

项目合同编号：25-62K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：基于新型阻尼-防落梁装置的在役公路桥梁韧性提升关键技术

承担单位：陕西省交通规划设计研究院有限公司

项目负责人：赵 昕

通讯邮编、地址：710065 西安市高新区科技六路 37 号

传真、电话：029-68718902

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) 新型阻尼-防落梁装置的设计与力学性能研究；
- (2) 基于新型阻尼-防落梁装置的桥梁结构韧性提升机理；
- (3) 多桥型多目标参数优化设计；
- (4) 极端荷载 - 桥梁时变系统模型研究。

2.技术关键

- (1) 解决粘滞阻尼器变形能力不足导致的碰撞问题，研发“粘滞阻尼器+金属橡胶+钢绞线”组合装置；
- (2) 揭示新型装置在极端荷载下提升桥梁韧性的机理；
- (3) 建立极端荷载-桥梁时变系统模型。

3.依托工程（依托工作）

本项目依托 G5 京昆高速西安至陕川界段安全韧性提升工程开展研究，G5 京昆高速西安至陕川界段安全韧性提升工程路线全长 326.03 公里，桥涵 134 座，用于实桥测试与应用验证。此外，S16 延吴高速和 S23 定吴高速（全长 202.147 公里，桥梁 142762.95 米 / 680 座），可为本项目提供实桥测试。

二、考核指标

1.预期目标

填补桥梁防护装置领域阻尼器-金属橡胶-钢绞线组合体系国内技术空白，装置可在抗震高烈度区、重载交通密集区桥梁试点应用并推广。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

（1）技术性能：极端荷载作用下形成消能与防落梁双重功能，力学模型峰值荷载误差 $\leq 5\%$ ，耗能误差 $\leq 7\%$ 。

（2）经济效益：推广后预计节省桥梁维修加固费用超千万元，延长桥梁使用寿命，降低全生命周期运维成本。

3.经济和社会效益

（1）经济效益：减少桥梁维修重建费用、提升通行能力、带动相关产业发展；

（2）社会效益：降低桥梁垮塌风险、保障交通通行安全、促进科技创新与产业升级；

（3）环境效益：减少资源消耗与建筑废弃物，推动绿色可持续发展。

4.成果提供形式

（1）形成项目研究报告 1 份；

（2）发表学术论文 2 篇（其中，中文核心 1 篇，注明依托陕西交通科技项目及编号）；

（3）申报专利 3 项；

(4) 研发新型阻尼-防落梁装置产品 1 套。

5.其他考核指标

开展媒体宣传报道不少于 3 次，技术交流不少于 1 次。

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	1. 第二季度：完成新型阻尼 - 防落梁装置构造设计，建立初步力学模型，确定金属橡胶布置方案； 2. 第三季度：调试实验设备，制定静力压缩、正弦加载试验方案，制备金属橡胶试件； 3. 第四季度：开展装置静力试验和正弦加载试验，获取力学响应数据，优化力学模型；
2027 年	1. 第一季度：建立桥梁 - 装置耦合动力学模型，模拟极端荷载影响，完成中期汇报材料。 2. 第二季度：开展参数敏感性分析，确定关键设计参数，建立多目标优化模型； 3. 第三季度：完成不同桥型适应性测试，通过仿真验证优化效果，确保性能稳定； 4. 第四季度：建立极端荷载 - 桥梁时变系统模型，校准参数，分析结构破坏机理；
2028 年	第一季度：汇总实验数据与分析结果，完成结题报告、论文发表及专利申报，申请课题验收。

四、项目经费

项目总经费：100 万元

交通运输厅补助：19.988 万元

自筹资金：80.012 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	75	19.988
1. 设备费	0	0
(1) 购置设备费	0	0
(2) 试制设备费	0	0
(3) 设备改造与租赁费	0	0
2. 业务费	68	19.988
(4) 材料支出	30	12
(5) 测试化验实验加工支出	23	7.988
(6) 燃料及动力支出	0	0
(7) 差旅支出	5	0
(8) 会议支出	5	0
(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	5	0
(11) 其他支出	0	0
3. 劳务费	7	0
(12) 劳务性支出	5	0
(13) 咨询专家支出	2	0
(二) 间接费用	25	0
4. 管理费	8	0
5. 绩效支出	17	0
合 计	100	19.988

