

项目合同编号：25-48K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

项目负责人：潘长平

通讯邮编、地址：710065 陕西省西安市高新区科技四路 205 号

传真、电话：02961321671

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：25-48K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

项目负责人：潘长平

通讯邮编、地址：710065 陕西省西安市高新区科技四路 205 号

传真、电话：02961321671

起止年限：2026 年 3 月至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制



一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

(1) 桥梁突发灾变识别及轻量化监测技术研究

针对当前桥梁监测方法冗余量大、设备繁杂、成本高等问题，本项目围绕水毁、地震、重载交通、恶劣气象及桥面特殊事件等多类风险源，系统识别监测目标与病害特征，深入解析桥梁灾变的主要诱因、外在表现及演化机理。通过多尺度数据融合技术，构建整体与局部感知数据的关联模型，形成多维度协同监测与验证方法，并建立客观、可量化的结构灾变评估体系。基于敏感指标类型与精度要求，优化传感器选型与布局，构建轻量化监测方案，实现多种轻量级传感器的协同配合与交叉验证，最终达成对桥梁灾变的低成本、高精度、轻量化监测目标。

(2) 基于多源数据融合的桥梁数据标准设计

以轻量化监测技术为基础，开展桥区多源数据集成的主题定义、信息项描述、标准代码设计及数据规则定义，建立规范化的数据标准，为数据采集与平台建设提供统一指导。该标准既能支撑后期系统复用与优化，又可提升跨部门、跨用户的信息共享能力。面向应用分析，通过构建数据一致性与标准化体系，形成可靠的数据基础，增强本技术方案的延伸应用潜力。

(3) 基于长周期海量数据深度挖掘的桥梁安全监控数据基座方案设计

考虑到长周期监控数据在地质水文、交通仿真、风险预警等多领域的潜在价值，开展数据存储体系研究，建立统一的桥梁海量数据基座，集成采集、存储、处理、分析等功能，为数据应用与标准化建设奠定基础。

针对数据安全与跨部门协同挑战，构建“桥梁数据协同安全治理框架”，从数据策略、治理组织、核心技术等方面系统设计。重点研究数据分类分级、轻量级加密优化、联邦学习隐私计算模型，以及融合属性与角色的混合动态权限管理，实现多维度实时权限管控，保障数据安全共享与协同。

(4) 多源低功耗桥梁集成传感装备开发

研究传感器的微型化设计技术，针对复杂环境下的长期服役需求，开展传感器本体耐久性与可靠性研究，通过兼容性设计提升传感器接入的灵活性与续航能力；研究基于无线传感网络的拓扑结构与自组网协议，保障复杂环境下多源设备的数据传输可靠性；设计边缘计算装备及多层智能计算架构，实现前端装置的集群管理与高效数据处理。

2. 技术关键

(1) 关键灾害指标选取与风险阈值设置。精确评估桥梁在复杂环境下的灾害表征和关键指标，研究多种因素的相互作用和不确定性，构建精度高、适用范围广的风险评估模型，研究针对关键指标的风险阈值设置方法。

(2) 预警大数据分析技术的方案构建。如：确保数据合规性、安全性和质量，对于数据分类、分级、标准化、脱敏等处理流程；确保数据隐私性，所需适用的数据加密技术以及访问控制，防止敏感信息泄露的同时，保护数据隐私和安全；面向数据分析与应用，相应文件存储框架、大数据处理平台的选型。

(3) 复杂环境下多参量、低功耗、无线自组网传感装备开发：对于极端环境下无公网覆盖场景中长期服役的传感器系统进行多参量集成研究，增加系

统节点稳定性。同时，进行低功耗自组网技术研究，提升传感器设备的续航能力和通讯稳定性等问题。

3. 依托工程（依托工作）

省内公路桥梁结构监测项目 1 项：重点聚焦桥梁结构安全，针对沿线关键桥梁，项目部署了轻量化结构监测系统，通过采用低功耗、高精度的传感设备与自动化数据采集网络，构建起对桥梁结构状态的实时感知能力，从而实现对桥梁位移、应力、振动等关键参数的连续、精准监测，为桥梁运营期的结构性能演变与安全评估提供可靠的数据支撑。

二、考核指标

1.预期目标

(1) 开发多参量、高精度、低功耗的智能采集处理装置，实现休眠功耗 $\leq 0.05\text{W}$ 、续航时间 ≥ 1 年的低功耗长续航特性，支持 0.06Hz （可调）采样频率，具备前端采集处理装置集群管理与数据处理功能，提升系统的处理效率和自主决策能力；

(2) 提出整套多传感器单元的协同工作机制与数据融合方法，形成多源协同传感器快速自组网技术，有效解决极端环境和无公网覆盖环境中监测系统存在的组网实施难度大、数据传输不稳定、通信设备功耗高等问题；

(3) 建立基于数据平台的安全监控与应急响应的实施体系。通过平台的构建，形成面向用户的可用界面，借助信息化、数字化、智能化手段，将基础的数据转化为适合管理方与执行方开展实际工作的分析结论与警示、警报，实现对具体事件的决策支撑。通过平台内的工作流程、提醒机制、数据分发机制、协同处置机制，进一步提升事件发生后的各方协同能力，为敏捷、高效处置事件提供技术载体。

2.主要技术经济指标

监测设备集成度与重量：高集成、轻量化；

采样频率： 0.06Hz （可调）

休眠功耗： $\leq 0.05\text{W}$

续航时间： ≥ 1 年

3.经济和社会效益

(1) 经济效益

轻量化监测系统采用成本相对较低的传感器和采集设备，可显著降低系统建设和运营成本。该系统借助精准的监测手段和深入的数据分析，能够敏锐且及时地发现交通基础设施可能存在的潜在问题。这不仅有效减少了不必要的养护维修费用，还能显著延长交通基础设施的使用寿命。

桥梁智能监测预警项目的实施需要大量的先进技术和设备，如传感器、监测仪器、通信设备等，这将带动相关产业的发展，创造新的经济增长点。在全方位监测系统实时监控和反馈下，桥梁能够在更长的时间内保持良好的运行状态，从而大幅提高了交通基础设施的经济效益。

有效的桥梁防灾抗灾措施可以保障桥梁的安全稳定运行，减少因灾害导致的交通中断时间，提高交通流量和运输效率。此外，通过提高桥梁的防灾抗

灾能力，可以降低灾害发生的概率和损失程度，从而减少保险赔付金额，降低企业的运营成本。

（2）社会效益

保障桥梁的安全运行具有至关重要的意义。在桥梁使用过程中，各种因素可能导致其结构受损或功能退化，如果不能及时发现和处理，一旦发生事故，将造成不可估量的人员伤亡和财产损失。所以保障桥梁的安全运行，是维护社会稳定、保障人民安居乐业的关键所在。

通过引入先进的监测理念和管理养护技术，能够更加及时、有效地发现桥梁存在的问题，并采取针对性的措施进行修复和改进。这不仅可以延长桥梁的使用寿命，还能增强公众对桥梁安全的信心和对交通运输系统的信任度。

桥梁监测预警系统还能够促进交通运输行业的发展。良好的桥梁状况能够保障路网的畅通无阻，减少交通拥堵和延误，提高运输效率，降低物流成本，促进区域间的经济交流与合作，推动产业的优化升级，从而带动整个经济社会的繁荣发展。

构建基于数据与数字化平台的交通基础设施安全监控与应急响应能力，将有效提升突发事件的处置能力与时效性。事件发生后，通过平台预设的处置机制，自动触发相关干系单位、重点干系人的协同处置预案，敏捷处置突发事件，有助于控制事件影响范围、降低人民群众生命财产损失。

基于长周期监控数据，为优化设计能力、防灾减灾、促进科学研究，提供数据资源支撑，不仅直接提升道路交通安全，同时可间接地优化道路运维养护、促进材料科学发展、服务综合生态安全等多方面效益。

4.成果提供形式

- （1）基于轻量化监测方法的桥梁安全监控数据标准报告 1 份；
- （2）长周期海量数据深度挖掘的桥梁安全监控数据基座方案 1 份；
- （3）高集成轻量化监测设备 1 套；
- （4）软著：1~2 项；
- （5）专利：1 项；
- （6）论文：1 项。

4. 其他考核指标

无

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）
2026.03-2026.07	1、调研国内外研究现状、搜集文献，完成需求初步解析，输出研究大纲初稿。 2、明确需求痛点与指标，形成正式调研报告与研究大纲。
2026.07-2027.01	1、完成传感器、通信模块等技术选型，确定桥梁监测关键节点及指标。 2、开发损伤识别与状态评估算法，完成算法原型搭建与初步验证。 3、完成云平台后端微服务与数据库开发。
2027.02-2027.09	1、开展嵌入式软件及前端可视化界面开发。 2、实验室集成系统，进行性能测试。 3、完成配套图纸设计。 4、申请软件著作权、专利，
2027.10-2028.02	1、启动 ≥ 3 个月连续数据采集。 2、系统迭代优化，评估系统准确性与有效性。 3、整理技术文档、源代码、设计图纸，撰写研究报告。 4、完成结题评审，

四、项目经费

项目总经费：40.0 万元
交通运输厅补助：19.9 万元
自筹资金：20.1 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	37	18.4
1. 设备费	17	8.5
(1) 购置设备费	17	8.5
(2) 试制设备费	0	0
(3) 设备改造与租赁费	0	0
2. 业务费	15.6	7.7
(4) 材料支出	8.6	4.2
(5) 测试化验实验加工支出	0	0
(6) 燃料及动力支出	0	0
(7) 差旅支出	2.5	1.5
(8) 会议支出	2	1
(9) 国际合作与交流支出	0	0
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	2.5	1
(11) 其他支出	0	0
3. 劳务费	4.4	2.2
(12) 劳务性支出	0	0
(13) 咨询专家支出	4.4	2.2
(二) 间接费用	3	1.5
4. 管理费	0	0
5. 绩效支出	3	1.5
合 计	40	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）	1
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	1~2
		3.发表论文（篇）	1
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其他	1
		4.著作（部）	
		5.制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	
	其他成果	1.填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	
		2.获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3.其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	
		（4）新装备（装置）	1
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	

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	
		（2）中试（样品样机）	
		（3）小批量	
		（4）规模化生产	
	人才引育	1. 引进高层次人才	
		（1）博士、博士后	
		（2）硕士	
		2. 培养高层次人才	
		（1）博士、博士后	
		（2）硕士	
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4. 是否设立科研助理岗位	
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2. 科研仪器设备利用率（%）	
		3. 孵化科技型企业（个）	
		4. 转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	
		2. 新增销售（万元）	
		3. 新增出口创汇（万美元）	
		4. 新增利润（万元）	
	社会效益	1. 新增税收（万元）	
		2. 新增就业人数	
		3. 就业培训（人次）	
		4. 带动农民增收（万元）	
		5. 培训和指导科技服务（人次）	
		6. 新增产业带动情况	
		7. 技术集成示范（项）	
		8. 建立示范基地（亩数）	
		9. 节约资源能源	
		10. 环保效益	
其他需要说明的情况			

