

项目合同编号：25-07K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究

承担单位：西安公路研究院有限公司

项目负责人：石雄伟

通讯邮编、地址：710061、陕西省西安市高新区高新六路 60 号

传真、电话：029-88811608

起止年限：2026 年 3 月至 2028 年 11 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) 基于病害及风险源的桥梁轻量化监测技术方案研究；
- (2) 桥群轻量化监测系统优化研究；
- (3) 基于相关性分析的轻量化监测融合预警技术。

2. 技术关键

- (1) 基于病害及风险源的桥梁轻量化监测技术方案；
- (2) 中小跨径桥群的轻量化监测系统优化研究；
- (3) 基于相关性分析的轻量化监测融合预警技术。

3. 依托工程（依托工作）

本项目依托陕西省公路桥梁群监测系统建设试点项目，选择**榆林市公路局桥梁监测群**：国道 210 头道坡大桥、青云河大桥、刘官寨大桥、刘官寨小桥及榆溪河特大桥；**宁陕路产养护中心 G5 京昆高速公路桥梁监测群**：太白庙汶水河大桥、筒车湾汶水河 1 号大桥、小庙垭汶水河 1 号大桥、白家坝高架特大桥及小麻洋坝高架桥；G244 国道 K1046+073 **潘家河大桥**，开展轻量化监测试点工程。

二、考核指标

1.预期目标

进行中小跨径桥梁轻量化监测技术研究，形成成套桥梁轻量化监测技术，促进我省中小跨径桥梁监测系统的推广应用，提高我省桥梁智能化、数字化水平，对于提高管理单位的运营水平、加强结构安全风险预警、有效保障桥梁的安全运营等方面都具有非常重要的意义。

(1) 梳理桥梁存在的主要病害和风险源，确定梁桥结构关键监测指标，建立标准化的中小跨径桥群轻量化监测指标体系。

(2) 研发基于微波干涉雷达的非接触式桥梁监测设备。

(3) 根据历史监测数据，进行挠度-应变等响应的相关性分析研究，融合多指标数据信息，提出轻量化桥群监测预警方法。

2.主要技术经济指标

项目研究成果能够形成成套轻量化监测技术，有利于中小跨径桥梁监测项目的规范化、标准化，有效提高桥梁监测应用效果，提高桥梁运营的安全性，提高投资效率，推进养护、安全管理的现代化，提高桥梁养护、安全管理水平和效率。

项目研究成果能够有效降低轻量化系统建设成本，减少桥梁检测运营成本，降低运营桥梁安全风险，有力保障人民生命和财产安全。

(1) 形成中小跨径桥群轻量化监测技术方案；

(2) 形成桥群轻量化监测系统优化技术，有效降低建设成本；

(3) 提出桥梁群监测融合预警技术，提高预警精度和准确性。

3.经济和社会效益

1) 经济效益:

(1) 项目结合陕西地域特点，通过基于病害及风险源的桥梁轻量化监测技术方案研究应用，提高我省中小跨径桥群应对自然灾害和突发事件的韧性，提高中小跨径桥群安全管理水平。

(2) 通过桥轻量化监测系统优化技术研究，有助于低功耗、高精度、低成本的桥群轻量化监测系统建设，有效节约投资，提高投资效率。

(3) 进行相关性分析的轻量化监测融合预警技术研究，有效提高我省桥群轻量化监测系统的安全预警能力，解决轻量化监测关键痛点，及时发现安全隐患，减少人民生命和财产损失。

2) 社会、环境效益:

(1) 提升公众安全感：通过本课题研究成果，可打通结构养护从方案设计、数据采集、数据处理、预警的全流程，通过结构监测、检测技术的应用，可以让公众感受到政府对基础设施安全的高度重视，增加公众的安全感。

(2) 促进技术创新：通过本课题的技术研究，将带动相关领域技术的创新，为结构的设计、施工和维护提供数据支持，为我国科技创新贡献力量。

(3) 提高管理水平：对于提高管理单位的运营水平、加强中小跨径桥梁结构安全风险预警、有效保障桥梁的安全运营等方面都具

有非常重要的意义。

(4) 减少资源消耗：通过监测系统及时评估，发现结构存在问题，及时采用合理方式处置，可以降低资源消耗。

4.成果提供形式

本项目的成果主要以技术应用报告等形式表现，具体成果如下：

- (1) 形成中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究报告；
- (2) 编制《陕西省公路中小跨径桥梁轻量化监测技术指南》；
- (3) 申请国家专利 3-5 项；
- (4) 申请软件著作权 2-3 项；
- (5) 在中文核心及以上期刊发表论文 2-3 篇。

4. 其他考核指标

- (1) 应开展的媒体宣传报道 3 次；
- (2) 技术交流 1 次；
- (3) 培养高级工程师 1 名。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2026 年	第 1、2 季度：完成项目前期调研。 第 3、4 季度：根据前期调研结果，开展基于病害及风险源的梁桥轻量化监测技术方案研究。
2027 年	第 1、2 季度：开展桥群轻量化监测系统优化研究。 第 3、4 季度：研究基于微波干涉雷达的非接触式桥梁监测技术，完成专利申请。
2028 年	第 1、2 季度：开展基于相关性分析的轻量化监测融合预警技术研究。 第 3、4 季度：编写研究报告和有关验收技术文件；项目资料整理及归档，完成项目验收。

四、项目经费

项目总经费：129.95 万元

交通运输厅补助：49.95 万元

自筹资金：80 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	104.35	40.45
1. 设备费	19.00	4.90
(1) 购置设备费	3.90	0.60
(2) 试制设备费	0.00	0.00
(3) 设备改造与租赁费	15.10	4.30
2. 业务费	62.05	21.55
(1) 材料支出	16.45	10.15
(2) 测试化验实验加工支出	16.10	3.90
(3) 燃料及动力支出	4.00	0.00
(4) 差旅支出/会议支出/国际合作与交流支出	14.00	4.20
(5) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/印刷支出	10.00	3.30
(6) 其他支出	1.50	0.00
3. 劳务费	23.30	14.00
(1) 咨询专家支出	6.90	6.10
(2) 劳务性支出	16.40	7.90
(二) 间接费用	25.60	9.50
4. 管理费	9.50	0.00
5. 绩效支出	16.10	9.50
合 计	129.95	49.95

注：预算编制按照《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）文件执行。项目验收将组织财务专项验收或审计。

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）	3~5
		（1）授权发明专利	1
		（2）实用新型	2~4
		（3）外观设计	/
		2.软件著作权授权数（项）	2~3
		3.发表论文（篇）	2~3
		（1）其中 SCI 索引收录数	/
		（2）其中 EI 索引收录数	/
		（3）其他	2~3
		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	/		

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)	2
	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

(1) 研发团队中，西安公路研究院有限公司主要负责本项目的组织立项，竞争性磋商活动，主持编制研究工作大纲和实施细则，过程实施管理，按照研究内容分工约定完成相应技术研发及成果报告，成果验证与评价；

(2) 陕西省公路局、陕西西公院工程试验检测有限公司、陕西交控运营管理公司配合西安公路研究院有限公司组建研究团队，共同开展国内外资料调研及工程调查，协助编制研究工作大纲和实施细则，按照研究内容分工约定开展各项研究工作，撰写相应研究报告及其他成果资料，并协助完成研究成果的各阶段验收。

七、项目参加人员表

项目承担单位：西安公路研究院有限公司							
参与单位（排序）：陕西省公路局、陕西交通控股集团有限公司运营管理分公司							
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	石雄伟	1976.09	西安公路研究院有限公司	正高级工程师	桥隧工程	项目负责人	石雄伟
主要研究人员							
2	马毓泉	1968.03	西安公路研究院有限公司	正高级工程师	桥梁工程	技术负责	马毓泉
3	柯亮亮	1983.11	西安公路研究院有限公司	正高级工程师	桥梁与隧道工程	理论分析	柯亮亮
4	马浩轩	1995.08	陕西省公路局	中级工程师	建筑与土木工程	传感器选型	马浩轩
5	苗建宝	1987.10	西安公路研究院有限公司	正高级工程师	桥梁与隧道工程	监测方案研究	苗建宝
6	冯博	1991.04	陕西交通控股集团有限公司运营管理分公司	中级工程师	交通运输工程	负责依托工程	冯博
7	雷浪	1993.02	西安公路研究院有限公司	中级工程师	桥梁与隧道工程	融合预警	雷浪
8	姚蒙阳	1993.10	陕西省公路局	助理工程师	交通运输工程	数据预处理	姚蒙阳

9	张小亮	1987.08	陕西西公院工程试验检测有限公司	高级工程师	桥梁与隧道工程	现场试验	张小亮
10	杜柯	1991.06	陕西交通控股集团有限公司运营管理分公司	中级工程师	公路桥梁工程	结构评估	杜柯
11	赵庭	1989.02	西安公路研究院有限公司	高级工程师	结构工程	传感器优化	赵庭
12	李榕	1993.11	陕西省公路局	中级工程师	交通工程	架构优化	李榕
13	祁瑞	1993.05	陕西交通控股集团有限公司运营管理分公司	中级工程师	公路工程	依托工程	祁瑞
14	刘颜滔	1994.05	西安公路研究院有限公司	中级工程师	土木工程	结构分析	刘颜滔
15	李京	1989.01	西安公路研究院有限公司	高级工程师	桥梁与隧道工程	桥梁群系统优化	李京

八、信息表

项目合同编号	25-07K	密级	/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部				
项目名称	中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究								
项目实施所在地	陕西省	起止年限	年 月至 年 月						
总经费	129.95 万	厅 拨	49.95 万						
第一承担单位	单位名称	西安公路研究院有限公司							
	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高新六路 60 号					邮编	710065	
	单位性质	() 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	2	
参与单位	序号	单 位 名 称							
	1	陕西省公路局							
	2	陕西交通控股集团有限公司运营管理分公司							
	3								
项目负责人	姓名	石雄伟	性别 (1) 1.男 2.女			出生年份	1976		
	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	18509202271		电子邮箱	982199746@qq.com				
项目联系人	姓名	雷浪		性别	男				
	联系电话	18291818310		电子邮箱	llang029@qq.com				
项目组人数	15	高级	7	中级	7	初级	1	其他	
主要研究内容 (100 字以内)	基于病害及风险源的梁桥轻量化监测技术方案; 桥群轻量化监测系统优化研究; 基于相关性分析的轻量化监测融合预警技术。								
成果属性	A	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他							
成果形式	A	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他							

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

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

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

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

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

6.合同正本一式玖份，甲方单位伍份，承担单位肆份。

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：

负责人：（签字）

联系人：（签字）

电 话：029-88869067

李涛

张喆

陕西省交通运输厅

2026年3月16日

科技合同专用章
（公章）

合同乙方：（承担单位）

单位负责人：（签字）

项目负责人：（签字）

电 话：029-88811608

王强

石维清

西安公路研究院有限公司

2026年3月16日

合同专用章
（公章）

财务负责人：（签字）

账 户 名：西安公路研究院有限公司

开户银行：中国工商银行股份有限公司西安南关支行

账 号：3700021509014434288

李翠

西安公路研究院有限公司

工商行南关支行
3700021509014434288

陕西交通科研项目科研诚信 承诺书

项目承担单位及项目负责人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》的规定和科研项目合同约定，保证所提交材料的真实性，确保自筹经费全额到位、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：

项目负责人：



2016年3月16日

项目编号：25-07K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：中小跨径桥群轻量化监测关键技术研究

申请单位：（盖章）西安公路研究院有限公司

联系人：雷浪

电 话：18291818310



陕西省交通运输厅制

2025 年 12 月

填写说明

格式要求：目录页码齐全，双面打印，胶装不另加封皮。

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

目 录

一、项目研究的背景和必要性.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 项目必要性.....	4
二、前期科研及工作基础.....	7
2.1 国内外研究现状.....	7
2.1.1 桥梁群结构轻量化监测研究.....	8
2.1.2 传感器优化布置与发展研究.....	15
2.1.3 监测数据应用与分析研究.....	17
2.2 存在的问题.....	21
2.3 前期成果及现有工作条件.....	25
2.3.1 前期科研成果.....	25
2.3.2 现有工作基础及条件.....	25
2.3.3 研究支撑条件.....	26
2.4 参考文献.....	26
三、实施方案.....	29
3.1 拟解决的关键问题.....	29
3.2 主要研究内容及实施方案.....	30
3.2.1 基于病害及风险源的桥梁轻量化监测技术方案研究.....	30
3.2.2 桥群轻量化监测系统优化研究.....	33
3.2.3 基于相关性分析的轻量化监测融合预警技术.....	35
3.3 技术路线.....	36
3.4 后续技术改造.....	37
3.5 有关技术经济指标.....	37
四、项目承担单位及参加单位概况.....	38
4.1 单位概况.....	38
4.1.1 承担单位.....	38
4.1.2 参与单位.....	39
4.2 技术力量及人员构成.....	39

4.3 各自承担的主要工作.....	41
4.4 项目主要负责人情况.....	42
五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件.....	42
5.1 依托工程情况（突出桥群）.....	42
5.2 投资来源.....	44
5.3 工程进度与项目科研进度的配合.....	44
5.4 组织管理形式.....	45
六、项目经费估算及资金筹措情况.....	48
七、项目绩效指标.....	52
八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益.....	54
8.1 项目预期目标.....	54
8.2 提交的研究成果及其形式.....	54
8.3 经济、社会、环境效益分析.....	54
九、其它需要说明的问题.....	56
十、申请单位意见.....	57

中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究

一、项目研究的背景和必要性

1.1 研究背景

据交通运输部发布的《2024 年交通运输行业发展统计公报》显示，截至 2024 年年末，全国公路桥梁共计 110.81 万座，其中特大桥 11329 座，大桥 19.14 万座，彰显了我国在桥梁建设领域的卓越成就与非凡实力。然而，在我国庞大的公路桥梁体系中，中小跨径桥梁占据了约 82% 的显著比例。中小跨径桥梁作为交通网络中的毛细血管，扮演着不可或缺的重要角色。

