

项目合同编号：25-44K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发

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：黄治炉

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：029-88322888

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

本项目拟设置四个紧密衔接的研究内容，这些工作包紧密围绕构建基于多参数融合与生成式 AI 的缆索桥梁结构安全状态智能评估模型这一核心目标展开：

内容一：缆索桥梁响应数据集构建

构建覆盖多种桥型、荷载及损伤场景的高保真结构响应数据库，为 AI 模型训练提供高质量数据。

研究方案：

（1）参数化高保真有限元模型库构建：选取以禹门口黄河大桥为代表的斜拉桥（含单塔、双塔）和典型悬索桥，利用有限元软件，构建精细化的三维参数化有限元模型，精准纳入几何尺寸、材料属性、索力初值、边界条件等核心参数。（2）多工况、多损伤场景大数据集生成：系统性模拟桥梁在多种环境荷载、交通荷载及不同位置、不同程度的结构损伤下的结构响应，生成包含索力、位移、应变等多维度响应的大数据集。（3）数据管理与预处理：对生成数据进行清洗、标准化、归一化等预处理，并建立高效的数据管理机制。

内容二：基于 GNN 与 VAE 的缆索桥梁 AI 代理模型训练与优化

开发并训练一种基于稀疏传感数据、融合生成式 AI 与图神经网络的轻量化智能预测模型，实现对缆索桥梁结构整体响应的精准、实时预测。

研究方案：

（1）图神经网络（GNN）模型设计：将桥梁结构抽象为图结构，设计基于图注意力网络（GAT）或图卷积网络（GCN）的图神经网络，捕捉结构的时空相关性。 （2）生成式模型（VAE/GAN）融合：利用变分自编码器（VAE）或生成对抗网络（GAN）对稀疏或缺失的传感器数据进行智能补全和增强，弥补实测数据的不足，生成物理意义完备的全场响应数据。（3）物理信息约束集成：探索将结构力学控制方程作为物理约束项融入模型训练的损失函数中，提升模型的物理合理性和泛化能力。（4）模型训练与优化：利用内容一构建的数据集对 AI 代理模型进行训练和调优，确保模型对关键构件索力预测精

度 $\geq 95\%$ ，对主梁关键截面挠度预测误差 $\leq 5\%$ 。

内容三：多维融合的安全评估指标体系研发与智能病害判断

建立一套多维融合的缆索桥梁结构安全评估指标体系与预警标准，实现对结构早期损伤的智能识别与主动预警。明确“安全评估”特指结构自身性能安全，重点关注由构件材料退化、结构损伤及极端荷载引发的问题。

研究方案：

（1）安全评估指标体系建立：基于内容二的 AI 代理模型预测结果，结合结构力学原理和工程经验，构建包含索力均衡性、主梁挠度、振动特性、材料损伤指数等在内的多维安全评估指标体系。（2）三级递进异常检测机制：状态异常，损伤预警，突发事件告警。（3）智能病害判断与四级预警标准：基于异常检测结果，结合预设的损伤知识库和专家经验，通过 AI 模型进行智能推理，判断可能的病害类型、位置与严重程度。建立“正常-关注-预警-告警”四级预警标准，其中，“关注”级对应状态异常，“预警”级对应损伤预警，“告警”级对应突发事件告警，实现预警响应时间小于 1 分钟。

内容四：软硬件一体化智能监测系统原型开发与工程验证

研制一套软硬件一体化的缆索桥梁智能监测与预警系统原型，并在工程上完成部署与验证，证明其在实际工程环境下的有效性、可靠性与经济性。

研究方案：

（1）低成本简易感知硬件研制：开发集成高精度传感器（如 MEMS 加速度计、振弦式应变计、低成本 GPS），具备低功耗、无线传输、易于安装特点的模块化感知节点，实现对桥梁索力、结构挠度等核心参数的实时采集。（2）云端平台与软件开发：开发一套包含数据采集、存储、AI 模型推理、状态评估、可视化展示、报告生成与预警推送等功能的云端软件平台。（3）与现有监测系统的数据接口与融合策略：设计并实现与依托工程现有传统监测系统的数据接口，研究数据融合策略，使本系统可作为现有系统的“轻量化、智能化的增强与补充”，提高兼容性和应用价值。（4）系统集成与工程示范验证：将研制的感知硬件与云端软件平台进行深度集成。进行部署与并行观测，通过与传统监测数据的比对，全面验证本系统在真实环境下的精度、可靠性、计算效率及经济性。

2. 技术关键

本项目聚焦于缆索桥梁运维阶段的核心痛点，旨在攻克当前技术瓶颈，利用生成式人工智能技术赋能数据处理与模型训练，实现经济、高效的智能监测与灾害预警，为缆索桥梁的智能化养护提供关键突破口。具体而言，拟解决以下三大核心技术问题：

（1）稀疏传感数据下的高精度、全场结构状态重构问题：利用部署于桥梁关键位置的少量（如 10-20 个）传感器采集的稀疏、多模态时间序列数据，通过 AI 模型逆向重构出全桥范围的高维、高保真结构响应场。

（2）时空耦合与物理约束下的结构性能演化预测问题：缆索桥梁的结构响应受空间位置和时间演化的双重影响。构建一个能同时捕捉结构空间拓扑相关性与长期时序依赖性的时空图神经网络模型，并有效融入物理力学约束，以精准预测结构在不同工况下的响应及性能演化趋势。

（3）从数据异常到结构失效模式的智能推理与多级预警问题：建立一个从“传感器数据异常”到“结构部件损伤模式”（如索体锈蚀、疲劳裂纹、支座固结）的智能推理知识图谱，使系统不仅能“知其然”（发现异常），更能“知其所以然”（推断损伤类型、位置与程度），并最终实现“正常-关注-预警-告警”四级安全状态的自动评估与发布。

3. 依托工程（依托工作）

本项目选取禹门口黄河公路大桥作为核心研究背景与工程验证依托。该桥于 2020 年 9 月建成通车，主桥为三跨双塔双索面钢-混结合梁斜拉桥，结构体系采用半漂浮体系，主桥跨径组合为 $245+565+245=1055$ 米，按双向四车道标准设计，桥梁全宽 30.25 米。桥塔高度 168.3 米，拉索采用标准强度 1860MPa 的钢绞线。

禹门口黄河公路大桥属于的典型缆索承重桥梁，其独特的结构形式、复杂的受力特性以及实际运营维护需求，使其成为开展缆索桥梁结构安全评估系统研发、智能预测模型训练、监测预警流程验证的理想工程载体，对实现本项目研究目标具有极强的典型性与代表性。

二、考核指标

1.预期目标

(1) 提出一种物理信息约束的缆索桥梁 AI 代理模型构建新方法，实现对不同工况下缆索桥梁结构响应的精准预测；

(2) 研制一套包含低成本感知硬件和云端智能分析平台的软硬件一体化“缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统”原型；

(3) 利用低成本感知系统原型，开展系统的示范应用，验证其有效性与可靠性，形成一套可复制、可推广的技术方案。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

(1) 模型预测精度：基于稀疏传感数据（传感器数量 ≤ 20 个），AI 代理模型对全桥任意位置拉索的索力预测精度 $\geq 90\%$ ；对主梁跨中关键截面的挠度预测误差 $\leq 5\%$ 。

(2) 计算效率：对于单次输入，AI 代理模型完成一次全桥状态预测的计算时间 ≤ 60 秒。

(3) 预警能力：早期损伤预警：对于 1%的索力损失或等效的早期损伤，系统应在 1 小时内发出“关注”级预警。突发事件告警：对于单根拉索断裂等突发事件，系统应在 1 分钟内发出“告警”级警报。

(4) 系统可靠性：硬件系统在 -20°C 至 40°C 环境下稳定运行，数据传输可靠性 $\geq 99.9\%$ 。

3.经济和社会效益

(1) 经济效益

本研究成果的应用，将为缆索桥梁管养单位带来显著的直接经济效益。通过部署低成本智能监测系统，可大幅降低传统高密度监测方案的初始投入和长期运维成本。通过实现从“定期大修”向“预测性维护”的转变，能够精准定位养护需求，避免不必要的维修开支，延长桥梁使用寿命，预计可为单座桥梁节省 15%-30%的全生命周期养护成本。更重要的是，通过对潜在灾害的提前预警，能够有效规避因桥梁功能中断乃至失效而造成的巨大经济损失。

(2) 社会效益分析

本项目的社会效益尤为突出。首先，它将显著提升陕西省乃至全国缆索桥梁等关键基础设施的安全水平，有效预防和减少桥梁安全事故，为公众出行提供更可靠的保障，维护社会稳定和公共安全。其次，本研究将推动我省在智慧交通、桥梁工程与人工智能交叉领域的科技创新，培养一批高水平复合型人才，提升行业的核心竞争力。