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	3
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	3
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	
		3.发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其他	2 （其中，中文核心 1 篇）
		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	1
	其他成果	1.填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	1
		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
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	新型阻尼-防落梁装置
		（3）新材料	
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(7) 生产线	
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	
		(1) 小试	否
		(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	
		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	
		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	带动桥梁加固等相关产业高质量发展
		7. 技术集成示范（项）	
		8. 建立示范基地（亩数）	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		9. 节约资源能源	减少桥梁重建材料消耗
		10. 环保效益	降低建筑废弃物排放
其他需要说明的情况	无		

六、承担单位或研究人员分工

1.陕西省交通规划设计研究院有限公司是本项目总牵头。本团队依托陕西省绿色低碳与智能建造工程技术研究中心、省级企业技术中心开展研究工作，负责装置整体设计与优化、项目策划及方案论证、桥梁结构计算分析、材料与结构试验方案制定，统筹项目实施与成果汇总。此外，公司建有博士后科研工作站、西安市绿色智造交通工程研究中心、西安市智慧与低碳交通工程技术研究中心、BIM 技术与全装配结构研究中心、交通安全产业技术研发中心等科研平台，为本项目提供技术和人才支持。

2.陕西交通控股集团有限公司延定分公司和陕西交控大修专项工程管理处：协助完成应用现场测试，衔接科研与工程应用。

3.哈尔滨工业大学：高校技术负责，主导新型装置研发及结构实验、力学模型验证，利用试验平台开展静力加载、正弦加载及混合试验，编写结构实验报告。

4.华路有道（北京）信息科技有限公司：负责项目具体实施，提供交通基础设施智慧感知、健康监测相关数字化技术支持，助力装置工程化落地。

七、项目参加人员表

项目承担单位：陕西省交通规划设计研究院有限公司							
参与单位（排序）：陕西交通控股集团有限公司延定分公司；陕西交控大修专项工程管理处；哈尔滨工业大学；华路有道（北京）信息科技有限公司							
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	赵昕	1982.07	陕西省交通规划设计研究院有限公司	正高级	道路工程	项目总负责	赵昕
主要研究人员							
2	杨浩军	1982.02	陕西交通控股集团有限公司延定分公司	副高级	道路工程	项目协调	杨浩军
3	傅震	1976.10	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	桥梁工程	技术负责	傅震

4	边陇超	1983.03	陕西交控大修专项工程管理处	副高级	公路工程	项目协调	边陇超
5	丁勇	1984.11	哈尔滨工业大学	副高级	桥梁工程	高校技术负责	丁勇
6	杨欣	1980.02	陕西省交通规划设计研究院有限公司	正高级	桥梁工程	结构计算分析	杨欣
7	王建飞	1988.01	华路有道（北京）信息科技有限公司	副高级	桥梁工程	项目具体实施	王建飞
8	李大军	1967.05	清华大学	副高级	桥梁工程	项目具体实施	李大军
9	牛永喆	1989.06	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	桥梁工程	项目策划与方案论证	牛永喆
10	王帅	1992.01	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	桥梁工程	结构计算分析	王帅

11	付成林	1993.09	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	桥梁工程	结构计算分析	付成林
12	申晓剑	1985.02	陕西交通控股集团有限公司延定分公司	副高级	桥梁工程	项目策划与方案论证	申晓剑
13	黄旭峰	1981.10	陕西省交通规划设计研究院有限公司	正高级	道路工程	项目具体实施	黄旭峰
14	李鑫	1982.02	陕西交通控股集团有限公司延定分公司	副高级	道路工程	项目策划与方案论证	李鑫
15	赵金凯	1996.02	陕西省交通规划设计研究院有限公司	中级	桥梁工程	结构计算分析	赵金凯
16	崔晓晓	1997.07	陕西省交通规划设计研究院有限公司	中级	桥梁工程	材料与结构试验方案	崔晓晓
17	刘宇飞	1988.05	清华大学	中级	桥梁工程	装置研发及结构实验	刘宇飞

18	张翼飞	1994.07	哈尔滨工业大学	副高级	桥梁工程	装置研发及结构实验	张翼飞
19	屈文新	2000.05	哈尔滨工业大学	助理级	桥梁工程	结构实验与报告编写	屈文新
20	杨兴东	1998.09	哈尔滨工业大学	助理级	桥梁工程	结构实验与报告编写	杨兴东
21	黎佳莹	1999.11	哈尔滨工业大学	助理级	桥梁工程	结构实验与报告编写	黎佳莹