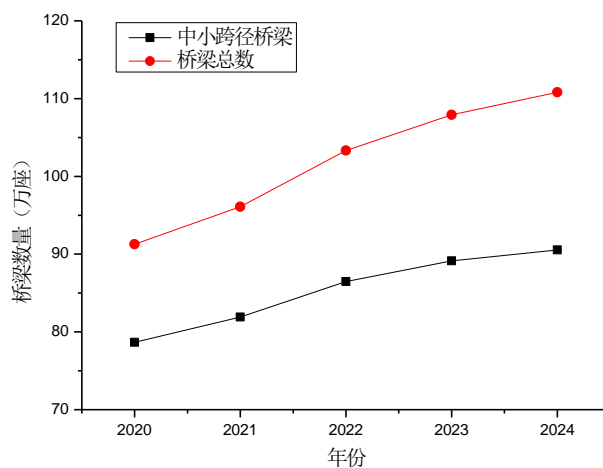


图 1-1 中小跨径桥梁及桥梁总数对比

然而，相较于大型桥梁受到的关注，中小桥梁的营养工作常常会受到忽视，不仅要应对材料老化、地基沉降等慢性侵蚀，还会面临着车船撞击、车辆超载、自然灾害等突发事件的威胁，其安全形势不容乐观。我国经过 30 多年公路大发展，步入维修期的桥梁数量日益增多。据不完全统计，目前我国公路路网中在役桥梁约 30% 服役超过 20 年，技术等级为三、四类的带病桥梁达 10%，超过 3 万座桥梁为

四类、五类危桥，安全隐患不容忽视。

面对数量庞大的公路中小跨径桥梁，如何做到安全隐患早发现、早排除，保障在役桥梁的运营安全、严防重特大交通安全事故发生、防止人民群众的生命财产损失，成为各地交通运输主管部门面临的重要问题。

当前，中小桥梁的结构安全多依赖于传统的人工巡检的方式，这种方法无法实现全天候连续监测，且容易受主观因素影响，检测周期也较长，难以及时发现并消除安全隐患。因此，推动桥梁向数字化方向发展，实现桥梁结构状态的实时感知与科学管养现实作用重大。

桥梁结构监测起步于 20 世纪 80 年代，最初在美国、英国尝试使用，主要用于测量桥梁的应变、位移和温度数据，随后增加风力和结构动力监测内容，能够在强风速或桥梁振动异常时向管理部门进行安全预警。随着网络技术和传感器技术的发展，监测系统逐步实现了实时监测、同步分析和数据网络共享等目标，长大桥结构监测系统建设在过去十年中得到长足发展。

2021 年 3 月 1 日，交通运输部发布《公路长大桥梁结构监测系统建设实施方案》，明确了 401 座特大桥梁安装监测系统的工作任务。2022 年 1 月交通运输部发布了《公路桥梁结构监测技术规范》（JTT 1037-2022），并于 2022 年 4 月实施，对公路桥梁结构监测的系统设计、实施、验收、运营维护、数据管理和监测应用都进行了规范和要求，能够有效的规范桥梁结构健康监测工作。

2023 年 11 月 9 日，交通运输部发布了《关于进一步推动公路桥

梁隧道结构监测系统工作实施方案》，将监测系统的覆盖范围扩大到471座特大桥梁和2200座中小跨径桥梁。2024年4月30日，交通运输部下发《进一步推动公路桥梁隧道结构监测工作实施方案（2024-2030年）》的通知，按照“安全第一、预防为主，统一标准、属地建设，轻量化为主、市场化推进”的原则组织实施。通过统筹协调、系统集成、分阶段分步骤建立全国公路长大桥梁隧道结构实时监测系统，动态掌握桥梁隧道结构运行状况建立健全桥梁隧道结构监测长效运行机制和安全风险防控体系，提升公路桥梁隧道运行安全水平。

经过多年发展，长大桥梁结构监测愈发成熟，完成了大批长大桥梁健康监测系统建设，并接入省级、交通运输部系统平台。但是与长大桥梁不同，中小跨径桥梁的数量十分庞大，对于中小跨径桥群监测尚未形成完善的规范体系，亟待开展相关研究，为顺利推进桥群轻量化监测提供技术支撑。

对于桥梁轻量化监测，2023年发布了《江苏省普通国省道桥梁轻量化监测系统建设指南》。截止2024年年底，江苏已在国省道、农用道路上近700座桥梁安装轻量化监测系统；预计2025年底，安装范围将进一步扩大，覆盖桥梁总数预计达到900座。2025年，江苏省率先发布《桥梁轻量化监测系统建设规范》，以科技创新为驱动，为全省桥梁安全装上“智慧之眼”。

广东省的轻量化监测技术核心在于实用性和高精度，主要依赖于非接触式监测和智能化数据分析。广东在推广过程中，着力破解传统监测系统“部署复杂、成本高昂”的难题，形成了一定的建设经验。

采用高度集成的一体化监测节点，结合太阳能供电和无线通信技术，实现了“即装即用”，大幅降低了现场布线难度和供电依赖。

山东省提出了以较少数量传感器监测高速公路桥梁群承载安全状态的轻量化监测方案。G308 文石线潍坊段桥群轻量化结构监测项目建设过程中，高效整合位移监测、振动感知、水位监测、气象观测、AI 智能识别、智能告警等多元智能设备，可精准捕捉梁体挠度变化、结构倾斜等细微异动，并能实时推送告警信息，一定程度突破传统人工巡检效率低、覆盖窄、响应慢的局限。

中小跨径桥梁是我国高速公路和国省干道路网上的主力桥型。中小跨径桥梁的主力桥型包括：简支梁桥、连续梁桥等，多以混凝土结构为主。其突出表现为梁体不同部位开裂的病害和较弱的抗灾变能力。中小跨径桥梁由于缺乏准确把握全生命周期服役性能的手段，往往贻误最佳维护时机，造成高昂的加固费用。根据调研，我省的桥群轻量化监测研究相对较少，且国省干线存在大量技术状况不佳的三、四类桥梁。因此，开展陕西省中小跨径桥群轻量化监测关键技术研究具有重要意义。该研究通过低成本、高精度、低功耗与高集成度的监测手段，获取海量监测数据，深入分析中小跨径桥梁在服役荷载下的结构响应时变规律与服役性能演变趋势，从而为其病害精准治理与科学养护决策提供可靠依据，兼具突出的学术价值与工程应用价值。

1.2 项目必要性

陕西地域辽阔，陕北、关中、陕南地质地貌、水文特征各不相同，陕北为黄土高原，沟壑纵横，夏季易突发暴雨；关中主要为关中平原，

渭河流淌而过，跨渭河桥位下部结构冲刷严重；陕南多为山岭地形，水系发达，自然灾害易发。在陕西开展中小跨径桥群轻量化监测，存在各种典型应用场景，学术价值显著。

桥群特点：相对集中（在同一条高速上或同一管理片区）、有一定的数量规模（1km 以上），结构型式类似（同为预制箱梁、T 梁、空心板等）、技术标准相同、运营环境相似，具有相似的风险源和典型病害，集成在同一个结构监测形成，进行统一管理，能够有效节约建设成本，在有限投资下最大程度发挥结构监测作用。

传统长大桥梁系统架构复杂，其监测系统是为管理成百上千个传感器高频实时监测设计的，用于只有少量传感器的中小跨径桥梁时，技术架构过于复杂，难以充分发挥设备性能。中小跨径桥梁分布范围广，现场条件复杂，现场供电和有线通讯条件参差不齐，对传感器性能提出更高要求。中小跨径桥梁结构变形等监测指标变化量远小于特大桥，传统方式难以满足要求。现有监测系统以工控机为采集系统核心，其系统庞大复杂，故障率高，高度依赖良好的后期维护。针对以上长大桥监测系统对于中小跨径桥监测适用性差的问题，急需开展中小跨径桥群轻量化研究，为顺利推进桥群轻量化监测提供技术支撑。同时促进中小跨径桥梁监测系统的推广应用，提高桥梁数字化水平，对于提高管理单位的运营水平、加强结构安全风险预警等方面都具有非常重要的意义，研究十分必要。

(1) 与长大桥梁不同，中小跨径桥梁的数量十分庞大，且从危桥占比来看，中小跨径桥梁远高于特大桥梁；从运营期垮塌桥梁来看，

主要集中于中小跨径桥梁。智慧城市、城市生命线工程安全监测提出了大量中小跨径桥梁监测。中小跨径桥梁设计和建造一般采用标准化方案，且结构形式较为简单、失效模式相对明确。中小跨径桥梁结构监测逐渐成为当前亟待研究的问题，同时如何实现高效的桥梁群结构监测平台架构，如何实现桥梁结构的技术状态评估及预测、如何实现桥梁结构实时安全预警及分级响应，这对于保障桥梁的安全运营、推进桥梁预防性养护具有重大意义。

(2) 传感、通讯等技术的发展使桥梁监测系统向轻量化发展成为可能，为低成本、强针对性、短周期建设的结构轻量化监测系统提供可行性。利用非接触式桥梁监测技术、无线传感器、创新型传感器等，通过整合多种新型传感器协同实现实时监测，相比传统技术，无需大规模安装设备，减少检测系统建设成本，减少对现场环境的影响，实现真正意义上的“轻”量监测。

(3) 桥梁轻量化监测技术不同于传统的监测方式，其通过无线通信技术与软硬件技术，实现了数据采集和数据处理的同步实时传输，实现数据实时处理与监测数据可视化，为管理人员提供即时的监测反馈，优化决策和控制策略，是建立高普及性桥梁健康实时监测网络的重要开端，对交通系统全盘性网络监控系统的建设具有重要参考意义。与此同时，轻量化监测技术的成本更低、监测方式更灵活，未来可以更广泛的应用于多种结构物的监测，推广应用价值广。

(4) 轻量化监测技术与大数据相结合，是加快“数字交通”发展，建设“数字中国”的重要引擎。通过大数据与智能化相结合，实现桥梁

结构监测的高效、智能以及长期持续。通过智能化系统，可以实时监测桥梁的结构稳定性及受力情况，及时发现和排除安全隐患，以数据为关键要素，赋能桥梁治理相关产业，是推进桥梁治理产业数字化转型，提高数字化公路服务效能的重要抓手。推广普及公路桥梁数字化管理养护技术，推动桥梁养护决策科学制定，提升桥梁应急处置能力，运用大数据提升公路桥梁养护治理现代化水平，推进行业治理模式创新，实现决策科学化、治理精准化、服务高效化。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

桥梁结构健康监测系统建设起源于 20 世纪 80、90 年代的欧美、日本等国家，桥梁结构健康监测系统是进行长期性能研究的重要应用和数据来源。交通运输部高度重视公路桥梁结构监测系统技术的发展和应用。在政策制定、规范编制方面持续加大指导推动力度，有力促进了桥梁结构健康监测系统技术进步和应用。2021 年 7 月交通运输部公路局组织编写颁布了《公路长大桥梁结构健康监测系统试点建设技术指南》，指导和规范试点桥梁结构健康监测系统的建设、维护和应用。2022 年 1 月交通运输部发布了《公路桥梁结构监测技术规范》（JTT 1037-2022），并于 2022 年 4 月实施，对公路桥梁结构监测的系统设计、实施、验收、运营维护、数据管理和监测应用都进行了规范和要求，能够有效的规范桥梁结构健康监测工作。根据指导意见及规范，我国已经开展了长大桥梁健康监测系统建设，并接入交通运输部系统平台。依托监测系统开展日常管理，健全完善了长期运行机制，

有效提升了公路桥梁运行安全水平和服务品质。

长大桥结构监测系统建设已经形成了相关规范,并且进行了实施总结了经验,监测系统基本能够实现既定的功能,满足桥梁管理和养护的需求,但是长大桥监测主要问题是资金投入待提高,专业人员待充足,标准体系不健全,实施运维较繁杂,数据应用不充分,结构评估工作滞后。

2.1.1 桥梁群结构轻量化监测研究

在20世纪80年代,欧美国家首先提出了结构健康监测的新理念,开始开展在线监测系统研究。随着相关理论发展成熟,欧美国家开始先后在一些重要的结构物上安装了监测系统,例如美国的SunshmeSkyway桥以及FredHartman桥,英国的Foyle桥以及Flintshme桥,丹麦的Great Belt East悬索桥等。这段时期,除了对传统的结构的状态和应力、位移、振动开展监测之外,开始逐渐加强对环境因素例如风、温湿度、地震以及交通荷载的监测与分析处理,许多基于结构可靠度理论和设计规范的结构物评估规范在这个时期产生。

人工神经网络法(ANNs)是20世纪80年代以来人工智能领域兴起的研究热点,是当代最强大的机器学习算法之一,也是目前各种神经网络模型的基础。随着ANNs的快速发展,基于监测数据驱动的损伤识别方法更新迅速,此类方法仅依靠桥梁的力学行为变化分析结构安全状态,而不需要建立复杂的桥梁有限元模型,可结合结构监测系统为桥梁管理人员提供简单、快捷的结构实时状态分析结果。

21 世纪初开始,以物联网、云计算为代表的新兴技术快速发展,无线通讯以及无线网络技术为代表的组网方式大大降低了系统布线的复杂度,云计算服务器成为搭建服务端平台的主要选择,进一步减少了系统硬件维护的工作量。

王腾义^[1]等针对桥梁结构监测系统提出的靶向感知方法,相比于传统的标准化监测,是在监测模式上的创新。在充分了解各监测手段特点的基础上,首先针对不同类型的桥梁进行主要病害和风险源的识别、分析和评估,建立起一系列常规桥梁典型病害与养护需求的轻量化监测场景,包括铰缝易损坏空心板梁桥、易倾覆独柱墩桥梁、重载交通桥梁、船舶撞击高风险桥梁等。其次,根据分析结果,对于长大桥梁遵循“一桥一策”的原则,选择与目标桥梁主要病害及风险源关联最密切的桥梁参数作为监测指标;对于设计与建造采用标准设计的中小跨径桥梁,其结构形式较为简单、失效模式相对明确,应制定专门化的技术标准与监测方式。最后,选择适宜的轻量化技术手段与相应的测点布置,实现针对于各类目标桥梁的精准监测。