六、承担单位或研究人员分工

中交第一公路勘察设计研究院有限公司是国家大型工程勘察、设计、咨询、监理骨干企业之一，也是交通系统最早获得“中国勘察设计综合实力百强”的单位。中交一公院长期致力于交通基础设施安全与健康保障工作，积极投身国家重大灾害抢险、交通事故调查整治及提升防灾韧性等关键任务，持续深耕极端复杂环境的工程维保、交通安全、应急保障领域科技创新，依托“极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室”、“交通安全应急保障技术交通运输行业研发中心”、“陕西省公路交通防灾减灾重点实验室”等高端创新平台，取得了一系列具有“一院”特色的核心技术成果，在业内树立了卓越影响力。历年来荣获国家科技进步一等、二等奖 9 项，近五年共牵头相关国家重点研发计划项目 5 项。公司聚焦交通基础设施安全防护技术、装备及数字化领域，累计承担国家重点专项计划、交通部科技项目、陕西省科技项目、中交团科技项目等国家及省部级课题 30 余项。主编参编标准 30 余项，编撰行业技术专著 5 部。累计授权专利 92 项，其中发明专利 16 项。获软件著作权 9 项、注册商标 10 项，发表学术论文 110 余篇。荣获了 30 余项省部级及以上科技奖励。自 2019 年以来，公司高度关注交通基础设施安全信息化技术领域，积极投入资源进行轻量化监测技术的研究。通过引进专业人才，组建了轻量化监测技术研究团队。经过不懈努力，在该领域取得了显著的科研成果。研发了智慧构件电器仓、边缘计算终端设备、结构监测系统平台等可为桥梁智能监测与预警进行技术支撑的行业先进软硬件设备。

潘长平：统筹项目推进与技术把关，主导技术路线制定及关键难题决策。

袁卓亚：负责项目总体研究框架制定，搭建研究体系，明确各阶段任务与衔接关系，提供顶层设计支撑。

康琦：为技术难点提供咨询与解决方案，优化技术方案。

王建强：负责总体方案设计，细化落地方案，衔接顶层设计与研发执行。

徐娜：参与算法开发，侧重算法与设备硬件的适配性研发。

赵彦龙：负责文献调研 研究方案设计

王永祥：聚焦算法开发，支撑风险识别、要素量化的算法实现。

马欢：参与核心传感设备样机研发、结构设计及性能调试。

宋晓波：负责感软件平台开发 示范应用研究。

王猛：支撑各研究模块高效协同与资源整合。

张庭瑞：支撑研究成果在实际桥梁中的应用落地。

王福刚：支撑风险识别、要素量化的算法实现。

张凡：负责感知设备机电系统软件集成开发，模型与算法研究。

韦壹：负责数据基座方案设计。

李蕾：负责示范应用研究。

谢文安：负责示范应用研究。

刘坤：负责软件平台开发 示范应用研究。

周怡敏：负责数据标准编制。

梁安妮：负责平台方案设计。

李光波：负责业务协调。

张超：负责资料整理。

杨若聪：负责资料整理。

黄浩：负责功能设计与材料管理。

石怡萱：负责功能设计与材料管理。

高行之：负责功能设计与材料管理。

七、项目参加人员表

项目承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司							
参与单位（排序）：西安中交土木科技有限公司							
中交二公局东萌工程有限公司							
项目负责人							
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作	签名
1	潘长平	1977.06	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高级	桥梁工程	项目负责人，技术指导	潘长平
主要研究人员							
2	袁卓亚	1971.09	中交第一公路勘察设计研究院	正高级	桥梁工程	项目负责人，技术指导	袁卓亚
3	康琦	1980.10	中交第一公路勘察设计研究院	正高级	桥梁工程	项目总体研究框架制定	康琦
4	王建强	1984.10	西安中交土木科技有限公司	正高级	交通工程（机电工程）	技术负责	王建强
5	徐娜	1984.05	中交第一公路勘察设计研究院	副高级	道路工程	技术负责	徐娜
6	赵彦龙	1987.03	西安中交土木科技有限公司	副高级	机械制造	平台内容技术负责	赵彦龙

7	王永祥	1983.10	西安中交土木科技有限公司	副高级	工程机械	文献调研、研究方案设计	王永祥
8	马欢	1986.08	中交第一公路勘察设计研究院	助理级	其他	项目总体研究框架制定	马欢
9	宋晓波	1991.10	西安中交土木科技有限公司	中级	工程机械	平台架构及应用规划	宋晓波
10	王猛	1988.03	中交第一公路勘察设计研究院	副高级	道路工程	软件平台开发、示范应用研究	王猛
11	张庭瑞	1986.06	中交第一公路勘察设计研究院	副高级	桥梁设计	业务协调	张庭瑞
12	王福刚	1989.05	中交第一公路勘察设计研究院	副高级	工程机械	示范应用研究	王福刚
13	张凡	1991.02	中交第一公路勘察设计研究院	助理级	桥梁工程	模型与算法研究	张凡
14	韦壹	1995.09	中交第一公路勘察设计研究院	中级	工程机械	模型与算法研究	韦壹
15	李蕾	1979.10	中交二公局东萌工程有限公司	副高级	桥梁工程	数据底座方案设计	李蕾
16	谢文安	1981.10	中交二公局东萌工程有限公司	副高级	桥梁工程	示范应用研究	谢文安
17	刘坤	1987.12	西安中交土木科技有限公司	中级	桥梁工程	示范应用研究	刘坤
18	周怡敏	1997.11	中交第一公路勘察设计研究院	助理级	道路运输	软件平台开发 示范应用研究	周怡敏
19	梁安妮	1998.01	中交第一公路勘察设计研究院	中级	工程机械	数据标准编制	梁安妮

20	李光波	1980.05	中交第一公路勘察设计研究院	副高级	机械制造	平台方案设计	李光波
21	张超	1991.07	中交第一公路勘察设计研究院	中级	桥梁工程	业务协调	张超
22	杨若聪	1998.11	西安中交土木科技有限公司	助理级	桥梁工程	资料整理	杨若聪
23	黄浩	1998.12	中交第一公路勘察设计研究院	助理级	机械工程	资料整理	黄浩
24	石怡萱	1999.11	中交第一公路勘察设计研究院	助理级	桥梁工程	功能设计与材料管理	石怡萱
25	高行之	1999.04	西安中交土木科技有限公司	助理级	交通工程（安全设施）	功能设计与材料管理	高行之

八、信息表

项目合同编号		25-48K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部	
项目名称		桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究							
项目实施所在地		陕西省		起止年限		2026.年 3 月至 2028 年 3 月			
总 经 费		40 万元		厅 拨		19.9 万元			
第一承担单位	单位名称	中交第一公路勘察设计研究院有限公司							
	所在地	陕西省西安市						代码	610100
	通讯地址	陕西省西安市高新区科技四路 205 号						邮编	710065
	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	西安中交土木科技有限公司							
	2	中交二公局东萌工程有限公司							
项目负责人		姓 名	潘长平		性别 (男) 1.男 2.女		出生年份		1977.6
		学 历	(研究生) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其他						
		职 称	(高级) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其他						
		联系电话	18509283350/029613 21671		电子邮箱		416746848@qq.com		
项目联系人		姓名	赵彦龙		性别		男		
		联系电话	18591987324/029613 21671		电子邮箱		345782459@qq.com		
项目组人数		25	高级	13	中级	5	初级	7	其他
主要研究内容 (100 字以内)		针对中小跨径桥梁水毁、撞击、地震等突发灾害,传统监测成本高、智能化低,难满足短临预警需求。本课题拟部署轻量化设备与边缘计算终端,构建低功耗、多参量监测预警系统,提升灾害识别与预警能力,降本扩面,杜绝重特大事故。							
成果属性		G	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		BF	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他						

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

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

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

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

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

6.合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：

陕西省交通运输厅

负责人：（签字）

李涛

2020年3月27日

联系人：（签字）

张峰

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）中交第一公路勘察设计研究院有限公司

单位负责人：（签字）

王学军

2020年3月27日

项目负责人：（签字）

张峰

（公章）

电 话：029-88322888

财务负责人：（签字）

袁育辉

账 户 名：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

开户银行：农行西安科技二路支行

账 号：26127101040000725

中交第一公路勘察设计研究院有限公司
26127101040000725
西安市农业银行科技二路支行

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：中交第一公路勘察设计
研究院有限公司



项目负责人：

[Handwritten signature]

2026 年 3 月 27 日

项目编号: 25-48K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 目研究大纲

项目名称 : 桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究

申请单位 : 中交第一公路勘察设计研究院有限公司

联系人 : 赵彦龙

电 话 : 18591987324



陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

目 录

一、项目研究的背景和必要性	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	3
1.3 项目概况	4
1.4 市场推广前景	5
二、前期科研及工作基础	7
2.1 国内外研究现状	7
2.1.1 国外研究概况	7
2.1.2 国内研究现状	9
2.1.3 国内外发展趋势	11
2.2 项目前期科研及现有工作条件	13
2.2.1 项目支撑条件	13
2.2.2 过去相关研究的工作基础	15
2.2.3 获奖情况	16
2.2.4 现有的实验手段	17
2.2.5 协作条件	19
2.3 主要参考文献	19
三、实施方案	22
3.1 拟解决的关键问题	22
3.2 主要研究内容及实施方案	23
3.3 技术路线	25
3.3.1 研究技术方案	26
3.3.2 项目工作流程	27
3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接	28
四、项目承担单位及参加单位概况	30
4.1 单位概况	30
4.2 技术力量及人员构成	31
4.3 各自承担的主要工作	32
4.4 项目主要负责人情况	34
五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	36
5.1 依托工程概况	36
5.2 投资来源	36
5.3 工程进度与项目科研进度的配合	36
5.4 组织管理形式	37
六、项目经费估算及资金筹措情况	39
七、项目绩效指标	42
八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益	44
8.1 项目预期目标（项目的考核目标）	44
8.2 提交的研究成果及其形式	44
8.3 经济、社会、环境效益分析	45
8.3.1 经济效益	45
8.3.2 社会效益	46

8.3.3 环境效益	47
九、 其它需要说明的问题	47
十、 申请单位意见	48

一、项目研究的背景和必要性

1.1 研究背景

随着数字中国、数字经济带领我国经济规模的快速增长，国家有关部门先后出台了《交通强国建设纲要》等重大方针政策，在建设现代化经济体系中明确提出建设交通强国的目标。作为基础性、先行性、战略性、引领性及与其他产业的渗透性、融合性的公路交通基础设施，智慧公路网的建设和发展无疑是建设交通强国和数字中国的重要基础。智慧公路作为新一代信息技术与交通系统深度结合的划时代产物，正在变革着人类的出行方式。广义上，智慧公路是将信息化与智能化发展贯穿于交通规划、建设、运营、服务、监管等全链条各环节的现代化公路；技术层面上，智慧公路是将云计算、大数据、物联网、移动互联网、智能控制等技术与交通运输深度融合，为普通公路赋予“智慧”，从而达到提高公路服务水平、减少环境污染、改进道路建设及运营安全、提升行车舒适性及安全性等目的。

智慧公路已经成为各国必争的战略高地，相比于发达国家，我国智慧交通建设起步时间较晚，但发展势头迅猛。习近平总书记深刻把握新时代我国发展的阶段性特征，对交通事业发展做出一系列重要论述，提出了建设交通强国的时代课题。到 2035 年，我国要基本建成交通强国；到本世纪中叶，全面建成交通强国。智慧公路已经成为国家交通强国战略的先行官，在当下及未来一段时间内将发生翻天覆地的变化，智慧公路这一研究领域必将迎来“百家争鸣，百花齐放”的盛景。



(1) 沥心沙大桥被船舶撞损



(2) 丹宁高速公路桥梁被山洪冲垮

近年来,全国深入实施创新驱动发展战略,加强重大科技研发、创新能力建设和科技管理创新,不断推动行业科技创新迈上新的台阶,公路交通运输在智慧化方向得到了快速发展,但仍存在诸多问题。主要表现为以下几点:

(1) 采集感知方面,传感器选型与布设合理性有待商榷,监测数据的连续性和准确性受环境、网络等影响较大,设备使用寿命难以保证。同时,传统的桥梁监测方法往往在桥梁上布置大量传感器来确定安全状态,其信息采集、系统集成、组网通信等工程量大,安装维护成本高。