八、信息表

项目合同编号		25-62K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部		
项目名称		基于新型阻尼-防落梁装置的在役公路桥梁韧性提升关键技术								
项目实施所在地		西安		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月				
总 经 费		100 万元		厅 拨		19.988 万元				
第一承担单位	单位名称	陕西省交通规划设计研究院有限公司								
	所在地	陕西省 西安市 高新区					代码	610100		
	通讯地址	陕西省 西安市高新区科技六路 37 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	435201880		
参与单位	序号	单 位 名 称								
	1	陕西交通控股集团有限公司延定分公司								
	2	陕西交控大修专项工程管理处								
	3	哈尔滨工业大学								
	4	华路有道（北京）信息科技有限公司								
项目负责人		姓 名	赵昕		性别 (2) 1.男 2.女		出生年份	1982		
		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	13609203218 (029-68718900)		电子邮箱		67091223 @qq.com			
项目联系人		姓名	张浩		性别		男			
		联系电话	15349142135 (029-68718902)		电子邮箱		772559115@qq.com			
项目组人数		21	高级	15	中级	3	初级	3	其他	0
主要研究内容 (100 字以内)		(1) 新型阻尼-防落梁装置的设计与力学性能研究; (2) 基于新型阻尼-防落梁装置的桥梁结构韧性提升机理; (3) 多桥型多目标参数优化设计; (4) 极端荷载-桥梁时变系统模型研究。								
成果属性		A、D	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他							
成果形式		A、F、D	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他							

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

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

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

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

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

6.合同正本一式叁份，甲方单位伍份，承担单位伍份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：

陕西省交通运输厅

负责人：（签字）

2026年3月27日

联系人：（签字）

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方： 陕西省交通规划设计研究院有限公司

单位负责人：（签字）

2026年3月27日

项目负责人：（签字）

赵昕

（公章）

电 话：029-68718900

财务负责人：（签字）

姜妍

陕西省交通规划设计研究院有限公司
3700023109014412785
工行电子工业区支行

账 户 名：陕西省交通规划设计研究院有限公司

开户银行：中国工商银行股份有限公司西安电子工业区支行

账 号：3700023109014412785

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：

项目负责人：

2026 年 3 月 26 日



项目编号：25-62K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：基于新型阻尼-防落梁装置的在役公路
桥梁韧性提升关键技术

申请单位：陕西省交通规划设计研究院有限公司
陕西交通控股集团有限公司延定分公司
陕西交控大修专项工程管理处
哈尔滨工业大学
华路有道（北京）信息科技有限公司

联系人：张浩

电 话：029-68718902

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

一、项目研究的背景和必要性

近年来，随着我国经济的快速发展和城镇化进程的推进，交通运输需求不断增加，桥梁作为重要的交通基础设施，其安全性和耐久性受到了广泛关注。与此同时，重载交通的频繁运行以及地震、洪水、强风等极端气候事件的增多，对桥梁结构的安全性能提出了更高的要求。传统的桥梁抗震和防灾措施主要依赖于结构自身的刚度和强度，但在极端荷载作用下，仍可能出现构件破坏、落梁甚至整体倒塌等严重问题，这对桥梁安全构成了巨大威胁。近年来发生的多起桥梁事故，进一步凸显了提升桥梁结构韧性和安全性能的紧迫性。例如，国内多地设置于山区河道中的大桥因暴雨引发的洪水而垮塌，造成交通中断和财产损失；台湾宜兰南方澳跨港大桥的突然倒塌，导致多人伤亡。这些事故不仅带来了巨大的社会和经济损失，也暴露了桥梁在极端荷载和超预期荷载作用下的脆弱性。



图 1 桥梁在洪水冲击下引发的灾害



图 2 桥梁在地震下引发的灾害

近年来，桥梁工程的振动控制和抗灾设计技术已经取得了长足的进展。依据 2023 年《住房和城乡建设部关于全面推进城市综合交通体系建设的指导意见》和 2024 年《关于支持引导公路水路交通基础设施数字化转型升级的通知》，建设安全、便捷、高效、绿色、经济、包容、韧性的可持续交通体系已成为国家重大需求。而当前公路桥梁防灾减灾与韧性提升相关技术需求依然面临许多挑战。粘滞阻尼器作为一种常用的被动耗能装置，虽然在减小桥梁结构的地震、风荷载响应方面发挥了重要作用，但其在极端荷载下的适用性存在明显局限性。当结构受到强烈的地震、洪水等极端荷载冲击时，粘滞阻尼器的活塞位移可能超过其设计允许范围，进而导致装置失效，这不仅无法实现有效的振动控制，甚至可能引发如梁体脱落等二次灾害。这一现象反映了现有粘滞阻尼器设计的局限性，尤其在面对大位移冲击时表现出不足。因此，如何提升阻尼器的适应性与耐久性，使其能够在极端工况下高效稳定地工作，成为当前桥梁工程领域亟需解决的问题。



