods[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(2): 607-615.
- [26] Pee M, Constant D, Resuscitate G A. An efficient pipeline to obtain 3D model for HBIM and structural analysis purposes from 3D point clouds[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1235.
- [27] 刘琼琼. 非量测相机近景摄影测量在桥梁线形监测上的研究与应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [28] 张绍成, 殷飞, 胡俊亮, 等. GPS/BDS-RTK与惯导组合实现大型桥梁垂向线形测量[J]. *测绘科学*, 2022, 47(6): 1-7.
- [29] 何聪. 基于倾角传感器的桥梁线形实时监测系统设计与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- [30] Akyildiz I F, Nu W, ET AL. A survey on sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114.
- [31] Dick J, Mukherjee B, Ghostly D. Wireless sensor network survey[J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [32] Kim S, Parkade S, Caller D, ET AL. Wireless sensor networks for structural health monitoring[D]. Berkeley: ac Berkeley, 2005.
- [33] Inch J P, Wang Y, Doh K J, ET AL. Performance monitoring of the Endanger Bridge using a dense network of high-resolution wireless sensors[J]. *Smart Materials*, 2006, 15: 1561-1575.
- [34] Nguyen K D, Kim J T, Shin S W, ET AL. Long-term monitoring of the Hamhung cable-stayed bridge using wireless sensor network[C]. 2013 Word Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, ASEM, 13, 2013: 2745-2758.
- [35] 庞珂, 李剑, 苏新彦, 等. 桥梁远程结构综合参数获取与智能评估软件设计[J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30(05): 143-149.
- [36] Lee K J. A Study on Increased Utilization of GNSS In Pier Inclination Monitoring [J]. *Journal of the Korean Society for Geo-spatial Information Science*, 2019, 27(2):

- [37] 刘康旭. 基于Java-E和Android的桥梁健康监测系统的软件设计[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [38] 张青春, 王劲尧, 何威, 等. 桥梁健康状态在线监测预警系统的设计[J]. 仪表技术, 2019(03): 18-20+32.
- [39] 杨李东, 钱志坚. 基于物联网与GIS的城市桥梁健康监测系统设计[J]. 测绘地理信息, 2019, 44(04): 19-22+26.
- [40] 杜立婵, 王文静, 韦冬雪等. 基于NB-IOT的桥梁健康远程监测系统设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(20): 155-159.
- [41] 黄志贤. 基于NB-IOT的桥梁健康监测系统设计研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2020.
- [42] 申志宇. 嵌入式桥梁健康监测系统设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [43] Bhang J, H Q W. A visualization progress management approach of bridge construction based on mixed panoramic and oblique photographer [C]//2018 26th International Conference on Geo informatics, June 28-30, 2018. Kunming. New York: IEEE, 2018: 1-6.
- [44] 徐哲能, 郑淑倩, 王烨晟, 等. 基于物联网桥梁结构健康监测与智能预警平台建设[J]. 现代信息科技, 2023, 7(03): 159-163.
- [45] 贺效鹏, 郑益斌, 罗晓玲, 等. 新型公路桥梁健康监测与安全预警云平台设计及应用[J]. 交通节能与环保, 2023, 19(03): 123-127+131.
- [46] 周敕. 基于裂缝特征和结构基频的混凝土桥梁性能评估技术及其应用[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [47] 赵煜, 任伟, 李春风, 等. 预应力混凝土简支箱梁裂缝损伤参数影响分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(02): 58-63.
- [48] 郭琦, 贺拴海, 白云. 基于神经网络的简支梁桥预应力衰减评估模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007(06): 53-57.
- [49] Loop M R, H J W, Bayed M A. Bridge performance assessment based on an adaptive euro-fuzzy inference system with wavelet filter for the GPS measurements[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2015, 4(4): 2339-2361.
- [50] 王凌波. 在役预应力梁桥残余承载力评估方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [51] 赵煜, 周博, 贺拴海, 等. 基于裂缝特征的PC简支梁损伤刚度评估方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(04): 39-44.
- [52] 贺拴海, 宋一凡, 赵小星, 等. 钢筋混凝土梁式结构裂缝特征与损伤评估方法

- 试验研究[J]. 土木工程学报, 2003(02): 6-9.
- [53] 贺拴海, 徐兴. 多梁式混凝土桥梁结构刚度的裂缝特征——动力分解综合识别法[J]. 土木工程学报, 2006(08): 91-95.
- [54] 贺拴海, 赵小星, 宋一凡, 等. 具有初荷载的钢筋混凝土梁桥粘贴碳纤维布加固试验研究[J]. 土木工程学报, 2005(03): 70-76.
- [55] 郭琦, 贺拴海, 任伟. 后张预应力钢束有效预应力分布模式判别与模拟方法[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(06): 57-62.
- [56] 郭琦. 钢筋混凝土梁承载能力的动力试验法预测研究[D]. 西安: 长安大学, 2001.
- [57] 张鹏飞. 基于遗传算法优化的BP神经网络在桥梁健康监测安全评估中的应用[D]. 兰州交通大学, 2021.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] Kaifeng Wang, Cheng hairy, Ciao Gunmen, Huang he, Wu Zhejiang, Song shanghai. A Slope Deformation Measurement Method Based on Laser Datum and Complex Target Motion Model[J]. Measurement, 2022, 199, 111526.
- [61] Kaifeng WANG, Lei ZHAI, He HUANG, Li min GUAN, Henan MU, Gripping WANG. Measurement for Cracks at the Bottom of Bridges Based on Tethered Creeping Unmanned Aerial Vehicle[J]. Automation in Construction, 2020, 119: 103330.
- [62] Du H , Kaifeng Wang, Ciao Y , ET AL. Self-supervised deep hash image dedication algorithm for visual inspection of concrete[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2025(15): 2261–2278.
- [63] Fao Du, Guofeng WANG, Ciao-Wei Bhang, Hainan Deng, Bong Fao, Abeyance Sheng, Xiongnu Tong, Yuan San, Zenger Pan, He Huang. Automated Intelligent Measurement of Cracks on Bridge Piers Using a Ring-climbing Vision Scanning Operation Robot [J]. Measurement, 2024, (237): 115197.
- [64] 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.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

桥梁结构轻量化健康监测预警和应急处置系统，是保障桥梁运营期的安全性、桥梁在服役过程中受到偶发极端自然灾害天气影响下处置的实时性、提高管养效率的重要研究内容。本课题研究设计的桥梁轻量化健康监测预警和应急处置系统，旨在解决当前人工定期巡检、试验检测、专家评估过程中自动化、效率低下、应急措施不完善等缺陷。本项目拟研究一套集结构健康监测、全时空预警和极端外界环境应急处置于一体的轻量化桥梁结构监测与应急处置系统。其关键的技术主要包括以下几个方面：

（1）基于桥梁支承构件嵌入压力感知的桥梁结构健康智能监测关键技术

针对目前桥梁模块化设计的现状，以桥梁结构易损受力构件（桥梁支座）为研究对象，通过向单体构件中“植入”多种智能感测设备，形成多种智能感知桥梁结构标准化构件，构建整个桥梁结构健康感知的“神经末端”，获取桥梁结构服役过程的实时状态，进而为桥梁服役过程的健康状况进行实时“把脉”，当在极端外界环境影响下结构发生危险状况时，“神经末端”感知单元会出现明显的信息突变，亦可为桥梁的应急处置提供触发依据。

（2）基于激光基准的桥梁结构宏观变形轻量化实时监测关键技术

针对大多数的连续多跨度桥梁结构支撑桥梁自重与荷载的重量的特点，以多跨结构整体为研究对象，提出基于激光基准的桥梁结构宏观变形的轻量化监测技术，通过分析各点外界因素对监测系统的影响，构建激光基准桥梁结构高精度变形实时监测的模型，设计激光基准桥梁结构宏观变形的实时监测系统，并将变形数据作为系统的关键指标纳入桥梁结构的健康状况评价的关键技术指标中，当桥梁受到外界影响引起桥梁结构的损毁时候，宏观变形监测系统也可以为应急处置系统提供触发信息源。

（3）基于轻量化智能构件及整体变形参数的桥梁结构健康状况评价关键技术研究

将边缘端所获得的桥梁服役状态可靠传输，通过系统的冗余的多模式通信将桥梁的多源传感器数据传送到云端后台，在云端进行存储，并且在Web端，App端进行显示，方便管理人员实时查看相关数据，并且，在云端基于大数据统计模型将多源传感器数据进行融合，送入人工智能模型进行结构运行状况的评价实时感知桥梁结构的健康状况，当结构出现异常时可进行预警，提醒管理养护人员进行必要的干预，实施结构养护、加固等，且可以对这些实时构件和整体数据实施分析，评价桥梁关键构件和梁体结构的损伤状况，指导设计人员优化构件及梁体结构的设计参数。

(4) 现场前端应急触发和处置告警一体化关键技术研究

现场前端应急触发多级处置告警单元是本系统的现场执行终端，是极端状况下发生桥梁损毁时的应急处置的执行机构，在突发极端外界灾害环境影响情况下当桥梁局部或者整体发生损毁时，现场前端的应急触发装置直接通过传感器的硬件通路被“触发”并启动三级紧急告警装置，防止管理部门未及时到场而产生的二次事故，进而，同时触发启动现场的视觉抓拍装置，抓拍现场的交通状况并传回管理部门，在发生事故后，可以用于追溯事故地点的现场情况，这对于研究桥梁结构安全事故应急处置及结构健康养护具有重要现实意义。

3.2 主要研究内容及实施方案

以保障桥梁运营期的安全性、桥梁服役过程中受偶发极端自然灾害天气影响下应急处置的及时性、提高中小跨梁体的管养效率为目标，以影响桥梁结构健康、安全的重要构件为研究对象，通过协同创新、多学科交叉融合研发基于智能构件和多传感器融合的桥梁结构健康监测及现场应急简易触发感知告警处置及联动报警一体化装备，实现桥梁结构健康感知+及时应急处置和报警一体化系统。主要研究内容包含：

(1) 复杂环境下基于桥梁支座构件智能感知的轻量化监测模型研究。

建立复杂环境下承载装置的变形模型，研究嵌入式支承支座压力传递机制，解析压力传感器受力和外界交变载荷之间的耦合关系；建立多传感器信息感知状况下桥梁伸缩缝的损伤感知模型，探究平衡归一化空间复用状态下的伸缩缝多源状态蠕变和损毁感知的系统设计准则；

(2) 基于激光基准的梁体多维变形轻量化监测模型研究，基于激光基准的结构变形监测方法研究。

研发基于激光基准的桥梁结构轻量化实时检测装置，设计基于FPGA的轻量化光斑中心解算模型，以实时获取梁体结构的变形信息，并实现梁体变形数据的实时上报；

(3) 研究极端天候灾害威胁下基于边缘计算的轻量化简易联动现场告警方法。

构建时空联动桥梁极端灾害下的灾毁告警和报警联动机制，探索高可靠的多级告警报警模型；研发极端外界灾害威胁下集成一体化的快速简易触发多级联动告警装置，设计基于多源数据融合+边缘计算和实时桥梁现场智能测控、联动触发定一体的简易感知装置，实现极端灾害威胁下的现场“硬连接”和远程报警的“软连接”，并实现报警信息的实时下发；

(4) 研究极端天候灾害威胁下的硬件边缘触发视频联动抓拍机制；

研发具有边缘端硬件联动触发功能的现场灾毁视频抓拍装置，针对极端自然灾害天候下的低能见度复杂现场，采用偏振多模视觉成像技术，提升抓拍图像的像质，并及时上传到终端，从而满足极端天气状况、不同场景、不同对象的高精度动态抓拍需求；最终设计实现轻量化的桥梁结构健康状况智能监测装置和结构健康大数据智能评价系统，并且实现桥梁在极端自然灾害条件下的现场应急处置和现场抓拍，进行现场示范。