伊廷华等^[2]从桥梁监测的工程需求出发,深度剖析了中小跨桥梁与大跨径桥梁监测需求的区别,首次提出了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和流程,详细阐述了支撑该方法实现所需的系统识别理论、结构分析理论和承载能力评估理论,文末对该方法的未来发展进行了初步展望。该方法为规范中小跨径桥梁结构健康监测技术提供了一条切实可行的思路,推进了桥梁智慧管养的工程实用化

进程。

郭梅[3]提出现有的桥梁监测系统多采用 C/S 架构、不仅设备成本相对较高，而且需投入比较庞大的人力和物力，对于中、小跨径桥梁监测管理的适用性不高。针对该问题采用了基于 B/S 架构的监测系统设计方案，系统无需插件，支持多终端同时访问。系统具有适用性强，安全可靠、经济合理、可扩展以及易维护等特点。

徐衍亮^[4]针对既有加固改造后桥梁提出了一种基于轻量化监测的桥梁加固改造后评估方法，根据横向刚度监测、交通流量监测以及挠度应变监测结果来评估加固效果。

马宏伟等^[5]提出基于高分辨率模态局部熵的轻量化损伤识别方法。该方法在利用少量传感器的条件下，通过对移动荷载作用下的位移响应数据进行主成分分析，获得主成分矩阵，通过低通滤波器对主成分矩阵中的高频信息进行滤波，得到高分辨率模态振型，实现结构健康监测系统硬件轻量化。

王琳虹等^[6]以 YOLOv5 算法为基础框架，通过引入 FasterNet 轻量化网络结构优化特征提取过程，降低模型计算复杂度；结合卷积块注意力模块（CBAM）注意力机制，提高模型对缺陷特征的关注度；采用 SIOU 损失函数改进边界回归精度，提升定位准确性。实验结果表明：本文改进模型在自建桥梁缺陷数据集上取得了显著效果，精确度和 mAP 分别达到 81.2%和 71.5%，较基准模型有明显提升。

刘啸宇等^[7]为解决传统深度卷积神经网络的运算效率相对较低、模型参数规模较大的问题，提出轻量化处理的区域推荐型卷积神经网络

络模型。介绍区域推荐网络与其轻量化改进方法的理论基础，分析轻量化模型处理的必要性，其能在保证识别精度的前提下降低模型训练与预测的设备性能需求，达到节约计算资源与时间的目的；通过数据增广等多手段解决损伤样本数据量不足的问题，设置对比试验，统计分析结果，验证了轻量化神经网络模型的优越性。

杨炜等^[8]提出了一种基于改进 YOLOv8 的轻量化算法 YOLOv8-ALTE。以 YOLOv8-N 模型为基础，首先将其 C2f 模块融合一种具备感知多尺度特征信息的轻量化卷积模块 ALConv，以此来丰富所提取特征图中的裂缝信息；其次在网络骨干 Backbone 特征提取模块的浅层网络中加入三元注意力机制，以此来提高模型对桥梁裂缝病害的定位及识别准确度；此外通过参数共享的思想设计出了一轻量化解耦头来代替原模型解耦头模块，从而可有效降低模型的计算复杂度；最后通过引入 MPDIoU 损失函数来代替原回归损失函数，使模型可具备更高的边界框回归效率及精度。与此同时，通过人工标注的方式构建了多种复杂背景条件下的桥梁裂缝图像数据集，并采取多种数据增强方式来对裂缝数据集进行整理及扩充，其后利用精确率 P 及召回率 R、平均精度中的 AP0.5 与 AP0.5-0.95 及计算复杂度 FLOPs 来作为数字化定量评价指标，并依次通过对比、模块融合、注意力结合及消融试验来对模型进行综合评估。

田文迪等^[9]基于新型非接触式微波全场振动测量方法，开展桥梁轻量化监测的应用技术研究。阐述了微波全场测振系统的硬件架构以及全场多目标识别与位移提取的感知原理。发挥微波全场测振的优势，

从设备、感测、数据三个层面建立了桥梁轻量化监测方法，提出了基于微波的桥梁全场域多跨挠度与多索索力测量技术。开展不同工况下滑台模拟振动测量试验，验证微波全场测振相较于传统微波测振技术在抑制耦合干扰上的有效性。

闫畅等^[10]提出了一种基于声纹识别与机器学习技术的轻量化健康监测方法，并通过足尺寸模型试验对该方法的可行性进行了研究。结果表明，该方法能够有效检测出螺栓松动、型钢与支撑横梁完全脱焊，以及下部承压支座脱落等病害。

Kildadshti^[11]等测试了车辆通过桥梁时的动力信号，并采用车桥耦合理论进行分析，证明仅采用车辆动力采集数据可以判断出斜拉索损伤位置及程度。Wu^[12]等采用桥梁端部的旋转角度和桥梁的模态参数进行叠加，对监测数据进行分析，并在一座斜拉桥上进行了算法验证，证明累积滑移可用来预测桥梁滑动支座的损伤及剩余寿命。包龙生^[13]等将简支梁和连续梁损伤前后的模态数据曲率化后，结合桥梁结构的损伤指标，采用BP神经网络识别结构损伤位置。《中国公路学报》2021年研究成果表明，该算法对简支梁和连续梁结构损伤位置识别效果较好，对于结构损伤程度的预测值与真实值拟合程度可达0.97^[14]。项长生^[15]等在广义局部信息熵的基础上引入曲率模态，以广义局部曲率模态信息熵作为BP神经网络的输入参数，对结构损伤进行定位及定量。经与一阶曲率模态对比可知，将广义局部曲率模态信息熵作为输入参数能较好的定位、定量简支梁结构损伤，且在靠近振型节点处指标的识别精度高于曲率模态理论。He^[16]等利用小波包变

换对包含车桥耦合振动的原始结构响应信号进行滤波重构,建立了一种基于卷积神经网络和递归图的损伤识别方法。与传统的统计模式识别方法相比,卷积神经网络通过逐层智能学习可以实现更准确的损伤位置和损伤程度识别。Weinstein^[17]等基于人工神经网络提出了一种通过自动采集交通荷载及结构响应数据以识别结构损伤的方法。测试证明,通过神经网络学习建立的桥梁行为概率模型,对于大多数类型的结构损伤都能有效定位,适用于实时交通荷载下桥梁长期性能的评估。

针对山区高速公路桥梁高墩受地形、气候等因素影响易发生偏位,且传统监测手段成本高、环境适应性差等问题,宋粉丽等^[18]研究开发轻量化监测系统及配套软件平台,以实现桥梁高墩偏位的高效、实时监测。采用小型化低功耗倾角与位移传感器、可靠的无线传输技术及监测预警软件平台,搭建轻量化监测系统,并以贵州省某山区大桥为工程实例,在山区复杂气候与环境下开展长期实地监测。该监测系统在野外环境运营稳定,成功监测到桥梁高墩受温度变化主导的周期性变形规律。经对比分析,监测结果与有限元计算结果较接近。

贺效鹏等^[19]采取“前端优化、后端升级”的模式进行优化研究,轻量化公路桥梁健康监测的系统性应用,体系化解决公路桥梁安全运营难题。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 AIoT 开放平台(PaaS)、公路桥梁健康监测与安全预警系统(SaaS)于一体的新型公路桥梁健康监测与安全预警云平台,以全面保障公路桥梁的安全运行。

吴佩莉^[20]提出了基于轻量化采集的桥梁健康监测系统:设计了一种兼容低频和高频数据无线采集的创新组网方式,使采集端可依据传感器采集的数据类型弹性使用两种工作方式;基于自研的 MPSA 装置,设置电池负载启动时间周期便可实现监测装置定点采样;融合 5W1H 管理学经典理论保证了预警事件处理的闭环及实效性。经试点项目测试表明,所设计系统构建和部署相对灵活,其实施仅为传统项目方案周期的三分之一,且通过这种方式可实现监测装置动态运行而降低设备功耗,动态传输数据而节约流量,轻量化采集有用数据而减轻数据中心 I/O 读写压力。

王威等^[21]提出了图像融合增强算法与深度学习模型相结合的水下桩墩表观病害轮廓提取方法。首先,提出了一种基于点锐度权重的图像像素级融合算法,不仅能够融合 2 种单一增强图像,而且在保证有效色彩校正的同时还能显著提高图像的对比度。其次,对 DeepLabv3+语义分割网络模型进行轻量化改进,使其保证精度的情况下,尽可能降低模型所需的权重参数量;随后采用陆上建筑结构中的表观病害公开数据集训练主干特征提取网络层,并采用迁移学习方法将其运用到目标域的检测任务中。最后,利用水下试验与实际工程采集到的图像数据集对轻量化改进模型进行训练,建立起水下桩墩表观病害轮廓提取模型,然后对其进行验证与测试,并从 3 个方面进行了比较与讨论,即与其他 5 种常用算法的比较、图像融合前后的检测结果以及噪声影响,验证了所提出改进方法的鲁棒性和有效性。

余培东等^[22]针对 YOLOv4 算法在遥感影像桥梁目标检测任务中

的检测效率较低和模型轻量化不足问题，使用轻量化的 MobileNetv3 骨干网络替换原始 CSPDarkNet53 骨干网络，将传统卷积层替换为深度超参数化卷积层(DO_Conv)，提出一种兼具精度和检测效率的轻量化模型。

综上所述，目前关于轻量化监测研究内容较少，主要集中与轻量化智能检测（外观）、轻量化荷载识别、轻量化裂缝病害识别、BIM 轻量化。尚未形成相应的成套技术和规范体系，亟待开展研究指导桥梁群轻量化设计。

2.1.2 传感器优化布置与发展研究

结构监测系统中，传感器的匹配和选择尤为重要。在实际工程应用中，由于结构累计损伤发展缓慢，结构响应信号随之发生微弱变化，桥梁结构监测系统在选择时应综合考虑监测设备的精度和结构损伤引起的静、动力响应量值进行匹配。当损伤引起的结构静、动力响应与环境噪声、设备测量误差水平相当时，桥梁结构监测系统往往难以获得理想的监测结果。

同时，传感器系统的优良程度决定了获取数据的真实性。为全面掌握桥梁的服役环境和安全状态，并考虑传感器布设的高效性和经济性，部分学者依据监测内容进行了传感器布设的优化研究。

高博^[23]等以模态置信准则为基础，构造了满足传感器优化布置的适应度函数，通过对引力常量 G 中衰减因子 α 的自适应调整，增强引力搜索算法的优化能力，进行传感器布设位置优化。经研究可知，传感器数量的选择对目标函数的精度影响较大，采用改进后的自适应引

力算法进行传感器优化布置优于传统遗传算法。刘杰^[24]等应用参数试验法和参数相关性理论,提出并得到一种包含所有单元损伤信息的节点自由度损伤信息指标,针对每个自由度的损伤敏感性排名优化传感器布置方式;并将该方法在满足损伤可识别性的前提下与基于模态可观测性的传感器优化布置方法相结合,可快速得到既满足损伤可识别性又满足模态可观测性的传感器优化布置方案。张笑华等^[25]基于 Pareto 多目标人工鱼群算法,构建与观测模态线性独立性、结构损伤灵敏度和损伤信息冗余性有关的传感器位置多目标优化目标函数,解决结构监测中传感器位置多目标优化的问题。该方法与有效独立法及有效独立-平均加速度幅值法相比,其传感器优化布置方案在损伤识别中具有测点分布均匀、获取结构损伤全面、冗余性低、振型独立性及抗噪性好等优点。杨康等^[26]采用猴群算法,应用 Fisher 信息矩阵变化率筛选计算模态振型,以 MAC 准则为目标函数,对双塔 PC 斜拉桥的主梁传感器测点布置进行优化,解决大跨斜拉桥损伤识别的多传感器位置优化问题。经研究表明,随传感器数量的变化,猴群算法计算所得的 MAC 非对角元最大值均明显小于有效独立算法和遗传算法的计算结果,具有精度更高、收敛速度更快的特点。Lin^[27]等提出了一种面向结构损伤监测的多传感器多目标位置优化方法,引入响应协方差灵敏度和响应独立性 2 个目标函数,采用非支配排序遗传算法进行传感器位置优化。与传统基于 Fisher 信息矩阵的单传感器优化布置方法相比,该方法既能保证对结构损伤的敏感性,又可避免冗余传感器布置,适用于多类型传感器的联合布置优化。张安安^[28]等将三维传

感器 3 个自由度组合成一个独立单元, 构建三维模态置信准则, 将柯西变异因子和混沌搜索、Levy 飞行策略引入量子粒子群算法中形成一种改进的 IQPSO 算法, 解决传感器最优放置的问题。IQPSO 算法与 QPSO 和 PSO 相比可避免传统算法中局部收敛问题, 具有收敛速度快、搜索能力强的特点。

已有研究表明, 除传统优化方法(有效独立法、模态动能法)外, 现代研究已引入部分仿生算法, 如退火算法、遗传算法、猴群算法、狼群算法、粒子群算法等, 将传感器优化布置推向巨型尺度、超大规模、海量自由度等特征的超级工程中。然而现有多目标优化函数仅将各单一优化目标做简单数学处理(如相乘组合、对数组合、幂指数组合等), 而忽略了各单一目标的量级差异, 无法保证传感器位置的优化精度和收敛性。如何从经典传感器优化布置理论中挖掘适合实际问题的优化目标函数, 并采用高效、自适应的现代智能优化技术求解, 用更符合实际问题的传感器优化布置准则评估, 是现代传感器优化布置领域亟待解决的关键瓶颈问题。

2.1.3 监测数据应用与分析研究

监测数据轻量化的关键在于海量数据的优化与高效利用, 为此, 建立了两阶段的监测数据快速处理与分析评估方法: (1) 数据快速处理。对原始监测数据进行异常检测, 剔除异常数据, 提高数据质量, 将筛选出的正常数据, 通过数据压缩与还原网络进行高精度的数据压缩与还原, 从而降低数据传输压力; (2) 结构分析评估。相比于原始数据, 经过优化后的监测数据在数据质量上有了明显的提升。在此