图 3 粘滞阻尼器在桥梁中的应用及其失效方式

传统的桥梁防落梁措施，如限位器、剪力销等，多为刚性防护装置，虽然能够在一定程度上防止梁体脱落，但在消能、减振方面效果有限。而随着桥梁结构越来越复杂，荷载形式愈加多样化，这类传统

的刚性防护措施在面对复杂动态荷载时显得力不从心，无法充分应对现代桥梁工程对高效防护装置的要求。此外，现有的防落梁装置大多为单一功能，在发生失效时，无法提供足够的安全冗余。因此，迫切需要开发一种兼具阻尼减振和防落梁功能的多功能装置，以应对极端荷载下的复杂动态工况。新型装置的研发不仅能显著提升桥梁结构的安全性能，也将带动桥梁防护技术的创新发展。



图 4 桥梁中的典型防落梁装置

基于这一背景，本项目旨在研发一种集减振与防落梁功能于一体的新型阻尼-防落梁装置。该装置将粘滞阻尼器、金属橡胶和钢绞线相结合，通过发挥粘滞阻尼器的耗能特性、金属橡胶的缓冲作用和钢绞线的高强抗拉性能，提供双重防护功能。在正常荷载下，粘滞阻尼器能够有效耗散地震、风荷载等引发的振动能量，保持桥梁结构的稳定性；而在极端荷载下，金属橡胶能够通过其独特的弹塑性特性提供额外的缓冲作用，防止过大位移的发生，同时钢绞线发挥抗拉作用，有效防止梁体脱落。这种多重保护机制为桥梁结构的安全性提供了冗余保障，显著提升了装置的耐久性和适用性。

在全球范围内，随着交通基础设施建设的规模不断扩大，桥梁事故频发，市场对高效桥梁减振和防护装置的需求日益迫切。近年来，

国内外发生的多起桥梁事故，无不凸显了当前桥梁结构在极端荷载下的脆弱性，亟需开发出更加先进的桥梁防护技术以应对未来日益复杂的自然灾害和交通负荷。新型阻尼-防落梁装置的研发和推广应用，不仅能够有效提升在役桥梁的安全性和耐久性，降低维修和加固成本，还具备广泛的市场应用前景，还可逐步推广至新建桥梁。该装置适用于公路桥梁、铁路桥梁等多种桥梁结构，尤其在抗震设防区、重载交通密集区具有显著的应用优势。通过本项目的实施，企业将能够掌握该新型装置的核心技术，在桥梁减振防护领域占据技术领先地位，增强市场竞争力，并推动新材料、新技术的应用和发展。

项目的研究不仅具有重要的工程应用价值，也具有一定的学术价值。通过研究基于新型阻尼-防落梁装置的桥梁结构的韧性提升机理，项目将填补桥梁防护装置领域粘滞阻尼器-金属橡胶-钢绞线组合体系的研究空白，丰富桥梁减振控制的理论体系。此外，项目的研究成果还将为桥梁结构的健康监测、状态评估和防灾减灾提供技术支持。

二、前期科研及工作基础

1.对项目领域国内外（省内外）研究现状，研究水平和发展趋势的分析和评价

当前，桥梁作为重要的交通基础设施，其安全性和耐久性受到广泛关注。随着我国经济的快速发展，重载交通频繁，极端气候事件增多，如地震、洪水和强风等，对桥梁结构的安全性能提出了更高的要求^[1,2]。传统的桥梁抗震和防灾措施主要依赖于结构自身的刚度和强度，但在极端荷载作用下，仍可能出现构件破坏、落梁甚至整体倒塌

等严重问题^[3,4]。

在桥梁减振和防护领域，粘滞阻尼器作为一种成熟的被动耗能装置，已被广泛应用于桥梁和建筑结构中^[5,6]。粘滞阻尼器能够有效地减小结构在地震和风荷载作用下的振动响应，降低内力和位移。然而，在极端荷载条件下，粘滞阻尼器的活塞位移可能超过设计允许范围，导致装置失效，甚至引发二次灾害^[7-11]。