成果将对中桥梁特别是中小跨桥梁群的低成本结构健康监测和应急处置具有重要的理论意义和实际应用价值。

3.3 技术路线

本项目拟采用的技术路线见图3.1所示。项目以运营期的安全性、桥梁服役过程中受偶发极端自然灾害天气影响下应急处置的及时性、提高中小跨梁体的管养效率为切入点，沿着“复杂环境下的多场耦合作用下的基于嵌入感知单元的构件物理机理和模型—基于多模信息挖掘的轻量化病害增强感知及可靠通信方法—一体化特征融合表征的结构健康数字建档案”这一研究主线，采用理论建模、数值模拟仿真、半实物仿真验证、检测系统搭建、数据采集、实验测试、现场实证等方法，系统地研究复杂外部环境中异构多模结构轻量化缺陷智能检测方法。具体地，研究过程中将按照首先进行模型和原理的理论分析，然后根据实际条件

采用数值模拟仿真，并通过实验室半实物仿真验证，最后在实际桥群外场下环境下完成外场测试。这样从理论到实践再到理论循环递进的研究技术路线。研究内容的整体框图如图3.1所示。

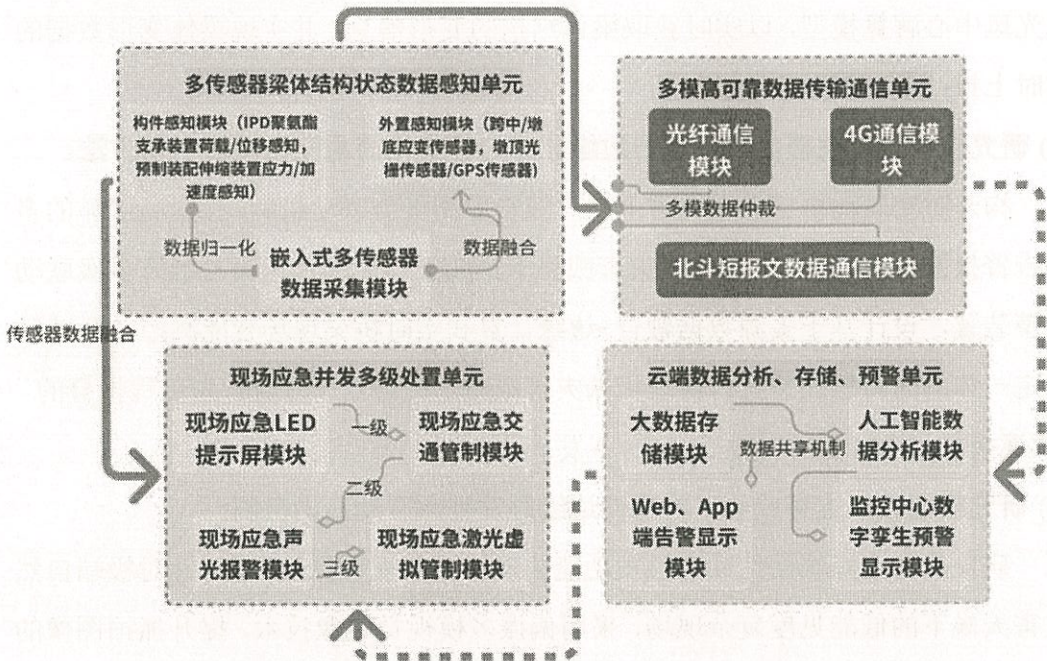


图3.1 简易桥梁多源健康智能感知装置及监测预警和处置一体化系统

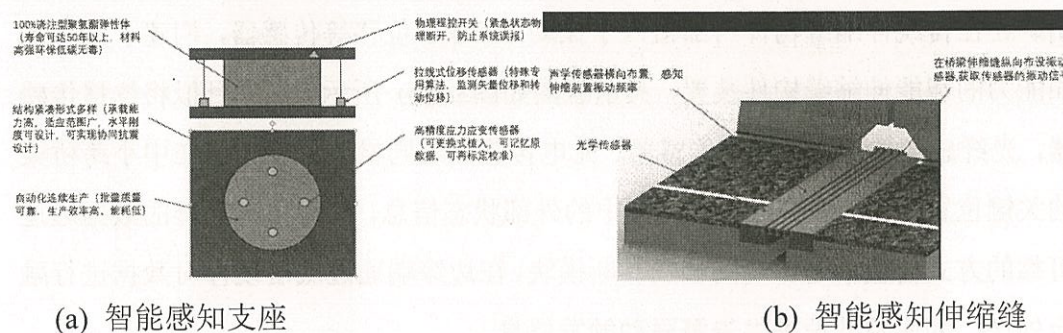
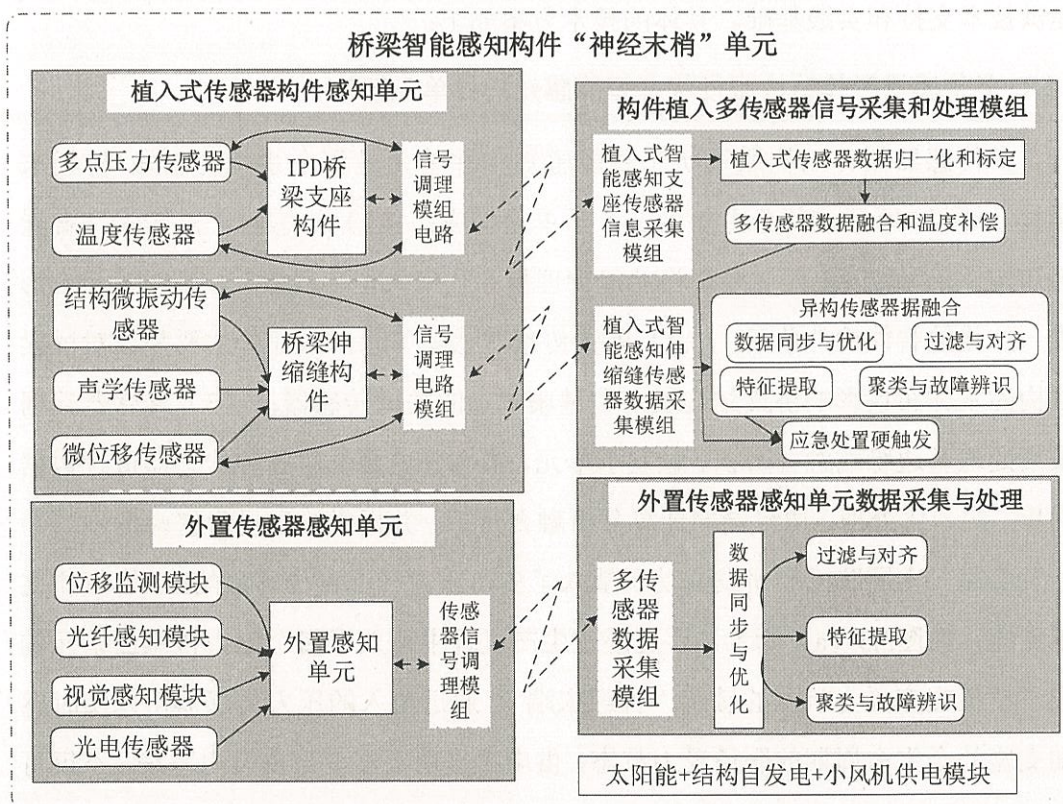
仿真分析方面，利用计算机模拟外部载荷作用下的梁体损伤，模拟验证复杂恶劣下场景中载荷与桥梁之间的多要素耦合动力学模型，分析外部载荷、自然环境和损伤演化扩展的相互影响机理，进而构建损伤-动态载荷生成模型。模拟分析算法的可行性和有效性，探讨算法优化路径。同时，结合多参数感知平台的研究，验证支撑装置在复杂外部载荷环境中受到外部载荷作用的破坏等挑战，提升其在外部载荷和自然载荷下结构检测中的稳定性和精准性。

实验研究方面，采用正交实验法，完成多模一体化感知参数的优化；主要包括室内实验和外场实验。室内实验中，建立虚拟仿真实验环境，采用半物理半实物缩比模型，构建多载荷复杂环境实验平台（例如车辆载荷、环境载荷），并搭建多模态检测参数获取硬件平台，通过数据仿真实验验证并修正理论模型；外场实验则在实际桥梁环境中，搭建特定的测试平台，通过自主研发的聚氨酯智能感知支撑装置传感器系统原理样机的测试，获取支撑装置耦合桥梁损伤机制，验证基于多模传感器智能感知的机理，并进一步调整和优化模型中的参数。通过实验结果修正理论模型中的方案、工艺和算法，为桥梁结构智能检测系统的工程应用

提供技术支持和实践基础。具体的技术方案如下：

3.3.1 多传感器梁体结构服役状态智能感知构件单元研究

多传感器梁体结构服役状态智能感知构件单元是整个系统的感知“神经末端”，如图3.2所示该部分主要由三个子单元构成：（1）传感器“植入式”智能感知构件单元，该单元主要是将功能物理量和几何量传感器植入桥梁的构件，形成一体化的智能构件单元；（2）外置传感器感知单元，该部分主要是针对桥梁结构的本体布设影响桥梁结构安全和健康状态的关键传感器；（3）传感器数据采集处理及边缘端融合辨识、触发子单元，本部分主要是对各种传感器进行数据同步、归一化处理、边缘端的计算分析融合辨识、并提供给现场告警端的硬同步触发信息。本团队已经研发成功了植入了多点压力和温度传感器的IPD聚氨酯支承支座，如图3.3（a）所示，该支座在生产过程中植入了多个压力传感器单元构成了桥梁支座受力状况的敏感“神经末端”，通过植入的压力传感器可以实时感知支座的全生命周期的服役受力状态，供电拟采用支座变形自发电系统，不仅可以给后续的单元提供重要日常运营过程受力变形、落梁毁伤感知信息，还可以通过数据分析为后续支座的运营损伤分析及设计生产提供可靠的数据支撑。同时本团队还在传统伸缩缝构件内部植入了振动、声学、位移等传感器，构建了具有感知能力的智能伸缩缝构件装置，其示意图如图3.3(b)所示。本项目拟将位移传感器，光纤感知传感器、视觉传感器、光电传感器连同梁体安装布设在中小跨桥梁的关键位置，获取桥梁在服役过程中的外部状态信息，同时将所获得的数据通过可靠的方式传输给边缘端的触发判断模块，在边缘端通过底层硬件对数据进行融合处理，为应急处理提供告警联动触发信息。



3.3.2 基于链式激光基准的梁体多点轻量化监测单元设计

在实际工程应用中大多数中小跨型桥梁结构设计均为连续多跨度型来支撑桥梁自重与荷载的重量。如图3.4所示为多跨度桥梁挠变模型，当桥梁为负载状态时，桥梁各跨度之间的最大挠变量分别为 Δy_1 ， Δy_2 ， Δy_3 ，可知多跨度桥梁的挠变曲线在各跨之间为连续的曲线，相对于整座桥梁则挠度曲线为不连续的。

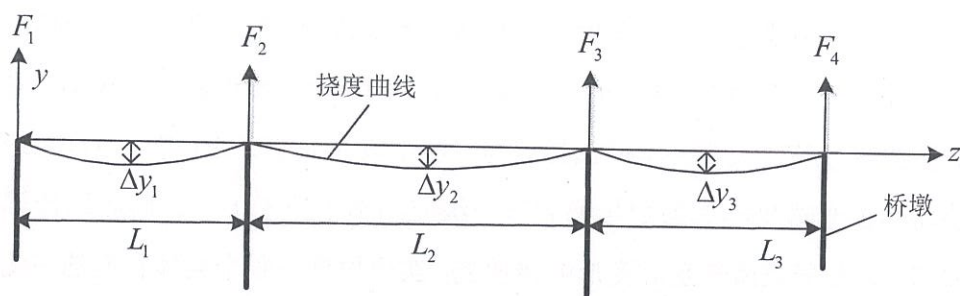


图3.4 桥梁多跨度挠变模型

由于桥梁各跨度的构筑特征与跨径都有很大差别，所以当桥梁负载时每跨发生的挠变量也各有差别，要实现桥梁多个跨度挠度的监测时，必须对桥梁进行多点数据检测方可近似拟合出桥梁的挠变曲线，准确地评估被检测桥梁的安全状况。本项目提出了基于链式激光基准的梁群挠度监测系统主要由基准站、多级监测站和交通抓拍模块组成，其链式激光位移传递示意图如0所示。基准站、多级监测站需顺桥向安装，各个模块最大程度地保持在一条直线上，以保证基准站的激光能够完全垂直发射到监测站的靶面上。