4.成果提供形式

- (1) 编制《缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发》研究报告；
- (2) 完成缆索桥梁安全智能评估与灾害预警系统开发；
- (3) 国内外公开发表学术论文不少于 2 篇（其中核心及以上文章不少于 1 篇）；
- (4) 申请软件著作权 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 年二季度	启动与数据基座构建：制定详细技术方案与研究大纲。完成参数化有限元模型构建，并生成初步的结构响应数据集。
2026 年三季度	代理模型初步研发：基于图神经网络（GNN）与变分自编码器（VAE），研发并训练结构响应预测的轻量化 AI 代理模型。
2026 年四季度	异常检测算法优化：聚焦生成式模型的优化，探索并验证其在结构响应异常实时检测任务中的应用潜力与轻量化特性。
2027 年一季度	算法验证与数据融合：基于深度学习框架完成代理模型优化，提取关键性能特征并与仿真结果对比，验证其异常识别能力。部署简易感知系统，采集实测数据用于模型增强。完成中期研究报告撰写。
2027 年二季度	模型深化与精准评估：研究基于 AI 模型的反向推理方法，提取损伤关键特征，实现对结构性能的精准评估。训练并优化模型以适应多样化服役工况。
2027 年三季度	系统集成与开发：融合深度学习模型与工程规范，研究损伤智能分级方法。完成软硬一体化的缆索桥梁智能监测与轻量化预警系统原型开发与验证。
2027 年四季度	成果转化与凝练：进行研究成果总结，完成学术论文、软件著作权及相关知识产权的撰写与申报工作。
2028 年一季度	项目总结与结题：编制并提交《缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发》项目总报告。准备并完成项目验收与结题工作。

四、项目经费

项目总经费：39.66 万元

交通运输厅补助：19.66 万元

自筹资金：20 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	38.13	19.13
1. 设备费	2.5	1
(1) 购置设备费		
(2) 试制设备费	0.5	
(3) 设备改造与租赁费	2	1
2. 业务费	15.8	8.3
(4) 材料支出		
(5) 测试化验实验加工支出	0.2	0.2
(6) 燃料及动力支出		
(7) 差旅支出	11.1	5.8
(8) 会议支出	1	0.8
(9) 国际合作与交流支出		
(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	1	0.5
3. 劳务费	19.83	9.83
(12) 劳务性支出	19.83	9.83
(13) 咨询专家支出		
(二) 间接费用	1.53	0.53
4. 管理费		
5. 绩效支出	1.53	0.53
合 计	39.66	19.66

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）授权发明专利	
		（2）实用新型 （3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项） 3.发表论文（篇） （1）其中 SCI 索引收录数	1
		（2）其中 EI 索引收录数 （3）其他	2
		4.著作（部）	
		5.制订标准数（项） （1）国际标准	1
		（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	1
		1.填补技术空白数	
		（1）国际 （2）国家	
	其他成果	（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	是
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	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）	
	产业化情况	4. 是否设立科研助理岗位	否
		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	无		

六、承担单位或研究人员分工

本项目由中交第一公路勘察设计研究院有限公司负责完成缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发的研究工作。具体分工如下：黄治炉担任项目负责人，负责项目执行统筹，武星负责项目技术统筹，苏凡和刘群峰负责理论指导，彭程、朱诗敏负责算法开发，霍剑和徐鹏飞负责有限元建模验证，孔晨阳、仝波负责现场验证，付诚俊和张鸿宇负责报告编制。

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）：						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作
1	黄治炉	1977.09	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高级/副总经理	道路运输	项目负责
主要研究人员						
2	武星	1980.02	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高级/中心主任	桥梁工程	技术统筹
3	彭程	1986.06	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高级/中心副主任	景观工程	技术研发
4	苏凡	1981.09	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高级/中心副主任	桥梁工程	技术研发
5	刘群峰	1980.01	西安科技大学	副高级	桥梁工程	技术研发

6	朱诗敏	1996.11	中交第一公路勘察设计院有限公司	中级	桥梁工程	技术研发	朱诗敏
7	霍剑	1997.11	中交第一公路勘察设计院有限公司	中级	桥梁工程	技术研发	霍剑
8	徐鹏飞	1993.05	中交第一公路勘察设计院有限公司	中级	桥梁工程	技术研发	徐鹏飞
9	张鸿宇	1994.04	中交第一公路勘察设计院有限公司	中级	结构工程	技术研发	张鸿宇
10	孔晨阳	1998.03	中交第一公路勘察设计院有限公司	中级	桥梁工程	技术研发	孔晨阳
11	全波	1988.12	中交第一公路勘察设计院有限公司	副高级	桥梁工程	技术研发	全波
12	付诚俊	1989.12	中交第一公路勘察设计院有限公司	中级	桥梁工程	技术研发	付诚俊

八、信息表

项目合同编号	25-44K	密级	/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部				
项目名称	缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发								
项目实施所在地	陕西		起止年限		年 月至 年 月				
总 经 费	39.66 万元		厅 拨		19.66 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（区、市）					代码		
	通讯地址	陕西省西安市雁塔区科技四路 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								
	2								
	3								
项目负责人	姓 名	黄治炉		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1977.09	
	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				电子邮箱				
项目联系人	姓名	武星			性别		女		
	联系电话	13572471986			电子邮箱		420650452@qq.com		
项目组人数	12	高级	6	中级	6	初级	0	其他	0
主要研究内容 (100 字以内)	(1) 缆索桥梁响应数据集构建 (2) 基于 GNN 与 VAE 的缆索桥梁 AI 代理模型训练与优化 (3) 多维融合的安全评估指标体系研发与智能病害判断 (4) 软硬件一体化智能监测系统原型开发与工程验证								
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：

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）

张喆

（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）

王学军印

2020年3月27日

项目负责人：（签字）

高焰

（公章）

电 话：

财务负责人：（签字）

李静

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

陕西交通科技项目科研诚信 承诺书

88 285

本单位承诺在科研项目实施过程中，遵守科学道德和科研诚信要求，严格执行《陕西省交通运输厅科研项目管理办
法》的规定和科技项目合同书约定，保证所提交材料的真实
性，确保专款专用。如违背以上承诺，愿意承担相关责任，
并同意主管部门将相关失信信息记入公共信用信息系统。



项目承担单位：（盖章）

项目负责人：黄岩

年 月 日

项目编号：25-44K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发

申请单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

联系人：武星

电话：13572471986

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 国家政策与行业发展趋势	1
1.2 陕西省缆索桥梁发展现状与监测需求分析	2
1.3 缆索桥梁结构特点与典型病害	2
1.4 现有监测技术的瓶颈与研究的迫切性	3
1.5 生成式 AI 带来的技术突破机遇	4
二、前期科研及工作基础	5
2.1 国内外研究现状	5
2.2 项目前期科研及现有工作条件	10
2.3 参考文献	12
三、实施方案.....	15
3.1 拟解决的关键问题	15
3.2 主要研究内容及实施方案	16
3.3 技术路线	19
3.4 有关经济技术指标	21
四、项目承担单位及参加单位概况	22
4.1 单位概况	22
4.2 技术力量及人员构成	23
4.3 各自承担的主要工作	24
4.4 项目主要负责人情况	24

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	25
5.1 依托工程（工作）概况	25
5.2 投资来源	25
5.3 工程进度与项目科研进度的配合	25
5.4 组织管理形式	25
六、项目经费估算及资金筹措情况	26
七、项目绩效指标	27
八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益	29
8.1 项目预期目标	29
8.2 提交的研究成果及其形式	29
8.3 经济、社会、环境效益分析	30
九、其它需要说明的问题	30
十、申请单位意见	31
附件.....	32
附件 1 大纲评审意见	32
附件 2 专家个人审查意见表	33
附件 3 评审专家委员会名单	38
附件 4 专家意见处理表	39

一、项目研究的背景和必要性

1.1 国家政策与行业发展趋势

随着我国交通强国战略的深入实施，公路桥梁作为国家交通网络的生命线工程，其安全运营保障被提升至前所未有的战略高度。根据交通运输部最新统计公报，我国在役公路桥梁已逾百万座，其中，以斜拉桥、悬索桥为代表的缆索承重桥梁，因其卓越的跨越能力，已成为跨江、跨海、越谷的首选桥型，在路网中扮演着关键节点角色。

根据交通运输部《2024 年交通运输行业发展统计公报》，我国在役公路桥梁总量已突破 110 万座，规模庞大，缆索承重等特殊结构桥梁作为公路交通网络的关键节点，数量持续增长。在行业政策引导方面，《关于进一步提升公路防灾抗灾能力的指导意见》明确要求强化科研攻关与技术支撑，完善监测预警体系，加速公路防灾抗灾工作向智能化、信息化、现代化转型；2030 年底实现高速公路、普通国道桥梁结构监测全覆盖。国家层面系列政策密集出台，充分表明推进桥梁结构监测智能化升级、筑牢长大桥梁安全防控体系，已成为公路交通领域高质量发展的核心重点。

近年来，国家层面政策频出，为桥梁监测智能化转型指明了方向。《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（2024—2030 年）》明确要求，到 2025 年底前，需全面完成对缆索承重等特殊结构桥梁的监测系统建设。这标志着，针对缆索桥梁的高效、智能、经济的安全保障技术，已从“锦上添花”变为“刚性需求”，市场空间巨大，技术需求迫切。

1.2 陕西省缆索桥梁发展现状与监测需求分析

陕西省地处中国内陆腹地，地形地貌复杂，山地、高原广布，黄河、汉江等水系纵横。为克服地理障碍，实现区域互联互通，省内已建及在建大量缆索桥梁。这些桥梁不仅面临日益增长的交通荷载，更承受着剧烈温差、大风、材料老化等多重不利因素的长期考验，其安全风险与养护压力并存。