为了解决粘滞阻尼器在大位移下的失效问题，研究者们尝试在阻尼器中加入金属弹簧^[12]或填充惰性气体^[13]，以提供弹性恢复力。但这些方法存在疲劳性能差、密封要求高、制造成本高等缺点，限制了其在实际工程中的应用。

近年来，金属橡胶材料因其优异的弹性、耐久性和阻尼性能，受到越来越多的关注^[14]。金属橡胶在高温、低温、腐蚀等恶劣环境下表现出良好的稳定性，已在航空航天、机械工程等领域得到应用^[15,16]。然而，金属橡胶在桥梁减振和防护领域的研究尚处于起步阶段，对其力学性能、工作机理等缺乏系统的理论和实验研究。

此外，防落梁装置作为桥梁抗震防灾的重要措施，通常采用限位器、剪力销等形式^[17,18]。但这些装置多为刚性结构，缺乏耗能能力，无法有效减小地震等极端荷载下的冲击力^[19]。一旦防落梁装置失效，桥梁结构仍面临严重的安全风险^[20]。云南格巧高速已应用防落梁装置，经历了地震考验，但阻尼相关的力模型未能给出明确参数、尚无冲击缓冲装置改善构件性能。因此，研发兼具阻尼-冲击缓冲减振和防落梁功能的混合装置，成为当前研究的热点和难点。

随着我国桥梁建设规模的不断扩大和在役桥梁数量的增加，桥梁结构的安全运营面临巨大挑战。近年来，国内多地山区河道洪水导致桥梁垮塌、台湾南方澳跨港大桥倒塌等事故的发生，暴露出桥梁在极端荷载和超预期荷载作用下的脆弱性^[21,22]。这些事故不仅造成了重大的人身和财产损失，也对社会稳定和经济发展产生了不利影响。

在此背景下，提升在役桥梁的韧性和安全性能，已成为亟待解决的工程问题^[23,24]。市场迫切需要一种高效、可靠的桥梁减振防护装置，能够在正常荷载和极端荷载条件下均保持良好的工作性能，延长桥梁的服役寿命，降低维护和修复成本^[25]。

根据相关统计数据，我国相当一部分桥梁建于 20 世纪末期，设计标准相对较低，难以满足当前的交通需求和抗灾要求^[26]。对这些桥梁进行改造和加固，安装新型的阻尼-防落梁装置，不仅具有广阔的市场前景，也符合行业对加强基础设施抗灾能力的需求。

2. 项目前期科研及现有工作条件

目前，科研团队已在桥梁工程、阻尼材料和抗震试验等领域积累了丰富的研究经验。团队在桥梁抗震设计与减振技术方面具备深厚的研究积累，已成功开发出冲击缓冲型粘滞阻尼器^[8,27]。该阻尼器在常规的粘滞阻尼器中引入金属橡胶作为缓冲物，金属橡胶具有抗疲劳老化、寿命长、耐高低温、耐腐蚀以及在恶劣环境下能够保持良好性能的特点。金属橡胶缓冲物可以满足粘滞阻尼器长期服役的需求。此外，金属橡胶的荷载位移关系具有指数特征，在小变形下其出力较小不会明显影响粘滞系统的能量耗散，而在大变形下金属橡胶的刚度呈指数

特征增加，附加的刚度和阻尼将帮助改变结构的动力响应，因此经过合理设计的阻尼器可以有效的避免阻尼器的位移超出行程，避免其失效。项目团队目前已完成了该力学模型的建立与试验验证工作。荷载及阻尼相关指标的理论值与实测值误差不超过 5%。基于冲击缓冲型粘滞阻尼器的桥梁振动控制技术取得了显著效果，研究表明附加冲击缓冲型粘滞阻尼器的桥梁安全性和韧性明显提高，显著降低了梁体的落梁风险，结构动力响应及内力均有明显改善，相关研究成果已发表在 Structural Control and Health Monitoring、Soil Dynamics and Earthquake Engineering、Journal of Sound and Vibration 和 Multibody System Dynamics 等知名期刊[8,27-29]。