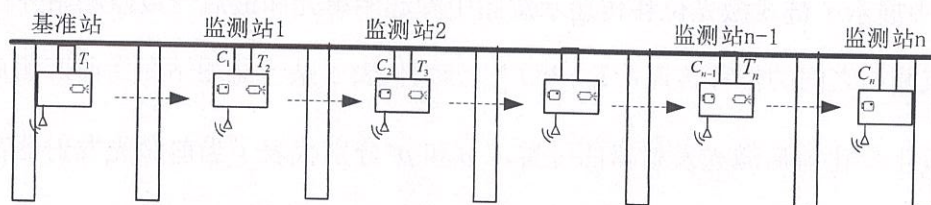
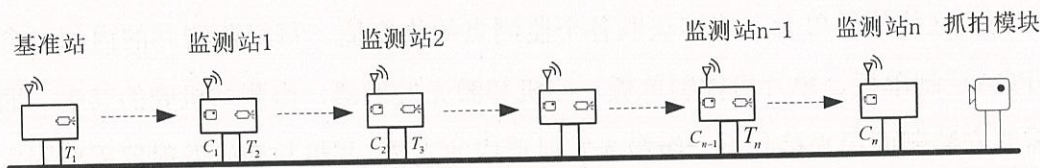


图3.5 链式激光基准的连续多跨梁桥群轻量化变形监测示意图

由上0可知，基准站是整个链式激光基准模型的起始单元，其内部包含激光基准发射调控单板，该单板用于与远程服务器端的通信、与各级监测站之间的无线通信和本级激光发射器的开关控制，该单元模块一般需安装在桥墩等不易产生形变的桥梁待测区域并将测量到的数据记作绝对位移，把该绝对位移的值作为变形的基准坐标，便于后级监测站测量位移的计算。中间多级监测站共同构成了系统挠度位移传递单元，能够获取各个监测点的挠度值。每级监测站的内部包含FPGA控制单板、单片机控制单板、相机和激光发射器，监测站机壳的其中一面需要安装靶面用来接收上一级激光发射形成的光斑，相机与激光发射器需要固定在机箱中的结构件上，以保证在两者没有相对位移的前提下相机轴线与激光发射器发射方向平行，本站的FPGA控制单板用于相机驱动、图像采集、畸变校正、

0中展示了链式激光位移传递示意图中除起始单元和最后一级监测站外任意两级监测站之间的位移传递, T_{n-1} 和 T'_{n-1} 分别代表了某一监测站在当前监测点的位移发生变化前后激光发射器的位置, p 和 p' 分别代表了当前激光发射器在下一级监测站的靶面上形成的光斑位置前后变化, Δx_{n-2} 表示光斑发生位移前后横向的挠度值, Δy_{n-2} 表示光斑发生位移前后纵向的挠度值, 该横向和纵向的挠度值均为相对于基准点的测量值。在计算链式激光的桥梁挠度的过程中, 需要将该倾斜角度的变化考虑在内, 本系统只研究桥梁的竖向形变程度, 只需要考虑设备的竖直方向的角度变化。为更直观地展现桥梁挠度的变化过程并推算桥梁挠度公式, 提出链式激光位移变化的数学模型图, 如图0所示。



当桥梁发生竖直挠度变化时,各监测站所处的位置均为监测点,各监测点发

生竖直方向的形变模型图如图0所示，图中用数学模型直观地展示了监测站1和监测站2的竖向位移的变化，可通过推导监测站1和2的位移公式类比推导其他监测点的位移计算公式。

当桥梁发生竖直挠度变化时，各监测站所处的位置均为监测点，各监测点发生竖直方向的形变模型图如图0所示，图中用数学模型直观地展示了监测站1和监测站2的竖向位移的变化，可通过推导监测站1和2的位移公式类比推导其他监测点的位移计算公式。

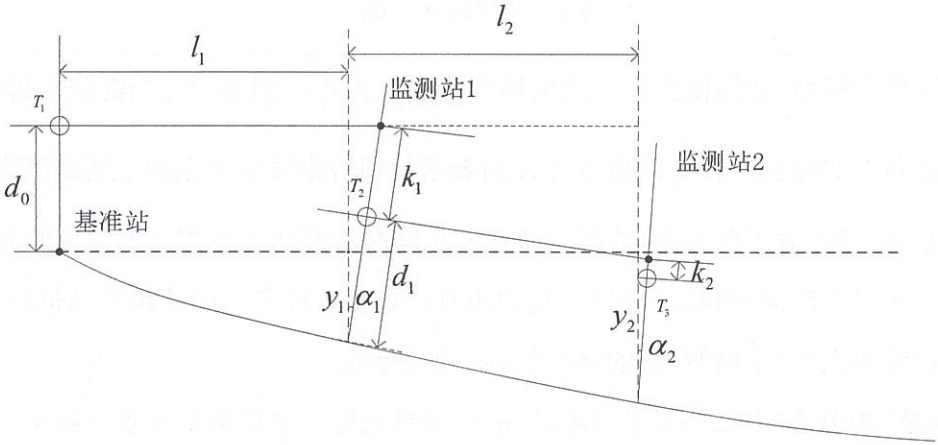


图3.8 监测点竖直方向形变模型图

在上图中， l_1 表示基准站与监测站1初始安装时的水平距离， l_2 表示监测站1与监测站2在开始安装时的水平距离， d_0 表示基准站安装模块内的激光发射器 T_1 距离水平地面的初始高度，可测量得知。当监测站1所在的监测点发生竖向位移时， y_1 表示当前监测点处桥梁所产生的挠度变化， α_1 表示当前监测点发生挠度变化时的竖向转角角度，可由监测站中的倾角仪传感器测量而得到， k_1 表示基准站的激光在监测站1的靶面上前后两次形成光斑中心的位置差，该数值可在FPGA中通过相关图像处理算法计算可得， d_1 表示初始安装监测站1后模块内激光发射器 T_2 距离水平地面的高度。因此根据三角函数关系可得出基准站与监测站1之间的位移变化如式（3.1）所示。

$$\frac{d_0 + y_1}{d_1 + k_1} = \cos \alpha_1 \quad (3.1)$$

由此可得监测站1所处的监测点的竖向方向的位移变化的公式如式 (4.2)所示。

$$y_1 = (d_1 + k_1) \cos \alpha_1 - d_0 \quad (3.2)$$

在理想情况下，安装基准站与各监测站时高度保持一致，即 d_0 与 d_1 相等，因此可将式 (3.1)改写成式 (3.3)所示。

$$y_1 = (d_0 + k_1) \cos \alpha_1 - d_0 \quad (3.3)$$

若在监测站1处的桥梁竖向的位移变化值 y_1 为正，则表示在当前测点桥梁发生的是向下的挠变；若 y_1 的值为负，则表示此刻桥梁发生的是向上的挠度变化。

监测站2相对于监测站1的竖向位移变化同时涉及两个监测点的角度倾斜，计算过程相对于监测点1和基准站之间的相对计算复杂许多，因此用单独位移模型来表示监测点2对于监测点1的竖向位移，如图3.9所示。

图3.9是对图3.8中监测站2相对于监测站1的位移模型做了更详细更直观的数学分析， y_2 代表监测站2在当前监测点所发生的竖向位移变化， α_2 表示当前监测点发生挠度变化时的竖向转角角度， k_2 表示监测站1的激光发射器在监测站2的靶面上前后两次形成光斑中心的位置差。

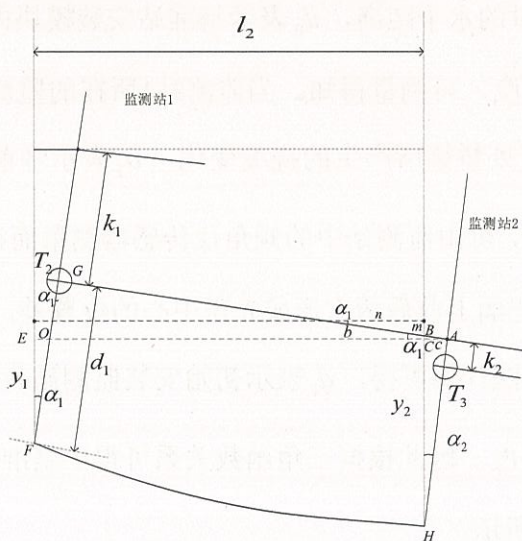


图3.9 监测点2对于监测点1的竖向位移模型

在 $\triangle ACH$ 中存在的几何关系如下式 (3.4) 所示:

$$(d_1 + k_2) \cos \alpha_2 = y_2 - m - b \quad (3.4)$$

由 $\triangle GAO$ 相似于 $\triangle EFO$ 可知, $\angle GAO = \alpha_1$, 又由平行线的内错角相等定理可得出 m 与 n 满足下式 (3.5) 的关系。

$$\frac{m}{n} = \tan \alpha_1 \quad (3.5)$$

由三角形相似的性质可得出式 (3.6)。

$$\frac{m}{n} = \frac{d_1 - y_1 \sec \alpha_1}{l_2 - y_1 \tan \alpha_1 - n} \quad (3.6)$$

联立式 (3.5) 和式 (3.6), 可得出式 (3.7)。

$$m = l_2 \tan \alpha_1 + y_1 (\sec \alpha_1 - \tan^2 \alpha_1) - d_1 \quad (3.7)$$

由 $\angle GAO = \alpha_1$ 可得出 b 和 c 的关系如式 (3.8) 所示。

$$\frac{b}{c} = \tan \alpha_1 \quad (3.8)$$

在 $\triangle ACH$ 中, 可通过三角函数求得 c 的值如下式 (3.9) 所示。

$$c = (d_1 + k_2) \sin \alpha_2 \quad (3.9)$$

联立式 (3.8) 和式 (3.9) 可得出式 (3.10)。

$$b = (d_1 + k_2) \sin \alpha_2 \tan \alpha_1 \quad (3.10)$$

联立式 (3.4)、式 (3.7) 和式 (3.10) 求解, 可得到式 (3.11)。

$$y_2 = (d_1 + k_2)(\cos \alpha_2 + \sin \alpha_2 \tan \alpha_1) + (l_2 - y_1 \tan \alpha_1) \tan \alpha_1 + y_1 \sec \alpha_1 - d_1 \quad (3.11)$$

若监测站2在当前监测点的桥梁竖向的位移变化值 y_2 为正, 则表示在当前监测点桥梁发生的是向下的挠度变化; 若 y_2 的值为负, 则表示此刻桥梁发生的是向上的挠度变化。

由基准站、监测站1、监测站2组成的监测点的竖向位移形变模型图中的桥梁挠度的计算公式推导可知, 当存在 n 级监测站时, 第 n 级监测站的监测点对于第 $n-1$ 级监测站的竖向位移模型可类比参考图 (3.8)。因此, 第 n 级监测站的监测点的桥梁挠度的位移变化公式如式 (3.12) 所示。

$$y_n = (d_{n-1} + k_n)(\cos \alpha_n + \sin \alpha_n \tan \alpha_{n-1}) + (l_n - y_{n-1} \tan \alpha_{n-1}) \tan \alpha_{n-1} + y_{n-1} \sec \alpha_{n-1} - d_{n-1} \quad (3.12)$$

由式(3.12)可知,某一监测点当前的挠度变化值不仅与当前光斑位置的变化、当前监测站发生竖向转角的角度和当前监测站与上一级监测站安装时的水平位置有关,还与上一级监测站的激光发射器的初始安装位置与水平地面的高度、上一级监测站发生竖向转角的角度和上一级监测站所处监测点的桥梁挠度值有关。

3.3.3 多模可靠数据传输通信“神经线”单元设计

多模可靠数据传输通信单元是桥梁结构感知数据的“神经线”，其主要功能是将边缘端所获得的桥梁服役状态可靠传输，在桥梁受极端自然灾害影响严重的状况下可以触发现场应急处置多级报警装置产生多级报警信息。同时，可以通过系统的冗余可靠的多模式通信将极端外部环境下的桥梁的损毁信息发送给云端后台，保障在极端外部环境下的数据传输不受外部状态的影响。