近年来，随着“米”字型高铁网和“三纵十二横”高速公路网的加速构建，斜拉桥、悬索桥等各类缆索结构桥梁已建及在建项目众多，成为支撑区域交通互联互通、助力经济社会发展的关键基础设施。然而，这些桥梁大多面临着复杂的地质条件、剧烈的温差变化以及日益增长的交通荷载等多重考验，对其长期服役安全提出了严峻挑战。

结合省内交通发展需求，陕西省相关“十四五”规划明确提出，聚焦交通基础设施提质升级，重点提升在役桥梁结构服役性能，加快推广桥梁结构安全监测与预警技术，深化长大桥梁长期健康观测研究，着力构建适配区域地理特征的桥梁安全保障体系。因此，本项目立足陕西，旨在研发一套适配本省地理环境与桥梁特点的智能监测系统，不仅是响应国家号召，更是服务地方交通建设、保障人民生命财产安全的具体行动，具有极强的现实意义和示范价值。

1.3 缆索桥梁结构特点与典型病害

从缆索桥梁自身结构特性来看，其以缆索为主要受力构件，主要包括斜拉桥与悬索桥两大类型，具有跨度大、刚度小、自重轻、结构柔、非线性显著等力学特征。其整体受力依赖主缆、斜拉索、索塔、

锚碇及加劲梁的协同工作，对风荷载、温度变化、车辆冲击及腐蚀环境高度敏感，是典型的对安全监测高度依赖的长大桥梁结构。

从病害特征来看，缆索体系极易发生以下典型损伤：

(1) 缆索系统损伤：拉索/主缆钢丝锈蚀、疲劳断裂、护套开裂老化、锚固端渗水腐蚀、索力松弛与不均衡等。

(2) 结构动力问题：在特定风场或荷载作用下，易出现涡激振动、风雨激振、拉索疲劳振动等，影响行车舒适性与结构安全。

(3) 关键节点损伤：加劲梁与索塔的连接区域、主梁节段连接处、支座等部位，易出现应力集中、疲劳裂缝、支座滑移或功能退化。

上述病害往往具有隐蔽性强、发展快、后果严重的特点，常规的周期性人工检测难以实时发现和有效预警，对桥梁的安全运营构成巨大威胁。

1.4 现有监测技术的瓶颈与研究的迫切性

缆索桥梁多为大跨径结构，常处于路网关键节点，其结构体系复杂，灾后修复难度大、周期长。因此，提升缆索桥梁在灾前预警、灾害防御和应急响应方面的技术能力，对保障交通生命线安全畅通具有重要意义。近年来，公路和桥梁的意外灾害事故频发，直接威胁到人民和社会的公共安全。在交通运输部和安全应急管理部门的督导下，桥梁结构健康监测系统将越来越多地应用于关键特大型桥梁。这些监测系统能够实时检测、分析和预测桥梁状况，为桥梁的预防性维护和灾后恢复提供科学依据，提高了桥梁安全监测的准确性和效率。但传统的桥梁结构安全评估方法，包括人工定期检测和桥梁健康监测

系统，不仅存在检测精度低、传感器种类繁多、系统维护成本高的问题，难以短期内实现高速公路和普通国道缆索桥梁的全覆盖；还可能因检测周期长、数据丢失和数据误判而导致潜在的安全隐患，难以实现实时安全评估。此外，传统方法在面对复杂多变的实际环境时，往往无法精确预测结构的真实状态，难以应对各种突发情况和环境变化。

传统的桥梁结构安全评估方法，主要依赖人工定期检测和基于高密度传感器的健康监测系统。这些方法存在显著瓶颈：

(1) 成本高昂，难以普及：高密度传感器（如光纤光栅、GPS等）的采购、布设和长期维护成本极高，导致其应用范围仅限于少数超大型桥梁，无法在省域范围内大规模推广。

(2) 数据稀疏与信息丢失：受成本和技术限制，测点布设必然是稀疏的，无法捕捉结构完整的响应场。同时，传感器故障、数据传输中断等问题常导致数据不完整，影响评估的准确性。

(3) 响应滞后，预警能力弱：传统监测系统多为“被动式”数据采集，缺乏智能分析内核，难以从海量数据中实时识别早期、微弱的损伤信号，导致安全评估存在显著的“响应滞后”，预警能力不足。

1.5 生成式 AI 带来的技术突破机遇

传统监测技术的瓶颈，本质上是“信息物理鸿沟”问题——即我们无法用有限的物理传感器，完整、精确地感知到结构完整的物理状态。而以生成式对抗网络（GAN）、变分自编码器（VAE）等为代表的生成式 AI（GAI）技术，以及图神经网络（GNN）、物理信息神经网络

(PINN) 等前沿算法，为弥合这一鸿沟提供了革命性工具。

然而，GAI 在缆索桥梁安全监测领域的应用仍处初级阶段，亟需开展系统性研究，开发出能够融合领域知识、适配工程实际的智能评估与预警系统。因此，本项目聚焦于缆索桥梁运维的核心痛点，致力于突破传统监测技术的瓶颈，其成功实施对保障国家及陕西省重要基础设施安全具有显著的战略意义与应用价值。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

结构健康监测 (SHM) 通过早期识别潜在问题，实现预警功能，确保基础设施的安全性、可靠性并延长其使用寿命^[1]。结构健康监测 (SHM) 领域正经历着从传统信号处理向数据驱动、人工智能范式的深刻变革。但是，基于激光位移计、加速度计、应变计等多种传感器的传统结构健康监测系统，由于需要大量传感器，导致部署成本和维护成本高昂；考虑到传统结构健康监测系统的数据收集过程复杂且昂贵，数据稀缺和信息丢失也是 SHM 领域常见的问题^[2]。

在数据驱动损伤识别方面，早期研究多集中于利用机器学习算法（如 SVM、决策树）对提取的损伤敏感特征进行分类。近年来，以卷积神经网络 (CNN)、循环神经网络 (RNN) 为代表的深度学习模型，凭借其自动特征提取能力，在振动信号分析、损伤定位等方面展现出巨大潜力。然而，这些监督学习方法高度依赖于海量的、带有清晰标签的损伤数据，而这在实际工程中极难获取，构成了其应用的主要障碍。

传统的监测方法通常依赖于人工规则和经验, 缺乏对结构真实状态的精准理解, 很大程度上依赖专家知识和评估者的主观经验^[3]。这些方法在处理复杂的工程问题时存在局限性, 难以适应不同类型缆索结构和复杂的实际服役环境。同时, SHM 涉及大量数据处理, 如数据收集、预处理和分析。深度学习技术擅长从数据中自动学习和提取特征, 无需人工干预, 并能在复杂数据结构中展现出卓越的学习能力^[4]。可以预见, 深度学习技术的发展将对 SHM 领域带来深远影响。当前, 基于人工智能的 SHM 系统在全球范围内逐渐从实验阶段向实际工程应用过渡。欧美国家已经在桥梁和建筑结构监测技术方面取得了显著进步, 在诸如图神经网络、生成对抗网络 (GAN) 等前沿生成式人工智能领域保持领先。与此同时, 我国在缆索桥梁监测领域虽有一定研究进展, 但在实时智能监测与轻量化灾害预警系统上仍存在不足, 亟需突破技术瓶颈。

近年来, 深度学习在结构设计和工程优化领域展现出了强大潜力, 为各类复杂系统的性能提升提供了新方法和新思路。例如, Liu 等^[5]研究了构件布局和结构拓扑的集成优化, 以提高谐波加速激励下多组件结构系统的动态性能, 其通过数值算例和振动试验验证了优化程序的有效性及其工程应用潜力。Mall 等^[6]提出了一种名为双向自动编码器的深度学习 (DL) 架构, 利用网格搜索进行了纳米光子超表面设计, 在多个超表面拓扑空间的优化中表现出色。Renaud Danhaiv^[7]将条件变分自动编码器整合到性能驱动的设计探索框架中, 通过采样算法生成有意义的设计数据集, 并在低维潜在空间中进行训练, 使设

计师能够直观探索并获取多样性的高性能设计方案。基于此, Yang 等^[8]进一步提出了一种新颖的分步生成式学习优化框架, 结合变分自编码器和多层感知机生成真实目标分布, 并通过主动学习和迁移学习技术提高准确性和效率, 通过对风力涡轮机翼型气动形状优化的验证显示了该框架的高效、准确和灵活性。

此外, Mirra 等^[9]通过对比人工定义和 AI 生成的设计空间在简单优化应用中的表现, 发现变分自编码器通过学习数据集来生成设计空间, 在优化中产生更多样化的设计输出且响应更好。Bucher 等^[10]提出了一种基于深度学习生成设计的工作流程, 输入一组结构性能和特征作为输入, 输出一组完整的设计参数; 通过不同案例研究表明, 该方法可有效利用预训练模型, 比遗传算法表现更优越。2024 年, Li Zheng 等^[11]基于 GNN 和 VAE 提出了一种生成式结构分析和预测框架, 可用于优化桁架结构超材料元胞的力学性能, 通过构建降维的潜在空间表示桁架结构的线性和非线性力学行为, 实现了原胞结构性优化设计。以上研究论证了生成式人工智能在工程设计中的广泛应用潜力, 不仅能够提高设计效率, 还为工程优化设计提供了新思路。