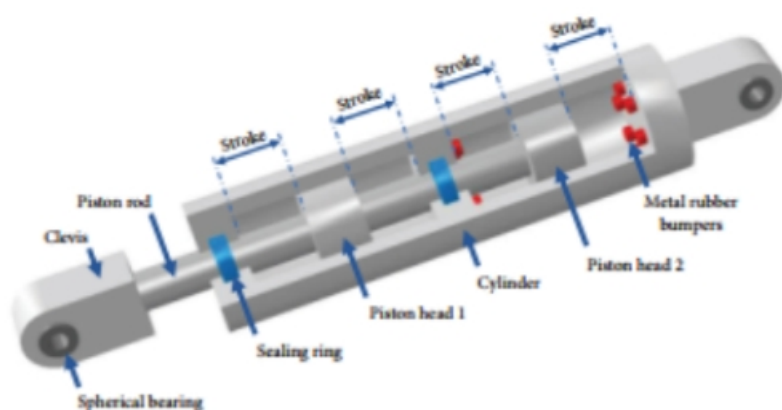


图 5 冲击缓冲型粘滞阻尼器

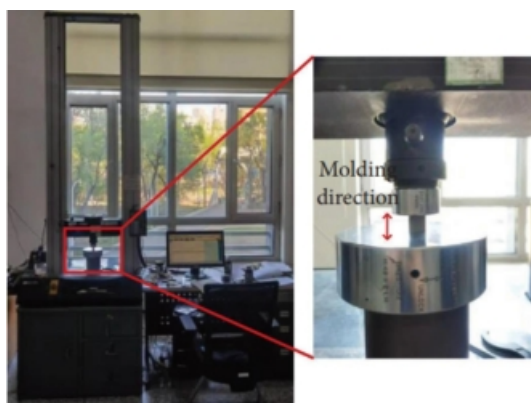


图 6 金属橡胶静力压缩试验

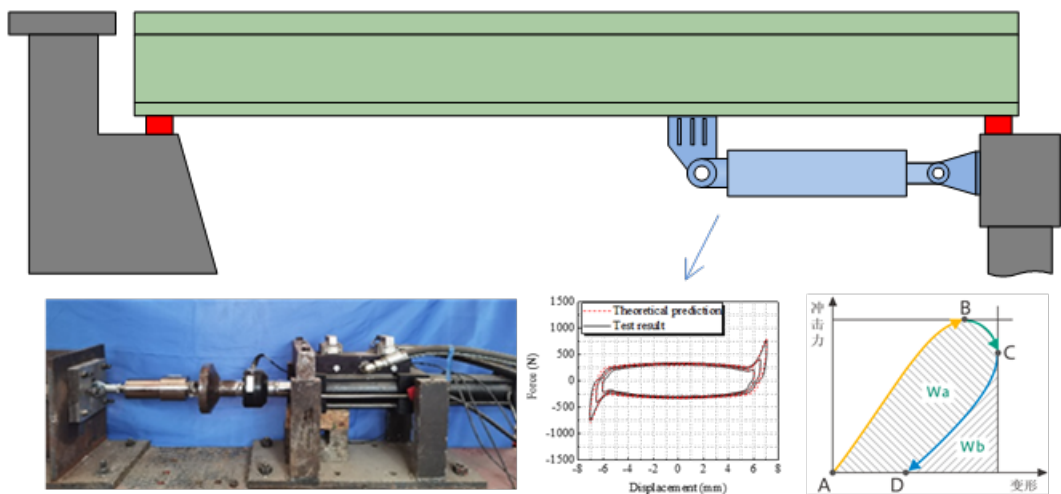


图 7 冲击缓冲型粘滞阻尼器性能试验

团队在新型缓冲材料应用研究方面也开展了相关工作，尤其是在金属橡胶在低速冲击下的弹性后效问题，针对该问题，团队提出了具有高精度的显式接触力模型，该模型可以准确的捕捉金属橡胶在低速冲击下的弹性后效特性^[29]，这对于准确的评估冲击缓冲阻尼器的振动控制和桥梁结构的韧性提高具有重要意义。上述研究为本项目中金属橡胶在阻尼装置中的应用提供了重要的理论和技术支撑。

此外，团队提出了一种面向桥梁的二次缓冲新型防落梁装置。该装置采用“缓冲-约束”双级防护理念，对应构件功能为“限位-防落梁”。装置整体由锚具、铰支座、金属橡胶垫片及同轴布置的钢绞线（含滑动机构）构成，可通过梁-梁、墩-梁等连接形式应用于既有桥梁韧性提升及新建桥梁工程。与常规防落梁方案的比选结果表明，该新型装置在耗能、缓冲、经济性及韧性提升等方面具有明显优势。同时，团队提出了相应的装置选型与设计方法，并形成了产品实用手册。