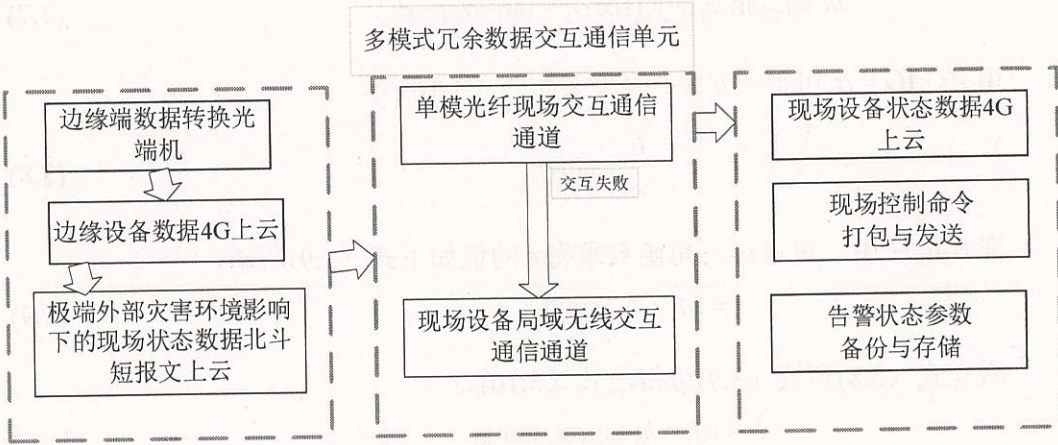


图3.10多模可靠数据传输单元

多模可靠数据传输单元是整个系统的高可靠“神经线”。在通常状态下，边缘端采集的数据通过边缘设备处理后直接通过4G上云，也可以设置通过光端机转换后在距离桥梁一定的距离地方（可以设置在联动报警点）再通过4G上云；在极端外部环境下（如桥梁坍塌等），边缘设备和4G基站可能由于物理损坏等原因无法正常工作。因此系统将根据情况切换传输模式，根据不同的环境和设备情况，设计三种通信手段的多模切换策略。系统在正常情况下，仍然优先选择光端机。但不同的是，系统直接通过单模光纤作为主通信通道，将桥梁突变信号传输至远程云平台 and 报警终端，确保数据的高速、可靠传输。

在光纤受损或失效时，系统自动切换至局域无线通信通道，处理后的数据通过无线接入点传输至无线网关，无线网关负责将数据打包并转换协议通过以太网

的形式将数据上传云平台，此外局域无线网络直接触发本地的报警装置，启动报警状态。若桥梁损毁严重，环境特别恶劣，前两种通信方式均失效，系统会启动北斗短报文通信功能。北斗装置安装于桥梁两端，通过串口接收边缘设备的数据。北斗系统能够在极端环境下，通过卫星传输报警信息，将桥梁的关键状态数据发送至云平台 and 报警终端。该系统为最后的应急通信手段，确保在所有其他通信方式都不可用时，依然能够传递关键报警信息。综上所述，这种多模数据传输策略，确保了系统在各种环境下的高可靠性和容错性，特别是在极端情况下也能持续传递重要的报警信息，保障现场的安全和应急响应能力。

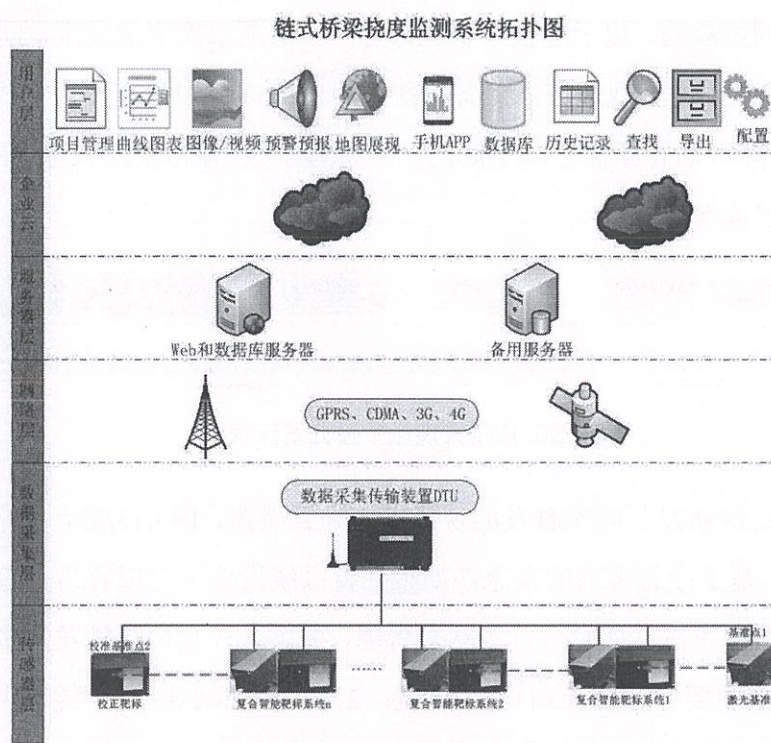


图3.11 数据采集传输通信拓扑

3.3.4 现场前端应急触发多级处置告警单元

现场前端应急触发多级处置告警单元是本系统的现场执行终端，是极端状况下发生桥梁损毁时的应急处理的执行机构，多级处置分为以下几个阶段：

- (1) 当现场传感器数据处在正常状态下，现场数据正常传输，此时桥梁处于安全状态，如图3.12中的绿色阶段，此时段采用日常巡查的方式进行巡查；
- (2) 当边缘端多类型感知系统融合辨识和判定的数据处在一定范围内时，触发云端一级预警（黄色），此时巡查员采用重点关注排查的方式对桥梁现场进

行重点排查；

(3) 当边缘端的传感器融合判定数据继续增大时此时桥梁处在危险的服役状态（橙色），可能受到自然灾害等外部原因的影响，此时交通管制部门需要前往立即排查，并封闭管制交通，等到隐患消除后方可恢复交通，此后连续多天需重点关注该桥梁的服役状态和参数；

(4) 受极端外部环境的影响发生突发落梁等桥梁损毁事故（红色），此时通过高可靠现场通信系统触发多级应急处置系统，此时事故前端的告警信息牌、交通控制信号灯、警示信号灯和语音提示装置同时触发启动，并且前端的激光光幕投影装置闪烁启动，提示过往车辆立即停车，避免二次事故发生，同时将信息上报云端，等待处理；现场应急处置系统采用逐级逐渐加强安装的方式，可以逐渐告知通行车辆，防止紧急停车引起的次生交通事故，保障紧急状态下的有序性，确保生命财产安全。



图3.12 桥梁现场多级处置流程

本团队已经研发了同步触发的现场应急处置装置，图3.13展示了部分现场应急处置装置，基于应急事态的紧急性如果处置系统设置不当很容易引起二次交通事故，因此本系统在设计时进行了认真考虑，提供了一套边缘触发的多级逐渐应急处置系统，主要包含1）LED提示系统；2）交通控制灯；3）紧急声光报警装置；4）激光路面投影装置。当驾驶员看到安置在紧急事故桥群前方的LED大屏后开始刹车，看到交通信号灯时车辆速度已经减到很慢，然后看到声光报警后，了解到前方发生的近期情况，最后看到地面激光投影后，可以逐渐安全地将车辆停下来，以免引起不必要的二次事故。

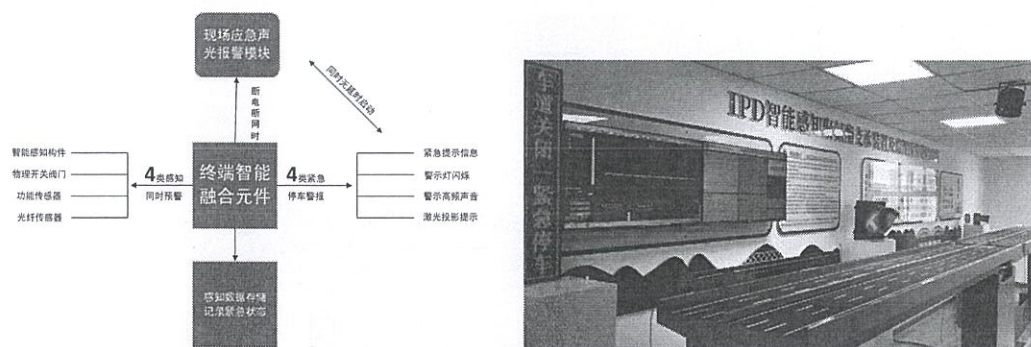


图3.13桥梁现场多级处置装备

同时本团队研发了现场视频同步触发抓拍装置，图3.14展示了部分现场应急处置装置现场视觉抓拍单元，当现场发生灾变等异常情况时动态抓拍单元被触发，通过布设在现场的摄像头可以抓拍现场的视频图片，管理人员可以实时获取现场的灾变动态。

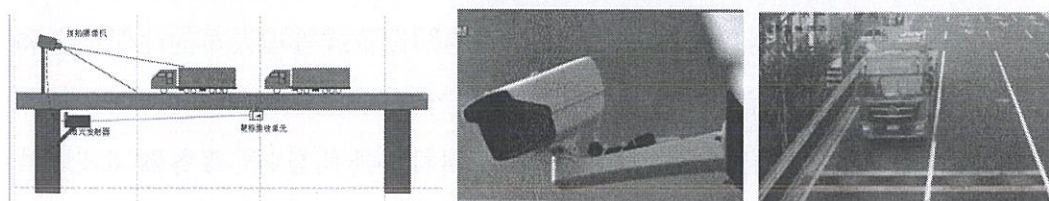


图3.14桥梁现场多级处置装备

3.3.5 云端数据分析、存储与智能预警单元

云端数据分析存储及智能预警单元软件系统是独立的组件单元。软件系统的网络结构设计包括一个服务器组和两个访问端口，其结构设计如图3.15所示。其中，服务器组包括一个数据库服务器和一个Web服务器。数据库服务器使用Server完成数据库创建和数据库表的创建以及管理。在用户进行访问时，移动端和网页端通过运营商提供的专用网络对服务器进行访问，并配备了防火墙以保证通信的安全性。

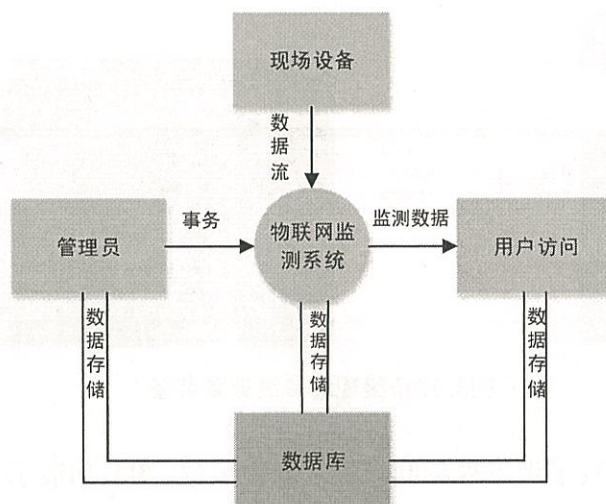


图3.15 软件系统数据流图

在服务器端与客户端通信时，客户端的请求类型共有四种，分别为用户注册及登录、上传子目标注册信息、获取全部智能感知设备或管理人员的注册信息和获取某一子目标的所有信息。当请求类型为用户注册及登录信息时，访问数据库用户表进行账号密码信息填充及查询；上传子目标注册信息时，服务器端获取数据库连接进行现场智能感知终端或者管理人员注册信息表中注册信息的填充，当请求类型为其他两类时，服务器端获取数据库连接之后分别在相应的数据库表中提取信息，进行封装和返回。现场设备系统监测实施流程图如图3.16所示。

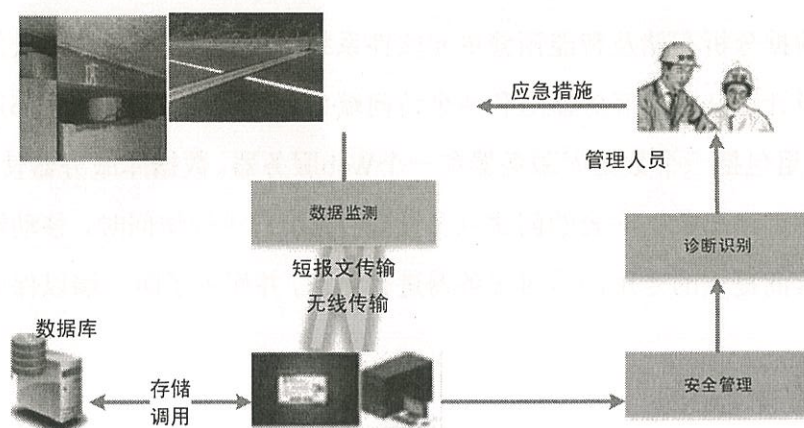


图3.16 现场监测实施流程

每一监测子节点硬件电路由监测信息模块、无线传输模块、系统电源模块、主控核心、报警模块五个部分构成。

软件平台作为监测预警系统的数据中心，集数据接收、存储、可视化等功能于一体。为管理方便，本系统的软件平台全部部署于服务器中。其结构如图3.17所示，主要由服务端软件、数据库以及智能监测管理平台三部分组成。