在结构健康监测 (SHM) 领域, 深度学习展现了卓越的效果。Rajeev 等^[12]提出了一种基于奇异谱分析 (SSA) 和自回归 (AR) 模型相结合的新方法, 用于识别钢筋混凝土梁柱节点的损伤。Andrea 等^[13]利用一类支持向量机 (OC-SVM) 从变分自编码器 (VAE) 重构的信号中提取损伤敏感特征, 以区分不同的健康状况, 提出了一种基于数据驱动的半监督结构异常检测方法, 可识别九种损伤情景下的钢结构试

件。胡玉柳等^[14]提出了一种结合主成分分析（PCA）和自动编码器的模型，利用数据驱动方法进行结构异常异常检测，并在实际桥梁健康监测系统中验证了其有效性。Seyedomid 等^[21]提出一种基于深度生成贝叶斯优化(DGBO)的并行优化解决方案，其在相同的函数求值次数下优于遗传算法，适用于解决大型民用基础设施中传感器优化配置的高维度挑战。董力豪等^[22]构建了基于卷积神经网络的趋于滑坡预警模型。

骆剑彬等^[15]开发了一种基于卷积神经网络（CNN）和迁移学习的结构损伤识别方法，该方法结合多传感器数据融合技术，在不同噪声水平下精确识别结构损伤的位置和程度，并通过迁移学习进一步提高模型的识别精度。李行等^[16]提出了一种基于图卷积神经网络（GCN）的结构损伤识别方法，通过将一维振动数据转换为图数据后再使用 GCN 提取特征，该方法在高噪声水平和样本数量较少的情况下仍能保持高识别精度，尤其在 60%噪声水平下仍能达到 98.39%的识别准确率。

唐和生等^[17]研究了结合数字孪生和深度学习的结构损伤识别方法，通过深度学习模型从大量传感器数据中学习并提取损伤特征，并结合数字孪生技术实现了对结构损伤的高精度识别和预测。尹爱军等^[18]提出了一种基于变分自编码器（VAE）的轴承健康状态评估方法，通过构建 VAE 模型从振动信号中自动提取特征，并对不同健康状态进行分类。Anaissi 等^[19]则提出了一种基于自编码器深度神经网络(ADNN)重构概率的多目标变分自编码器(MO-VAE)多路感知数据智

能基础设施损伤检测与诊断方法，能够在无监督情况下准确捕获损伤位置并评估不同级别的损伤程度。

为解决数据稀缺问题，生成式 AI 提供了两条路径。一是数据增强，利用 GAN、VAE 等模型学习健康状态数据的分布，生成大量“伪健康”数据，从而使异常检测模型（如 One-Class SVM）的训练更为鲁棒。二是数据修复与补全，针对传感器失效或数据丢失问题，利用生成模型进行高保真度的数据插值与重建。Zhou 等^[20]提出了一种基于生成式对抗网络（GAN）和变分自编码器（VAE）的异常检测模型，通过分步训练获取同时具备重构和判别损失的编码器模型，能够准确检测异常信号，并对大坝进行定量综合评价。上述研究已证实了数据增强方法的有效性。

以上研究表明，深度学习和生成式人工智能技术为结构健康监测提供了新的思路，展现了巨大的优势。通过生成式人工智能的数据增强技术，可以弥补传统监测数据稀疏和信息丢失的难题，再结合深度学习技术，可以仅凭少量的传感器便可达到高效监测效果，从而节省了 SHM 的部署和维护成本，未来有望成为结构监测领域强有力的助手。

当前，深度学习和生成式人工智能在缆索桥梁健康监测领域的工程应用相对较少，但随着《进一步提升公路防灾抗灾能力的指导意见》和《进一步推动公路桥梁隧道结构监测系统工作实施方案（2024-2030 年）》的发布，加强科研攻关和技术指导，强化监测预警，推动公路防灾抗灾向智能化、信息化、现代化方向转型已成为紧迫需求。因此，

本研究旨在研发深度学习方法在缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统，以填补当前相关研究的空白。结合《实施方案》的明确目标，以及缆索承重、高大跨、服役年限较长的重要桥梁结构监测系统建设的要求，本研究将针对缆索结构的特殊性，借鉴深度学习在工程结构领域的应用经验，提出一种创新性的、适用于实际工程问题的索力优化和反演检测框架，以实现缆索桥梁的智能化监测和预警，助力实现2030 年底全面覆盖的国家公路桥梁和隧道结构监测体系的目标。

2.2 项目前期科研及现有工作条件

本团队在缆索桥梁工程领域拥有深厚的项目积淀，深度参与了多座大跨径缆索承重桥梁的设计与研究工作，例如滹沱河特大桥（斜拉桥）、泊水公园特大桥（拱桥）、龙泉大桥（拱桥）、拉萨河特大桥（矮塔斜拉桥）以及川杨河大桥（斜拉桥）等。这些重大工程实践，使团队积累了涵盖复杂地形、恶劣环境等多种挑战性条件下的桥梁结构设计、施工控制及运营期健康监测的宝贵经验。

在长期项目历练中，团队形成了一套科学高效、兼具适应性的桥梁设计方法。在施工阶段，团队积极参与关键工序如斜拉索张拉过程的索力控制，确保成桥内力符合设计意图。桥梁投入运营后，项目团队通过运用先进的监测技术和数据分析方法，对缆索桥梁的健康状况进行实时监测与评估，确保及时发现并处理潜在的安全问题。项目团队还积极参与桥梁的维护保养工作，为桥梁的长期安全稳定运行提供了坚实的技术支撑。

面对行业智能化转型趋势，团队积极推动人工智能、大数据与传

统土木工程的深度融合。前期工作中，团队已系统梳理并掌握了智能设计与运营的关键技术，特别是在数据驱动设计、决策等方面进行了深入探索。本团队通过将桥梁结构抽象为一个图（节点为传感器或关键截面，边为构件连接关系），GNN 能够学习并预测在特定荷载下各节点的响应，从而构建高效的代理模型。本团队的前期研究 [Engineering Structures 2025] 已初步验证了 GNN 在索力优化中的可行性，并初步构建了索结构监测与预警系统的原型。

这些前期工作与技术储备，不仅体现了团队对行业前沿技术的紧密跟踪与卓越的工程实践能力，更为本项目成功实施奠定了坚实的技术基础，确保了项目研究内容的先进性、技术路线的可行性及最终成果的实用价值。

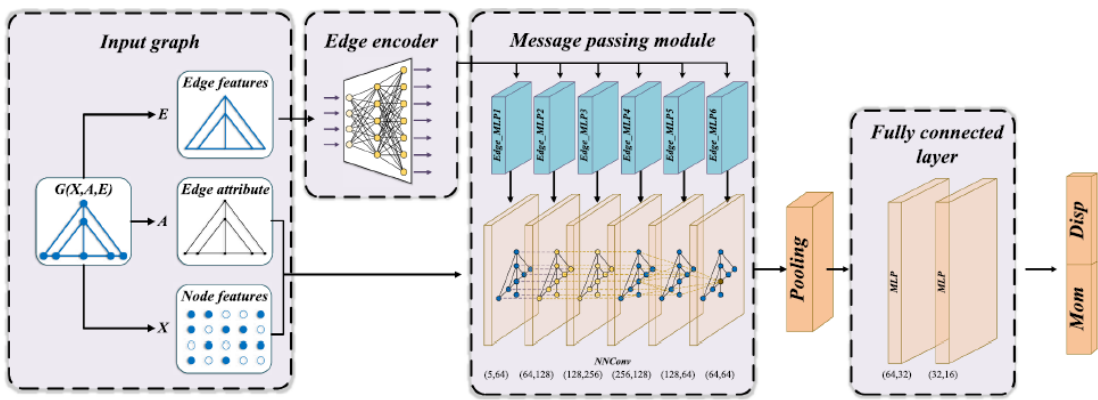


图 1 基于图神经网络的斜拉桥索力优化 (Engineering Structures 2025)

然而，现有研究仍存在以下局限，也正是本项目的突破方向：(1) 模型融合不足：现有研究多采用单一模型，GNN 长于空间相关性，而 RNN（如 LSTM）长于时间序列依赖性。如何将二者有效融合，构建一个能同时捕捉时空依赖特性的混合模型，是提升预测精度的关键。(2) 物理知识融入不足：多数 AI 模型仍是“黑箱”，其预测结

果可能违背基本的物理力学定律。近年来兴起的物理信息神经网络 (PINN) 方法, 通过将结构力学控制方程作为约束融入网络训练, 为模型赋予了物理先验知识, 是提升模型泛化能力和可解释性的重要方向。(3) 从识别到评估的跨越不足: 多数研究停留在识别有无损伤的二元判断, 而对损伤的程度量化、剩余寿命预测、安全等级评估等决策层面的研究尚浅, 难以直接指导养护决策。