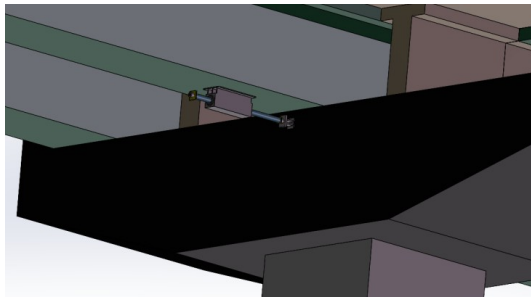


图 8 新型防落梁装置

表 1 新型装置与现有技术的性能对比

装置名称	链式防落梁装置	弹簧防落梁装置	纵向挡块式防落梁装置	二次缓冲新型防落梁装置
耗能机制	几乎无耗能，依赖塑性变形	弹簧弹性变形耗能	几乎无耗能，依赖塑性变形	金属丝干摩擦+弯曲变形（高效滞回）
缓冲性能	无缓冲，冲击力大	无缓冲，冲击力大	无缓冲，冲击力大	变刚度，小位移柔性/大位移刚性
经济性	常规造价，后续运维成本低	造价高于链式装置，后续运维成本高	挡块造价低，但达到同等性能造价提升	造价与链式装置基本一致，后续运维成本极低
施工工艺	工艺简单	安装复杂，需精确控制弹簧预紧量	安装简便，但受结构布置限制大	标准化流程安装，支持新建与改建桥梁；无需大规模改动原结构
养护管理	定期检查链条锈蚀与连接松动	弹簧易疲劳、需周期更换	易锈蚀、维修不便	金属橡胶耐久性高，构件检修方便

在多目标优化设计和抗震试验等领域，团队同样具备扎实的技术储备。团队掌握了遗传算法等先进优化技术^[30]，并将其成功应用于复杂结构系统的参数优化设计中。在防灾领域的混合试验方面，团队开发了混合试验平台助力更快捷的开展相关试验研究^[8]。平台集成了目

前主流的商业有限元软件接口（ANSYS 或 Abqus），为多平台如 OpenSees 等交互提供了可靠的解决方案。在混合试验控制方法和时滞补偿方面，团队深入探索，提出了多种控制方法和时滞补偿方法，确保了试验的精度与实时性^[31,32]。这些研究成果为复杂荷载下桥梁和建筑结构的抗灾设计提供了强有力的支持。