(2) 数据分析方面:虽然高精度传感器和智能算法的应用提高了监测数据的准确性和数据分析的效率,但分析人员缺乏足够的桥梁知识,可能造成数据灾难,即数据虽多但难以有效解读和利用。

(3) 实际应用方面:结构状态预警功能的实用性研究不足,可靠性待提升。同时,在极端气候条件、交通负荷以及运营状况出现异常时,系统无法迅速发出预警信号。同时,系统操作复杂,非常依赖数据分析人员的经验,因此目前更多的应用于大型桥梁或者关键桥梁上,对与广泛的中小型桥梁由于其高昂的建设运维成本,没有得到大

量的推广。

综合来看，目前桥梁结构监测的全面应用还需要一个技术的提升和凝练，针对目前存在的上述问题，本项目将聚焦于桥梁轻量化监测及突发灾害感知，以从业者和运维人员的角度出发，针对实际需求和关注场景，构建了桥梁轻量化监测技术，关注重点指标监测，实现场景需求的靶向感知与主动报警。融合多元感知传感器与人工智能算法，依托视觉传感、振动等少量设备感知桥梁状态、实现精准诊断，同时将低功耗监测、无线通信等技术应用在桥梁监测方面，可大幅降低成本，提升部署效率，实现了对桥梁结构和周边环境态势的实时监控和预警，大大提高了桥梁的安全性和运营效率，以科技之力重塑桥梁安全新篇章。

1.2 研究目的

本项目旨在针对当前桥梁结构监测中存在的“高成本、低效率、难推广”等核心问题，立足于实际运维场景与从业者需求，开展桥梁轻量化智能监测关键技术研究，构建一套低成本、高可靠性、易部署、可扩展的智慧桥梁监测体系。具体目标如下：

实现监测系统的轻量化设计：突破传统“多传感器密集布设”的技术路径依赖，通过优化传感器布局、精选关键监测指标（如位移、振动频率、倾角、应变等），采用视觉传感、微振动传感、低功耗无线传感等新型感知手段，大幅降低设备数量与安装复杂度，实现“少而精”的靶向感知。

提升突发灾害的快速感知与预警能力：聚焦极端天气、地质灾害、

车辆撞击、超限超载等典型风险场景，融合多源异构感知数据，研发基于人工智能的异常行为识别与早期预警算法，实现场景驱动的主动报警机制，显著提升系统响应速度与可靠性。

推动“感知—分析—决策”一体化智能升级：结合深度学习、边缘计算与云平台协同架构，开发具备自学习、自诊断能力的数据分析模型，降低对人工经验的依赖，提升非专业人员的操作友好性与系统自主运行水平。

降低全生命周期成本，促进技术普惠化应用：通过低功耗设计、无线通信组网、远程运维管理等技术集成，显著降低系统建设与运维成本，推动智慧监测技术从“重点工程专属”走向“中小桥梁普适”，助力实现全国公路网整体安全水平的跃升。

服务国家重大战略需求：响应“交通强国”“数字中国”“新型基础设施建设”等国家战略，为构建安全、智能、绿色、高效的现代化交通体系提供关键技术支持，助力我国在智慧交通领域实现从“跟跑”到“并跑”乃至“领跑”的转变。

1.3 项目概况

本项目面向国家重大战略需求与公共安全关切，针对桥梁基础设施在极端气象事件频发、服役环境恶化背景下日益突出的灾变风险，聚焦由此引发的垮塌、倾覆、疲劳断裂等突发性结构损坏问题，致力于破解当前桥梁安全监测体系在感知能力、识别精度与应急响应效能等方面的突出瓶颈。

本项目以“风险精准识别—设施智能监测—应急高效决策”为主

线,系统构建面向桥梁结构的安全风险防控技术体系,全面提升桥梁在极端与日常工况下的防灾减灾能力。

第一,研发桥梁灾变机理与多模态风险识别方法。**面向水毁多发区、高烈度地震区及重载交通桥梁等重大灾害与病害场景**,研究基于深度学习与多源数据融合的风险识别算法,融合应变、位移、倾角、振动、图像等多模态监测信息,构建适用于不同结构类型与服役条件的全场景、全天候、动态化风险识别模型,实现对桥梁异常状态与潜在损伤的早期预警。

第二,集成开发轻量化、高性能桥梁安全监测装备。基于低功耗传感技术、微振动感知技术与无线自组织网络,**基于高密度封装技术,将多参量感知能力集成于单一微型单元,替代传统多个传感器组合的多参量传感装置**。通过多种轻量级传感器相互配合、交叉验证的方式,实现对桥梁灾变的低成本、高精度、轻量化监测。

第三,构建智能化的桥梁灾患应急响应与决策平台。建立融合风险预警、损伤评估、养护决策于一体的桥梁灾患安全平台。通过打通监测数据与养护管理的衔接路径,构建应急决策知识库与预案推荐机制,实现多源数据融合分析、多部门信息互联互通与联动处置,为桥梁管理者提供从“感知”到“决策”的全链条技术支撑。

1.4 市场推广前景

随着我国交通基础设施迈入“建养并重”阶段,存量桥梁规模持续扩大。据行业统计,全国公路桥梁总数已逾百万座,其中大量中小型桥梁缺乏有效的安全监测手段,潜在安全隐患日益凸显。与此同时,

《交通强国建设纲要》明确提出“到 2035 年基本建成交通强国”，要求实现“基础设施安全耐久、运行管理智能高效”，为智慧监测技术的深度应用提供了战略机遇。

本项目所研发的桥梁灾患安全平台与轻量化传感系统，具备成本可控、部署便捷、维护简易、智能化程度高等技术优势，精准契合当前桥梁管养的市场需求，具备显著的推广应用前景：

一、政策驱动强劲。国家大力推进“新基建”“数字交通”“智慧公路”等战略实施，各级政府持续加大对交通基础设施安全运行的财政投入。多地已将“桥梁健康监测系统建设”纳入年度重点工程，形成稳定的政策引导与资金保障机制，为本项目成果的规模化应用创造了良好的制度环境。

二、市场需求旺盛。除新建桥梁需配套建设智能监测系统外，大量既有桥梁亟需开展安全评估与智能化改造。尤其在地震活跃带、山区峡谷、洪涝易发区等高灾害风险区域，轻量化监测系统可实现快速部署，成为提升桥梁防灾减灾能力的关键技术手段，市场空间广阔。

三、应用场景多元。本项目核心技术不仅适用于公路桥梁，还可向铁路桥梁、城市立交、隧道、边坡、涵洞等其他交通基础设施领域拓展。系统具有良好的技术迁移性与产业延展性，可支撑构建覆盖多类交通设施的安全监测网络，形成全链条、多场景的推广应用格局。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

2.1.1 国外研究概况

桥梁智能化监测和灾患风险实时感知预警融合了现代传感器技术、无线通信、数据处理、趋势预测等技术,是近些年来国内外学者研究的一个热点问题。以大跨度桥梁为例,最早的风险感知系统出现在 20 世纪 80 年代,主要着力于桥体振动形变及损伤裂纹的整体性能感知。自此之后,国外陆续建立了多种现代化规模的桥梁灾变风险感知系统,相关理论和技术研究也有长足的进步。1982 年,美国 Sunshine Skyway 桥上安装了一套由 500 多个传感器组成的综合设备^[1],能在长时间内实时监测桥梁的应变、位移和温度状况。1987 年,英国在主跨为 233.6m 的 Foyle 桥上安装传感器来监测该桥交通荷载和风力的作用下主梁的各种响应^[2],该系统是最先安装的相对完备的健康监测系统之一。此后,各个国家都开始对大型桥梁安装了桥梁健康监测系统。美国佛罗里达的阳光高架桥 (Sunshine Skyway Bridge) 主跨为 440m,采用了综合监测系统实现了施工过程中和施工后桥梁的状态监测,该程序包括对该桥选定位置的混凝土抗压强度,弹性模量,泊松比,热膨胀系数,收缩率,蠕变,混凝土应变,垂直挠度以及温度分布的物理测量,使用自动数据采集系统 (ADAS),之后对数据进行了评估分析比较。上世纪九十年代,丹麦对 Faroe 跨海斜拉桥进行了施工建设和首年监测^[3],其目的是对主要的设计参数进行测试,获取开发维护系统必需的监测数据。挪威的 Skarnsnde 桥上安装有全自

动数据采集系统^[4],能够对桥梁的加速度、位移、倾斜度、温度等数据进行自动监测。1995年,泰国桥梁风险感知领域应用 OASIS 结构安全和完整在线报警系统^[5],对异常风速及桥梁振动情况进行长时间的监测,及时发现桥梁的疲劳损伤状况。英国对威尔士 Deeside 公路连接线上的 Flintshire 大桥进行了监测^[6]。该桥将加速度计安装在 8 根电缆上用于观察防止减震装置变质并失效;该桥在 14 根电缆上安装了称重传感器来提供桥梁的交通信息和锚具的疲劳载荷。挪威对主跨 530m 的 Skarnsunder 斜拉桥进行了长期监测,总共使用了 37 个传感器和一个可主动采集数据的系统来监视风,加速度,倾斜度,应变,温度和动态位移。其安装的信号采集系统实现了对各种响应信号的在线自动采集。

研究方法方面, Ittipong Khemapech (University of the Thai Chamber of Commerce Bangkok) 提出了一种基于流处理和人工神经网络技术的结构健康监测系统^[7],采用无线传感器网络、实时数据流处理和基于测量的弯曲应变的人工神经网络能够有效、准确地实现能量感知的数据通信和工程结构的损伤检测。Juan C. Avendano (Department of Computer Engineering and Sciences Florida Institute of Technology Melbourne, FL 32901, USA) 提出了一种用于结构健康监测系统的传感器优化布置技术^[8]。在 ANSYS 环境中对一座钢桥进行了建模,并在预先确定的位置施加了四个荷载值来生成数据,得到桥上传感器放置的最佳位置。

此后,随着现代传感技术、信号无线传输技术、信号分析与处理

技术等技术的发展,越来越多国家均建立起了不同规模的现代化桥梁灾变风险感知系统,例如日本的明石海峡大桥(Akashi-Kaikyo)、韩国的 New HaengJu 桥、加拿大的 Portage Creek 桥、泰国的 Rama IX 桥、瑞士的 Siggenthal 桥、挪威的 Sakamsundet 大桥等^[9],这些系统主要对桥梁结构的振动加速度、振动幅度、挠度、应变分布、位移沉降、几何线形、裂纹损伤等结构参量进行监测,以分析桥梁结构的振动特性。

2.1.2 国内研究现状

我国的桥梁监测起步较晚但发展迅速,许多研究院所、高校和企业对结构安全监测技术进行了理论研究,部分成果已应用在大坝、桥梁和隧道等基础设施上,取得了一定的成果。东南大学、哈尔滨工业大学、重庆交通大学等高校成立了专门研究桥梁健康监测的团队。目前,国内的绝大多数大型桥梁均配备了结构安全监测系统,例如著名的杭州湾跨海大桥、港珠澳大桥,九江长江大桥等等,典型案例如下:江阴长江大桥主跨 1385m,对其上部结构的监测内容有:主梁的位移、主缆束股的拉力、吊索中的拉力和振动特性等^[10]。将采集的数据和设定的允许值进行对比,可对大桥的健康状况进行综合分析,确保桥梁的运营安全。苏通大桥的结构健康监测系统在主桥和辅桥上共布置了 566 个传感器^[11],又针对索塔地基基础监测布置了 581 个传感器,总共布置 1147 个测点传感器。监测内容包括风荷载、温度和构件腐蚀等荷载监测以及桥面位移、加速度、应变、拉索索力和桥墩倾斜度等结构响应监测。