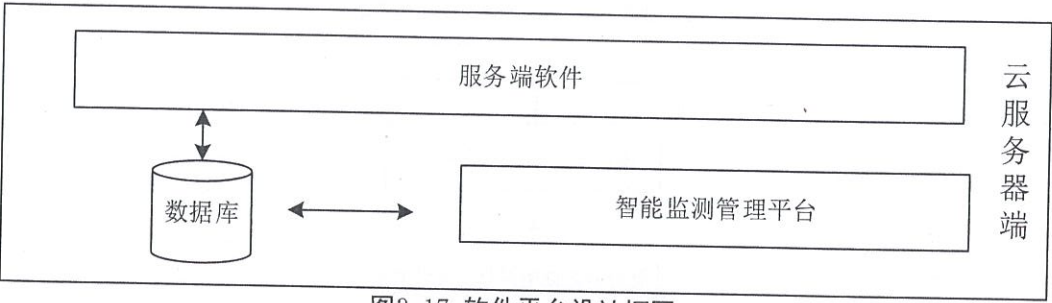


图3.17 软件平台设计框图

智能监测管理平台是直接由管理人员操作的Web端软件，实现监测数据的可视化以及整个监测预警系统的管理功能，方便管理人员通过PC或手机直接查看、分析、管理监测数据，控制监测设备等。数据库主要用于存储数据以及管理平台里的用户信息等。

服务端软件，即数据接收软件，用于接收由硬件采集设备的通讯单元发送的数据，是实现云服务器与远程监测设备通讯的桥梁，包含对监测数据的接收、存储、评价等操作。

健康评价是桥梁结构轻量化健康监测系统的核心功能，关于中小跨桥梁健康评价模型的研究一直是桥梁监测领域的关键问题。本系统采用功效系数法以隧道监测数据进行健康评价，将隧道健康状态按照总功效系数值分为4个等级，首先采用小波阈值降噪法进行数据预处理，根据不同阈值函数和阈值组合降噪后的信噪比和均方误差选择合适的降噪组合，然后对多源传感器数据进行耦合分析，并根据支持度选择功效系数法的评价指标，使用熵权法计算各指标权重，为了对比功效系数法评价模型的结果，引入了高斯混合模型对隧道监测数据进行分类评价，并通过主成分分析和K-means算法改进了高斯混合模型的初始化参数过程，解决了更新迭代模型参数过程中会出现奇异矩阵和迭代次数过多的问题。使用两种模型对同一数据集进行评价，结果表明两种模型的评价分歧主要在Ⅱ、Ⅲ级状态，其余两种状态的评价结果较为一致，原因可能是由于功效系数法在根据历史监测数据和监测规范制定指标标准时存在不确定性，导致中间状态产生差异。

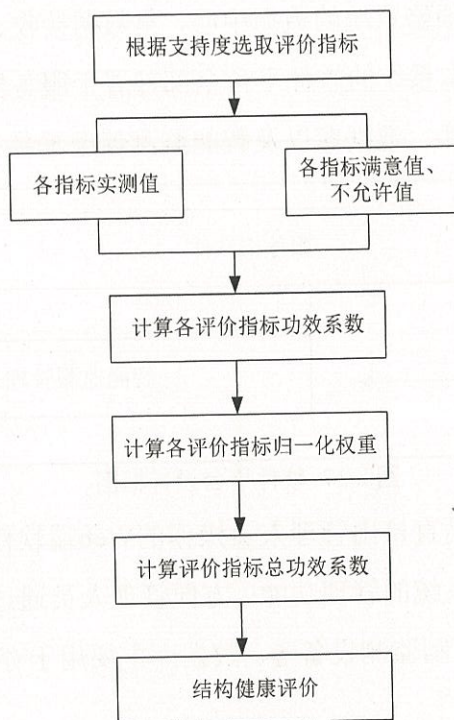


图3.18 功效系数法流程

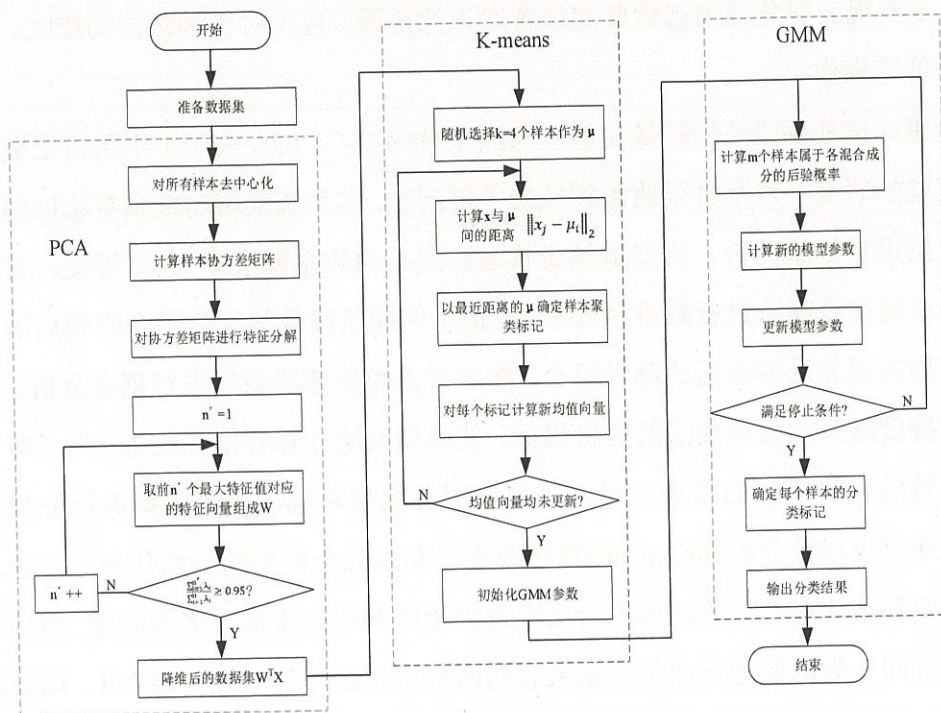


图3.19 改进后的GMM算法流程

3.3.6 多模系统供电单元

本系统采用包括太阳能、小型风机发电和压电自供能三种途径在内的多模态互补供电装置供能，几种发电方式通过在电源管理单元的控制下为胶体电池蓄电，并由电源管理模块对各个供电来源进行综合管理。在本系统中，电源管理模块通过实时监测电池的电量水平、充放电状态以及系统的负载需求，自动调节各供电途径的功率分配。其中，太阳能板和风机提供持续的能源输入，而压电自供

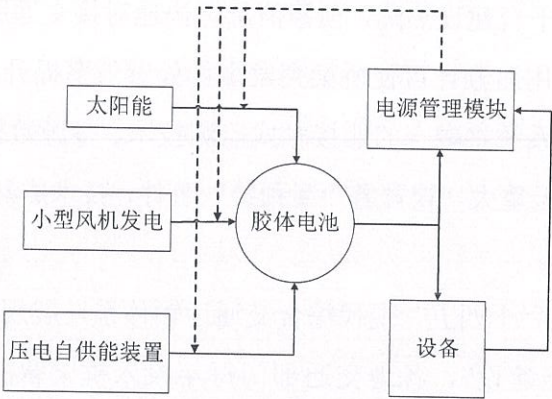


图3.20多模态供电单元框图

能装置在机械振动或压力变化时提供额外电力，从而优化系统的能量利用效率。采用多模态能源供应方式能够保障系统在任何状况下都能获得电能供应，保证了系统的稳定性和可靠性，在外界极端环境中小型风能可以来自车辆通过产生的风力，压电自供电可以采用车辆通过自身的振动产生的电力给系统的蓄电池充电，一般情况下太阳能可以保障系统的正常工作。

3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目研发的桥群轻量化监测预警系统，其技术成果的应用场景已覆盖占桥梁数目大多数的在役中小跨桥梁的数字化升级与新建桥梁配套：

针对我国现有超 80 万座存量中小跨径桥梁中 60% 以上未安装智能监测设备的现状（参考《公路桥梁技术状况评定标准》统计），推测可直接应用于 30 万座以上中低风险桥梁的快速数字化改造-通过工业网关兼容 Mod bus、TCP/IP 等 20 余种协议，实现与传统传感器的数据互通；对于新建桥梁，预留接口可使设备安装率提升至 100%，提升我国桥梁数字化升级的应用前景广阔。

系统集成 4G/5G 物联网传输模块，联网成功率 99.9%、时延 1-10ms，推测可无缝接入全国 31 个省市级交通监控平台的无线通信网络。针对山区、跨江等复杂场景（占全国桥梁总数的 35%），该技术可彻底解决传统有线传输易受自然灾害损坏的痛点，预计在西南、西北山区桥梁改造中应用率可达 80% 以上。

三级预警机制（现场声光报警+移动端推送+平台同步）与现有交通应急响应流程匹配，推测可直接应用于全国5万余座重点监测桥梁的应急处置体系。结合各地“智慧交通”平台建设热潮，预警信息可快速对接交通服务热线、应急管理部门指挥系统，应用后预计可使桥梁突发事件处置效率提升 60% 以上。

核心技术验证：系统将融合的非接触式监测技术、多源数据融合算法，预警准确率 95% 以上，无重大“误预警”“漏预警”事件，技术成熟度达TRL4级，具备直接推广应用条件。

政策驱动需求：《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》明确提出“推进智慧交通基础设施建设”，各地交通部门每年投入桥梁智能化改造的资金超 500 亿元，2023 年全国重点监测桥梁超 5 万座，市场规模年增长 15% 以上，政策红利为成果应用提供了广阔空间。

用户痛点适配：传统人工巡检存在效率低（10 公里桥梁需 20人·天）、风险高（年均事故超8起）、漏检率高（约 30%）等痛点，系统实现 7×24 小时无人值守监测，病害检出率提升 20%，巡检效率提升 85%，项目得到市场验证，用户反馈良好，需求刚性强。

成本效益优势：轻量化设备部署成本较传统系统降低 40%，现场部署时间从1个月缩短至 2 周，且运维成本每年可节省 15万-20万元/座桥梁，符合交通基建“经济性、可持续性”原则，在中小城市及县域市场具备极强的推广竞争力。

3.5 有关技术经济指标

技术指标：

- (1) 压力感知灵敏度V/V: $1.5 \pm 20\%$ ，直线度 (L)%FS:<0.5%)；长期稳定性 (S) %FS: <0.1；重复性 (R)%FS: <0.2；温度补偿范围 (T)°C:-10°C+50°C；(多点感知)
- (2) 位移感知灵敏度: 0.05%，直线度 (L)%FS:0.5；重复性%FS: 0.2（可定制）；

- (3) 振动感知: 1000 V/g (可定制); 测量分辨率: 0.1mV; 频率范围: 0.2Hz~2000Hz; 数据输出: 均方根 (RMS)、特征频率 (频谱)、振动模态 (可选) (可定制);
- (4) 角度感知: 灵敏度0.005° ; 感知范围: -15~15° ;
- (5) 挠度感知: 挠度范围±60mm, 距离±60m; 感知精度: ±0.01@10m;
- (6) 温度感知: 0.5℃; 感知范围: -40~100℃;
- (7) 告警准确率: 95%; 虚警概率: 5%;
- (8) 抓拍响应延迟: 不大于100ms; 复杂天气增强: 具备;
- (9) 灾毁现场联动触发处置告警延迟: 不大于500ms; 多传感器信息融合告警: 边缘具备;
- (10) 灾毁远程预警延迟: 不大于10s; 多功能远程预警方式: 具备;
- (11) 现场设备自供电: 太阳能+设备压力自发电+风机自发电。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