基础上,与桥梁结构性能直接相关的关键参数可通过优化后的监测数据进行快速有效地分析,从而进一步提高了桥梁结构监测的效率。

及时准确的对目标桥梁进行评估是桥梁结构监测的最终目的,桥梁监测系统为此提供了可靠的数据支持。如何充分地利用系统中各类型监测数据,并从中提取出与结构性能直接相关的信息,是实现快速有效结构性能评估的关键。

针对桥梁结构动力测试信号噪声水平高,难以分离结构有效信号的特点,学者们提出了很多解决方案。Zhou^[29]等提出在进行数据处理前,应对采集的数据进行有效性评价。Wang^[30]等将小波变换应用于桥梁结构监测的数据降噪处理中,并采用希尔伯特-黄变换进行了结构一阶基频的识别,并在苏通大桥上得到验证。为解决桥梁结构监测中的数据丢失问题,Tang^[31]等采用稀疏卷积神经网络进行了丢失数据恢复,并采用现场试验进行了丢失数据验证。为解决结构监测海量数据处理问题,Daneshvar^[32]等提出了采用三阶段数据处理、模型时间序列整理、高斯过程降维及异常值检测等方法进行数据处理。Zhao^[33]等针对结构监测中多源数据采集问题,采用深度学习回归网络,进行了多源数据的回归分析。Teng^[34]等针对采用振动信号进行桥梁损伤识别时,由于振动信号采集有限性带来的损伤评价不准确问题,建立了一种基于卷积神经网络的桥梁损伤评估融合决策方法,并采用试验测试结果,验证了该方法的有效性。

已有研究表明,在不受外界环境因素干扰的情况下,经过训练的神经网络理论上能够以较高的准确率识别结构损伤的发生、位置及失

效程度；但在实际工程中，不断变化的环境条件（如空气温度、风和交通）会强烈影响桥梁的力学响应，使得神经网络的性能随着采集信号中噪声的增加和桥梁的车辆负载而下降；神经网络的准确性取决于训练时采用的数据，应变、频率、振型比加速度数据更适宜作为神经网络的训练数据，且随着训练数据样本的减少，人工神经网络损伤监测精度下降，虚假预警比例上升；对特定工程需要选择最合适的神经网络进行数据训练，神经网络的选择需要根据待测系统人工进行调整，且神经网络的准确性受损伤发生位置的影响比较显著，在桥梁关键截面监测结果较准确，反之则适用度不高。

Kalooop^[35]等采用应变测量方法研究了公路钢板梁桥的动力特性（动力加速度、动挠度、频率和阻尼比），设计了基于多项式预测模型和双重滤波方法的变换函数，采用循环过滤方式在时域内消除实时应变测量噪声以预测桥梁的动态行为。Han^[36]等综述了温度效应的分析方法及结构监测中温度数据处理方法，建立了考虑温度影响的结构损伤评估模型，并指出：当前关于温度与结构动力响应相关性的研究大多集中在桥梁的自振频率上，振型、阻尼等其他模态参数由于受试验精度的影响较少采用；温度与静力响应相关性的研究主要集中在桥梁的应变上，对挠度及倾角变化等其他静态参数研究较少。动力参数比静力参数对环境激励的响应更为敏感，随着传感器布局优化和模态分析方法的不断发展，基于动力响应的研究工作可以继续深化。刘扬等^[39]提出基于多层前馈—长短期记忆混合模型的实时评估及预测方法；并利用结构监测系统及有限元法热力耦合构建包含“结构特征、

时间特征、环境特征—温度、温度效应”映射的样本库，通过考虑时间权重的均方误差损失函数对样本库数据进行训练、验证、测试，从而给出温度效应实时评估与预测的方法。结果表明，采用 BP—LSTM 混合模型精度高于单独采用 BP 网络或 LSTM 网络，可用于钢—混组合桥面系空间温度场及温度效应实时评估及预测。祝青鑫^[40]等基于主成分分析及自适应神经网络模糊推理系统，以结构监测系统长期实测数据为基础，建立桥梁结构温度场与桥梁结构应变响应的复杂非线性关系。结果表明，桥梁结构上、下表面测点温度变化存在明显差异，应考虑桥梁结构温度场变化以精确建立温度与应变响应间的关系模型，准确预测桥梁结构应变响应。

为了改善桥梁结构健康监测数据多模式异常检测难以全覆盖的问题，殷鹏程等^[42]提出了基于迁移学习图像识别技术的数据异常检测方法。首先，绘制结构应变和温度数据时程图，统计分析数据日周期变化规律，并标记异常类型作为训练集；通过图像仿射变换实现数据增强，减少网络对不平衡数据集的过拟合。其次，以 AlexNet 预训练网络为基础，选择迁移学习策略，建立多个对比模型用于分析不同优化算法、初始学习率、Drop out 取值和结构轻量化对网络识别结果的影响；以模型分类准确率、训练速率和内存需求作为评价指标，获得性能优越的监测数据异常检测深度网络模型，模型对试验数据的异常分类准确率可达 95.5%，体量可缩减 94.7%。最后，基于优化模型编译数据异常检测模块，并以某斜拉桥一个月的监测数据为例进行验证，验证集准确率为 98.0%。

为实现未知运营荷载下桥梁下部结构服役状态实时在线监测,王闯等^[41]提出了基于荷载-参数-响应联合估计和稀疏观测响应的下部结构轻量化监测方法。首先,开发了一种未知激励下改进自适应无迹卡尔曼滤波算法,通过融合桥梁下部结构动力学分析模型,构建了适用于下部结构实时在线评估的荷载-参数-响应联合估计框架。其次,通过数值模拟验证了噪声干扰和随机荷载作用下算法识别的有效性,并分析了结构参数初始误差对算法鲁棒性的影响。最后,基于某真实桥梁下部结构的现场监测数据,对所提方法在复杂运营环境下的可行性和有效性进行了验证。

虽然当前各国在桥梁上建立的结构监测系统,可以实现通过传感器采集到各种环境条件下反映结构状态的监测数据,但无法真正从这些数据中得到对桥梁实际性状的评估,从而不能及时有效地发出预警信号,即“只监测,不报警”的状态。实用的桥梁结构监测系统应在监测的同时作出恰当准确的评定,并将评定结果及时传输到预警模块。因此,如何利用已有的监测数据对桥梁健康状态进行实施评估是关键,这对运营中的桥梁监测与养护管理具有重要的指导作用和实用价值。同时也有利于桥梁性能状态的评价及结构健康度的评价。

2.2 存在的问题

近几年来,长大桥梁结构健康监测技术逐渐向统一、规范化发展,监测设备的选取、监测指标的选取、采样频率、报警阈值等都有相对明确的规定。从实施角度来看,存在监测指标多、测点数量多、实施费用高、运维成本高等问题,给管养单位的实施与运维带来较大的压

力；从实施效果来看，结构监测系统带来的海量监测数据，如西堠门大桥日新增数据为 4GB，苏通大桥日新增数据为 10GB，在结构监测系统快速发展的背景下，大量存储数据未被有效利用。长大桥梁结构监测技术应用于中小跨径桥群轻量化监测存在以下问题：

（1）系统架构复杂

传统的结构监测系统前端设备组网复杂，链路长，设备多；软件系统结构复杂，资源消耗大，性能低，缺少标准化的架构设计，系统功能扩展和升级改造困难；算法与软件系统高度耦合，算法工程应用落地难。

（2）安装条件复杂

桥梁安装条件较复杂，一部分结构现场不存在供电环境，对于监测设备自供电要求较高。无线传感器技术作为解决基础设施安全监测问题的主要技术之一，技术更为先进。基于无线传感网的监测网络通常由大量传感器节点通过自组织方式构成，其监测点的布置灵活简便、施工时间短、维护方便、成本低、性价比高，解决了传统检测手段和有线监测系统存在的各种问题，是结构轻量化监测的重要研究方向之一，但是现有的无线传感网技术在面对高频采样时，传感器寿命相对基础设施寿命而言仍然较短，现有结构在数据采集过程中，市电接入经常会存在困难，通常在方案设计上选取监测设备自供电或太阳能设备进行供电。

（3）设备精度要求高

对于刚度较大的结构，对监测设备的参数精度与稳定性要求更高。

典型动态监测指标为动应变和动挠度。

挠度作为反映结构整体性能最直观有效的结构响应指标，目前市面上常见的测动挠度设备具有诸多不足，如：全球卫星定位系统GNSS可以输出三向位移变化，但竖向精度低，动态精度最高毫米级，无法满足结构挠度监测精度需求；LVDT位移传感器基于电磁感应原理，具备响应快，精度高等优势，但其需要配合一根张紧的钢弦作为基准值，钢弦一端配置坠砣拉紧钢弦，坠砣受恶劣大风环境影响大，且钢弦随时间会变得松弛影响数据准确性，不适用于长期监测结构动挠度应用场景；光电挠度仪通过光学成像法测结构动挠度变化，具有测量范围大、集成度高优势，但其精度随距离大幅降低，且受雨雾、灰尘环境影响严重，穿透能力弱。

动应变是结构响应的重要指标之一，目前市面上动应变常采用光纤光栅类传感器进行监测，具有测点多、实施难度大、设备类型多、造价高等特点，不适用于中小跨径桥梁的轻量化监测。

（4）测点规模大而全

除此之外，结构监测中的传感器主要用来获取结构的动力响应等信息，从而确定结构的健康状态。因此传感器布置的合理与否决定了结构健康监测的准确性、有效性。由于结构的复杂性，依靠穷举法来计算最优布设位置既不经济，也不符合现实，所以采用一种高效、准确的结构测点布设算法就显得尤为重要。

传感器测点布设的优化方法可分为传统优化算法和智能优化算法。传统优化算法，如有效独立法、模态动能法、Guyan模型缩减法

等。智能算法大多根据自然现象来仿真模拟，主要有遗传算法、猴群算法等。彭珍瑞提出了遗传算法和模拟退火算法相结合的 Memetic 算法并在一座悬索桥模型上进行测点布设并与遗传算法运行结果进行对比，结果表明了 Memetic 算法的优越性。李晓等人基于猴群算法进行了连续刚构桥传感器优化布置的研究，并与一些方法进行比较验证了其优越性和可靠性。李俊等人提出了多种群粒子群算法和混合蛙跳算法结合的一种新算法，其研究结果表明融合算法优于改进粒子群算法。粒子群算法较常见于结构的传感器布置中，但由于粒子群算法在寻优上易于陷入局部最优值的缺点，得到的结果往往不甚理想。

因此，根据不同的评判标准对各算法的测点布设结果进行对比分析，从而得到适应性好的优化算法，也是本项目需要解决的问题之一。

(5) 后期维护难、成本高

现有监测系统组网链路复杂，故障率高，智能化程度低，缺少远程在线维护机制，高度依赖良好的后期维护。

如何通过轻量化的监测系统设计方案，达到造价低、测点精、部署快、维护方便、精准预警评估，是本课题需要解决的重要问题之一。

(6) 桥群轻量化监测研究较少

目前，针对长大桥结构监测的内容相对较多，从监测技术、传感器选型、监测系统建设、结构安全预警到数据处理、损伤识别、结构评估均有一定研究积累，而针对中小跨径桥群轻量化监测的研究相对较少，不论是轻量化监测方案、传感器选型，还是开发针对性的监测手段、系统架构优化、结构安全预警，均缺乏一定理论支撑和标准规

范的约束，难以满足多样桥群轻量化建设的需求。

2.3 前期成果及现有工作条件

2.3.1 前期科研成果

项目承担单位同参与单位联合组建了专业联合研发团队，围绕着连续刚构桥监测平台、监测数据处理、风险评估、监测预警等，进行了相关研究，取得了一定的成果，为本课题的进一步研究打下了坚实的基础，主要包含：

表 2-1 已取得的重大成果

成果	阶段	备注
1.1 薄壁空心高墩大跨径预应力连续刚构桥的研究	完善推广	陕西省 2000 年科技进步二等奖
1.2 高墩大跨径连续刚构桥结构监测应用技术研究	完善推广	陕西省交通建设科技项目
1.3 《连续刚构（梁）桥结构监测技术规程》	颁布实施	陕西省地方标准
1.4 基于大数据分析的大跨梁式桥监控监测成套技术及全寿命期挠度控制	完善推广	公路学会科学技术一等奖

2.3.2 现有工作基础及条件

项目由西安公路研究院有限公司承担，陕西省公路局、陕西交控运营管理公司、陕西西公院工程试验检测有限公司参与。

西安公路研究院有限公司作为该项目承担单位，西安公路研究院有限公司目前是国内交通行业规模较大，集科研、勘察设计、试验检测、软件开发、监理、机电设计施工、仪器研发生产、路用材料开发销售、技术咨询为一体的科研机构。公司长期开展桥梁结构安全监测业务，有着深厚的技术积累，并有一定的前置性研究。

陕西省公路局作为陕西省地方道路的主管单位，管理了省级长大

桥梁健康检测系统平台的建设和运维工作及省级地方道路桥梁的结构监测管理工作，长期从事公路和桥梁监测平台的管理，对公路桥梁数字化监测平台管理制度有一定的研究基础。

项目承担单位同参与单位联合组建了专业联合研发团队，多年的相关研究及工作实践为拟开展的课题开展积累了研究经验，并能够提供有力的技术支持。

2.3.3 研究支撑条件

(1) 本项目由西安公路研究院有限公司主持承担，课题研究组长期开展桥梁监测、评估及监测平台研建等工作，具有丰富的实践经验，且均有系统的研究。

(2) 陕西省公路局是我省地方道路的主管单位，可为依托工程提供充分的人力和物力支持，为项目的顺利进行以及与科研进度的配合奠定了前提条件。

(3) 项目参与单位在相关领域为国内领先团队，并取得了显著成果，保障相关研究的创新性和领先性。

2.4 参考文献

- [1]. 王腾义,李丹,张建. 桥梁结构轻量化健康监测思路与技术研发 [J]. 土木工程学报, 2025, 58 (06): 51-68.
- [2]. 伊廷华, 郑旭, 杨东辉, 李宏男. 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 (02): 458-466.
- [3]. 郭梅. 基于 BIM 技术的桥梁健康监测信息可视化管理及监测预警研究[D]. 西南交通大学, 2020.
- [4]. 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.