目前我国的桥梁防灾抗灾技术正朝着多学科融合、智能化、精细化的方向快速发展^[12]。从监测技术方面来看,积极运用先进的传感器网络技术,如光纤光栅传感器、微机电系统(MEMS)传感器等,实现对桥梁结构状态的高精度、实时监测。同时,基于卫星遥感技术和无人机技术的监测手段也日益成熟,通过高分辨率的影像数据和灵活的飞行巡检,可以对大范围的桥梁进行快速监测,及时发现潜在的灾害隐患^[13]。在风险评估领域,利用大数据分析和机器学习算法,建立了复杂的风险评估模型。这些模型可以综合考虑多种因素,包括自然环境因素、人为因素以及桥梁自身的特性,对桥梁的风险进行定量评估。在灾害预警和应急响应方面,构建完善的预警系统,通过整合监测数据、气象信息、地理信息等多源数据,实现对灾害的提前预警。一旦灾害发生,高效的应急响应机制能够迅速启动,包括交通管制、救援队伍调度、物资分配等,最大限度地减少灾害损失。

近年来,随着我国交通事业的不断发展进步,桥梁结构监测的对象开始由大跨径桥梁向小跨径桥梁过渡,监测目的由全面把握桥梁结构状态向监测轻量化转变。中小跨径桥梁挠度监测对监测设备精度、采样频率等动态指标要求较高^[14],基于此,中交公路规划设计院提出采用微波雷达监测技术进行高速枢纽互通立交桥梁的挠度监测,以及采用实时中值滤波的算法对动挠度数据进行预处理,以实现多因素耦合挠度响应的解耦,提取中长期趋势项、得到汽车荷载挠度响应,并建立相应的数据处理分析算法、数据应用及评估指标体系。徐文城(西南交通大学)在分析了上部结构型式^[15]、活荷载作用下主梁位移占比、

活荷载作用时间等影响中小跨径桥梁安全耐久的因素基础上,确定了以桥梁跨中动挠度作为中小跨径桥梁监测的关键指标,并提出了采样频率和精度等要求以某在役中小跨径桥梁为对象基于毫米波雷达技术开展了动挠度监测试点应用,利用均值滤波算法实现了活载挠度与温度挠度的分离,结合监测统计值确定了分级报警阈值设定方案。伊廷华等人^[16](大连理工大学)提出中小跨径桥梁结构健康监测系统轻量化设计理念,系统构建了由输入、输出和标定三者组成的监测系统轻量化设计方法。

我国《公路桥涵设计通用规范(JTGD60-2015)》规定:单孔跨径在5~40m之间的桥梁属于中小跨径桥梁。根据交通运输行业发展统计公报显示,截至2022年底,我国中小跨径桥梁总计86.47万座,占桥梁总数的83.7%。在长期服役过程中,由于环境侵蚀、材料老化和荷载的长期效应、疲劳效应及突变效应等不利因素的耦合作用,这些中小跨径桥梁将不可避免地产生结构损伤积累和抗力衰减,致使各种灾难事故发生。与大跨径桥梁不同,我国中小跨径桥梁的数量十分庞大,其设计和建造一般采用标准化方案,在桥梁设计建设阶段并未全面考虑日后健康监测及灾害预警等相关事宜,且结构形式较为简单、失效模式相对明确。因此,以全面把握结构状态为目标的传统监测系统设计方法并不适用于我国中小跨径桥梁量大面广的建设情况,亟需建立专门的设计方法。

2.1.3 国内外发展趋势

目前桥梁监测技术和系统主要是针对大型桥梁进行全方位状态

监测,针对大面积常规中小跨径桥梁的普适性监测预警设备和相关技术理论尚未完善,因此需要进行全面技术攻关以规范桥梁结构监测技术,推动桥梁的监测预警系统向轻量化、普适性、低成本、低功耗方向发展。要将轻量化桥梁监测技术广泛应用于实践工程中进行桥梁运行状态监控和灾害预警,主要围绕以下几个方面开展:

(1) 现有桥梁通常针对重点大型桥梁建立综合全面的结构监测系统,而传统桥梁数量庞大,以全面把握结构状态为目标的传统监测系统设计方法并不适用。对于公路桥梁的轻量化监测实际更侧重于面向重大灾患的监测^[17],以期在面临极端天气、突发事件和重大自然灾害发生时能做出及时预警和安全防护措施。因此面对以上需求,亟需建立普适性中小跨径桥梁智能监测与预警轻量化设计方法,规范和推广轻量化结构监测技术。

(2) 现有桥梁监测技术面临成本高、部署复杂及效率低等多重挑战。传感监测装置规模庞大,成本颇高,且对于难以到达的区域,其部署与维护存在显著困难^[18]。此外,桥梁监测可能涉及多个不同的监测系统和设备,各类型的传感设备难以互联互通,难以实现有效的集成和数据共享,这又显著增加了监测系统的复杂程度。针对以上问题,当前研究需要开发一套区域桥梁集群监测系统,通过信息化手段和集群式监测技术的应用,实现集中管理,提供及时、可靠的监测和安全预警服务,保证桥梁长期稳定安全服役。

(3) 桥梁监测数据来源多样,包括传感器数据(如应变、位移、温度、振动传感器等)、视频图像数据、地理信息数据等^[19]。不同类

型数据的采集频率、精度、格式差异较大,将这些多源数据进行有效融合以获取全面、准确的基础设施状态信息存在困难,而对海量数据进行有效的质量筛选和修复更是一项挑战。因此需要将大数据分析、机器学习等前沿技术融入数据采集和处理中^[20],为基础设施的底层数据获取建立可靠的技术支撑。

随着我国经济的快速发展和城市化进程的加速,对桥梁的需求不断增加,同时也对其安全性和可靠性提出了更高的要求。桥梁在灾害中频繁受损,不仅会影响交通的正常运行,还会制约经济的发展和社会的进步。通过技术攻关,提高桥梁的防灾抗灾能力,可以保障交通的畅通和安全,促进经济的发展和社会的稳定,推动交通行业的可持续发展。

2.2 项目前期科研及现有工作条件

2.2.1 项目支撑条件

依托中交中交第一公路勘察设计院(简称一公院)七十余年深耕交通工程领域的深厚积淀,构建了全方位的支撑格局。公司作为我国交通工程行业规划设计咨询的领军企业,已形成覆盖交通、城市、生态三大领域的全产业链服务能力,业务涵盖前期投资、规划咨询、勘察设计、项目管理、养护运维等全环节,能为项目提供丰富的实际工程场景与应用载体。

公司拥有包括极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室、青海花石峡冻土公路工程安全国家野外科学观测研究站在内的 26 个科技创新平台,其中不乏国家级、省部级高端科研载体,为项目提供了

顶尖的科研引领与技术支持。公司属地机构覆盖全国 31 个省（直辖市、自治区），能充分整合国内外跨区域、跨场景的资源优势，为项目研究提供广泛的实践验证基础。



极端环境绿色长寿道路工程
全国重点实验室



青海花石峡冻土公路工程安全
国家野外科学观测研究站

公司负责陕西省交通基础设施防灾减灾共性技术研发平台的研究工作，已系统构建了覆盖“灾前智能感知预警、在役设施韧性提升、灾害主动管控、灾后快速评估”的全链条技术研发体系。该平台在轻量化监测装备、多源数据融合模型、结构增强与快速修复技术等方面积累了扎实的科研基础与装备研制能力，能够为本项目提供从理论方法、关键技术到系统集成的完整科研支撑。



2.2.2 过去相关研究的工作基础

自我公司成立以来，聚焦工程防减灾技术、装备及数字化领域不断开拓创新，公司已积累了扎实的研究工作基础。多年来，公司始终聚焦交通行业核心技术攻关，承担了 60 余项国家级科技计划项目和 200 余项行业及地方科技计划项目，其中“十三五”国家重点研发计划“道路交通安全主动防控技术及系统集成”项目已圆满完成，构建了道路交通安全主动防控系统平台，形成了综合防控干预成套理论与技术体系，相关成果入选国家“十三五”科技创新成就展，为本次研究提供了直接的技术传承与理论支撑。

中交一公院长期致力于交通基础设施安全与健康保障工作，积极投身国家重大灾害抢险、交通事故调查整治及提升防灾韧性等关键任务，持续深耕极端复杂环境的工程维修、交通安全、应急保障领域科技创新，依托“极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室”、“交通安全应急保障技术交通运输行业研发中心”、“陕西省公路交通防灾减灾

灾重点实验室”等高端创新平台，取得了一系列具有“一院”特色的核心技术成果，在业内树立了卓越影响力。历年来荣获国家科技进步一等、二等奖 9 项，近五年共牵头相关国家重点研发计划项目 5 项。

公司聚焦交通基础设施安全防护技术、装备及数字化领域，累计承担国家重点专项计划、交通部科技项目、陕西省科技项目、中交团科技项目等国家及省部级课题 30 余项。主编参编标准 30 余项，撰写行业技术专著 5 部。累计授权专利 92 项，其中发明专利 16 项。获软件著作权 9 项、注册商标 10 项，发表学术论文 110 余篇。荣获了 30 余项省部级及以上科技奖励。自 2019 年以来，公司高度关注交通基础设施安全信息化技术领域，积极投入资源进行轻量化监测技术的研究。通过引进专业人才，组建了轻量化监测技术研究团队。经过不懈努力，在该领域取得了显著的科研成果。研发了智慧构件电器仓、边缘计算终端设备、结构监测系统平台等可为桥梁智能监测与预警进行技术支撑的行业先进软硬件设备。

2.2.3 获奖情况

公司在相关领域的研究成果已获得多项高级别科技奖励，彰显了深厚的技术实力与行业认可度。国家级层面，先后荣获 11 项国家级科学技术奖，其中包括国家科技进步一等奖 3 项、二等奖 7 项及国家技术发明二等奖 1 项，相关获奖成果涵盖青藏公路多年冻土地区公路建设与养护技术、寒区公路与隧道灾害综合防治关键技术、高海拔地区大型公路隧道建设与营运关键技术等，均与交通基础设施风险防控、安全保障密切相关。省部级层面，累计获得 300 余项科学技

术(进步)奖,其中中国公路学会科学技术奖特等奖多项,获奖成果包括多年冻土地区公路修筑技术研究、公路交通安全风险识别与防控技术及装备、复杂条件下公路安全设计与交通关键技术等,充分体现了公司在该领域研究成果的行业领先水平。



2.2.4 现有的实验手段

中交一公院现有 42000 m²的科技产业园和 120000 m²的试验场,建成了道路材料实验厅、道路驾驶模拟仿真分析平台、大型结构实验平台、智慧交通室外测试基地、野外暴露试验平台、大型远程数据监控信息融合平台等独立场所,可完成工程结构韧性、工程状态监测、

交通安全应急保障等研究。

(1) 在室内试验与仿真方面,配备了大型道路驾驶模拟仿真平台,能够开展驾驶模拟、心生理、运行速度、动态视距等人机交互分析;构建了结构健康监测平台,集成机器学习、物联网、数据颗粒度、态势感知等先进技术,实现对交通基础设施的多元化、精细化、智慧化监测与评估。

(2) 在感知与检测设备方面,拥有基于雷达视频融合的高速公路实时交通状态与事件检测系统、全息感知设备(雷达、摄像头)、计算节点、通信单元、多源数据采集设备等,可实现交通路况、通行车辆、流量拥堵、交通事件等全方位感知。