主持单位: 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), 陕西交控桥隧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；努力为我国公路桥梁工程建设做出了贡献。

参研单位：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。

在人才团队方面,现有员工829人,其中:交通运输部及省级各类专家41人,各类专业技术人员614人。交通运输部行业资质持证人员比率达95%,建有秦创原科学家+工程师队伍2支,西安市科学家+工程师队伍1支,博士团队2支,是一支具有高素质专业队伍。平台建设方面,获批交通运输部卫星技术行业应用研发中心(参建)、陕西省企业技术中心、陕西省智慧交通产业中试基地、西安市交通土建结构安全监测技术中心、道路桥隧智慧监测省级高校工程研究中心(参建),提升了公司的科技攻关能力。入选陕西省省属重点科技型企业、陕西省DCMM数据管理成熟度贯标试点企业,获评陕西省“专精特新”中小企业,入选国家级“小巨人”企业。先后荣获先后获得陕西省科学技术进步奖二等奖、中国公路建设行业协会科学技术奖一等奖、中国交通运输协会科学技术奖一等奖、二等奖,陕西省专利奖优秀奖、2024年“数据要素×”大赛陕西分赛区交通运输赛道三等奖等省部级以上奖励荣誉二十余项。

参研单位：中路高科交通检测检验认证有限公司

中路高科交通检测检验认证有限公司是在国家“整合检验检测认证机构”及“深化交通运输改革”的大背景下,于2017年1月注册成立的一家专业从事交通

基础设施试验检测和科技开发的高科技企业。

公司主营业务包括工程检测、工程监测、产品检测与认证、工地试验室、信息化服务及其他技术咨询服务。其下设两个国家检测中心，分别为国家认监委和国家质监局授权成立的“国家道路及桥梁质量监督检验中心”及“国家交通安全设施质量监督检验中心”，均为相关专业唯一的国家检测中心。公司拥有9000余平方米科研及检测场所，国检中心、研发中心及驻地项目办共拥有3000余台套高端完备的试验检测设备。具备交通运输行业公路工程试验检测全套资质，包括：公路工程综合甲级、桥梁隧道工程专项、交通工程专项；已取得CMA认证、CNAS认可、CAL授权；取得九大类交通产品认证资质；获得ISO9001:2015、ISO14001:2015及OHSAS18001:2007认证。

参研单位：长安大学

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。

学校平台条件完善，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。课题组所在的“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”，依托交通运输工程国家一级重点学科，长期研究交通基础设施智能检测领域的关键性难题和共性技术。

4.2 技术力量及人员构成

姓 名	单 位	性别	年龄	技术 职称	专业	在项目中担 任 具体工作
宋世杰	陕西交控桥隧有限公司	男	54	副高级	交通运输工程 领域工程	项目总体负责
王伟	陕西交控桥隧有限公司	男	45	中级	交通工程（安全设施）	项目协调设计
王海渊	陕西高速公路工程 试验检测有限公司	男	46	正高级工 程师	交通工程	项目总体规划
李明	中路高科交通检测 检验认证有限公司	男	43	正高级工 程师	桥梁与隧道工程	检测总负责
张喆	陕西交控桥隧有限公司	男	39	中级	公路工程	现场检测实施与数据采集
辛向阳	陕西交控桥隧有限公司	男	46	中级	其他	评价测试
王会峰	长安大学	男	50	正高级	信息化	项目规划

谢进财	中路高科交通检测 检验认证有限公司	男	49	助理工程 师	桥梁检测	产品检测
张伟	中路高科交通检测 检验认证有限公司	男	44	助理工程 师	道路工程	数据采集
曹志远	中路高科交通检测 检验认证有限公司	男	42	助理工程 师	机械	数据分析
靳明洋	中公高科养护科技 股份有限公司	男	38	高级工程 师	道路工程	现场指导
高荣	长安大学	男	39	副高级	信息化	软件设计
骆巧叶	陕西交控桥隧有限 公司	女	36	中级	机械设计	产品设计
侯柄江	陕西交控桥隧有限 公司	男	34	中级	工程力学	产品试验
刘盼芝	长安大学	女	36	副高级	交通工程（机 电工程）	项目协调设 计
杨 丁	陕西交控桥隧有限 公司	男	44	中级	桥梁工程	现场实施
罗宇涛	陕西交控工程技术 有限公司	男	42	副高级	桥梁工程	现场实施
关丽敏	长安大学	女	39	副高级	信息化	算法研究及 软件设计
李政姗	长安大学	男	25	技术员级	信息化	硬件设计
贺东兴	长安大学	女	27	技术员级	信息化	算法研究

张成艳	长安大学	女	30	技术员级	信息化	软件设计
-----	------	---	----	------	-----	------

4.3 各自承担的主要工作

本项目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，中路高科交通检测检验认证有限公司、长安大学联合承担，宋世杰任项目负责人。项目按照责任制的原则进行管理，以自己的业务为单位，确定开发内容和考核指标。

组织管理形式为成立单独部门，负责项目的日常管理。项目的组织管理形式采用事业部的形式，不同的合作单位分别完成不同的职能，陕西交控桥隧有限公司负责现场试验和工程协调以及、应用推广等工作，及样机性能的检测、技术标准、技术服务；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；中路高科交通检测检验认证有限公司：负责项目产品试验检测；长安大学主要负责技术的研发。

4.4 项目主要负责人情况

宋世杰，男，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，系高级工程师、硕士研究生，深耕交通工程领域科研与实践多年，科研经验丰富、专业能力突出。是承担本项目的最佳人员。

拥有近30年交通工程领域一线实践与管理经验，工作履历覆盖公路建设、工程技术、试验检测、企业管理等全链条岗位。2021年8月至2022年11月，担任陕西高速桥梁伸缩缝工程有限公司、陕西高速公路工程技术有限公司总经理；2022年11月至今，出任陕西交控桥隧有限公司执行董事、总经理，丰富的岗位经历为科研工作奠定了坚实的实践基础。多岗位历练使其对交通工程的技术痛点、行业需求有深刻理解，为科研项目的精准立项与落地实施奠定了坚实基础。

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。

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互联网专业委员会副主任委员、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**等多家杂志审稿人。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。

王伟，男，中共党员，1981年生，现任陕西交控桥隧有限公司总工程师，长期从事特殊复杂结构桥梁构件技术研究和桥梁构件产品开发及技术转化服务工作。在国内外权威学术刊物上发表技术研究论文4篇，主持编写交通运输部行业产品类标准6部，住房和城乡建设部行业标准1部，陕西省地方标准5部（在编2

部），中交集团企业标准2部，交通运输行业团体标准3部（在编2部），主持开发了30余系列桥梁构件产品，并发明了50余项自主知识产权和专利技术。主持或参与省部级科研项目20余项，获中国公路学会科学技术一等奖1次，中交股份科学技术奖二等奖2次，陕西省五部委青年创新创效大赛科技研发类三等奖1次；陕西省公路学会科学技术奖二等奖2次，参编专著3部。

五、项目依托工程情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程概况

保障桥梁在服役运营过程中的安全性和可靠性，特别是在偶发极端自然灾害天气影响下危险安全事故处置的及时性、提高管养效率，已成为交通基础设施管理养护部门及工程界共同面临的巨大挑战，因此桥梁运营服务期间特别是健康监测、安全评估、极端灾害天候下的应急快速处置告警具有促进经济发展和保障生命安全、社会稳定的双重战略意义。

本项目针对传统人工巡检周期长、效率低、反馈慢、长期成本高的问题，结合当今人工智能、自动化技术和信息处理技术发展的需求，提出桥梁的轻量化桥梁基础设施安全智能结构健康监测预警及应急处置一体化系统，提供了全寿命周期数字化营运管养的前沿技术的空白开展深入研究，实际依托工程情况如下：

西安站是铁路包头至海口主通道的关键节点与西安“四主一辅”铁路枢纽体系中的重要一环，集多种交通方式于一体的大型综合性交通枢纽； 本项目聚焦于西安站高架快速路系统及节点立交工程EPC项目1标段。旨在通过本项目的建设，实现西安市与高铁站的快速衔接，为枢纽提供交通功能的基础保障。本标段主要包括如下各工程：（1）新兴南路-东绕城高速立交：本立交由A匝道桥和B匝道桥构成，A匝道桥全长489m，B匝道桥全长1199m，两条匝道桥全桥墩台均采用正交90°，下部结构采用花瓶墩，钻孔灌注桩基础。（2）新兴南路高架：新兴南路高架桥全长955m，桥面宽度为25.5~47.8m。全桥墩台除11、12、13、14号墩外，均采用正交90°，下部结构采用柱式花瓶墩，钻孔灌注桩基础。（3）神鹿大道高架（含地面道路、平行匝道）：神鹿大道高架桥全长1614.5m，桥面宽度为24.5~42.06m。神鹿大道地面辅道桥包含A4匝道桥、B4匝道桥2条平

行匝道。A4匝道桥全桥长234m，B4匝道桥全桥长167m。（4）4、长鸣路-神鹿大道立交：包含A2匝道桥、B2匝道桥、C2匝道桥、D2匝道桥、E2匝道桥、F2匝道桥、G2匝道桥7条匝道桥。

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60.0万元，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40.0万元，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给出了本项目的科研与实际工程配合的模式：

5.3.1 核心配合模式

图5.1给出了本项目的科研与实际工程配合的模式：

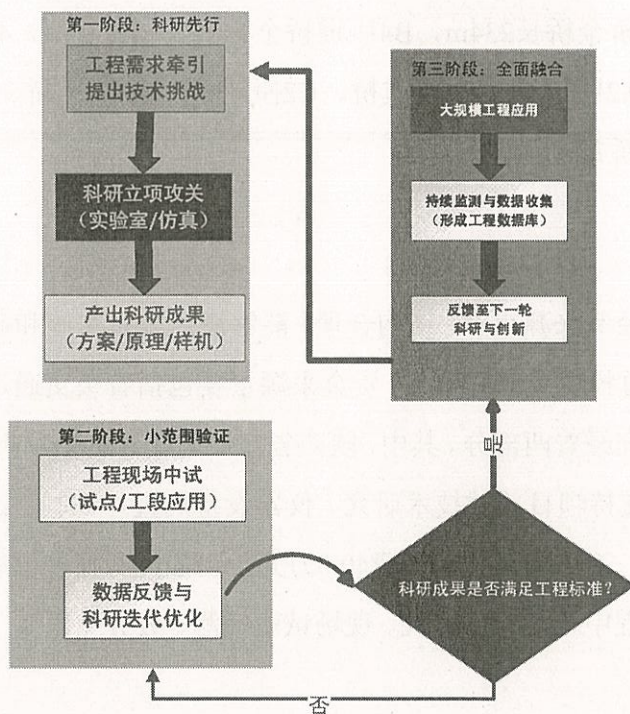


图5.1 项目进度与科研配合模式流程

基于上述框架，两者的配合体现在以下几个层面：前期：科研先行，为工程扫清技术障碍；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）。中期：小范围验证，在真实场景中迭代。在工程现场划定试点区域或建立实验工段，将科研成果（如第一代检测机器人）进行实地测试（工程提供“试验田”）；科研团队根据现场测试暴露的问题（如实际风载、表面粗糙度影响）和收集的数据，对技术进行快速改进和优化，推动科研成果从“实验室可用”到“工程现场好用”（科研快速迭代优化）；后期：全面融合，驱动工程创新与科研深化。成熟的科研成果转化为标准作业流程、专用设备或核心工艺，在工程全范围推广应用，直接提升工程质量和效率（技术规模化应用）；工程应用产生的大量真实数据（如长期监测数据、故障案例），成为科研团队进行可靠性分析、模型修正和下一代技术研发的宝贵资源（工程数据反哺科研）。

5.3.2 关键写作机制

为确保配合顺畅，需要建立以下机制：通过组织联合团队：成立由工程经理

和科研负责人共同领导的“工程-科研联合工作组”，定期召开协调会。通过派遣科研人员常驻工程项目部，同时让工程师参与科研实验，促进双向理解。

在项目主计划中，将关键科研里程碑作为工程关键路径的前置节点进行管理。例如，“机监测系统验收通过”必须是“应急处置系统设计实现”的紧前任务。建立共享的**项目数据平台**，实时同步工程图纸、现场数据、实验报告和仿真模型，确保信息一致。在预算和风险管理中，**明确包含“科研中试与转化”的专项经费和预案**，共同承担技术不确定性带来的风险。