- [5]. 马宏伟, 黄宇, 高应松, 等. 中小跨径桥梁轻量化损伤识别的高分辨率模态局部熵方法[J/OL]. 振动工程学报: 1-13[2025-5-26].
- [6]. 王琳虹, 刘宇阳, 刘子昱, 等. 基于 YOLOv5 的轻量化桥梁缺陷识别[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), 2025, 55(09): 2958-2968.
- [7]. 刘啸宇, 黄永, 徐峰, 等. 基于轻量化卷积神经网络的桥梁斜拉索 PE 护套损伤识别方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(01): 167-178.
- [8]. 杨炜, 方虹苏, 唐湘松, 等. 桥梁裂缝病害检测的轻量化 YOLOv8-ALTE 算法[J]. 交通运输工程学报: 1-17[2024-11-25].
- [9]. 田文迪, 熊玉勇, 吴朔阳, 等. 基于微波全场测振的桥梁轻量化监测技术[J/OL]. 振动与冲击, 2025, 44(10): 106-115.
- [10]. 闫畅, 周自凡, 刘朵, 等. 新型轻量化装配式桥梁伸缩缝健康监测方法研究[J]. 公路, 2025, 70(08): 130-137.
- [11]. Kildashti K, Alamdari M M, Kim C W, et al. Drive-by-bridge inspection for damage identification in a cable-stayed bridge: Numerical investigations[J]. Engineering structures, 2020, 223: 110891.
- [12]. Wu G M, Yang D H, Yi T H, et al. Sliding life prediction of sliding bearings using dynamic monitoring data of bridges[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(5): e2515.
- [13]. 包龙生, 曹悦, 赵宁, 等. BP 神经网络和曲率模态理论在桥梁损伤识别中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(02): 296-302.
- [14]. 王凌波, 王秋玲, 朱钊, 等. 桥梁结构监测技术研究现状及展望[J]. 中国公路学报, 2021, 34(12): 25-45.
- [15]. 项长生, 原子, 周宇. 基于广义局部曲率模态信息熵和 BP 神经网络的结构损伤识别方法[J]. 兰州理工大学学报, 2021, 47(01): 129-135.
- [16]. He H, Zheng J, Liao L, et al. Damage identification based on convolutional neural network and recurrence graph for beam bridge[J]. Structural Health Monitoring, 2021, 20(4): 1392-1408.
- [17]. Weinstein J C, Sanayei M, Brenner B R. Bridge damage identification using artificial neural networks[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(11): 04018084.
- [18]. 宋粉丽, 刘海宽, 于品德, 等. 桥梁高墩偏位轻量化监测系统开发与应用研究[J/OL]. 河南科技, 2025, 52(20): 52-57.
- [19]. 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.
- [20]. 吴佩莉. 基于轻量化采集的桥梁健康监测系统设计[J/OL]. 河西学院学报, 2025, 41(02): 97-105.
- [21]. 王威, 姜绍飞, 宋华霖, 等. 基于轻量化网络与迁移学习的桥梁水下桩墩结构表观病害轮廓提取[J/OL]. 中国公路学报, 2024, 37(02): 88-99.
- [22]. 余培东, 王鑫, 江刚武, 等. 一种轻量化 YOLOv4 的遥感影像桥梁目标检测算法[J]. 海洋测绘, 2022, 42(02): 59-64.
- [23]. 高博, 柏智会, 宋宇博. 基于自适应引力算法的桥梁监测传感器优化布置[J]. 振动与冲击, 2021, 40(06): 86-92+189.
- [24]. 刘杰, 王海龙, 张志国, 等. 斜拉桥损伤可识别性传感器的优化布置方法[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(01): 173-181.
- [25]. 张笑华, 肖兴勇, 方圣恩. 面向桥梁结构健康监测的压缩感知动力响应信号重构[J]. 振动工程学报, 2022, 35 (03): 699-706.
- [26]. 杨康, 李铎, 栾守领. 基于猴群算法的斜拉桥测点优化布置研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32 (01): 13-17+114.
- [27]. Lin J F, Xu Y L, Law S S. Structural damage detection-oriented multi-type sensor placement with multi-objective optimization[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 422: 568-589.
- [28]. 张安安, 吴翔. 基于 IQPSO 的桥梁传感器优化布置[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(04): 43-47+57.
- [29]. Zhou Z, Wegner L D, Sparling B F. Data quality indicators for vibration-based damage detection and localization[J]. Engineering Structures, 2021, 230: 111703.
- [30]. Wang X, Huang S, Kang C, et al. Integration of wavelet denoising and HHT applied to the analysis of bridge dynamic characteristics[J]. Applied sciences, 2020, 10(10): 3605.
- [31]. Tang Z, Bao Y, Li H. Group sparsity-aware convolutional neural network for continuous missing data recovery of structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2021, 20(4): 1738-1759.
- [32]. Daneshvar M H, Gharighoran A, Zareei S A, et al. Early damage detection under massive data via innovative hybrid methods: application to a large-scale cable-stayed bridge[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2021, 17(7): 902-920.
- [33]. Zhao H, Ding Y, Li A, et al. Digital modeling on the nonlinear mapping between multi - source monitoring data of in - service bridges[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(11): e2618.
- [34]. Teng S, Chen G, Liu Z, et al. Multi-sensor and decision-level fusion-based structural damage detection using a one-dimensional convolutional neural network[J]. Sensors, 2021, 21(12): 3950.
- [35]. Kaloop M R, Kim D. De-noising of GPS structural monitoring observation error

- using wavelet analysis[J]. Geomatics, natural hazards and risk, 2016, 7(2): 804-825.
- [36]. Han Q, Ma Q, Xu J, et al. Structural health monitoring research under varying temperature condition: A review[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11: 149-173.
- [37]. 杨辰. 结构监测的传感器优化布置研究进展与展望[J]. 振动与冲击, 2020, 39(17): 82-93.
- [38]. 孙利民, 尚志强, 夏焯. 大数据背景下的桥梁结构监测研究现状与展望[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 1-20.
- [39]. 刘扬, 向胜涛, 王达. 基于 BP-LSTM 混合模型的钢-混组合桥面系空间温度场及温度效应实时评估及预测[J]. 土木工程学报, 2021, 54 (11): 57-70+78.
- [40]. 祝青鑫, 王浩, 茅建校, 等. 基于 ANFIS 的环境激励下桥梁结构应变响应预测分析[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 62-70+117.
- [41]. 王闯, 战家旺, 孙全胜. 基于荷载-参数-响应联合估计的桥梁下部结构轻量化监测方法[J]. 中国公路学报, 1-18[2025-12-04].
- [42]. 殷鹏程, 谭曼丽莎, 曹阳梅, 等. 基于迁移学习图像识别的桥梁监测数据异常检测方法[J/OL]. 大连交通大学学报, 2024, 45(03): 106-113.
- [43].

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

本项目拟解决的关键问题如下:

(1) 桥梁运营安全风险及轻量化监测方案设计

与大跨径桥梁相比, 中小跨径桥梁所处桥址环境多变, 场景复杂, 桥梁本身对地震、洪灾等情况未进行专门设计, 结构本身抗风险安全储备小。针对中小跨径桥梁结构自身特点, 考虑结构面临的安全风险, 才能有针对性进行轻量化监测方案设计, 提出典型的监测指标, 及时进行有效的风险预警。

(2) 中小跨径桥群的轻量化监测系统架构、数据采集与传输问题

传统长大桥梁系统架构复杂, 其监测系统是为同时管理成百上千个传感器高频实时监测设计的, 用于只有少量传感器的中小跨径桥梁

时技术架构过于复杂，难以充分发挥设备性能。中小跨径桥梁分布范围广，现场条件多变，现场供电和有线通讯条件复杂，怎么样优化系统架构，适应中小跨径桥群的复杂环境，降低运营成本，显得尤为重要。

结构监测系统由传感层、采集层、传输层、数据处理层及业务应用层组成系统架构复杂、数据量大、建设成本高。是目前结构监测普遍存在的问题。怎样针对轻量化监测，由内而外进行瘦身与优化，提高数据采集和传输效率。

(3) 中小跨径桥梁群的安全预警问题

与长大跨径桥梁相比，中小跨径桥梁轻量化监测指标少，断面少，怎样利用有限监测数据，及时进行数据处理挖掘，怎样及时进行安全预警，对于单传感器预警信息，怎样复核确认，确保安全预警不误报、漏报。

3.2 主要研究内容及实施方案

本课题拟从病害及风险分析、数据采集与系统架构、数据分析与预警等方面开展研究，通过研究中小跨径桥梁风险分析、数据采集技术、轻量化监测架构优化技术、结构状态预警技术等，将预警评估与养护决策有机融合，解决监测系统实施费用高、数据利用难，人工检测评估效率低、难度大、准确性低等问题，解决轻量化监测落地遇到的难点，形成公路中小跨径桥群轻量化监测技术。

3.2.1 基于病害及风险源的桥梁轻量化监测技术方案研究

研究内容：

桥梁结构安全风险主要分为外部风险和内部风险，外部风险与桥址位置所处环境有关，常见有地震、洪水等；内部风险是随着桥梁结构的服役年限增长，结构自身材料性能的降低、劣化，各种病害逐年发展、增加。对中小跨径桥梁，梳理清楚结构所面对的内部和外部风险，分类分析轻量化应用场景，结合桥梁结构特点，考虑地域地形、地貌、降雨等特点，才能有针对性的制定轻量化监测指标，提出行之有效轻量化监测方案，提高监测效率。

实施方案：

进行现场调研和调查，掌握桥梁结构特点、常见典型病害，桥址处环境信息，分析主要病害类型及其形成机理，研判桥梁面临的主要风险类型。结构类型不同，桥梁运营中产生的病害情况及结构面对的安全风险均有差异。通过对桥梁的基本结构和属性进行建模和分析，包括材料、结构类型、尺寸、承载能力等，基于桥梁响应敏感度分析方法，研究其敏感参数以及影响桥梁安全的关键因素，确定关键监测指标，为监测方案制定提供依据。关键监测指标体系的确定，需考虑与相关规范的衔接和陕西地域特点。

中小跨径桥梁主要结构形式有预制箱梁、预制空心板、预制 T 梁、现浇箱梁等。竖向荷载作用下，主梁自然弯曲下挠，挠度指标是梁式桥监测的主要对象，也是反映结构刚度、变形的主要特征量。梁桥结构的极端破坏与其异常变形紧密联系，梁桥主要对其主梁挠度进行监测，同时根据桥梁风险源对于涉河、泥石流等情况进行下部结构变形监测，上下部结构异常变形均可能导致结构的极端破坏。研究上

下部结构变位关系，实现互相校核，精准掌握桥梁结构的变位状态，实现结构安全监测。梁桥主要病害表现为主梁开裂，对于病害严重或裂缝发展超限桥梁，需对典型受力裂缝进行监测。

对简支梁，传力明确，受力简单，温度、预应力作用下不产生次内力，结构变形较大；监测以跨中断面挠度、应变为主。对连续梁，结构在移动荷载作用下，正弯矩相比简支梁小，墩顶有负弯矩区。监测边跨 $0.4L$ 断面、中跨跨中断面挠度，对多孔连续结构受力分析表明，各孔之间变形关联性强，其中一跨出现较大变形对相邻孔变形影响较大，对于 3-7 孔一联梁桥结构监测其中两孔可以实现对全联整体变位监测，通过合理选择监测桥跨，可以实现结构整体的轻量化监测，同时根据结构受力状态及病害情况增加监测项目。

对预制箱梁、空心板、T 梁等多主梁结构，必要时增加横向联系效果监测点，如监测空心板铰缝状态。对现浇箱梁，特别是在平面曲线半径较小主梁，主梁有横向偏移，增加横向偏位监测指标。桥墩为独柱墩时，还需增加监测支座受力指标，掌握支座脱空情况，防止结构倾覆。对于加固后桥梁需要重点监测加固体及协同受力状态。

中小跨径桥梁不仅要面对结构自身的各种病害，同时要面对的桥址位置复杂的外部风险。重载交通风险，桥梁所处位置附近有高速路出口，所在路线为地区重要运输通道等；滑坡风险，桥梁位置山体或土体有崩石、滑坡风险，可能冲击桥面或桥墩等；地震风险，由于设计理念的完善，过去很多桥梁对地震风险预估不足，抗震措施不到位，桥址位置地震风险又较大；过水断面不足风险，考虑陕西地域地貌、

降雨特点，陕北地区有大量小跨径桥梁跨越河沟，枯水期桥下基本断流，但在夏秋汛期，突发山洪，短时降雨量较大，泄洪压力大。

进行现场调研和调查，了解拱桥主要病害和桥址环境，研判拱桥面临超载、地震、洪水等主要风险类型；通过对桥梁的基本结构和属性进行建模和分析，包括材料、结构类型、尺寸、承载能力等，基于桥梁响应敏感度分析方法，研究其敏感参数以及影响拱桥安全的关键因素，明确可能导致风险的因素和风险点对桥梁结构的影响，制定相应的监测指标。

同时，在进行传感器选型和布置优化时，需要结合中小跨径桥梁结构特点，结构响应小，对设备成本敏感，考虑监测设备的安装位置、使用性能和期限、设备保护、供电稳定、数据传输等多种因素。采用粒子群算法、自适应猴群算法等方法进行布置优化。

通过分类分析，能够结合桥梁基本资料和实地调查情况，在充分掌握各种监测手段特点的基础上，明晰桥梁结构特点，梳理桥梁面对的主要病害和风险源，确定梁桥结构关键监测指标，形成基于病害及风险源的梁桥监测技术方案。

3.2.2 桥群轻量化监测系统优化研究

研究内容：

现有的长大桥结构安全监测系统从方案设计、设备选型、系统应用等方面存在着成本高、便捷性差、稳定性差等问题，为了推动结构监测行业发展，促进行业解决方案向着低成本、长寿命、数字化方向发展，尤其是针对桥梁群复杂多样的结构及大量监测数据，实现监测