因此, 本项目将在现有研究基础上, 重点突破时空融合混合代理模型构建、物理知识约束下的 AI 模型训练、以及从损伤识别到多级安全状态评估等关键科学问题。

2.3 参考文献

- [1] Malekzadeh M, Atia G, Catbas F N. Performance-based structural health monitoring through an innovative hybrid data interpretation framework[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(3): 287-305.
- [2] Luleci F, Catbas F N. A brief introductory review to deep generative models for civil structural health monitoring[J]. AI in Civil Engineering, 2023, 2(1): 9.
- [3] Vagnoli M, RemenYTE-Prescott R, Andrews J. Railway bridge structural health monitoring and fault detection: State-of-the-art methods and future challenges[J]. Structural Health Monitoring, 2018,17(4): 971-1007.
- [4] Janiesch C, Zschech P, Heinrich K. Machine learning and deep

- learning[J]. *Electronic Markets*, 2021, 31(3): 685-695.
- [5] Liu T, Zhu J H, Zhang W H, et al. Integrated layout and topology optimization design of multi-component systems under harmonic base acceleration excitations[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, 59(4): 1053-1073.
- [6] Mall A, Patil A, Tamboli D, et al. Fast Design of Plasmonic Metasurfaces Enabled by Deep Learning[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(49): 49LT01.
- [7] Danhaive R, Mueller C T. Design subspace learning: Structural design space exploration using performance-conditioned generative modeling[J]. *Automation in Construction*, 2021, 127: 103664.
- [8] Yang S, Lee S, Yee K. Inverse design optimization framework via a two-step deep learning approach: application to a wind turbine airfoil[J]. *Engineering with Computers*, 2023, 39(3): 2239-2255.
- [9] Mirra G, Pugnale A. Comparison between human-defined and AI-generated design spaces for the optimisation of shell structures[J]. *Structures*, 2021, 34: 2950-2961.
- [10] Bucher M J J, Kraus M A, Rust R, et al. Performance-Based Generative Design for Parametric Modeling of Engineering Structures Using Deep Conditional Generative Models[J]. *Automation in Construction*, 2023, 156: 105128.
- [11] Zheng L, Karapiperis K, Kumar S, et al. Unifying the design space

and optimizing linear and nonlinear truss metamaterials by generative modeling[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 7563.

[12] Rajeev A, Pamwani L, Ojha S, et al. Adaptive Autoregressive Modelling Based Structural Health Monitoring of RC Beam-Column Joint Subjected to Shock Loading[J]. Structural Health Monitoring, 2023, 22(2): 1049-1068.

[13] Pollastro A, Testa G, Bilotta A, et al. Semi-Supervised Detection of Structural Damage Using Variational Autoencoder and a One-Class Support Vector Machine[J]. IEEE Access, 2023, 11: 67098-67112.

[14] 胡玉柳. 基于模型与数据驱动的结构健康监测异常检测[J].公路, 2023, 68(3): 278-281.

[15] 骆剑彬, 刘越生, 姜绍飞, 等. 基于卷积神经网络和迁移学习的结构损伤识别[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2022, 50(4):546-552.

[16] 李行, 骆勇鹏, 郭旭, 等. 强噪声小样本条件下基于图卷积神经网络的结构损伤识别[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(3):52-60.

[17] 唐和生, 王泽宇, 陈嘉缘. 基于数字孪生和深度学习的结构损伤识别[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 110-121.

[18] 尹爱军, 王昱, 戴宗贤, 等. 基于变分自编码器的轴承健康状态评估[J]. 振动.测试与诊断, 2020, 40(5): 1011-1016+1030.

[19] Anaissi A, Zandavi S M, Suleiman B, et al. Multi-objective variational autoencoder: an application for smart infrastructure maintenance[J]. Applied Intelligence, 2023, 53(10): 12047-12062.

[20] Zhou Y, Shu X, Bao T, et al. Dam safety assessment through data-level anomaly detection and information fusion[J]. Structural Health Monitoring, 2023, 22(3): 2002-2021.

[21] Sajedi S, Liang X. Deep generative Bayesian optimization for sensor placement in structural health monitoring[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37(9): 1109-1127.

[22] 董力豪, 刘艳辉, 黄俊宝, et al. 基于卷积神经网络的福建省区域滑坡灾害预警模型[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1):145-153.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

本项目聚焦于缆索桥梁运维阶段的核心痛点,旨在攻克当前技术瓶颈,利用生成式人工智能技术赋能数据处理与模型训练,实现经济、高效的智能监测与灾害预警,为缆索桥梁的智能化养护提供关键突破口。具体而言,拟解决以下三大核心技术问题:

(1) 稀疏传感数据下的高精度、全场结构状态重构问题:利用部署于桥梁关键位置的少量(如 10-20 个)传感器采集的稀疏、多模态时间序列数据,通过 AI 模型逆向重构出全桥范围的高维、高保真结构响应场。

(2) 时空耦合与物理约束下的结构性能演化预测问题:缆索桥梁的结构响应受空间位置和时间演化的双重影响。构建一个能同时捕捉结构空间拓扑相关性与长期时序依赖性的时空图神经网络模型,并有效融入物理力学约束,以精准预测结构在不同工况下的响应及性能

演化趋势。

(3) 从数据异常到结构失效模式的智能推理与多级预警问题：建立一个从“传感器数据异常”到“结构部件损伤模式”（如索体锈蚀、疲劳裂纹、支座固结）的智能推理知识图谱，使系统不仅能“知其然”（发现异常），更能“知其所以然”（推断损伤类型、位置与程度），并最终实现“正常-关注-预警-告警”四级安全状态的自动评估与发布。

3.2 主要研究内容及实施方案

为解决上述问题，本项目拟设置四个紧密衔接的研究内容，这些工作包紧密围绕构建基于多参数融合与生成式 AI 的缆索桥梁结构安全状态智能评估模型这一核心目标展开：

内容一：缆索桥梁响应数据集构建

构建覆盖多种桥型、荷载及损伤场景的高保真结构响应数据库，为 AI 模型训练提供高质量数据。

研究方案：

(1) 参数化高保真有限元模型库构建：选取以禹门口黄河大桥为代表的斜拉桥（含单塔、双塔）和典型悬索桥，利用有限元软件，构建精细化的三维参数化有限元模型，精准纳入几何尺寸、材料属性、索力初值、边界条件等核心参数。(2) 多工况、多损伤场景大数据集生成：系统性模拟桥梁在多种环境荷载、交通荷载及不同位置、不同程度的结构损伤下的结构响应，生成包含索力、位移、应变等多维度响应的大数据集。(3) 数据管理与预处理：对生成数据进行清洗、标

准化、归一化等预处理，并建立高效的数据管理机制。

内容二：基于 GNN 与 VAE 的缆索桥梁 AI 代理模型训练与优化

开发并训练一种基于稀疏传感数据、融合生成式 AI 与图神经网络的轻量化智能预测模型，实现对缆索桥梁结构整体响应的精准、实时预测。

研究方案：

(1) 图神经网络 (GNN) 模型设计：将桥梁结构抽象为图结构，设计基于图注意力网络 (GAT) 或图卷积网络 (GCN) 的图神经网络，捕捉结构的时空相关性与时空演化特性。(2) 生成式模型 (VAE/GAN) 融合：利用变分自编码器 (VAE) 或生成对抗网络 (GAN) 对稀疏或缺失的传感器数据进行智能补全和增强，弥补实测数据的不足，生成物理意义完备的全场响应数据。(3) 物理信息约束集成：探索将结构力学控制方程作为物理约束项融入模型训练的损失函数中，提升模型的物理合理性和泛化能力。(4) 模型训练与优化：利用内容一构建的数据集对 AI 代理模型进行训练和调优，确保模型对关键构件索力预测精度 $\geq 95\%$ ，对主梁关键截面挠度预测误差 $\leq 5\%$ 。

内容三：多维融合的安全评估指标体系研发与智能病害判断

建立一套多维融合的缆索桥梁结构安全评估指标体系与预警标准，实现对结构早期损伤的智能识别与主动预警。明确“安全评估”特指结构自身性能安全，重点关注由构件材料退化、结构损伤及极端荷载引发的问题。

研究方案：

(1) 安全评估指标体系建立：基于内容二的 AI 代理模型预测结果，结合结构力学原理和工程经验，构建包含索力均衡性、主梁挠度、振动特性、材料损伤指数等在内的多维安全评估指标体系。(2) 三级递进异常检测机制：状态异常，损伤预警，突发事件告警。(3) 智能病害判断与四级预警标准：基于异常检测结果，结合预设的损伤知识库和专家经验，通过 AI 模型进行智能推理，判断可能的病害类型、位置与严重程度。建立“正常-关注-预警-告警”四级预警标准，其中，“关注”级对应状态异常，“预警”级对应损伤预警，“告警”级对应突发事件告警，实现预警响应时间小于 1 分钟。

内容四：软硬件一体化智能监测系统原型开发与工程验证

研制一套软硬件一体化的缆索桥梁智能监测与预警系统原型，并在工程上完成部署与验证，证明其在实际工程环境下的有效性、可靠性与经济性。

研究方案：

(1) 低成本简易感知硬件研制：开发集成高精度传感器（如 MEMS 加速度计、振弦式应变计、低成本 GPS），具备低功耗、无线传输、易于安装特点的模块化感知节点，实现对桥梁索力、结构挠度等核心参数的实时采集。(2) 云端平台与软件开发：开发一套包含数据采集、存储、AI 模型推理、状态评估、可视化展示、报告生成与预警推送等功能的云端软件平台。(3) 与现有监测系统的数据接口与