总而言之，工程与科研的配合，本质上是构建一个“需求-研发-应用-反馈”的闭环创新系统。是让工程成为最大的实验场和孵化器，而科研成为工程核心竞争力的直接来源和发动机。这需要前瞻性的规划、制度化的协作和包容试错的文化来保障。

5.4组织管理形式

(1) 本项目的实施应坚持精心组织、精心设计、精心实施、精心管理的原则。在项目实施过程中，产品设计应严格按照国家相关法律、法规的要求进行，实行项目质量领导负责制、项目法人责任制度、过程严格管理制度、品质管理制度和试验检验制度，以确保产品的顺利研发和制造质量。

(3) 本项目完成后，严格按照国家相关产品的法律法规要求、企业标准、设计图纸及文件规范要求、工艺要求，试验检验合格后方可交付市场，供用户使用。此外，在项目实施过程中，要加强项目的档案管理工作，从项目筹划到产品生产过程、交付用户使用直至报废的全生命周期的资料，都要按照国家有关规定收集、整理和归档。

(4) 借鉴我国项目建设管理的实践经验，建立精干、高效的项目实施管理机构。管理机构人员中有设备、电器、财务、研发等专业人员，分工负责抓好项目建设的组织和施工等工作，并同时做好项目协调工作。

(5) 本设计遵循安全、有效、可靠、系统维护管理方便的原则。严格的质量控制和检验标准是确保产品或服务的质量符合预定的标准，提高生产效率，减少缺陷和误差，增强产品竞争力，降低风险，提升客户满意度，以及保护公众的生命安全和权益。通过在生产过程中对产品的质量进行检测、控制和改进，确保

产品符合规定的质量要求。这一过程不仅涉及产品的物理和化学特性，还包括对生产过程的监控和管理，以确保最终产品的质量和安全性。通过质量控制，可以减少不合格品的产生，提高效率，同时降低因质量问题导致的失效、索赔等风险，从而提升客户满意度和忠诚度。此外，通过规范和标准化工作流程，明确岗位职责和工作要求，提高员工对工作的认同感和满意度。

(6) 本系统在生产过程和施工阶段检测质量控制。本产品实施早期生产过程和施工过程检测工作分为以下几道程序。首先，在产品开发完成后由生产单位的质量管理部门制定严格的检测方案。确保在生产过程中每一个环节系统能够正确的保证产品的有效性。生产过程的指标质量检测主要包含产品生产环节的性能指标和功能指标检测，在产品生产过程中按照所制定的检测方案对产品所涉及的每一块PCBA进行。

性能检测：压力传感器按照制定的标定方法进行精度标定、采样速率检测、可靠性标定、高低温测试、防护性能测试，以满足户外安装的需求；温度传感器进行采集测试，利用温度传感器补偿压力漂移测试实验（抽检）；然后组装部件，再进行部件功能和性能的检验测试，部件组装完成后对子系统进行检验测试，最后将子系统和软件平台对接整体搭建并测试系统的功能，性能，并在车间进行3-5天拷机，反复测试，保障产品运行的可靠性，避免出现BUG。另外，产品在测试阶段要接受寿命测试，防护测试，评估系统的性能指标。智能支承构件生产过程的质量检测流程大体图5.2所示。

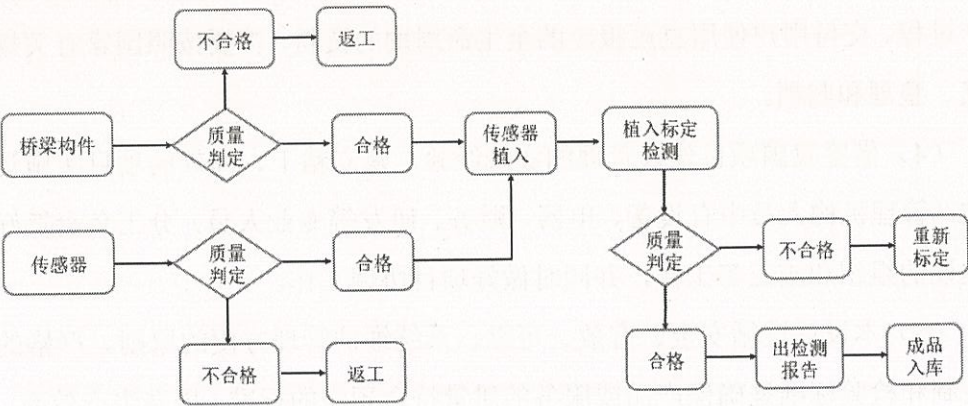


图5.2 产品生产工程质量检测与控制

(7) 系统在使用阶段的检测质量控制。在设备投入使用之后，检测工作的作用就是制定质量检测机制以及确定系统运行完善。首先安装施工完成后要综合测试系统工作的有效性，确保系统处在正常的工作状态，安装完成后确保系统启动。其次，在系统运行过程中巡查人员定期的要对系统进行巡查，比如系统的供电是否正常，系统的物联网流量卡是否处在服务器内，系统的工作指示灯是否处在常设工作状态等等，当系统在运营过程中出现损坏或者故障的时候，要尽快进行维护维修；再次，外部在自然灾害高发季节要重点排查系统，确保系统正常工作；最后，在高发自然灾害的时段，要第一时间排查评价高危路段的路和桥所安装的系统，切实维护系统工作正常。

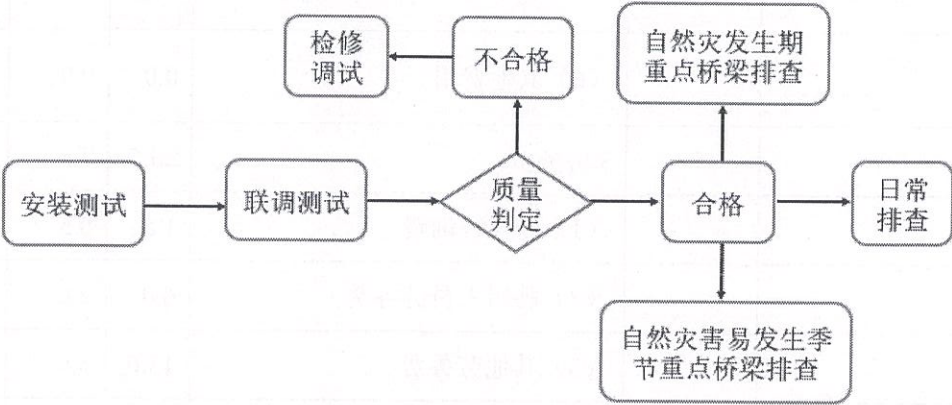


图5.3 产品运营期的检测和质量控制

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	60.0	19.9	40.1
工程配套研究经费	40.1	1.设备费	6.0	2.0	4.0

单位自筹	0.0	(1) 购置设备费	2.0	1.0	1.0
其他经费	0.0	(2) 试制设备费	2.3	0.3	2.0
		(3) 设备改造与租赁费	1.7	0.7	1.0
		2.业务费	27.5	7.5	20.0
		(1) 材料费	14.0	4.0	10.0
		(2) 测试化验实验加工费	6.3	1.5	4.8
		(3) 燃料动力费	1.2	0.0	1.2
		(4) 差旅费/会议费/国际合作与交流费	3.5	2.0	1.5
		(5) 出版/文献/信息传播/知识产权事费	2.5	0.0	2.5
		(6) 其他费用	0.0	0.0	0.0
		3.劳务费	20.5	7.5	13.0
		(1) 专家咨询费	1.5	0.5	1.0
		(2) 聘用人员劳务费	6.0	2.0	4.0
		(3) 其他劳务费	13.0	5.0	8.0
		(二) 间接费用	6.0	3.0	3.0
		4.管理费	4.7	2.7	2.0
		5.绩效支出	1.3	0.3	1.0

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）	3
		（1）授权发明专利	1
		（2）实用新型	2
		（3）外观设计	0
		2、软件著作权授权数（项）	1
		3、发表论文（篇）	5

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(1) 其中SCI索引收录数	1
		(2) 其中EI索引收录数	1
		(3) 其他	3
		4、著作（部）	0
		5、制订标准数（项）	1
		(1) 国际标准	0
		(2) 国家标准	0
		(3) 行业标准	0
		(4) 地方标准	0
		(5) 企业标准	0
		(6) 科技报告	1
	其他成果	1、填补技术空白数	0
		(1) 国际	0
		(2) 国家	0
		(3) 省级	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	3
		(1) 新工艺（或新方法模式）	0
		(2) 新产品（含农业新品种）	1
		(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
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
	人才引育	(4) 规模化生产	否
		1、引进高层次人才	2
		(1) 博士、博士后	1

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(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）	0
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			

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

8.1 项目预期目标

本项目以保障桥梁运营期的安全性、桥梁服役过程中受偶发极端自然灾害天

气影响下应急处置的及时性、提高中小跨梁体的管养效率为目标，以影响桥梁结构健康、安全的重要构件为研究对象，通过协同创新、多学科交叉融合攻克桥梁结构健康监测及应急处置一体化关键技术，研发基于智能构件和多传感器融合的桥梁结构健康监测及现场应急轻量化触发感知告警处置及联动报警一体化装备，并在现场开展实际示范应用，实现桥梁结构健康感知+及时应急处置和报警一体化系统，解决公路桥梁轻量化全时空、自动化、多参数智能监测，实现结构健康状况智能性能评估系统、全生命周期数字化建档和管理难题，提供桥梁受偶发自然灾害损毁情况的现场应急处置方案及装置，满足养护管理部门对公路桥梁基础设施营运过程的自动化巡检、数字化养护管理的迫切需求。

8.2 提交的研究成果及其形式

本项目针对传统人工巡检周期长、效率低、反馈慢、长期成本高的问题，结合当今人工智能、自动化技术和信息处理技术发展的需求，提出桥梁的轻量化桥梁基础设施安全智能结构健康监测预警及应急处置一体化系统，提供了全生命周期数字化营运管养的前沿技术的空白开展深入研究，拟取得以下研究成果：

1. 桥梁结构健康轻量化智能感知预警及应急处置系统相关技术行业发展趋势报告1份；
2. 发表学术论文不少于5篇，其中核心期刊2篇，SCI/EI检索不少于1篇；
3. 一体化的桥梁基础设施多参数智能检测、应急处置集成一体化系统样机1套（示范应用桥梁安装）；
4. 轻量化桥梁结构健康智能监测平台软件1套（配使用说明书）；
5. 申请国家专利不少于2项；
6. 申请软件著作权不少于1项；
7. 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

如何保障桥梁在服役运营过程中的安全性和可靠性，特别是在偶发极端自然灾害天气影响下危险安全事故处置的及时性、提高管养效率，已成为交通基础设施管理养护部门及工程界共同面临的巨大挑战，因此桥梁运营服务期间特别是健

健康监测、安全评估、极端灾害天候下的应急快速处置告警具有促进经济发展和保障生命安全、社会稳定的双重战略意义。

8.3.1 经济效益

本项目已经研制成功的植入智能传感器的桥梁智能支承装置及支承装置和桥梁伸缩缝构件状态感知及监测与安全评估系统样机已在示范应用桥梁中投入使用，前期研究开展顺利，后期将进一步完善系统，并正式投产及推广至其他桥梁工程中应用，实现更大的经济和社会效益。此外，本项目拟集成开发的桥梁外部智能感知装备，并结合智能感知构件实现桥梁结构服役安全状态及应急处置一体化系统对各类大中小型桥梁具有普遍的适用性，可实现对多座桥梁支座的实时在线监测、安全评估和多级预警，并具备智能化的风险对策分析和功能，具有扩容功能。该系统将有效解决现有桥梁健康监测系统监测桥梁单一、监测目标多而杂、数据处理效率低下、维护费用高、智能化程度低，特别是缺少极端外部环境因素影响下桥梁损毁的应急处置等问题，产品的问世将带来巨大的社会效益、具备良好的产业前景和市场潜力。