系统的轻量化显得十分迫切。

实施方案：

明晰桥梁群界定范围，物理距离上较近的多座桥梁；集成同一监测系统的桥梁；同一类结构类型桥梁；同一管理路段上的桥梁。针对桥梁群监测面临的针对性强、桥梁群特征多样、点多面广、成本敏感的特点，优化监测系统形成一套基于模块化设计理念、一体化与汇聚化采集无缝融合的新型轻量化监测系统。结构监测系统以轻量化为原则，瞄准“精监测、高集成、易施工、高精度、简运营”的目标。

充分调研先进的监测仪器设备，桥梁结构的变形是关键监测参数，可通过视觉技术实现。进行基于视觉的非接触式桥梁监测技术及基于微波干涉雷达的非接触式桥梁监测技术研究，结合工程实践综合优选适合轻量化监测的低功耗光电式挠度监测、微波雷达挠度监测设备。根据应用场景及传感器要求优选光纤光栅应变计、振弦式应变计及电阻式应变计等应变采集传感器。同时研发前端 AI 摄像机，与传感器联动触发拍照，提供预警关键的影像资料；同时通过识别结构的特征参照物实现结构状态的识别，以路面为标线及增设参照物两种方式同时识别校核验证，实现精准识别监测结构的整体状态；通过前端 AI 识别技术，在结构极端破坏状况下，实现无网络情况下结构破坏预警并启动关联的交通管控设备。基于模块化设计理念，将传感器组设计为独立模块，灵活实现轻量化监测参数配置。

桥群轻量化监测将传统的监测系统架构传感层、采集层、传输层、应用层，优化为传感层、采集传输一体、应用层三个层级。同时通过

对组网方式、功能、能源、处理能力的模块化设计，辅以前端倾斜设计、边缘服务等技术，需实现从前端传感器到平台端轻量化设计。设计出组网方式、功能、能源、处理能力模块化，将桥梁群涉及的全部参数采集分解为多个可灵活组合的功能模块，实现按需配置与无缝扩展。

前端设备功能实现了智能化，存储和处理数据能力大幅增加。形成前端滚动存储功能，并实现前端边侧配置算法，实现数据的过滤、平滑、动静剥离等算法配置，推送结果数据，提升价值密度。基于AI的前端报警分析系统，直接传输预警信息到轻量化监测平台，提高效率。

通过以上对传感器优选及模块化设计，结合系统架构轻量化及前端设备的存储及数据处理，可直接传输预警信息及相关数据，实现桥梁群监测系统的轻量化。

3.2.3 基于相关性分析的轻量化监测融合预警技术

研究内容：

中小跨径桥群轻量化监测平台接入桥梁数较多，但是单个桥梁监测指标较少，仅通过有限数据实现及时预警难度较大。通过怎样策略综合多跨、多个监测指标信息进行结构状态进行安全预警，确保预警信息准确性和实时性，成为轻量化监测预警的可行路径，亟待开展轻量化监测融合预警技术。

实施方案：

对中小跨径桥群进行结构分析，根据荷载与结构相应的相关性以

及多主梁各片梁挠度、应变的相关性，根据监测通行车辆的重量及桥梁结构相应的相关性分析确定一定时段内的结构阈值，以该阈值替代结构最不利设计的荷载和作用计算值，可更准确判断结构的状态，实现较为精准预警。

对于采用的预制箱梁、空心板、T梁等多主梁结构，可以根据相邻主梁之间挠度、应变的高度相关性，排除单个传感器数据异常。桥梁结构的极端破坏与其异常变形紧密联系，下部结构变形必然带动关联上部结构位移；多孔连续结构受力分析表明，各连续孔之间变形关联性强，其中一跨出现较大变形亦会对相邻两孔产生较大影响。对正常状态下采集的相邻主梁挠度、应变、上下部位移等数据，进行协方差计算、相关系数分析、回归分析，得到正常状态下的相关关系与报警状态相关关系进行对比分析，确保预警分析准确、及时。

3.3 技术路线

本项目分成3个研究内容，技术路线如图3-5所示。

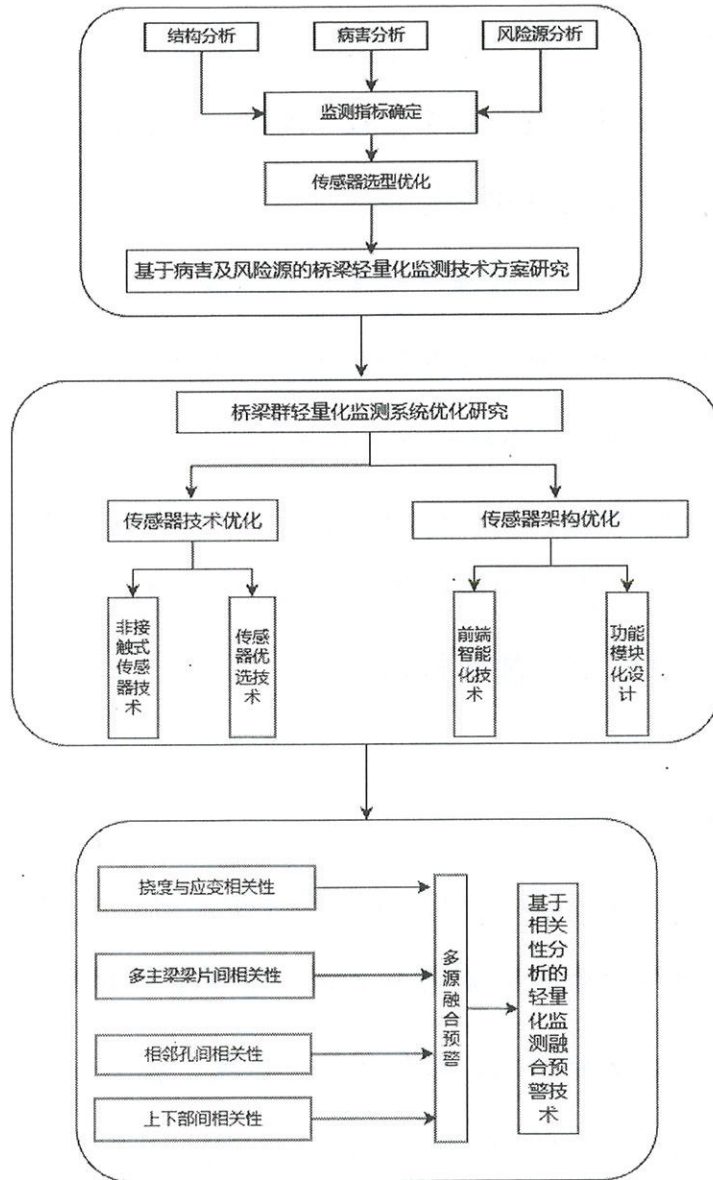


图 3-1 技术路线图

3.4 后续技术改造

依托该科研项目，计划在陕西省开展中小跨径桥群监测试点。试点工作将重点围绕中小跨径桥梁的结构监测设计、监测平台建设与运维等方面，推动项目研究成果的实际应用与推广，并在此基础上持续开展后续改造与技术升级。

3.5 有关技术经济指标

项目研究成果能够形成成套轻量化监测技术，有利于中小跨径桥

梁监测项目的规范化、标准化，有效提高桥梁监测应用效果，提高桥梁运营的安全性，提高投资效率，推进养护、安全管理的现代化，提高桥梁养护、安全管理水平和效率。

项目研究成果能够有效降低轻量化系统建设成本，减少桥梁检测运营成本，降低运营桥梁安全风险，有力保障人民生命和财产安全。

- (1) 形成中小跨径桥群轻量化监测技术方案；
- (2) 形成桥群轻量化监测系统优化技术，有效降低建设成本；
- (3) 提出桥梁群监测融合预警技术，提高预警精度和准确性。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

4.1.1 承担单位

承担单位西安公路研究院是陕西交控集团直管的国家高新技术企业。西安公路研究院目前是国内交通行业规模较大，集科研、交通规划、勘察设计、试验检测、软件开发、监理、施工、仪器和道路材料研发生产销售、技术咨询为一体的科研机构。全院职工 337 人，其中正高级工程师 30 人，高级工程师 185 人，享受国务院特殊津贴 1 人，陕西省突出贡献专家 2 人，陕西省三五人才 4 人。博士学位 11 人，硕士学位 157 人。自“七五”以来，西安公路研究院共承担交通科技项目 400 余项，其中获国家科技进步奖 10 余项、中国公路学会科技进步奖 10 余项、陕西省科技进步奖 70 余项的优异成果。

西安公路研究院现拥有交通运输部颁发的公路工程甲级监理资质、交通工程机电专项监理资质、公路工程试验检测综合甲级资质、

交通运输行业环境监测资质、住房和城乡建设部颁发的公路行业（公路、特大桥梁、特长隧道、交通工程）专业甲级设计资质、公路工程勘察综合甲级资质、建筑业承包通信、监控、收费等综合系统工程施工资质、国家发改委甲级工程咨询资质（2个甲级资质和1个丙级资质）、陕西省住房和城乡建设厅颁发的园林绿化施工二级资质，省发改委批准的陕西省首批“固定资产投资项目节能评估文件编制机构和评审机构”。并于2004年通过了中国方圆标准认证中心的审核，获GB/T 19001-2008质量管理体系认证证书。

4.1.2 参与单位

陕西省公路局是省交通运输厅领导下的全省公路管理专业机构，负责全省公路的规划、建设、养护、路政以及收费公路等的行业管理，建制为副厅级事业单位，局机关、事业机构共有职工196人。1997年至2001年，省公路局连续5年被省委、省政府命名为“创佳评差”竞赛活动“最佳单位”；近10年来，4次受到陕西省人民政府通令嘉奖；“九五”以来，有49个单位（集体）、31名个人受到省部级以上单位的表彰奖励；“十五”期间，有65个单位（集体）、42名个人受到省部级以上单位的表彰奖励。2001年，全省公路系统荣获全国交通系统部级文明行业称号。2005年，陕西省公路局机关荣获全国文明单位称号。

4.2 技术力量及人员构成

项目研发团队技术人员18名，其中正高工4人、高级工程师3人、工程师9人，人员梯队及知识结构构成合理。研发团队技术人员

具有丰富科研、高速公路养护及管理经验，对公路桥梁监测、预警评估及监测平台均有系统的研究，可及时、准确开展各项工作。部分主要人员主持或参与过省厅科研项目，有一定的科研经验，能够保障科研工作有序顺利进行。

项目名称	中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究					
项目总投资	129.95 万元		申请资助金额		49.95 万元	
申请项目负责人	姓名	石雄伟	性别	男	年龄	48
	职务	分院院长	职称	正高级	专业	桥隧工程
项目研究主要成员情况						
姓名	单位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
马毓泉	西安公路研究院有限公司	男	1968.03.26	正高级工程师	桥梁工程	技术负责
柯亮亮	西安公路研究院有限公司	男	1983.11.23	正高级工程师	桥梁与隧道工程	理论分析
马浩轩	陕西省公路局	男	1995.08.01	中级工程师	建筑与土木工程	传感器选型
苗建宝	西安公路研究院有限公司	男	1987.10.05	正高级工程师	桥梁与隧道工程	监测方案研究
冯博	陕西交通控股集团有限公司运营分公司	男	1991.04.11	中级工程师	交通运输工程	负责依托工程
雷浪	西安公路研究院有限公司	男	1993.2.27	中级工程师	桥梁与隧道工程	融合预警
姚蒙阳	陕西省公路局	男	1993.10.01	助理工程师	交通运输工程	数据预处理
张小亮	陕西西公院工程试验检测有限公司	男	1987.08.08	高级工程师	桥梁与隧道工程	现场试验

杜柯	陕西交通控股集团有限公司运营 管理分公司	男	1991.06.10	中级工程 师	公路桥梁工 程	结构评估
赵庭	西安公路研究院有 限公司	女	1989.02.09	高级工程 师	结构工程	传感器优化
李榕	陕西省公路局	女	1993.11.01	中级工程 师	交通工程	架构优化
祁瑞	陕西交控运营管理 公司	女	1993.05.18	中级工程 师	公路工程	依托工程
刘颜滔	西安公路研究院有 限公司	男	1994.05.06	中级工程 师	土木工程	结构分析
杜品儒	陕西交通控股集团 有限公司运营管理 分公司	男	1990.07.31	中级工程 师	公路工程	桥梁群系统优 化
李京	西安公路研究院有 限公司	男	1989.01.16	高级工程 师	桥梁与隧道 工程	相关性分析
祁春辉	陕西交控运营管理 公司	男	1993.01.18	中级工程 师	道路与铁道 工程	风险源分析
贾浩楠	陕西省公路局	男	1994.10.01	助理	交通运输工 程	长期挠度分析
王剑飞	西安公路研究院有 限公司	男	1993.07.26	中级工程 师	公路与桥梁	拱桥病害分析

4.3 各自承担的主要工作

(1) 研发团队中，西安公路研究院有限公司主要负责本项目的组织立项，竞争性磋商活动，主持编制研究工作大纲和实施细则，实施过程管理，按照研究内容分工约定完成相应技术研发及成果报告，成果验证与评价；

(2) 陕西省公路局、陕西交控运营管理公司、陕西西公院工程试验检测有限公司配合西安公路研究院有限公司组建研究团队，共同开展国内外资料调研及工程调查，协助编制研究工作大纲和实施细则，按照研究内容分工约定开展各项研究工作，撰写相应研究报告及其他

成果资料，并协助完成研究成果的各阶段验收。

4.4 项目主要负责人情况

石雄伟，男，1976年9月出生，黑龙江哈尔滨人，工学博士，毕业于长安大学桥梁与隧道工程专业，正高级工程师。主要从事科研、桥梁监测预警、桥梁病害检测和加固设计等工作，重视创新，重视理论与实践相结合，先后承担了多项省部级科研项目，在桥梁加固技术、结构监测、波形钢腹板组合箱梁关键技术等研究领域取得了创新性成果，科技成果在多座桥梁加固改造和监测项目中得到积极的应用。获陕西省科技进步二等奖2项，三等奖2项，中国交通运输学会科学技术一等奖2项，中国公路科学技术奖特等奖、一等奖、二等奖各1项，主持和参与制定陕西省地方标准三部，发表核心期刊论文20余篇（EI检索4篇、ISTP检索1篇）。先后被评为交通运输部2012—2014年度交通科技英才、全国交通运输企业科技创新人才、全国交通基础设施重点工程劳动竞赛先进个人和陕西省交通运输行业“科技创新领军人才”，获第十二届中国公路青年科技奖及第十届陕西省青年科技奖。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程情况