融合策略：设计并实现与依托工程现有传统监测系统的数据接口，研究数据融合策略，使本系统可作为现有系统的“轻量化、智能化的增强与补充”，提高兼容性和应用价值。（4）系统集成与工程示范验证：将研制的感知硬件与云端软件平台进行深度集成。进行部署与并行观测，通过与传统监测数据的比对，全面验证本系统在真实环境下的精度、可靠性、计算效率及经济性。

3.3 技术路线

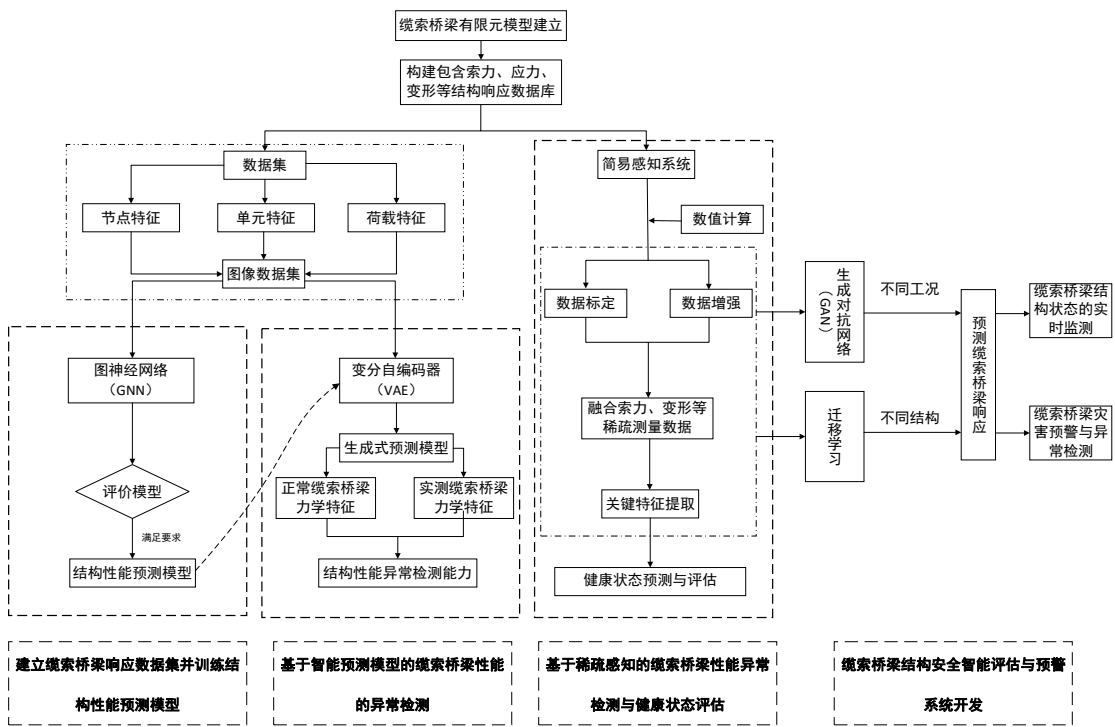


图 1 技术路线图

本项目技术路线如下图所示，遵循“数据基座构建 -> 核心算法研发 -> 决策智能提升 -> 系统集成与应用”的层层递进逻辑，具体分为四个阶段，对应四个研究内容，各阶段环环相扣，并行与串行结合，确保研究高效推进。

阶段一（第 1-6 月）：数据基座构建

- 参数化有限元建模（斜拉桥、悬索桥）
- 多工况、多损伤场景仿真
- 缆索桥梁多维结构响应数据集

阶段二（第 7-15 月）：核心算法研发与决策智能提升

- GNN 模型设计与 STGNN 构建
- VAE/GAN 数据补全与增强
- 物理信息约束融入
- AI 代理模型训练与优化
- 多维安全评估指标体系建立
- 三级异常检测机制（状态异常、损伤预警、突发事件告警）
- 智能病害判断与四级预警标准（正常-关注-预警-告警）

阶段三（第 16-21 月）：系统集成与部署

- 低成本简易感知硬件研制
- 云端软件平台开发
- 与现有监测系统接口设计
- 软硬件一体化系统集成与联调

阶段四（第 22-24 月）：工程示范与成果总结

- 传感器部署与并行观测

- 系统性能评估与验证
- 科研论文、专利、软著、技术指南
- 项目研究总报告

3.4 有关经济技术指标

(1) 技术指标（量化、可考核）

①模型预测精度：基于稀疏传感数据（传感器数量 ≤ 20 个），AI 代理模型对全桥任意位置拉索的索力预测精度 $\geq 90\%$ ；对主梁跨中关键截面的挠度预测误差 $\leq 5\%$ 。

②计算效率：对于单次输入，AI 代理模型完成一次全桥状态预测的计算时间 ≤ 60 秒。

③预警能力：早期损伤预警：对于 1%的索力损失或等效的早期损伤，系统应在 1 小时内发出“关注”级预警。突发事件告警：对于单根拉索断裂等突发事件，系统应在 1 分钟内发出“告警”级警报。

④系统可靠性：硬件系统在 -20°C 至 40°C 环境下稳定运行，数据传输可靠性 $\geq 99.9\%$ 。

(2) 经济指标

①成本效益：与传统高密度光纤光栅监测方案相比，本系统在保证同等监测覆盖效果的前提下，其硬件采购、部署及 20 年全生命周期运维的综合成本预计可降低 20%以上。

②风险减损价值：通过提前预警，将重大维修转变为预防性维

护，预计可为单座桥梁节省维修费用 15%-30%。通过有效规避灾难性事故，其潜在的经济社会效益难以估量。

③养护模式革新：推动桥梁养护从“定期巡检”向“按需维修”的智能模式转变，预计可减少 20%以上的非必要人工巡检次数，显著提升养护决策效率和科学性。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

本项目依托单位中交第一公路勘察设计研究院有限公司（以下简称“中交一公院”）始建于 1952 年，现为中国交通建设股份有限公司旗下核心企业，是我国交通工程勘察、设计与咨询领域的国家级骨干单位。公司具备涵盖工程勘察综合类甲级、工程设计行业甲级、工程咨询甲级等在内的 30 余项高等级资质，并拥有极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室、博士后科研工作站以及陕西省公路交通防灾减灾重点实验室等多个国家级与省部级科研平台，构建了完善的科技创新体系。

在科研积累方面，中交一公院持续承担国家科技支撑计划、国家重点研发计划等重大科研项目百余项，荣获国家科技进步奖多项，获授权专利 200 余项。公司配备有先进的数据采集系统、X 射线探伤仪等科研实验设备，能够为本项目在缆索桥梁结构响应分析、损伤识别与安全预警等方面的研究提供坚实的理论、技术及装备支撑。

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
黄治炉	一公院	男	1977.09	正高级	道路运输	项目负责
武星	一公院	女	1980.02	正高级	桥梁工程	技术统筹
彭程	一公院	女	1986.06	副高级	景观工程	技术研发
苏凡	一公院	男	1981.09	正高级	桥梁工程	技术研发
刘群峰	西安科技大学	男	1980.01	副高级	桥梁工程	技术研发
朱诗敏	一公院	男	1996.11	中级	桥梁工程	技术研发
霍剑	一公院	男	1997.11	中级	桥梁工程	技术研发
徐鹏飞	一公院	男	1993.05	中级	桥梁工程	技术研发
张鸿宇	一公院	男	1994.04	中级	结构工程	技术研发
孔晨阳	一公院	女	1998.03	中级	桥梁工程	技术研发
全波	一公院	男	1988.12	副高级	桥梁工程	技术研发
付诚俊	一公院	男	1989.12	中级	桥梁工程	技术研发

4.3 各自承担的主要工作

本项目由中交第一公路勘察设计研究院有限公司负责完成缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发的研究工作。具体分工如下：黄治炉担任项目负责人，负责项目执行统筹，武星负责项目技术统筹，苏凡和刘群峰负责理论指导，彭程、朱诗敏负责算法开发，霍剑和徐鹏飞负责有限元建模验证，孔晨阳、仝波负责现场验证，付诚俊和张鸿宇负责报告编制。

4.4 项目主要负责人情况

黄治炉，男，正高级工程师。现任中交第一公路勘察设计研究院有限公司副总经理，毕业于长安大学交通工程专业，博士研究生学位。从事公路及市政业务 20 余年，参加各阶段勘察设计项目 50 余项。多次获得国家和省部级优秀设计奖。在《长安大学学报》等核心期刊上发表了二十余篇学术论文；多次作为特邀专家参加国家、广东、四川、陕西等省厅评审会。长期从事公路工程勘察、设计、咨询等方面的科研与管理工作。典型项目包括：西安十四届全运会交通组织优化与设计、河源市中心城区综合交通治理、普宁中交电商物流园区及旧城更新、揭阳楼片区城市更新、超宽桥面扭索面独塔斜拉桥设计关键技术研究、在藏公路工程路侧能源自供给与优化调控技术、陕西省宜居韧性智慧城市交通基础设施国际联合研究中心等项目。具有丰富的公路工程设计科研和综合管理能力。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程（工作）概况