根据市场调研及反馈，桥梁结构轻量化监测预警处置系统成套装备市场售价为6万元（含税）/套，根据市场需求情况，按每年产销2000套来算，新增销售收入1.2亿元/年。养护维护和后续数据处理费用为2000元/桥，根据市场需求情况，新增销售收入400万元/年，总体产生收益1.24亿元/年。

8.3.2 社会效益

保障桥梁在服役运营过程中的安全性和可靠性，特别是在偶发极端自然灾害天气影响下危险安全事故处置的及时性、提高管养效率，已成为交通基础设施管理养护部门及工程界共同面临的巨大挑战，因此桥梁运营服务期间特别是健康监测、安全评估、极端灾害天候下的应急快速处置告警具有促进经济发展和保障生命安全、社会稳定的双重战略意义。

桥梁健康轻量化多参数智能监测预警及应急处置一体化系统的研究成功可极大地缓解目前护栏基础设施的检测方面面临的人力、物力不足等问题，最大程度地保障人民生命财产的安全，促进我国智能制造和研发水平达到国际一流水平，带动包括政府交通管理部门、检测部门、养护部门、电信运营商、内容-服

务-应用等提供商的行业联盟和产业的快速发展，建造一个面向基础设施的智能化运营平台，形成基础设施的信息物理和智能一体化服务模式。

社会经济发展水平和安全事故的损失大小成正比，在当今经济高速增长、人口日益膨胀的情况下，基础设施安全对公共安全的影响越来越大，已成为影响公共安全的重要因素。交通基础设施是国民生活的物质基础，是为生产奠定了物质基础，能够为经济的发展带来成倍增长的助推力，因此基础设施的安全和完善以及公共服务的到位程度是判断其经济是否持续稳定发展的基础。改善运营手段离不开强大的技术力量，未来交通设施着重于智慧信息平台的建设，只有建设共同互联能动的信息处理平台，才能将信息转化为大数据，进行数字化的安全管理。

建立一体化的信息基础设施成为未来信息物理系统发展的必然趋势。构建互联网、移动通信网等全面融合的一体化的基础设施信息网络对国民经济、国防安全有深远影响，是提升我国信息服务能力的有效途径。一体化网络具有典型的大时空尺度属性，在任何复杂气候条件、任何时间段、任何地段均可以接入，其智能控制和处理、快速反应、高效应对等鲜明特征。

构建适应万物互联、智能化社会的新一代互联网基础设施，对于促进信息技术与实体经济融合、保障信息基础设施的安全有着重要意义。未来智能化网络将具备更简单、更灵活和更开放的特点。我们相信，信息基础设施将与人工智能等技术深度结合并广泛应用于经济社会的方方面面，未来其将不断向全要素、全天候、全时空、高质量和强智能等方向加速演进，最终发展可能会大大超出我们的想象。

九、其他需要说明的问题

无

十、申请单位意见

配套资金与依托工程均已落实到位。

(公章)

单位负责人: (签字)



2020年3月27日

桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用

大纲评审意见

2026年3月23日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用”（项目编号：25-79X）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容全面，研究目标明确，技术路线可行。

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

三、预期成果完全覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架高度契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

1.国内外研究现状、拟解决的关键问题及主要研究内容加强桥群、轻量化及应急处置等内容分析；

2.进一步完善技术路线图、技术经济指标与项目预期目标等内容。

主任委员：王建子

2026年3月23日

专家审查意见表

项目名称	桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用				
专家姓名	王建宇	职务/职称	教授	专业	交通工程
专家单位	长安大学			联系电话	13709252206
评审意见 1. 主要研究内容中加强应急处置内容研究； 2. 完善技术路线图； 3. 项目预期目标进一步明晰； 4. 技术经济指标进一步梳理。 评审专家（签字）：王建宇 2016年3月23日 （本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）					

专家审查意见表

项目名称	桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用				
专家姓名	苗建宝	职务/职称	正高工	专 业	土木工程
专家单位	西安公路研究院有限公司			联系电话	15249205285
评 审 意 见 本项目紧扣中小跨径桥梁占比高、老化严重、人工巡检效率低、极端灾害应急处置缺失的行业痛点，面向陕西省公路桥群安全运维实际需求，技术路线清晰、应用导向明确，整体思路可行、研究价值突出，同意研究大纲通过评审。意见如下： 一、总体情况： 1、根据本项目研究内容包括了监测设备和预警设备基本是按照公路自然灾害监测预警，建议核查，在研究内容中提及“本项目拟将位移传感器，光纤感知传感器、视觉传感器、光电传感器连同梁体安装布设在中小跨桥梁的关键位置”安装大量传感器与桥群轻量化监测不够匹配；链式激光基准的梁体多点轻量化监测也是要逐孔布置监测站，建议核查修改。同时目前基本上是单桥监测系统研究，建议增加与桥群相关研究，体现桥群研究与单桥监测的特点。 2、技术路线中提及健康评价是桥梁结构轻量化健康监测系统的核心功能，与交通部相关文件不一致，轻量化监测目的核心是达到对桥梁运行重大安全风险的有效监测，评估主要是结构监测的主要目的，因此也是建议如何表述能与研究匹配。 3、本项目研究涵盖了监测+评估+预警+应急处置+多装备+平台，内容全面，项目整体研究经费有限，建议还是聚焦重点。 二、技术方面： 1、理论研究深入，建议与桥群结合，应该根据不同桥群特点提出合理的监测预警的方案，体现实用价值。 2、3.5 有关技术经济指标表述：告警准确率：100%；虚警概率：0%，建议核查是否合理，目前基本达不到，同时核查其他指标合理性。 三、依托工程未明确是否有相应的监测预警方案，建议落实依托工程。 评审专家（签字）： 年 月 日 （本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）					

专家审查意见表

项目名称	桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用				
专家姓名	常海波	职务/职称	正高工	专 业	公路工程
专家单位	交通运输部公路科学研究院有限公司			联系电话	18192640597
评 审 意 见					
一、总体意见: 项目针对桥群轻量化监测预警及应急处置技术开展研究,研究目标明确,内容全面,技术路线可行,人员组织合理,依托工程落实,同意研究大纲通过评审。 二、建议: 1. 结合拟解决的关键问题进一步优化研究内容; 2. 轻量化监测的实施路径进一步优化; 3. 技术路线进一步优化。 4. 落实经费。					
评审专家(签字): 常海波					
2026年3月21日					
(本意见入档,应填写工整,纸面不敷,可另加纸)					

专家审查意见表

项目名称	桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用				
专家姓名	赵池航	职务/职称	教授、博导	专 业	交通运输工程
专家单位	东南大学			联系电话	13951922763

评 审 意 见

该项目开展桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用的研究工作，主要包括复杂环境下基于桥梁支座构件智能感知的轻量化监测模型、基于激光基准的梁体多维变形轻量化监测模型及结构变形监测方法、极端天候灾害威胁下基于边缘计算的轻量化简易联动现场告警方法、硬件边缘出发视频联动抓拍机制。该项目研究大纲的研究内容具体，研究目标及拟解决的问题明确，技术架构与技术路线可行；达到了项目研究大纲的评审要求。

修改建议如下：

（1）进一步梳理相关的文字论述，以保证论述的逻辑性与准确性。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 23 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用				
专家姓名	伍朝辉	职务/职称	副研究员	专 业	交通数字化
专家单位	交通运输部科学研究院			联系电话	15210832821

评 审 意 见

同意通过研究大纲评审。

建议：

（1）已有研究基础写得太多了，写直接相关的内容即可，要区分好已有基础与本项目的研究增量；

（2）P55“技术指标”要有测评对象，是研发了一套系统？还是部署了一套软硬件监测平台？“告警准确率：100%；虚警概率：0%”的提法是否科学？

（3）P63“5.3.2 关键写作机制”应为“关键协作机制”，内容写得也比较乱。P54“政策驱动需求”写的是“十四五”的要求，现在已经进入“十五五”期，应该跟踪一下最新的桥梁智慧化相关的政策要求。

评审专家（签字）：伍朝辉

2026年3月22日

桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用 (项目编号: 25-79X)

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签名
1	主任委员	王建军	长安大学	交通运输工程	交通运输工程	教授	王建军
2	委员	苗建宝	西安公路研究院有限公司	土木工程	土木工程	正高工	苗建宝
3	委员	曹海波	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	公路工程	公路工程	正高工	曹海波
4	委员	赵池航	东南大学	交通运输工程	智慧交通系统	教授	
5	委员	伍朝辉	交通运输部公路科学研究院	计算机应用专业	交通数字化	正高工	

专家意见处理表

项目名称：桥群轻量化监测预警及应急处置系统及应用

(项目编号： 25-79X)

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应，详细说明修改情况)
1	王建军	1. 主要研究内容中强化应急处置研究 2. 完善技术路线图 3. 项目目标进一步明晰 4. 经济指标需进一步梳理	1. 已强化应急处置研究内容，补充极端灾害和突发风险场景下的快速响应、联动告警与现场处置相关内容。 2. 已优化技术路线图，进一步梳理总体链条。 3. 已进一步凝练项目目标，明确聚焦中小跨径桥梁及桥群场景下的重大安全风险监测、预警与应急处置需求。 4. 已对经济指标进行梳理与核查，补充测算依据，增强指标设置的合理性。
2	苗建宝	1. 核查研究内容与“桥群轻量化监测”的匹配性，优化传感器布设和监测方式，并补充桥群监测研究内容，体现桥群与单桥监测的区别。 2. 调整“健康评价是核心功能”的表述，突出轻量化监测服务重大安全风险监测、预警与处置的定位。 3. 研究内容较多，建议聚焦重点。 4. 理论研究应与桥群特点结合，提出更有针对性的监测预警方案。 5. 核查“告警准确率 100%、虚警概率 0%”等技术经济指标表述的合理性。 6. 进一步落实依托工程及其监测预警方案。	1. 已研究对象、研究范围和实施方式进行调整，突出“少量关键传感器+分层分级布设+重点桥梁差异化配置”的轻量化思路，并补充桥群监测相关内容。 2. 已调整“健康评价是核心功能”的表述，突出轻量化监测的核心目标是服务桥梁重大安全风险监测、预警与处置。 3. 已对研究内容进行聚焦，重点突出轻量化监测预警、关键风险识别和应急处置联动。 4. 后续将结合不同桥群特点，提出更具针对性的监测预警方案，增强成果实用性。 5. 已对“告警准确率 100%、虚警概率 0%”等表述进行核查，后续将改为更加科学、可验证的指标表述，并同步优化其他技术经济指标。 6. 后续将进一步落实依托工程，补充监测预警方案、示范部署方式和验证路径

3	曹海波	根据拟解决的问题进一步优化研究内容 轻量化检测的实施路径进一步优化 技术路线进一步优化 核实厅拨经费	1. 已围绕拟解决的关键问题进一步梳理研究内容，突出重大安全风险监测、轻量化部署、桥群预警联动和应急处置协同。 2. 已优化轻量化检测实施路径，突出关键部位感知、低成本部署、分级配置和桥群共享。 3. 已进一步优化技术路线，增强前端感知、平台分析、预警判识与应急处置之间的逻辑衔接。 4. 将进一步核实厅拨经费与研究内容、任务安排及预期成果之间的匹配关系。
4	赵池航	1. 进一步梳理相关的文字论述，以保证论述的逻辑性与准确性。	1. 已对相关文字论述进行了梳理和修改，优化章节衔接、层次结构和概念表述，提高全文论述的逻辑性、准确性和一致性。
5	伍朝辉	1. 精简已有研究基础，突出与本项目直接相关的内容，并区分已有基础与本项目研究增量。 2. 明确技术指标的测评对象，并核查“告警准确率100%、虚警概率0%”表述的科学性。 3. 将“关键写作机制”改为“关键协作机制”，梳理相关内容，并更新“政策驱动需求”中的最新政策依据。	1. 已压缩前期研究基础内容，重点保留与本项目直接相关的成果，并进一步突出本项目的研究增量和创新点。 2. 后续将补充技术指标对应的测评对象，明确指标适用范围，并对“告警准确率100%、虚警概率0%”等表述作科学修订。 3. 已将“关键写作机制”修正为“关键协作机制”，并将进一步梳理相关内容；同时更新“政策驱动需求”部分，补充最新桥梁智慧化相关政策要求。

大纲评审委员会专家（签字）： 王建子

项目负责人（签字）： 李亚杰