此外,公司下设工程信息感知与病害诊治研发中心、桥梁结构与标准化技术中心、结构智能建造研发中心等六大研发中心及数十个专业研发机构,配备了后台存储、数据处理服务器、智能分析终端等完善的配套设备,形成了覆盖“感知-采集-分析-仿真-预警-决策”全流程的试验研究能力,能够满足桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究的试验验证需求。

(3) 在实验测试方面,公司现有省部级工程技术中心1个、省级工程实验室1个、企业级产品中试基地1个,并通过科研项目及生产项目余国内知名的高校、科研院所、试验及检测机构等建立合作。我公司项目团队针对桥梁构件智慧电器仓、桥梁轻量化监测平台进行了大量的元件试验和平台测试研究,积累了丰富的试验方法和设备开发研究经验。

2.2.5 协作条件

公司具备多元化、高层次的协作条件，为项目研究提供了广泛的资源整合与技术交流支撑。在产学研协作方面，依托极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室，整合了长沙理工大学、深圳大学等高校的优势科研资源，构建了协同创新机制；拥有陕西省“四主体一联合”先进交通基础设施材料校企联合研究中心、公路绿色智能养护技术协同创新平台等多个校企、行业协同创新平台，能够充分汇聚高校、科研院所的学术资源与技术力量。

作为交通行业标准规范的制定者和科技创新的引领者，与交通运输部等行业主管部门、国内各大交通建设与运营单位建立了长期稳定的合作关系，能够及时获取行业需求、技术动态及工程实践数据，确保研究成果贴合行业实际需求。

2.3 主要参考文献

- [1] Huston, D., et al. Smart structures and materials: The Sunshine Skyway Bridge monitoring system[J]. Proceedings of SPIE, Vol. 2446, 1995.
- [2] Maunsell Structural Engineers. Foyle Bridge Instrumentation Scheme. 1987.
- [3] Andersen, E. Y., & Pedersen, L. Structural monitoring of the Faroe Bridges[J]. IABSE Symposium, 1990.
- [4] Høgsberg, J., et al. Monitoring of the Skarnsundet Bridge[J]. IABSE Conference Reports 1994.

- [5] Jeary, A. P., et al. OASIS: An on-line alarm system for structural integrity.[J] Structural Safety , 1995
- [6] Darling, T., et al. Monitoring of the Flintshire Bridge[J].1998.
- [7] KHEMAPECH I, DUNCAN I, MILLER A. Speculative sensor data transmission for energy-aware structural health monitoring[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM 2008). Cap Esterel, France: IEEE, 2008: 266-271.
- [8] AVENDANO J C. Sensor placement optimization for structural health monitoring using ANSYS[C]//Proceedings of the SPIE Smart Structures/NDE Conference. San Diego, CA, USA: SPIE, 2011, Vol. 7984: 79841O
- [9] Li Hui, Ou Jinping. Status and development trends of bridge structural health monitoring systems[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 106-113.
- [10] 张启伟. 江阴长江大桥结构健康监测系统的设计与实现[J]. 公路交通科技, 2001, 18(5): 36-39
- [11] 缪长青, 李爱群, 韩晓林, 等. 苏通大桥结构健康监测系统设计 with 实现[J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2008, 38(5): 869-874.
- [12] 李惠, 鲍跃全, 欧进萍. 我国桥梁结构健康监测系统的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 106-113.
- [13] 储彤, 刘志强, 冯良平, 等. 南京长江第四大桥结构健康监测系

统设计[J]. 中国交通信息化, 2013, 14(S2): 62-65.

[14] 韩飞杨,黄雅茜,王凯,等.中小跨径桥梁挠度监测及应用研究[J].运输经理世界,2024,(09):91-93.

[15] 徐文城,高艳滨,王凯,等.中小跨径桥梁监测预警关键技术研究[J].公路,2024,69(05):177-182.

[16] 伊廷华,郑旭,杨东辉,等.中小跨径桥梁结构健康监测系统轻量化设计方法 [J]. 振动工程学报, 2023, 36(2):458-466.DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.02.017.

[17] 吴智深.公路桥隧结构区域分布传感监测技术及病变和灾变早期识别(上)[J].现代交通技术, 2023, 20(4):1-14.

[18] 韩飞杨,黄雅茜,王凯,等.中小跨径桥梁挠度监测及应用研究[J].运输经理世界,2024,(09):91-93.

[19] 徐文城,高艳滨,王凯,等.中小跨径桥梁监测预警关键技术研究[J].公路,2024,69(05):177-182.

[20] 伊廷华,郑旭,杨东辉,等.中小跨径桥梁结构健康监测系统轻量化设计方法 [J]. 振动工程学报, 2023, 36(2):458-466.DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.02.017.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

开展“桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究”项目，需要系统性地解决从“感知”到“决策”全链条的关键问题，具体如下：

一、 传感层关键问题

(1) 传感器硬件轻型化问题：传统传感器监测项单一，难以满足复杂结构多参数同步采集的需求，且安装过程复杂、供电布线成本高昂，限制了监测系统的高效部署与规模化应用。

(2) 数据传输无线化问题：有线传输方式布线工程量大、长期可靠性差、易损坏且维护困难，是实现监测系统轻量化的主要技术瓶颈。

(3) 传感器优化布设问题：在桥群架构下，如何以最少的传感器数量、最优的空间布局获取最具代表性的结构响应信息，并实现快速、无损安装。

二、 数据层关键问题

(1) 多源异构数据协同问题：应变、位移、倾角、温湿度、图像等多类型传感器存在数据格式不统一、采样频率不一致等问题，亟需解决多源数据的协同采集与融合处理。

(2) 海量数据筛选问题：长期监测产生海量数据，直接上传占用大量带宽与存储，且包含大量无用背景噪声，需研究数据筛选与压缩技术，提取有效特征信息。

(3) 结构状态精准识别问题：如何从复杂的监测数据中准确识

别桥梁异常状态、定位损伤位置并评估剩余寿命，是决定系统核心价值的关键。

(4) 数据融合标准缺失问题：不同来源数据因缺乏统一格式标准，导致融合后数据一致性不足，难以支撑后续的精准分析与诊断。

三、平台层关键问题

(1) 可视化决策支持问题：原始数据与分析结果需以直观、易懂的方式呈现给管理者，并能够直接转化为指导养护决策的有效信息。

(2) 平台架构扩展性问题：现有平台多采用僵化的单体架构，新增功能需整体重构，系统兼容性差，无法接入第三方装备，制约了平台的持续升级。

(3) 预警信息精准推送问题：现有平台预警信息冗余，关键险情被大量无效警报淹没，亟需建立精准推送机制，确保关键信息及时准确传达给决策者。

3.2 主要研究内容及实施方案

本课题旨在克服桥梁突发灾变监测及防控技术的局限，通过部署轻量化监测设备、边缘计算终端、智能预警设备等，形成低功耗、多参量、高集成度的桥梁灾患安全监控平台，有效提高桥梁灾毁轻量化监测系统布设灵活性和灾毁告警及时性，降低建设成本，扩大监测预警覆盖范围，杜绝重特大事故发生。具体研究内容如下：

(1) 桥梁突发灾变识别及轻量化监测技术研究

基于目前桥梁监测方法冗余量大、设备繁杂、成本高等问题，在

桥梁各类风险源（如水毁多发区桥梁、高烈度地震区桥梁、重载交通桥梁结构风险、恶劣气象环境风险、桥面桥侧特殊事件等）的基础上，确定监测的风险源和病害目标，研究桥梁突发灾变的主要诱因、外在表现和演化机理，利用多尺度数据融合技术，建立整体感知与局部感知数据的关联模型，形成多维度监测协同验证方法；对监测目标的特征进行分析，设计形成一套客观、可量化、能准确反映结构灾变的评估体系。根据敏感指标类型、指标精度进行传感器的选型和结构布局设计，建立桥梁轻量化监测方案。通过多种轻量级传感器相互配合、交叉验证的方式，实现对桥梁灾变的低成本、高精度、轻量化监测。

（2）基于多源数据融合的桥梁数据标准设计

以轻量化监测技术为基础，开展基于桥区多源数据集成主题定义、信息项描述、标准代码设计、数据规则定义等工作，建立符合本技术方案数据采集和平台建设的规范化数据标准，为后期建设、复用、优化时在数据层面建立标准化指导。同时在横向业务贯通方面可提升不同部门、不同用户之间的信息共享能力。面向应用分析时，通过构建数据一致性与标准化，能够形成可靠的数据基础，提升本技术方案的延伸应用潜力。

（3）基于长周期海量数据深度挖掘的桥梁安全监控数据基座方案设计

考虑到长周期监控数据除了在桥梁安全方面的应用，还具备丰富的潜在价值，如地质、水文气象研究，交通设计仿真，结构仿真，风险预警模型构建等应用场景，开展数据存储体系建设研究，为后续建

立相应数据服务打基础。建立统一的桥梁长周期海量数据基座，一方面，集成数据采集、存储、处理、分析和 Service 功能的全面平台，为数据分析业务提供统一和高效的数据管理能力；另一方面，通过数据基座建设方案的标准化，为后期项目实践和数据场景的持续挖掘建立良好基础。

针对桥梁长周期海量数据基座在运行过程中面临的数据安全与跨部门协同的核心挑战，研究构建“桥梁数据协同安全治理框架”。从数据收集、治理组织、数据策略、核心技术、基础支撑等维度进行系统化设计，为实现安全可信的跨部门数据共享与协同奠定理论基础。研究面向海量异构监测数据的分类分级方法与标准、轻量级加密算法优化以及基于联邦学习的隐私计算模型；并设计融合属性与角色的混合动态权限管理模型，以支持多维度属性（用户身份、数据敏感度、环境风险等）的实时权限管控。

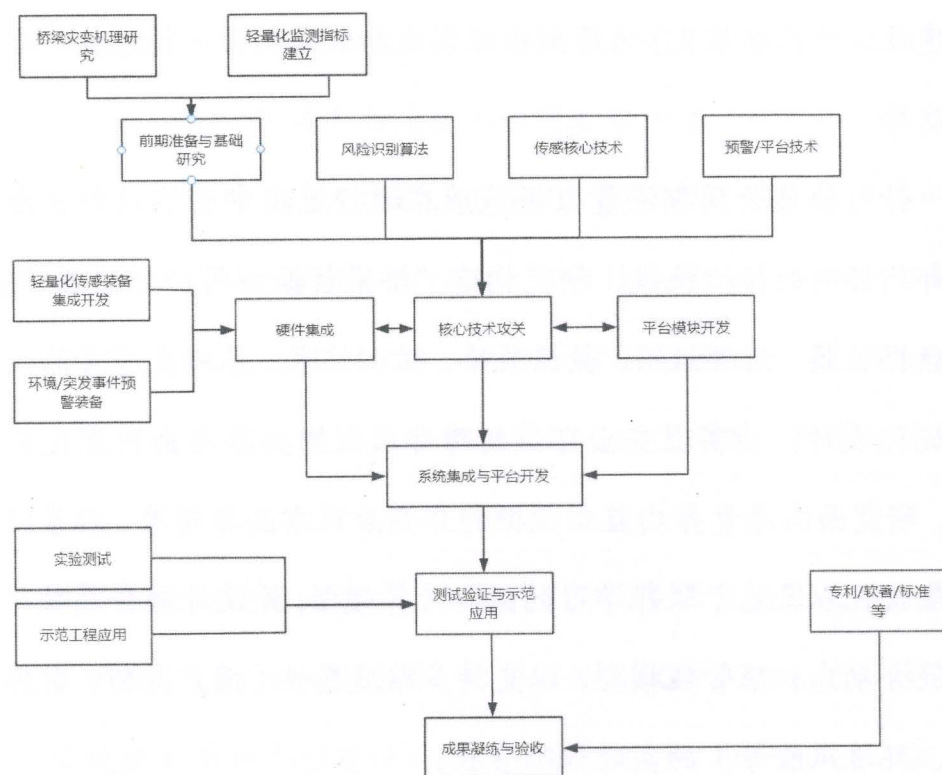
（4）多源低功耗桥梁集成传感装备开发

研究传感器的微型化设计技术，针对轻量化传感器的长期服役需求，重点研究传感器本体在复杂环境下的耐久性与可靠性。采用兼容性设计保障传感器接入通道种类和数量的灵活性等方式实现传感器的低功耗与长续航能力；研究基于无线传感网络的传感器网络拓扑结构，建立传感器自组织网络协议，确保多源设备复杂环境下的数据传输可靠性；设计开发边缘计算装备和多层级的智能计算架构，实现前端采集处理装置集群管理与数据处理功能。