本项目选取禹门口黄河公路大桥作为核心研究背景与工程验证依托。该桥于 2020 年 9 月建成通车，主桥为三跨双塔双索面钢-混结合梁斜拉桥，结构体系采用半漂浮体系，主桥跨径组合为 $245+565+245=1055$ 米，按双向四车道标准设计，桥梁全宽 30.25 米。桥塔高度 168.3 米，拉索采用标准强度 1860MPa 的钢绞线。

禹门口黄河公路大桥属于的典型缆索承重桥梁，其独特的结构形式、复杂的受力特性以及实际运营维护需求，使其成为开展缆索桥梁结构安全评估系统研发、智能预测模型训练、监测预警流程验证的理想工程载体，对实现本项目研究目标具有极强的典型性与代表性。

5.2 投资来源

本项目由陕西省交通厅和单位自筹科研经费支持。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

本项目依托禹门口黄河公路大桥开展研究。项目研究成果可直接应用于禹门口黄河公路大桥运营期的养护管理与安全监测，为大桥全生命周期维养决策提供坚实技术支撑。同时，本项目形成的关键技术与方法，不仅能够服务于本桥工程实际，还可为同类缆索体系桥梁的养护监测提供可复制、可推广的技术方案与应用示范。

5.4 组织管理形式

为了保证项目的顺利实施和研究工作的开展，项目参研单位在如下三方面采取有效的组织管理措施；

(1) 建立沟通与协调机制，包括定期联系会议、工作会议与讨论会议等，加强对课题的领导及沟通与协调，促进攻关课题研究工作的顺利开展。

(2) 建立信息共享机制，充分利用现有资源，开辟信息共享平台，保证课题各研究单位及时获取相关信息。

(3) 建立咨询专家机制，对课题各研究内容的方向、目标、技术路线、方法及成果等方面进行审查把关，参与课题的决策和协调，协助组织课题技术管理。

六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科 目	估算数	科 目	总经费	厅补经费	其他经费
省交通运输厅补助	19.66	合 计	39.66	19.66	20
工程配套研究经费	0	1.设备费	2.5	1	1.5
单位自筹	20	（1）购置设备费	0	0	0
其他经费	0	（2）设备改造与租赁费	2.5	1	1.5
		2.业务费	15.8	8.3	7.5
		（1）材料费	0	0	0
		（2）测试化验实验加工费	0.2	0.2	0.2
		（3）燃料动力费	0	0	0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	12.1	6.6	5.5
		（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	1	0.5	0.5
		3.劳务费	19.83	9.83	10
		(1) 专家咨询费	0	0	0
		(2) 聘用人员劳务费	19.83	9.83	10
		(3) 其他劳务费	0	0	0
		(二) 间接费用	1.53	0.53	1
		4.管理费	0	0	0
		5.绩效支出	1.53	0.53	1

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) 授权发明专利	
		(2) 实用新型 (3) 外观设计	
		2、软件著作权授权数（项）	1
		3、发表论文（篇） (1) 其中 SCI 索引收录数	2
		(2) 其中 EI 索引收录数 (3) 其它	2
		4、著作（部）	
		5、制订标准数（项） (1) 国际标准 (2) 国家标准	1
		(3) 行业标准 (4) 地方标准	
		(5) 企业标准 (6) 科技报告	1
	其他成果	1、填补技术空白数	
		(1) 国际 (2) 国家	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标		(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	
		4、研究开发情况	
	其他成果	(1) 小试	是
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	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	否
	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）	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
	社会效益	4、新增利润（万元）	
		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

（1）提出一种物理信息约束的缆索桥梁 AI 代理模型构建新方法，实现对不同工况下缆索桥梁结构响应的精准预测；

（2）研制一套包含低成本感知硬件和云端智能分析平台的软硬件一体化“缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统”原型；

（3）利用低成本感知系统原型，开展系统的示范应用，验证其有效性与可靠性，形成一套可复制、可推广的技术方案。

8.2 提交的研究成果及其形式

（1）编制《缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发》研究报告；

（2）完成缆索桥梁安全智能评估与灾害预警系统开发；

(3) 国内外公开发表学术论文不少于 2 篇（其中核心及以上文章不少于 1 篇）；

(4) 申请软件著作权 1 项。

8.3 经济、社会、环境效益分析

(1) 经济效益

本研究成果的应用，将为缆索桥梁管养单位带来显著的直接经济效益。通过部署低成本智能监测系统，可大幅降低传统高密度监测方案的初始投入和长期运维成本。通过实现从“定期大修”向“预测性维护”的转变，能够精准定位养护需求，避免不必要的维修开支，延长桥梁使用寿命，预计可为单座桥梁节省 15%-30% 的全生命周期养护成本。更重要的是，通过对潜在灾害的提前预警，能够有效规避因桥梁功能中断乃至失效而造成的巨大经济损失。

(2) 社会效益分析

本项目的社会效益尤为突出。首先，它将显著提升陕西省乃至全国缆索桥梁等关键基础设施的安全水平，有效预防和减少桥梁安全事故，为公众出行提供更可靠的保障，维护社会稳定和公共安全。其次，本研究将推动我省在智慧交通、桥梁工程与人工智能交叉领域的科技创新，培养一批高水平复合型人才，提升行业的核心竞争力。

九、其它需要说明的问题

无。

十、申请单位意见

本项目设计了可行的技术路线，研究内容清晰明确，拥有丰富工程经验支撑。同时，项目已筹集充足经费，实行专款专用，确保各阶段资金需求。期待获批后顺利推进，促进桥梁健康监测技术的发展。

单位负责人：(签字)



(公章)



年 月 日

附件

附件 1 大纲评审意见

缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发 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“缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发”（项目编号：25-44K）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容较全面，研究目标明确，技术路线基本可行。

二、项目研究人员组成合理，前期研究基础扎实，基本具备开展研究工作的条件。

三、预期成果基本覆盖研究目标。

与会专家原则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，配套经费；
- 2.结合缆索桥梁结构特点完善研究内容。

主任委员：陈世浩

2026年03月13日

附件 2 专家个人审查意见表

专家审查意见表

项目名称	缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发				
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 该科研大纲紧紧围绕缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发展开研究，选题结合前沿 AI 技术研究成果，紧扣国家推动桥梁结构监测向智能化转型的行业需求，研究方向明确，整体框架较为完整，团队具备一定的前期研究基础与实施能力具备开展研究的基本条件。建议进一步完善。 1、本大纲列举了国内外大量科研现状，准确的指出了当前研究问题，但是未结合陕西地域特点，论证本研究内容的必要性，建议补充完善研究依据。 2、本研究是基于人工智能的结构安全评估技术，但研究内容未凸显出缆索桥梁的桥梁特点，研究内容需要进一步突出量化和具象化。 3、技术路线整体框架清晰，但技术路线较为笼统，未突出缆索桥梁的细节特点，建议补充完善路线内容，确保研究内容与技术路线一致。 4、本研究经济指标只是宏观描述，缺少量化指标，建议增加相关内容。 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	缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发			
专家姓名	张东亮	职务/职称	正高	专业
专家单位	西安市政建设集团		联系电话	1389281823
评 审 意 见 项目研究方向很前沿在缆索桥结构安全 监测、评估、预警方面具有可行性借鉴。 且该系统开发于传统缆索桥监测、 评估、预警的衔接并不明确。系统应用 为外省项目，系统仍是不足。 评审专家（签字）：张东亮 年 月 日 （本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）				

专家审查意见表

项目名称	缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发				
专家姓名	卢刚	职务/职称	正高	专 业	桥梁
专家单位	铁一院			联系电话	13609191693

评 审 意 见

1. 应落实配套经费。

2. 依托工程不在陕西省，建议^{省内}落实依托工程。

3. 研究内容要体现 缆索体系、斜拉桥、悬索桥等，且目前仅有单塔，要研究多塔斜拉桥。

评审专家（签字）：卢刚

2023 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	缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发				
专家姓名	杜进生	职务/职称	教授	专 业	桥梁
专家单位	北京交通大学			联系电话	13552795846
评 审 意 见 项目重点针对斜拉桥的拉索索力展开研究，构建覆盖多种典型缆索桥梁的参数化高保真有限元模型，通过系统性的仿真计算，生成覆盖结构多样化荷载与环境效应组合、以及潜在损伤工况的结构响应大数据集，为 AI 模型训练构筑坚实的数据基座。依托 AI 代理模型的快速预测能力，研究并提出一套兼具高敏感度与强鲁棒性的新型结构安全评估指标。面向工程应用，研制并部署低成本、易于安装的缆索桥梁服役状态的简易感知硬件系统，获取桥梁的实时测试数据。 项目理论性较强，技术路线基本可行！ 建议聚焦研究内容，深化细化大纲内容。 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

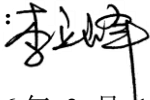
项目名称	25-44K 缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发				
专家姓名	李立峰	职务/职称	教授	专 业	桥梁
专家单位	湖南大学			联系电话	13607433836