本项目依托陕西省公路桥梁群监测系统建设试点项目，选择**榆林市公路局桥梁监测群**：国道210头道坡大桥、青云河大桥、刘官寨大桥、刘官寨小桥及榆溪河特大桥；**宁陕路产养护中心G5京昆高速公路桥梁监测群**：太白庙汶水河大桥、筒车湾汶水河1号大桥、小庙埡汶水河1号大桥、白家坝高架特大桥及小麻洋坝高架桥；G244国道

K1046+073 潘家河大桥，开展轻量化监测试点应用。

头道坡大桥位于 G210 榆林段，建成于 2011 年，上部结构采用 $4 \times 30 + 4 \times 30 + 3 \times 30$ m 预应力混凝土连续箱梁，下部结构采用柱式墩、桩基础，设计荷载等级为公路—Ⅰ级。

青云河大桥位于 G210 榆林段，建成于 2011 年，上部结构采用 $4 \times 40 + 4 \times 40 + 4 \times 40 + 4 \times 40 + 3 \times 40$ m 预应力混凝土连续箱梁，下部结构采用柱式墩、桩基础，设计荷载等级为公路—Ⅰ级。

刘官寨大桥位于 G210 榆林段，建成于 2011 年，上部结构采用 $3 \times 40 + 4 \times 40$ m 预应力混凝土连续箱梁，下部结构采用柱式墩、桩基础，设计荷载等级为公路—Ⅰ级。

刘官寨小桥位于 G210 榆林段，建成于 2011 年，上部结构采用 1 孔 7.2m 现浇板梁，下部结构采用重力式桥台，设计荷载等级为公路—Ⅰ级。

榆溪河特大桥位于 G210 榆林段，建成于 2011 年，上部结构采用 $22 \times 40 + 22 \times 30$ 预应力混凝土连续箱梁，下部结构采用柱式墩、桩基础，设计荷载等级为公路—Ⅰ级。

太白庙汶水河大桥位于 G5 京昆高速，建成于 2007 年，上部结构采用 7×30 预应力混凝土连续箱梁，下部结构采用柱式墩、桩基础，设计荷载等级为公路—Ⅰ级。

筒车湾汶水河 1 号大桥位于 G5 京昆高速，建成于 2007 年，上部结构采用 7×30 预应力混凝土连续箱梁，下部结构采用柱式墩、桩基础，设计荷载等级为公路—Ⅰ级。

小庙埡汶水河 1 号大桥位于 G5 京昆高速，建成于 2007 年，上部结构采用 9×30 预应力混凝土连续箱梁，下部结构采用柱式墩、桩基础，设计荷载等级为公路—Ⅰ级。

白家坝高架特大桥位于 G5 京昆高速，建成于 2007 年，上部结构采用 11×30 预应力混凝土连续箱梁，下部结构采用柱式墩、桩基础，设计荷载等级为公路—Ⅰ级。

G244 国道 K1046+073 潘家河大桥位于宝汉线汉中境内的石门水库大坝上游约 25 公里处，跨越褒河一级支流潘家河，宝鸡岸桥头引道位于曲线内。桥梁全长 176m，上部结构采用净跨 150m 中承式钢管混凝土拱桥，桥面宽度组成为： $2 \times 0.25\text{m}$ （人行道栏杆）+ $2 \times 1.0\text{m}$ （人行道）+ $2 \times 1.7\text{m}$ （拱肋及防撞护栏）+ 7.0m （行车道）=12.9m；桥梁位于直线段。设计荷载为汽车-20 级，挂车-100，人群荷载： 3.5kN/m^2 ，于 2003 年建成通车。

依托以上 11 座桥梁开展桥群轻量化监测应用研究，验证课题成果并为后期桥梁结构轻量化监测大范围推广应用奠定基础。

5.2 投资来源

本项目资金预算 129.95 万元，其中省厅专项资金 49.95 万，剩余资金为自筹资金。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

项目执行时间为 3 年，研究内容与依托工程两者互相配合，研究根据依托工程的规划制定方案，并将阶段研究成果在依托工程进行验证，已开展了前期调研和部分研究工作，具体进度如下。

(1) 2025 年 12 月-2026 年 3 月

完成项目前期调研。

(2) 2026 年 4 月-2026 年 11 月

根据前期调研结果,开展基于病害及风险源的桥梁轻量化监测技术方案研究。

(3) 2026 年 12 月-2027 年 10 月

开展桥群轻量化监测系统优化研究。

(4) 2027 年 11 月-2028 年 5 月

开展基于相关性分析的轻量化监测融合预警技术研究;

完成专利申请。

(5) 2028 年 6 月-2028 年 11 月

编写研究报告和有关验收技术文件;项目资料整理及归档,完成项目验收。

5.4 组织管理形式

项目组织实施机制,认真执行试点项目相关管理办法的基础上,加强项目的规范化、科学化管理,建立科学、合理的组织管理体系,建立、健全各项管理制度,以保证项目的顺利完成。

(1) 项目组织管理方式

项目负责人负责管理项目总体进度、总体质量、财务进度等,保证在规定时间内和预算范围内高质量地完成项目任务,实现基于目标管理的全过程监控与评估,回避风险和不确定性。项目设立科研财务助理,为预算编制和调剂、经费支出、财务决算和验收等方面提供专业

化服务。建立年度和中期进展监控和评估制度，健全各任务人员的日常交流制度。

（2）制度化管埋措施

通过项目管理责任制建立起层层责任约束机制，使项目建设全过程的管理责任得到落实，有利于保证项目各项管理目标的实现。包括如下内容：进退场管理制度；工作例会制度；质量管理体系；进度管理制度；环保管理制度；安全管理制度；技术资料管理制度；总平面管理制度；成品保护制度；后期保修服务制度等。

（3）项目实施管理措施

在进行项目管理过程中，制定出总目标及阶段性目标，目标包括质量、进度、安全、文明实施等，在目标明确的前提下对项目软硬件进行管理、监控、协调和考评。对各目标进行逐步分析和层层分解，细化为一个个子目标和阶段性目标，据此进行资源筹措、配置和协调，以各级子目标和各阶段性目标的如期实现来保证总体目标的最终实现。在此基础上划定工作范围、工作内容和工作量，确定项目各阶段的关键控制点，并制定相应的、可量化的、逐步实现各项总目标的控制计划。根据目标分解，建立健全相应的内部管理机构与制度，确立行为规范，使各部室、各级各类人员努力有方向，工作有标准，办事有依据。各项目目标将具体落实到各部室，落实到各负责小组。

（4）进度管理措施

建立完善的进度计划分级管理体系，按照合理的工序和工作流段划分，制定综合进度计划，安排好小组成员、作业面、软硬件设施等

相关因素。应用先进、成熟的计划管理软件，对实际进度与计划进度作即时比较分析，及时纠正偏差，控制整体进度计划的实施。

(5) 协同攻关机制

项目团队通过不断整合内部优势，建立研发平台，集中力量进行联合攻关。在解决关键问题、突破关键技术时凸显个体优势，实现创新；在软件完善集成、系统并行优化时凸显联合优势，实现突破。该协调攻关机制为项目创新提供保障，实现稳定的科技创新。

(6) 质量控制等制度

定期召开项目协商会议，对项目实施中出现的问题，及时提出问题的解决方案，并督促相关任务负责人纠正、改进。对系统开发过程中产生的技术文件建立技术档案，保证系统研发过程的可追溯性；系统研发将严格遵循步骤要求，对系统进行测试，保障系统的可应用性。

六、项目经费估算及资金筹措情况

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	49.95	合 计	129.95	49.95	80
工程配套研究经费	0.00	（一）直接费用	104.35	40.45	63.9
单位自筹	80.00	1.设备费	19	4.9	13.1
其他经费	0.00	（1）购置设备费	3.9	0.6	3.3
		（2）设备改造与租赁费	15.1	4.3	9.8
		2.业务费	62.05	21.55	40.5
		（1）材料费	16.45	10.15	7.4
		（2）测试化验实验加工费	16.1	3.9	12.2
		（3）燃料动力费	4	0	2.9
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	14	4.2	9.8
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	10	3.3	6.7
		（6）其他费用	1.5	0	1.5
		3.劳务费	23.3	14	10.3
		（1）专家咨询费	6.9	6.1	0.9
		（2）聘用人员劳务费	16.4	7.9	9.4
		（3）其他劳务费	0	0	0
		（二）间接费用	25.6	9.5	16.1
		4.管理费	9.5	0	9.5
		5.绩效支出	16.1	9.5	6.6

注：预算编制按照《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）文件执行，详见附件《科研经费预算编制说明》。项目验收将组织财务专项验收或审计。

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：104.35万元）：

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（19万元）：

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。

购置设备费（约3.9万元）：

是指在项目研究开发过程中试制专用仪器设备

设备改造与租赁费（约15.1万元）：

是指在项目研究开发过程中对现有仪器设备进行升级改造以及租赁外单位仪器设备和桥梁检测车等

（2）业务费（约62.05万元）：

业务费是项目执行的主体支撑费用，主要包括：

1) 材料费（约16.45万元）：

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。

2) 测试化验实验加工支出 (约 16.1 万元) :

是指在项目实施过程中支付给外单位(包括项目承担单位内部独立经济核算单位)的检验、测试、化验、实验及加工等费用。根据实验方案及样品数量,结合市场价格测算。

3) 燃料动力费 (约 4 万元) :

是指用于项目研究开发过程中相关大型仪器设备、专用科学装置等运行发生的可以单独计量的水、电、气、燃料消耗费用等

4) 会议费/差旅费/国际合作与交流费 (约 13 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。

5) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/印刷费 (约 10 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。

6) 其他支出 (约 1.5 万元) :

指在项目研究中发生的除上述费用之外其他业务费支出。以市场价格或公允标准为基础。

(3) 劳务费 (约 23.3 万元)

1) 专家咨询费 (6.9 万元)

用于支付给临时聘请的咨询专家的费用。

2) 劳务费 (16.4 万元)

项目实施过程中支付给参与项目研究的研究生、博士后、访问学者以及项目聘用的研究人员、科研辅助人员等的劳务性费用。

(二) 间接费用 (合计: 24.6 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) 管理费 (9.5 万元)

测算依据:按照项目直接费用扣除设备购置费后的差额,根据国家规定的核定比例提取。用于补偿单位为项目提供的现有公共设施、管理服务 etc 产生的间接成本。

计算基数: $(104.35-3.9)=100.45$ 万元,按约 9.5%的比例计提。

(2) 绩效支出 (16.1 万元)

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)	3-5
		(1)授权发明专利	1
		(2)实用新型	2-4
		(3)外观设计	
		2、软件著作权授权数(项)	2-3
		3、发表论文(篇)	2-3
		(1)其中 SCI 索引收录数	
		(2)其中 EI 索引收录数	
		(3)其它	2-3
		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			

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	
	人才引育	(4)规模化生产	
		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)	2
	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

进行中小跨径桥梁轻量化监测技术研究，形成成套桥梁轻量化监测技术，促进我省中小跨径桥梁监测系统的推广应用，提高我省桥梁智能化、数字化水平，对于提高管理单位的运营水平、加强结构安全风险预警、有效保障桥梁的安全运营等方面都具有非常重要的意义。

(1) 梳理桥梁存在的主要病害和风险源，确定梁桥结构关键监测指标，建立标准化的中小跨径桥群轻量化监测指标体系。

(2) 研发 AI 视频识别与分析技术，有效识别桥面。

(3) 根据历史监测数据，进行挠度-应变等响应的相关性分析研究，融合多指标数据信息，提出轻量化桥群监测预警方法。

8.2 提交的研究成果及其形式

本项目的成果主要以技术应用报告等形式表现，具体成果如下：

(1) 形成中小跨径桥群轻量化监测**预警**关键技术研究报告；

(2) 编制《陕西省公路中小跨径桥梁轻量化监测技术指南》；

(3) 申请国家专利 3-5 项；

(4) 申请软件著作权 2-3 项；

(5) 在中文核心及以上期刊发表论文 2-3 篇。

8.3 经济、社会、环境效益分析

进行中小跨径桥梁轻量化监测技术研究，形成成套桥梁轻量化监测技术，促进我省中小跨径桥梁监测系统的推广应用，提高我省桥梁智能化、数字化水平；

1) 经济效益:

(1) 项目结合陕西地域特点, 通过基于病害及风险源的桥梁轻量化监测技术方案研究应用, 提高我省中小跨径桥群应对自然灾害和突发事件的韧性, 提高中小跨径桥群安全管理水平。

(2) 通过桥群轻量化监测系统优化技术研究, 有助于低功耗、高精度、低成本的桥群轻量化监测系统建设, 有效节约投资, 提高投资效率。

(3) 进行相关性分析的轻量化监测融合预警技术研究, 有效提高我省桥群轻量化监测系统的安全预警能力, 解决轻量化监测关键痛点, 及时发现安全隐患, 减少人民生命和财产损失。

2) 社会、环境效益:

(1) 提升公众安全感: 通过本课题研究成果, 可打通结构养护从方案设计、数据采集、数据处理、预警的全流程, 通过结构监测、检测技术的应用, 可以让公众感受到政府对基础设施安全的高度重视, 增加公众的安全感。