3.3 技术路线

3.3.1 研究技术方案

项目技术研究路线遵循“理论方法—技术攻关—平台研发—应用验证”的闭环逻辑，



具体展开如下：

(1) 理论方法层：构建轻量化监测理论体系，研究桥梁灾变机理，通过模拟、试验和数据挖掘分析灾变规律。使用多尺度模型仿真灾变行为，识别关键指标并建立关联模型；结合模态分析和损伤识别，优化传感器选型与布局，实现传感器数量减少 60% 的轻量化监测。

(2) 技术攻关层：攻关关键指标选取、多源数据融合、低功耗传感和云边协同平台。关键指标通过混合方法选取核心指标，并构建动态阈值；多源数据融合采用全流程算法和隐私保护；传感装备实现微型化、低功耗和自组网；平台开发边缘和云端功能，支持实时处理

和自定义配置。

(3) 平台研发层：研发云边协同平台。边缘端集成传感器接口和通信模块，开发固件实现数据采集和处理；云端构建 Web 服务与界面，提供数据看板、状态评估、预警和养护功能；支持 SaaS 部署和多租户管理。

(4) 应用验证层：通过试点桥梁验证传感装备稳定性、数据融合效率和平台性能，优化传感器布局、阈值和功能，形成可复制解决方案。通过“理论-技术-平台-应用”闭环实现轻量化感知、融合与决策，为桥梁监测提供高效支撑。

3.3.2 项目工作流程

项目工作流程围绕“需求分析—算法集成—硬件开发—成果总结—结题验收”五大阶段推进，周期为 2026 年 3 月-2028 年 2 月，具体工作如下：

阶段	时间	核心目标	主要任务与内容
一阶段： 需求与 预研	2026.03- 2026.07	国内外研究现状调研、搜集文献资料，形成调研报告，并确定研究工作大纲。	1. 需求分析：广泛征集需求，开展需求的进一步解析，明确痛点与指标 2. 架构设计：确定“云-管-边-端”总体架构。 3. 生成调研报告和研究大纲。
二阶段： 算法开 发与集 成	2026.07- 2027.01	桥梁主要风险源识别调研、安全评价方法研究，中小跨径桥梁监测需求及重要节点研究，确定监测指标参数。	1. 技术选型：完成传感器、通信模块、云平台技术栈的评估与选定。 2. 监测指标确定：进一步深入研究桥梁关键节点及监测要求，确定监测内容和数据采集方式。 3. 算法开发：损伤识别与状态评估算法模型开发。

阶段	时间	核心目标	主要任务与内容
三阶段： 硬件开发与实验	2027.01- 2027.07	硬件装备集成、多源桥梁数据的融合设计，系统调试、实验	1. 传感层开发：嵌入式软件开发（采集、通信）。 2. 平台层开发：云平台后端微服务、数据库、前端可视化界面开发。 3. 实验室集成系统，进行全链路功能与性能测试。
四阶段： 成果总结与推广	2027.07- 2027.12	通用图纸及配套的方案设计资料；桥梁灾患安全监控平台桥梁灾患安全监控平台数据基座方案设计，集成及测试验收	1. 配套图纸设； 2. 数据采集：进行为期不少于3个月的连续数据采集。 3. 系统迭代：系统迭代优化，评估系统准确性与有效性。
五阶段： 结题验收	2027.12- 2028.02	总结项目工作，完成相关技术工作的汇报，进行项目评审。	1. 成果固化：整理所有技术文档、源代码、设计图纸。 2. 知识产权：申请软件著作权、专利，撰写研究报告。 3. 完成结题验收。

3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目的研究成果将作为桥梁基础设施智能化升级的核心技术支撑，与后续技术改造及基本建设任务紧密衔接。面向存量桥梁，将推动轻量化监测系统纳入养护改造工程，通过监测数据指导精准养护实践，实现“老桥焕新”的改造目标，达成降本增效的运营效果。面向新建工程，将推行“建养一体化”建设模式，将监测系统设计前置，为新建设施植入全生命周期感知能力，构建数字孪生底座，为实现从建设到养护的全周期管理奠定基础。

在数据协同与管理赋能层面，将打通监测数据与养护管理的衔接

路径，推动数据接入省市两级路网监管平台，赋能行业智慧监管与应急指挥协同。同时，建立持续的技术迭代机制，不断优化核心算法与关键装备，带动传感、通信及数据分析等相关产业链升级，最终形成“科研引领工程、工程反哺科研”的良性发展闭环，为交通强国建设提供坚实的技术支撑与数据基础。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

中交第一公路勘察设计研究院有限公司是国家大型工程勘察、设计、咨询、监理骨干企业之一，也是交通系统最早获得“中国勘察设计综合实力百强”的单位。中交一公院长期致力于交通基础设施安全与健康保障工作，积极投身国家重大灾害抢险、交通事故调查整治及提升防灾韧性等关键任务，持续深耕极端复杂环境的工程维养、交通安全、应急保障领域科技创新，依托“极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室”、“交通安全应急保障技术交通运输行业研发中心”、“陕西省公路交通防灾减灾重点实验室”等高端创新平台，取得了一系列具有“一院”特色的核心技术成果，在业内树立了卓越影响力。历年来荣获国家科技进步一等、二等奖 9 项，近五年共牵头相关国家重点研发计划项目 5 项。公司聚焦交通基础设施安全防护技术、装备及数字化领域，累计承担国家重点专项计划、交通部科技项目、陕西省科技项目、中交团科技项目等国家及省部级课题 30 余项。主编参编标准 30 余项，编撰行业技术专著 5 部。累计授权专利 92 项，其中发明专利 16 项。获软件著作权 9 项、注册商标 10 项，发表学术论文 110 余篇。荣获了 30 余项省部级及以上科技奖励。自 2019 年以来，公司高度关注交通基础设施安全信息化技术领域，积极投入资源进行轻量化监测技术的研究。通过引进专业人才，组建了轻量化监测技术研究团队。经过不懈努力，在该领域取得了显著的科研成果。研发了智慧构件电器仓、边缘计算终端设备、结构监测系统平台等可为桥梁

智能监测与预警进行技术支撑的行业先进软硬件设备。

表 1 强相关的项目

序号	项目名称	项目牵头单位	课题主要承担单位
1	基于光纤传感的智慧桥梁监测系统前置技术研究 2020-4-1	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中交第一公路勘察设计研究院有限公司
2	基于北斗高精度监测的桥梁健康评价预警系统 2022GY-108	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中交第一公路勘察设计研究院有限公司
3	山区拱桥建设与维护新技术研发及应用	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	中交第一公路勘察设计研究院有限公司、重庆交通大学等

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
潘长平	中交第一公路勘察设计研究院	男	1977-06-24	正高级	桥梁工程	项目负责人, 技术总指导
袁卓亚	中交第一公路勘察设计研究院	女	1971-09-01	正高级	桥梁工程	项目总体研究框架制定
康琦	中交第一公路勘察设计研究院	男	1980-10-20	正高级	桥梁工程	技术负责
王建强	西安中交土木科技有限公司	男	1984-10-22	正高级	交通工程(机电工程)	技术负责
徐娜	中交第一公路勘察设计研究院	女	1984-05-04	副高级	道路工程	平台内容技术负责
赵彦龙	西安中交土木科技有限公司	男	1987-03-24	副高级	机械制造	文献调研、研究方案设计
王永祥	西安中交土木科技有限公司	男	1983-10-09	副高级	工程机械	项目总体研究框架制定
马欢	中交第一公路勘察设计研究院	男	1986-08-18	助理级	其他	平台架构及应用规划
宋晓波	西安中交土木科技有限公司	男	1991-10-04	中级	工程机械	软件平台开发、示范应用研究
王猛	中交第一公路勘察设计研究院	男	1988-03-06	副高级	道路工程	业务协调
张庭瑞	中交第一公路勘察设计研究院	男	1986-06-15	副高级	桥梁设计	示范应用研究

	计研究院					
王福刚	中交第一公路勘察设 计研究院	男	1989-05-20	副高级	工程机械	模型与算法研究
张凡	中交第一公路勘察设 计研究院	男	1991-02-09	助理级	桥梁工程	模型与算法研究
韦壹	中交第一公路勘察设 计研究院	男	1995-09-09	中级	工程机械	数据基座方案设计
李蕾	中交二公局东萌工程 有限公司	女	1979-10-01	副高级	桥梁工程	示范应用研究
谢文安	中交二公局东萌工程 有限公司	男	1981-10-01	副高级	桥梁工程	示范应用研究
刘坤	西安中交土木科技有 限公司	男	1987-12-08	中级	桥梁工程	软件平台开发 示范应 研究
周怡敏	中交第一公路勘察设 计研究院	女	1997-11-16	助理级	道路运输	数据标准编制
梁安妮	中交第一公路勘察设 计研究院	女	1998-01-27	中级	工程机械	平台方案设计
李光波	中交第一公路勘察设 计研究院	男	1980-05-21	副高级	机械制造	业务协调
张超	中交第一公路勘察设 计研究院	男	1991-07-28	中级	桥梁工程	资料整理
杨若聪	西安中交土木科技有 限公司	男	1998-11-08	助理级	桥梁工程	资料整理
黄浩	中交第一公路勘察设 计研究院	男	1998-12-28	助理级	机械工程	功能设计与材料管理
石怡萱	中交第一公路勘察设 计研究院	女	1999-11-17	助理级	桥梁工程	功能设计与材料管理
高行之	西安中交土木科技有 限公司	男	1999-04-30	助理级	交通工程(安 全设施)	功能设计与材料管理

4.3 各自承担的主要工作

潘长平：统筹项目推进与技术把关，主导技术路线制定及关键难题决策。

袁卓亚：负责项目总体研究框架制定，搭建研究体系，明确各阶段任务与衔接关系，提供顶层设计支撑。

康琦：为技术难点提供咨询与解决方案，优化技术方案。

王建强：负责总体方案设计，细化落地方案，衔接顶层设计与研发执行。

徐娜：参与算法开发，侧重算法与设备硬件的适配性研发。

赵彦龙：负责文献调研 研究方案设计

王永祥：聚焦算法开发，支撑风险识别、要素量化的算法实现。

马欢：参与核心传感设备样机研发、结构设计及性能调试。

宋晓波：负责感软件平台开发 示范应用研究。

王猛：支撑各研究模块高效协同与资源整合。

张庭瑞：支撑研究成果在实际桥梁中的应用落地。

王福刚：支撑风险识别、要素量化的算法实现。

张凡：负责感知设备机电系统软件集成开发，模型与算法研究。

韦壹：负责数据基座方案设计。

李蕾：负责示范应用研究。

谢文安：负责示范应用研究。

刘坤：负责软件平台开发 示范应用研究。

周怡敏：负责数据标准编制。

梁安妮：负责平台方案设计。

李光波：负责业务协调。

张超：负责资料整理。

杨若聪：负责资料整理。

黄浩：负责功能设计与材料管理。

石怡萱：负责功能设计与材料管理。

高行之：负责功能设计与材料管理。

4.4 项目主要负责人情况

潘长平，男，49岁，中共党员，工学硕士。中交第一公路勘察设计研究院，正高级工程师。

潘长平同志长期致力于道路交通防灾减灾领域的技术研究与科技成果转化工作，在该领域具有深厚的学术积淀与产业实践经验。其核心贡献主要体现在以下方面：

在道路交通结构物安全运营与防灾减灾方向，首次提出了针对桥梁支承结构的减隔震设计理念与设计方法，并主持编制了多部该领域的交通运输行业标准，为提升我国桥梁抗震设计水平奠定了理论基础。在结构物撞击灾害防护领域，针对我国道路桥梁结构特点，创新性地提出了基于刚度设计的撞击安全防护集成解决方案，系统性地提升了我国道路桥梁防减灾技术能力与产业化水平。