评 审 意 见

研究大纲总体内容齐全，具有较好的研究技术路线和前期研究基础，主要从理论方面开展研究，研究目的明确，经费预算符合规定，也有依托工程。

几点建议如下：

- 1、本项目研究的对象是缆索体系桥梁，关于缆索体系桥梁的特点、病害特征、关注内容应该有针对性的阐述，特别是异常检测、少量数量，具体指什么。
- 2、研究内容还需要进一步明确和细化，看不出来具体做什么。安全具体指哪一个方面的安全？自身锈蚀、疲劳还是火灾等导致的安全评估。
- 3、智能体现在哪一些方面？数据采集的智能、数据处理的智能还是说通过数据的分析而提出的智能病害判断？这一些都需要明确界定。
- 4、有依托工程、但没有配套经费。

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）

附件3 评审专家委员会名单

缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发（项目编号：25-44K）

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	杜进生
5	委员	李立峰	湖南大学	土木工程	土木工程	教授	李立峰

附件 4 专家意见处理表

专家意见处理表

项目名称： 缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发 （项目编号： 25-44K ）

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	陈长征	该科研大纲紧紧围绕缆索桥梁结构安全智能评估与预警系统开发开展研究，选题结合前沿 AI 技术研究成果，紧扣国家推动桥梁结构监测向智能化转型的行业需求，研究方向明确，整体框架较为完整，团队具备一定的前期研究基础与实施能力具备开展研究的基础条件。建议进一步完善。 1.本大纲列举了国内外大量科研现状，准确的指出了当前研究问题，但是未结合陕西地域特点，论证本研究内容的必要性，建议补充完善研究依据； 2.本研究是基于人工智能的结构安全	衷心感谢专家的宝贵意见，我们已逐条对研究大纲进行了针对性修改，具体如下： 1. 关于研究必要性与地域特点结合：将研究与地方实际紧密结合，是确保科研项目落地生根的关键。为此，我们已在研究大纲第一章“项目研究的背景和必要性”中，增补了“陕西省缆索桥梁发展现状与监测需求分析”的专门论述。新内容从陕西复杂的地形地貌（如多山、多水系）、桥梁建设现状及“十四五”交通发展规划出发，系统阐明了在省域内率先开展缆索桥梁智能化监测的独特价值与需求。 2. 关于研究内容聚焦缆索桥梁特点并量化：我们对第三章“主要研究内容”进行了重构，使其更紧密地围绕缆索桥梁的独特力学行为和典型病害展开。同时，我们引入了明确的量化指标，例

		评估技术,但研究内容未凸显出缆索桥梁的桥梁特点,研究内容需要进一步突出量化和具象化; 3.技术路线整体框架清晰,但技术路线较为笼统,未突出缆索桥梁的细节特点,建议补充完善路线内容,确保研究内容与技术路线一致; 4.本研究经济指标只是宏观描述,缺少量化指标,建议增加相关内容。	如: AI 代理模型的索力预测精度不低于 95%,关键截面挠度预测误差小于 5%,异常损伤识别的预警响应时间小于 1 分钟 等,使研究目标更加具体、可考核。 3. 关于技术路线的细化:我们对“技术路线图”及其说明文字进行了大幅扩充和细化。新的技术路线将每个研究阶段(如数据生成、模型训练、系统开发)与缆索桥梁的特定技术难点紧密对应。例如,在“数据生成”阶段,明确了将构建单塔/多塔斜拉桥、悬索桥等多种参数化有限元模型,确保了研究内容与技术路线的一致性和可操作性。 4. 关于经济指标的量化分析:我们在第八章“经济社会效益”部分,增设了量化经济效益分析。
2	张保元	项目研究方向很前沿,在缆索桥梁结构安全监测、评估、预警方面具有可借鉴。但该系统开发与传统缆索桥梁监测、评估、预警的衔接方式不明确,依托项目为外省项目,配套经费不足。	衷心感谢专家的宝贵意见,我们已根据您的意见进行了如下修改: 1. 关于与传统监测体系的衔接:我们在研究大纲修改稿中明确,本系统并非意在完全取代传统监测,而是定位为一种“轻量化、智能化的增强与补充”。系统将具备良好的兼容性,既可利用现有监测系统的部分传感器数据,通过 AI 算法进行数据增强和深

		度分析；也可独立部署少量核心传感器，构建低成本监测方案。在技术方案中增加“与现有监测系统的数据接口与融合策略”研究，确保技术落地性。 2. 关于依托工程与配套经费：我们已将依托工程更换为陕西省内的重点项目禹门口黄河公路大桥（双塔双索面钢-混结合梁斜拉桥），该桥更能代表省内大型缆索桥梁的特点。同时，申请单位中交一公院高度重视本项目，已承诺提供 20 万元的配套经费，确保研究工作的顺利开展。
3	卢皓	衷心感谢专家的宝贵建议。针对您提出的三点意见，我们已全部落实： 1. 关于配套经费：申请单位已落实 20 万元配套经费，连同省厅资助，项目总经费达到 39.66 万元，足以支撑本研究的各项开销。 2. 关于省内依托工程：我们已将依托工程更换为陕西省内的禹门口黄河公路大桥，确保研究成果能直接服务于陕西省的交通事业。 3. 关于扩展缆索体系研究范围：我们已在修改稿中将研究对象从单一的斜拉桥扩展至更广泛的缆索体系。在“主要内容”

			中，明确了研究将覆盖斜拉桥（含单塔、双塔及多塔）和悬索桥两种主要类型。
4	杜进生	项目重点针对斜拉桥的拉索索力展开研究，构建覆盖多种典型型缆索桥梁的参数化高保真有限元模型，通过系统性的仿真计算，生成覆盖结构多样化荷载与环境效应组合、以及潜在损伤工况的结构响应大数据集，为 AI 模型训练构筑坚实的数据基座。 依托 AI 代理模型的快速预测能力，研究并提出一套兼具高敏感度与强鲁棒性的新型结构安全评估指标。面向工程应用，研制并部署低成本、易于安装的缆索桥梁服役状态的简易感知硬件系统，获取桥梁的实时测试数据。 项目理论性较强，技术路线基本可行！ 建议聚焦研究内容，深化细化大纲内容。	感谢专家的深刻洞察和鼓励。我们非常认同您关于“聚焦研究内容，避免面面俱到但深度不足”的建议。 根据您的意见，我们对研究框架进行了调整： 将研究的核心目标进一步聚焦于“构建基于多参数融合与生成式 AI 的缆索桥梁结构安全状态智能评估模型”。以此为核心，原有的“数据集构建”、“异常识别方法”、“简易感知系统开发”等内容，都将作为服务于这一核心目标的支撑性研究。通过这样的调整，研究的逻辑主线更加清晰，重点更加突出。我们将在有限的资源和时间范围内，集中力量在核心算法和模型上取得突破，确保研究的深度和创新性。

5	李立峰	研究大纲总体内容齐全,具有较好的研究技术路线和前期研究基础,主要从理论方面开展研究,研究目的明确,经费预算符合规定,也有依托工程。 几点建议如下: 1.本项目研究的对象是缆索体系桥梁,关于缆索体系桥梁的特点、病害特征、关注内容应该有针对性的阐述,特别是异常检测、少量数量,具体指什么。 2.研究内容还需要进一步明确和细化,看不出来具体做什么。安全具体指哪一个方面的安全?自身锈蚀、疲劳还是火灾等导致的安全评估。 3.智能体现在哪些方面?数据采集的智能、数据处理智能还是说通过数据的分析而提出的智能病害判断?这一些都需要明确界定。	衷心感谢专家的宝贵意见,我们已逐条对研究大纲进行了针对性修改,具体如下: 1.根据专家建议对一些概念进行了界定: (1)在第一章新增“缆索桥梁结构特点与典型病害”一节,系统阐述了其力学特性、对环境荷载的敏感性,以及索体腐蚀、疲劳、锚固区损伤等典型病害模式。(2)已明确其内涵为三级递进的识别体系:① 状态异常(识别结构响应偏离正常波动范围);② 损伤预警(识别由早期损伤引发的微弱信号);③ 突发事件告警(识别由拉索断裂等引发的结构突变)。(3)将“少量数量”修正为更专业的表述“基于稀疏传感数据”,并明确指利用少量(如全桥仅布设 10-20 个)关键测点(如索力、位移、加速度传感器)的数据,来反应和评估结构整体状态。 2.对“安全”的范围与研究内容进行了细化: (1)明确本研究中的“安全评估”特指结构自身性能安全,重点关注由构件材料退化(如锈蚀、疲劳、结构损伤(如裂缝、连接松动)及极端荷载引发的安全问题,暂不涉及火灾、船舶撞击等外部灾害。
---	-----	---	--

		4.有依托工程、但没有配套经费。	(2) 已根据您的建议将原研究内容细化为更具体、可操作的步骤，如：①参数化有限元模型库构建；②多工况、多损伤场景大数据集生成；③基于 GNN 与 VAE 的代理模型训练与优化；④多维融合的安全评估指标体系研发；⑤软硬件集成的预警系统原型开发与工程验证。 3. 明确了“智能”的体现在“分析决策”层面，具体包括： (1) 数据处理智能，(2) 状态评估智能。(2) 病害判断的智能。 4. 根据专家建议，申请单位已承诺 20 万元配套经费，确保项目顺利实施。
--	--	-------------------------	---

大纲评审委员会专家（签字）：

项目负责人（签字）：