(2) 促进技术创新: 通过本课题的技术研究, 将带动相关领域技术的创新, 为结构的设计、施工和维护提供数据支持, 为我国科技创新贡献力量。

(3) 提高管理水平: 对于提高管理单位的运营水平、加强中小跨径桥梁结构安全风险预警、有效保障桥梁的安全运营等方面都具有非常重要的意义。

(4) 减少资源消耗: 通过监测系统及时评估, 发现结构存在问题, 及时采用合理方式处置, 可以降低资源消耗。

九、其它需要说明的问题

无

十、申请单位意见

本单位支持“中小跨径桥梁群轻量化监测关键技术研究”项目的立项申报，并将为该项目的实施提供必要的依托工程和经费保障。

项目关键技术的研究、验证与集成示范，已确定依托以下依托工程开展：本项目依托陕西省公路桥梁群监测系统建设试点项目，选择**榆林市公路局桥梁监测群**：国道 210 头道坡大桥、青云河大桥、刘官寨大桥、刘官寨小桥及榆溪河特大桥；宁陕路产养护中心 **G5 京昆高速公路桥梁监测群**：太白庙汶水河大桥、筒车湾汶水河 1 号大桥、小庙垭汶水河 1 号大桥、白家坝高架特大桥、及小麻洋坝高架桥；G244 国道 K1046+073 **潘家河大桥**，开展轻量化监测试点应用。

项目申报预算为人民币 129.95 万元，所需资金已全部落实：49.95 万元来源于省级财政科技计划专项拨款，其余 80 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，预期成果对桥梁群安全风险预警、有效保障桥梁的安全运营等方面都具有非常重要的意义，推荐予以立项支持。

西安公路研究院有限公司

单位负责人：

年 月 日

中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究 大纲评审意见

2025年12月11日，陕西省交通运输厅在西安主持召开了“中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究”（项目编号：25-07K）项目研究大纲评审会。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。

项目研究内容较全面，研究目标明确，技术路线可行；研究人员组成合理；研究基础较扎实；依托工程基本落实，经费预算合理，具备开展研究工作的条件；预期成果基本符合研究目标。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

- 建议：1. 前期研究现状紧扣研究内容，补充其他省份研究成果；
2. 研究内容突出重点，取消安全评估相关内容；
 3. 进一步凝练预期目标；
 4. 建议课题研究成果调整为：
 - (1) 形成中小跨径桥群轻量化监测关键技术研究报告；
 - (2) 编制《陕西省公路中小跨径桥梁轻量化监测技术指南》；
 - (3) 申请国家专利 3-5 项；
 - (4) 申请软件著作权 2-3 项；
 - (5) 在中文核心及以上期刊公开发表论文 2-3 篇。

主任委员：赵之胜

2025年12月11日

中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究 (项目编号: 25-07K)

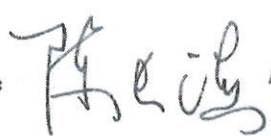
大纲评审专家委员会名单

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	赵之胜	陕西省交通运输厅	工程地质	公路工程	正高级工程师	赵之胜
2	委员	陈长海	陕西省交通规划设计研究院	桥梁工程	勘察设计	正高级工程师	陈长海
3	委员	翟晓亮	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	桥梁工程	桥梁设计 咨询与科 研工作	正高级工程师	翟晓亮
4	委员	陈淮	郑州大学	桥梁工程	桥梁工程	教授	陈淮
5	委员	阴德辉	沈阳市城市建设投资集团有限公司	土木工程	工程项目 建设管理	正高级工程师	阴德辉

专家审查意见表

项目名称	中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究				
专家姓名	赵训性	职务/职称	正高	专业	公路工程
专家单位	陈桥交通运通局			联系电话	1370228598
评审意见					
<p>研究内容较合适。目的较明确。技术路线可行。研究内容较合理。苏州、北京、河北、山东、同音通过评审。</p> <p>建议：1. 进一步完善研究背景与苏州研究基础。完善研究内容补充江苏、山东的研究成果。</p> <p>2. 强化桥群的研究。强化监测指标研究。</p> <p>3. 数据及时更新</p> <p>4. 参考资料补充。增加最新成果。</p> <p>5. 以表格形式呈现。</p> <p style="text-align: right;">评审专家(签字): 赵训性</p> <p style="text-align: center;">2025年12月11日</p> <p style="text-align: center;">(本意见入档, 应填写工整, 纸面不敷, 可另加纸)</p>					

专家审查意见表

项目名称	中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究				
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					
<p>项目针对中小跨径桥梁轻量化监测预警关键技术开展研究,具有重要的工程应用价值和实用意义。研究大纲内容全面,项目研究目标明确,技术路线清晰,人员结构合理。同意通过评审。</p> <p>建议:</p> <ol style="list-style-type: none">1. 建议补充完善 3.2.3 内容,突出“桥群”、“轻量化”;2. 建议补充创新点,明确研究特色。					
评审专家(签字): 					
2025年12月10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	中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究				
专家姓名	翟晓亮	职务/职称	正高级工程师	专业	桥梁与隧道工程
专家单位	中交第一公路勘察设计研究院有限公司			联系电话	13619211927

评审意见

本项目聚焦中小跨径桥梁群轻量化监测预警关键技术从监测方案、系统优化、融合预警和安全评估四方面开展系统研究，研究工作对促进常规桥梁监测系统的推广应用，提高桥梁智能化、数字化水平，对于提高管理单位的运营水平具有重要意义。

项目研究目标明确，关键问题把握准确，技术路线可行，研究立项必要。

项目组研究人员组成合理，依托工程落实，具备开展项目研究的能力和条件。

具体意见和建议如下：

1. 国内外研究现状部分建议进一步加强调研，补充江苏、广东等省份已经开展的桥梁轻量化监测工作调研内容；围绕我省交通国省干线、高速公路运营管理特点，突出陕西省在中小跨径桥梁轻量化监测方面的卡点。

2. 拟解决的关键技术问题部^分建议进一步凝练内容。

3. 研究内容建议进一步聚焦，建议研究内容一和二合并。

4. 细化研究目标，围绕监测内容、系统和预警，每一项有別能达到什么可考核目标；体现桥群特点。

5. 提交成果部分报告名称取消“基于人工智能”，明确“轻量化技术指南”是否为地标。

6. 经济效益部分围绕轻量化系统自身疏理。

评审专家（签字）：

翟晓亮

2025年12月11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	中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究				
专家姓名	陈淮	职务/职称	教授	专业	桥梁工程
专家单位	郑州大学			联系电话	13653863751
<p>评审意见</p> <p>项目研究大纲人员配备基本合理，研究内容基本合适，技术路线合理，实施方案可行，研究设施完备，研究基础较好，经费预算合适。研究大纲经修改完善后可用于指导该项目研究。</p> <p>建议修改意见：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.研究大纲没有体现出中小跨径桥梁“群”与单体桥梁关系相关研究研究，增加桥梁“群”轻量化监测、预警相关内容。 2.“3.1 拟解决的关键问题——（2）典型拱桥结构轻量化监测方案确定”、“3.2.2 典型拱桥结构轻量化监测技术方案研究”，中小跨径桥梁，梁桥为主，拱桥数量较少，且两者上部结构受力与破坏模式差异也较大，建议在有限时间和经费的情况下集中精力，研究梁桥相关内容。 3.“3.2.1 基于病害及风险源的梁桥轻量化监测技术方案研究”，连续梁桥、连续刚构桥通常不属于中小跨径常规桥梁范畴，研究内容应集中题目所限定的范围。 4.项目研究对象主要为公路桥梁，对于部分缺少电力的公路桥梁，给出如何解决内容？ 5.在桥梁建成后，后加传感器测量的量是增量，而判别标准是全量，如何确定增量与全量关系？ 6.“5.1 依托工程情况” G244 国道 K1046+073 潘家河大桥，不属于项目研究题目所限定的中小跨径桥梁范围。 7.“3.5 有关技术经济指标”，给出单体桥梁轻量化监测系统的费用。 8.写作方面，应紧扣项目研究主题，精简与本项目关系不密切的文字表述（特别是一、项目研究的背景和必要性、2.1 国内外研究现状）；前面讲了较多的人工智能、滑坡的内容，后面没有涉及。 <p style="margin-top: 20px;">同意通过项目研究大纲和开题。</p> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;">评审专家（签字）：陈淮</p> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">2025 年 12 月 11 日</p> <p style="text-align: center;">（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）</p>					

专家审查意见表

项目名称	中小跨径桥梁群轻量化监测关键技术研究				
专家姓名	阴德辉	职务/职称	正高级工程师	专业	土木工程
专家单位	沈阳市城市建设投资集团有限公司			联系电话	18040019016
评 审 意 见					
一、总体评价					
本项目项目立项依据充分，研究目标明确，技术路线基本合理，符合当前桥梁管养数字化、精细化的发展趋势。					
二、相关建议					
1.标准化程度继续深化：建议在研究中进一步明确轻量化监测的标准化指标体系，并探索与相关现行规范的衔接。					
2.深化经济性分析：建议在研究中增加与传统监测系统的对比分析，明确轻量化监测在成本、精度、时效等方面的优势与局限，为行业推广提供决策依据，同时加入全生命周期成本分析内容。					
评审专家（签字）：阴德辉					
2025年12月11日					
（本意见入档，填写工整，纸面不敷，可另加纸）					

专家意见处理表

项目名称： 中小跨径桥群轻量化监测预警关键技术研究 （项目编号： 25-07K）

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	赵之胜	<ol style="list-style-type: none"> 1. 进一步完善研究背景与前期研究基础, 补充江苏、山东等省研究成果。 2. 强化桥梁群的研究, 强化监测指标研究。 3. 凝练预期目标。 4. 参考资料偏老, 增加最新成果。 5. 认真推敲成果论文形式。 	<p>意见采纳:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1、已按照专家意见完善研究背景与前期研究基础, 突出桥梁群轻量化相关内容, 增加江苏、山东等省份相关研究成果; 2、研究内容 3.2.2 桥梁群轻量化监测研究, 3.2.1 确定轻量化监测指标; 3、细化研究预期目标; 4、更新参考文献内容, 关注近年研究成果; 5、已完善研究成果提交形式。
2	陈长海	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建议补充完善 3.2.3 内容, 突出“桥群”、“轻量化”; 2. 建议补充创新点, 明确研究特色。 	<ol style="list-style-type: none"> 1、按意见修改完善研究内容, 详见内容 3.2.2; 2、在 3.2.1 中考虑陕北、关中、陕南地域差异, 体现陕西地域特色。
3	翟晓亮	<ol style="list-style-type: none"> 1. 国内外研究现状部分建议进一步加强调研, 补充江苏、广东等省份已经开展的桥梁轻量化监测工作调研内容; 围绕我省交通国省干线、高速公路运营管理特点, 突出陕西省在中小跨径桥梁轻量化监测方面的卡点。 2. 拟解决的关键技术问题部分建议进一步凝练内容。 3. 研究内容建议进一步聚焦, 建议研究内容一和二合并。 4. 细化研究目标, 围绕监测内容、系统和预警, 每一项分别能达到什么可考核目标; 体现桥群特点。 5. 提交成果部分报告名称取消“基于人工智能”, 明确“轻量化技术指南”是否为地标。 6. 经济效益部分围绕轻量化系统自身梳理。 	<ol style="list-style-type: none"> 1、完善研究现状, 补充江苏、广东等省份轻量化监测成果; 增加我省国省干线、高速轻量化相关痛点; 2、完善修改关键技术问题; 3、研究内容一和二整合, 以桥梁轻量化监测为主; 4、细化研究预期目标; 5、成果技术报告修改为: 基于人工智能的结构安全轻量化监测关键技术研究报告, “轻量化技术指南”不是为地标; 6、按意见修改经济效益部分内容;

4	陈淮	<p>1.研究大纲没有体现出中小跨径桥梁“群”与单体桥梁关系相关研究，增加桥梁“群”轻量化监测、预警相关内容。</p> <p>2.“3.1 拟解决的关键问题——(2) 典型拱桥结构轻量化监测方案确定”、“3.2.2 典型拱桥结构轻量化监测技术方案研究”，中小跨径桥梁，梁桥为主，拱桥数量较少，且两者上部结构受力与破坏模式差异也较大，建议在有限时间和经费的情况下集中精力，研究梁桥相关内容。</p> <p>3.“3.2.1 基于病害及风险源的梁桥轻量化监测技术方案研究”，连续梁桥、连续刚构桥通常不属于中小跨径常规桥梁范畴，研究内容应集中题目所限定的范围。</p> <p>4.项目研究对象主要为公路桥梁，对于部分缺少电力的公路桥梁，给出如何解决内容？</p> <p>5.在桥梁建成后，后加传感器测量的量是增量，而判别标准是总量，如何确定增量与总量关系？</p> <p>6.“5.1 依托工程情况”G244 国道 K1046+073 潘家河大桥，不属于项目研究题目所限定的中小跨径桥梁范围。</p> <p>7.“3.5 有关技术经济指标”，给出单体桥梁轻量化监测系统的费用。</p> <p>8.写作方面，应紧扣项目研究主题，精简与本项目关系不密切的文字表述。</p>	<p>1、研究大纲 1.2 中增加桥群概念与界定、单桥与桥群关系内容；</p> <p>2、研究内容 3.2.1 和 3.2.2 整合，以梁桥轻量化监测为主；</p> <p>3、修改 3.2.1 相关内容；</p> <p>4、对于缺少电力的公路桥梁监测，推广采用低功耗、太阳能供电等技术的监测设备；</p> <p>5、传感器监测结果为增量，阈值设置以可变荷载如移动荷载、温度作用等作为判别标准，课题将深入研究桥群阈值方法；</p> <p>6、调整依托工程；</p> <p>7、优化相关指标；</p> <p>8、已按照专家意见完善研究背景与研究现状，突出桥群轻量化相关内容。</p>
5	阴德辉	<p>1.标准化程度继续深化:建议在研究中进一步明确轻量化监测的标准化指标体系，并探索与相关现行规范的衔接。</p> <p>2.深化经济性分析:建议在研究中增加与传统监测系统的对比分析，明确轻量化监测在成本、精度、时效等方面的优势与局限，为行业推广提供决策依据，同时加入全生命周期成本分析内容。</p>	<p>1、在研究中细化明确轻量化监测的指标体系，同时与现行规范合理衔接；</p> <p>2、在桥群轻量化监测系统优化中增加与传统监测系统系统的对比分析，考虑监测系统全寿命周期在成本、精度、时效等方面的优缺点。</p>

项目负责人（签字）：