在科研攻关与产业实践方面，潘长平同志负责或主持国家及省部级重大科研课题近20项，负责防减灾领域产业项目100余项，累计创造产业收入近10亿元，实现了科研创新与经济效益的良性互动。

其研究成果获得行业高度认可，曾荣获中国公路学会科学技术一等奖3项、陕西省科技进步奖1项、中国交建科技进步特等奖1项及一等奖1项、二等奖4项，以及中国勘察设计协会与陕西省勘察设计协会科技进步奖多项。他还积极投身技术标准化工作，主编、参编交通运输行业标准7部、陕西省地方标准3部、中交集团企业标准1部

及公路学会团体标准 2 部。

个人荣誉方面，先后获得“陕西省职工优秀科技创新创业人物”、“陕西省中青年科技创新领军人才”及公路学会优秀科技工作者等称号。知识产权成果丰硕，共获得专利 45 项，其中发明专利 8 项、实用新型专利 35 项、外观专利 2 项，取得软件著作权 6 项，发表学术论文 14 篇。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程概况

省内公路桥梁结构监测项目 1 项：重点聚焦桥梁结构安全，针对沿线关键桥梁，项目部署了轻量化结构监测系统，通过采用低功耗、高精度的传感设备与自动化数据采集网络，构建起对桥梁结构状态的实时感知能力，从而实现对桥梁位移、应力、振动等关键参数的连续、精准监测，为桥梁运营期的结构性能演变与安全评估提供可靠的数据支撑。

5.2 投资来源

本项目资金来源多元化且保障充分，总投资 40 万元，由省级财政拨款与企业自筹资金共同构成。其中，省级财政拨款 19.9 万元，为项目研发工作提供政策与资金层面的引导支持；企业自筹资金 20.1 万元，由项目承担单位自主筹措，保障项目研究过程中设备研发、试验验证、示范应用等各环节的资金需求，两类资金协同发力，为项目顺利推进奠定坚实的资金基础。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

本项目的研究中始终坚持“科研引领工程，工程反哺科研”的核心原则，将理论创新与工程实践视为相互驱动的“双螺旋”，确保二者深度融合、互为支撑。

（1）以理论突破驱动工程方案的顶层设计：项目组通过构建多尺度数值模型与多源数据融合算法，在项目前期开展传感器极端环境适应性仿真与优化布设分析，为工程端提供了既满足结构安全监测需

求、又最大限度减少环境干扰的精准布设方案与灾变识别逻辑，确保了轻量化监测系统设计源头的科学性与先进性，为后续施工图设计与现场实施提供了扎实的理论依据。

(2) 以实测数据驱动模型的进化与完善：依托现有工程桥梁现场布设的监测网络，开展传感器长期稳定性实测研究，为交通基础设施监测设备在典型灾害多发区的可靠应用与相关标准制定提供扎实的工程实证支撑。

(3) 科研任务与工程节点实现了全过程协同：施工前期完成设备选型与布设方案论证，施工中期开展现场安装与数据采集系统联调，施工后期进入监测数据积累与平台功能验证阶段。建成后的监测数据将为后期养护决策提供数据支撑，同时通过长期运行积累的实测数据进一步反哺算法优化与设备迭代，最终形成“科研支撑工程建设、工程验证科研成果、数据驱动持续迭代”的良性闭环。

5.4 组织管理形式

本项目采用“专项小组统筹 + 分层责任落实 + 平台资源保障”的一体化组织管理形式，构建全流程闭环管理体系以保障研发质量与效率。项目设立质量管理小组，由项目负责人担任组长，统筹推进整体质量管理工作，小组下设技术监督、数据质控、成果验收三个专项工作组，明确各小组职责边界与协同机制——技术监督组聚焦研发全流程技术规范性把控，数据质控组负责感知数据、试验数据的精度校验与质量审核，成果验收组牵头阶段性成果与最终成果的验收评估。

同时，建立定期质量例会制度，常态化梳理研发过程中的质量隐患与技术瓶颈，快速协调解决各类问题，确保研究方向不偏离、质量标准不降低。资源支撑层面，深度依托“极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室”等核心平台，建立优先资源调配机制，高效整合高性能计算集群、极端环境模拟设备等关键资源，为技术攻关、设备研发、试验验证等核心环节提供坚实保障。通过上述组织管理设计，有效凝聚团队力量、优化资源配置，助力实现“设备高精度、算法高可靠、平台高效能”的质量目标，为项目顺利推进及成果落地提供全方位组织支撑。

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	其他
				经费	经费
省交通运输厅补助	19.9	合计	40	19.9	20.1
工程配套研究经费	0	1.设备费	17	8.5	8.5
单位自筹	20.1	（1）购置设备费	17	8.5	8.5
其他经费	0	（2）设备改造与租赁费	0	0	0
		2.业务费	15.6	7.7	7.9
		（1）材料费	8.6	4.2	4.4
		（2）测试化验实验加工费	0	0	0
		（3）燃料动力费	0	0	0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	4.5	2.5	2
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	2.5	1	1.5
		（6）其他费用	0	0	0
		3.劳务费	4.4	2.2	2.2
		（1）专家咨询费	4.4	2.2	2.2
		（2）聘用人员劳务费	0	0	0
		（3）其他劳务费	0	0	0
		（二）间接费用	3	1.5	1.5
		4.管理费	0	0	0
		5.绩效支出	3	1.5	1.5

经费测算详细说明:

本项目经费预算严格按照《国务院办公厅关于改革完善中央财政科研经费管理的若干意见》（国办发〔2021〕32号）、《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发〔2022〕3号）等相关科研经费管理办法编制，分为“直接费用”和“间接费用”两大部分。

（一）直接费用（合计：37万元）：

直接费用是指在项目实施过程中发生的与之直接相关的费用。

（1）**设备费**（17万元）：是指在项目实施过程中购置或试制专用仪器设备，对现有仪器设备进行升级改造，以及租赁外单位仪器设备而发生的费用。

测算依据：为完成项目关键技术研究，需购置/试制专用仪器设备。根据市场询价及供应商报价单测算，此费用为保障实验数据准确性与研究进度的必要支出。

（2）**材料费**（8.6万元）：是指在项目实施过程中消耗的各种原材料、辅助材料等低值易耗品的采购及运输、装卸、整理等费用。根据项目所需材料及数量，结合市场价格测算。

（3）**差旅/会议/国际合作与交流支出**（约4.5万元）：差旅费是指在项目研究过程中开展科学实验(试验)、业务调研、学术交流等所发生的差旅费、市内交通费用等；会议费是指在项目研究过程中为组织开展学术会议、研讨会、评审会以及协调项目等活动而发生的会议费用。参照现行差旅标准及会议市场情况预估。

(4) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/印刷支出(约 2.5 万元):

是指在项目研究过程中,需要支付的出版费、资料费、印刷费、专用软件购买(使用)费、数据购买和调查费、文献检索费、专利申请及其他知识产权事务等费用。根据出版合同、官方收费标准及印刷品询价单等市场公允价格,结合研究计划的实际需求数量进行具体测算。

(5) 专家咨询费(4.4 万元)

测算依据:用于支付给临时聘请的咨询专家的支出等。

(二) 间接费用(合计:3 万元)

间接费用是指项目承担单位在组织实施项目过程中发生的无法在直接费用中列支的相关费用,主要用于补偿单位为项目研究提供的现有仪器设备及房屋、水、电、气、暖消耗等间接成本,以及激励科研人员的绩效支出。测算依据主要根据项目直接费用扣除设备费后的余额,按照国家或项目主管单位明确规定的核定比例进行计提。

(1) 绩效支出(3 万元)

测算依据:根据项目预算绩效目标和预计完成的工作量设定,用于激励项目组科研人员的创新绩效。此部分费用将在项目通过关键节点考核或验收后,由单位根据科研人员的实际贡献进行分配,以充分调动科研人员积极性。

本单位承诺,将严格执行相关财务管理制度,确保经费专款专用,独立核算,并接受上级主管部门和审计部门的监督检查。

七、项目绩效指标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1、专利授权数（项）	1
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	
		2、软件著作权授权数（项）	1~2
		3、发表论文（篇）	1
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其它	1
		4、著作（部）	
		5、制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	
	其他成果	1、填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	
		2、获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3、其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	

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

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

8.1 项目预期目标（项目的考核目标）

（1）开发多参量、高精度、低功耗的智能采集处理装置，实现休眠功耗 $\leq 0.05\text{W}$ 、续航时间 ≥ 1 年的低功耗长续航特性，支持 0.06Hz （可调）采样频率，具备前端采集处理装置集群管理与数据处理功能，提升系统的处理效率和自主决策能力；

（2）提出整套多传感器单元的协同工作机制与数据融合方法，形成多源协同传感器快速自组网技术，有效解决极端环境和无公网覆盖环境中监测系统存在的组网实施难度大、数据传输不稳定、通信设备功耗高等问题；

（3）建立基于数据平台的安全监控与应急响应的实施体系。通过平台的构建，形成面向用户的可用界面，借助信息化、数字化、智能化手段，将基础的数据转化为适合管理方与执行方开展实际工作的分析结论与警示、警报，实现对具体事件的决策支撑。通过平台内的工作流程、提醒机制、数据分发机制、协同处置机制，进一步提升事件发生后的各方协同能力，为敏捷、高效处置事件提供技术载体。

8.2 提交的研究成果及其形式

（1）基于轻量化监测方法的桥梁安全监控数据标准报告 1 份；

（2）长周期海量数据深度挖掘的桥梁安全监控数据基座方案 1 份；

（3）高集成轻量化监测设备 1 套；

（4）软著：1~2 项；

(5) 专利: 1 项;

(6) 论文: 1 项。

8.3 经济、社会、环境效益分析

随着交通强国的建设,我国交通行业进一步发展完善交通大力发展,四通八达的交通运输网成为保障民生工作和经济发展的重要基础。然而交通网络的快速发展也伴随着新的交通安全问题,面对极端恶劣环境和各种突发情况时,传统中小跨径桥梁在服役过程中面临新的交通安全问题和各种灾患风险。随着网络技术、电子技术、人工智能的发展,交通行业信息化、智慧化的发展也得到了进一步的理论和技术支持,针对桥梁结构轻量化智能监测预警技术的研究,为建立安全、高效、便捷的区域及城市交通系统奠定基础。

8.3.1 经济效益

轻量化监测系统采用成本相对较低的传感器和采集设备,可显著降低系统建设和运营成本。该系统借助精准的监测手段和深入的数据分析,能够敏锐且及时地发现交通基础设施可能存在的潜在问题。这不仅有效减少了不必要的养护维修费用,还能显著延长交通基础设施的使用寿命。

桥梁智能监测预警项目的实施需要大量的先进技术和设备,如传感器、监测仪器、通信设备等,这将带动相关产业的发展,创造新的经济增长点。在全方位监测系统实时监控和反馈下,桥梁能够在更长的时间内保持良好的运行状态,从而大幅提高了交通基础设施的经济效益。

有效的桥梁防灾抗灾措施可以保障桥梁的安全稳定运行,减少因灾害导致的交通中断时间,提高交通流量和运输效率。此外,通过提高桥梁的防灾抗灾能力,可以降低灾害发生的概率和损失程度,从而减少保险赔付金额,降低企业的运营成本。

8.3.2 社会效益

保障桥梁的安全运行具有至关重要的意义。在桥梁使用过程中,各种因素可能导致其结构受损或功能退化,如果不能及时发现和处理,一旦发生事故,将造成不可估量的人员伤亡和财产损失。所以保障桥梁的安全运行,是维护社会稳定、保障人民安居乐业的关键所在。

通过引入先进的监测理念和管理养护技术,能够更加及时、有效地发现桥梁存在的问题,并采取针对性的措施进行修复和改进。这不仅可以延长桥梁的使用寿命,还能增强公众对桥梁安全的信心和对交通运输系统的信任度。

桥梁监测预警系统还能够促进交通运输行业的发展。良好的桥梁状况能够保障路网的畅通无阻,减少交通拥堵和延误,提高运输效率,降低物流成本,促进区域间的经济交流与合作,推动产业的优化升级,从而带动整个经济社会的繁荣发展。

构建基于数据与数字化平台的交通基础设施安全监控与应急响应能力,将有效提升突发事件的处置能力与时效性。事件发生后,通过平台预设的处置机制,自动触发相关干系单位、重点干系人的协同处置预案,敏捷处置突发事件,有助于控制事件影响范围、降低人民群众生命财产损失。

基于长周期监控数据，为优化设计能力、防灾减灾、促进科学研究，提供数据资源支撑，不仅直接提升道路交通安全，同时可间接地优化道路运维养护、促进材料科学发展、服务综合生态安全等多方面效益。

8.3.3 环境效益

桥梁轻量化智能监测预警系统的建设与应用，本身就是交通基础设施绿色低碳发展的重要实践。系统采用的低功耗、微型化传感器及无线传输技术，显著降低了对能源的依赖和消耗，减少了传统监测中因布线、设备运行等产生的碳排放，符合国家“双碳”战略目标和绿色交通的发展方向。通过精准的结构健康监测，系统能够科学指导桥梁养护工作，避免了因盲目大修或过早拆除重建而产生的大量建筑垃圾和资源浪费，实现了基础设施运维的精细化与绿色化。

此外，系统对桥梁周边地质、水文及气象环境的同步监测能力，有助于及时发现和预警由环境因素（如滑坡、洪水、泥石流）引发的次生灾害风险，为保护桥梁沿线生态环境安全提供技术支撑。通过延长桥梁使用寿命、减少资源消耗和环境污染，本项目不仅创造了可观的生态价值，也为构建人与自然和谐共生的现代化交通体系奠定了坚实基础。

九、其它需要说明的问题

无。

十、申请单位意见

本单位支持“桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究”项目的立项申报,并将为该项目的实施提供必要的工程实践载体与经费保障。

项目申报预算为人民币 40 万元,所需资金已全部落实: 19.9 万元来源于省级财政科技计划专项拨款,其余 20.1 万元由申报单位自筹资金予以配套,确保项目可按进度顺利执行。

该项目研究目标明确,预期成果对提升我国桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究水平、增强突发灾害感知能力具有重要意义,推荐予以立项支持。



中交第一公路勘察设计研究院有限公司 (公章)

单位负责人:



(签字)

2016 年 3 月 27 日

桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究 大纲评审意见

2026年3月13日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究”（项目编号：25-48K）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，经费预算符合规定，具备开展研究工作的条件。

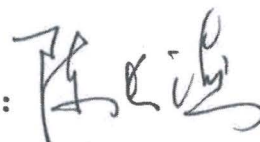
三、预期成果完全覆盖研究目标。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

- 1.尽快落实省内依托工程；
- 2.进一步明确灾患类别。

主任委员：



2026年3月13日

专家审查意见表

项目名称	桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究				
专家姓名	陈长海	职务/职称	正高级工程师	专 业	桥梁工程
专家单位	陕西省交通规划设计研究院有限公司			联系电话	13309281155

评 审 意 见

本项目研究整体方案设计合理、研究思路清晰，技术路线与研究内容贴合桥梁灾患安全监测的行业实际需求，整体具备可行性。结合现阶段行业发展现状与实际应用要求，建议进一步完善。

1、建议在现有研究内容中，补充轻量化传感器自身耐久性和长期可靠性相关的研究。本项目依托工程为高寒、冻土极端环境，传感器容易出现老化、精度下降、防护失效的情况，而且现在也缺少能实时监测传感器自身是否正常工作的手段，容易让监测数据失真。本次研究虽考虑了传感器在极端环境的抗干扰能力，对轻量化传感装置的老化性能研究没有提及，补充这部分研究能让研发的传感设备更适配工程实际的长期使用需求。

2、建议在桥梁长周期海量数据基座的研究内容中，进一步强化数据安全与跨部门权限管理的相关设计。当前各类基础设施数据的保密管理形势较为严峻，监测数据涉及交通运行、地形地势、桥梁结构等关键信息，一旦泄露可能带来安全风险；且后续数据基座需与路政、设计、养护、应急等多部门系统对接，数据共享过程中必然涉及分级权限管控、数据脱敏、安全加密等实际问题。建议补充这部分研究内容，能更好地贴合实际应用场景，切实保障数据安全，确保跨部门数据互通可安全、有序地推进。

评审专家（签字）：

2026年3月13日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	25-48K 桥梁灾害安全平台与轻量化传感关键技术研究				
专家姓名	李立峰	职务/职称	教授	专 业	桥梁
专家单位	湖南大学			联系电话	13607433

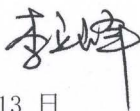
评 审 意 见

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

1 目前而言，桥梁灾害种类很多、风险源也很多，性质也千差万别，如何识别各类风险进行判断，这本身就是一个很复杂的事情。也只能依赖于传感器来分析。这里首先要分类，并针对性研究。

2、传感器轻量化不好理解、其种类和指标是什么，是要开发新传感器还是目前传感器太大、影响测试结果，具体从哪些方面着手研究、针对哪些传感器开展研究，这些都详细说明。

建议删除目前传感器体积大、功率大（哪些种类）等问题，不太符合实际；其实目前技术关键在于传感器的寿命偏短、数据量太大，这是关键问题。传感器开发之类的内容建议删除。

评审专家（签字）： 李立峰 

2026 年 3 月 13 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究（25-48K）				
专家姓名	卓皓	职务/职称	正高	专业	桥梁
专家单位	铁一院			联系电话	1369191693

评审意见

1. 落实省内依托工程。
2. 补充明确的量化技术指标：如续航能力（时间>1年）
3. 明确项目研究的适用范围。

评审专家（签字）：卓皓

2026年3月13日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究（25-48K）				
专家姓名	张东元	职务/职称	正高	专 业	桥梁工程
专家单位	西安建筑科技大学			联系电话	138928

评审意见

项目研究方向明确, 内容详实, 技术路线清晰, 具有一定的研究价值。

1. 因受车内空间限制, 而向高寒、冻土及复杂环境下的桥梁结构, 限制了研究应用范围及宽度把握, 因此造成局限性。
2. 依托项目为青藏公路 G109 线拉改道, 不在陕西境内。
3. 该研究应用范围在西北地区。

评审专家(签字):

张东元

2016 年 3 月 13 日

(本意见入档, 应填写工整, 纸面不敷, 可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	桥梁灾患安全平台与轻量化传感关键技术研究				
专家姓名	杜进生	职务/职称	教授	专 业	桥梁工程
专家单位	北京交通大学			联系电话	13552795846

评 审 意 见

项目旨在克服既有桥梁突发灾变监测及防控技术的局限，通过部署轻量化监测设备、边缘计算终端、智能预警设备等，形成低功耗、多参量、高集成度的桥梁灾患安全监控平台，有效提高桥梁灾毁轻量化监测系统布设灵活性和灾毁告警及时性，降低建设成本，扩大监测预警覆盖范围，杜绝重特大事故发生。项目通过试点桥梁验证传感装备稳定性、数据融合效率和平台性能，优化传感器布局、阈值和功能，形成可复制解决方案。通过“理论-技术-平台-应用”闭环实现轻量化感知、融合与决策，为桥梁监测提供高效支撑。

项目研究内容合理，思路清晰，技术路线可行，能够达到预期研究成果和研究目标！
建议聚焦所依托的桥梁类型，使研究成果在实际工程中得到成功应用。

评审专家（签字）：



2026 年 3 月 13 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

桥梁灾害安全平台与轻量化传感关键技术研究 (项目编号: 25-48K)

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签名
1	主任委员	陈长海	陕西省公路勘察设计院	桥梁工程	桥梁工程	正高工	陈长海
2	委员	张保元	西安市市政建设集团 有限公司	公路工程 与管理	市政工程	正高工	张保元
3	委员	卢皓	中铁第一勘察设计院	桥梁工程	桥梁工程	正高工	卢皓
4	委员	杜进生	北京交通大学	桥梁工程	桥梁工程	教授	网上评审
5	委员	李立峰	湖南大学	土木工程	土木工程	教授	网上评审

专家意见处理表

项目名称：桥梁灾害安全平台与轻量化传感关键技术研究（项目编号：25-48K）

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应，详细说明修改情况)
1	陈长海	1、建议在现有研究内容中，补充轻量化传感器自身耐久性和长期可靠性相关的研究。 2、建议在桥梁长周期海量数据底座的研究内容中，进一步强化数据安全与跨部门权限管理的相关设计。切实保障数据安全，确保跨部门数据互通可安全、有序地推进。	1、修改研究内容，补充轻量化传感器的相关研究。 2、修改研究内容，补充数据安全与跨部门权限的相关研究。
2	李立峰	1 建议优先对桥梁各类风险源进行科学分类，在此基础上开展针对性研究与辨识，为后续风险管控与防治提供可靠依据。 2、轻量化传感器概念表述不够清晰，需进一步系统阐释 3、建议删除目前传感器体积大、功率大（哪些种类）等问题，不太符合实际。传感器开发之类的内容建议删除。	1、修改项目研究内容，在桥梁风险源的基础上进行监测技术研究。 2、在文本研究内容中增加轻量化传感器的表述。 3、已修改文本中提到的用词不当的文本内容。
3	卢皓	1、落实省内依托工程； 2、补充明确的量化技术指标：如续航能力（时间>N年） 3、明确项目研究的适用范围	1、依托工程已经修改为省内桥梁结构监测项目。 2、项目预期目标已增添量化的技术指标。 3、修改项目概况内容，明确项目研究适用范围。

4	张保元	1、文本内容中多处提到面向高寒、冻土等复杂环境下的桥梁结构，限制了研究的适用范围及灾变机理、风险识别的局限性； 2、依托项目为青藏公路 G109 提质改造，不在陕西境内；该研究范围应进一步明确。	1、修改项目概况内容，明确项目研究适用范围。 2、依托工程已经修改为省内桥梁结构监测项目。
5	杜进生	建议聚焦所依托的桥梁类型，使研究成果在实际工程中得到成功应用。	项目概况及主要研究内容，已明确补充水毁多发区、高烈度地震区、重载交通桥梁及恶劣气象环境等典型桥梁风险类型，并聚焦于此开展研究，确保成果在实际工程中得到应用与验证。

陈长进

大纲评审委员会专家（签字）：

陈长进

项目负责人（签字）：