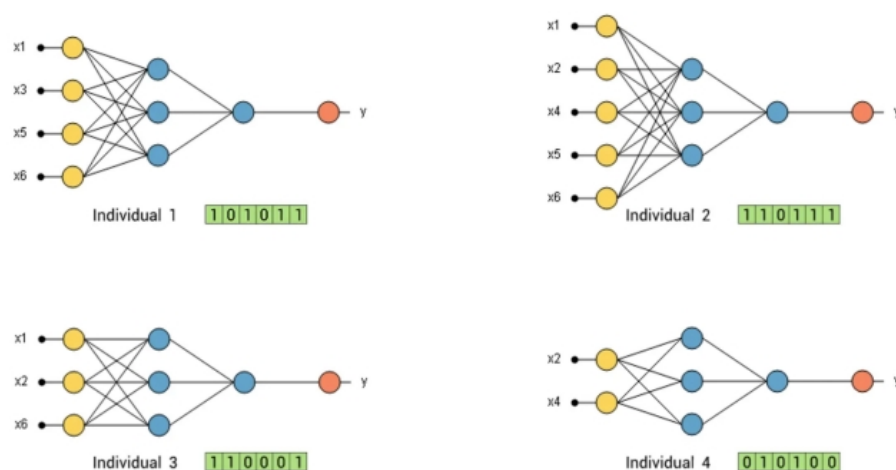


图 9 遗传算法示意图

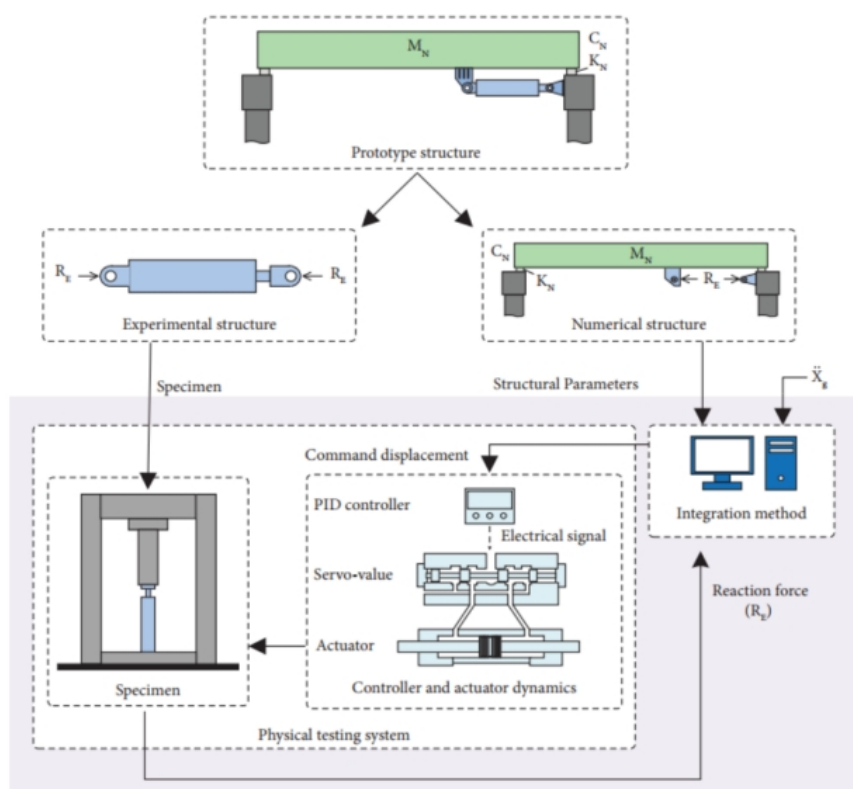


图 10 混合试验系统示意图

本项目依托陕西省绿色低碳与智能建造工程技术研究中心、省级企业技术中心开展研究工作，团队还与多家国内外知名高校和科研机构建立了长期合作关系，形成了多学科交叉、资源共享的研究网络，进一步增强了项目的科研能力和创新潜力。综上所述，团队在桥梁工程、阻尼技术、新型材料及优化设计等方面积累的丰富经验和研究基础，为本项目的顺利实施提供了强有力的保障，并为项目的创新性和实用性奠定了坚实的基础。

3.参考文献

- [1] 张轩, 温佳年, 韩强, 等. 桥梁结构防落梁与碰撞装置综述[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(4): 403-420.
- [2] 李忠献, 岳福青. 城市桥梁地震碰撞反应研究与发展[J]. 地震工程与工程振动, 2005(4): 91-98.
- [3] 唐伟健, 王东升, 张鹏颺, 等. 桥梁震害的历史回顾(上)[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(4): 70-80.
- [4] Xiang N, Goto Y, Obata M, et al. Passive seismic unseating prevention strategies implemented in highway bridges: a state-of-the-art review[J]. Engineering Structures, 2019, 194: 77-93.
- [5] Lu Z, Wang Z, Zhou Y, et al. Nonlinear dissipative devices in structural vibration control: a review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 423: 18-49.
- [6] Hwang J, Tseng Y. Design formulations for supplemental viscous dampers to highway bridges[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, 34(13): 1627-1642.
- [7] Miyamoto H K, Gilani A S J, Wada A, et al. Limit states and failure mechanisms

- of viscous dampers and the implications for large earthquakes[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 39(11): 1279-1297.
- [8] Ding Y, Zhang Y, Xu G. Pounding mitigation design and real-time hybrid simulation for a novel viscous damper applied in bridges[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2023, 2023(1): 1-16.
- [9] 骈超, 钱江. 考虑阻尼器极限状态的单自由度体系地震响应[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(8): 46-54.
- [10] 韩建平, 张振龙. 大震下考虑黏滞阻尼器极限状态的减震结构抗震性能分析[J]. *建筑结构*, 2019, 49(8): 37-42.
- [11] 谢丽宇, 郝霖霏, 张瑞甫, 等. “3·11”大地震中减隔震装置的破坏及性能探讨[J]. *结构工程师*, 2015, 31(2): 10-20.
- [12] Hashizume S, Takewaki I. Hysteretic-viscous hybrid damper system for long-period pulse-type earthquake ground motions of large amplitude[J]. *Frontiers in Built Environment*, 2020, 6: 1-12.
- [13] Zhang H, Liu X. Investigation of the seismic behaviours of three-dimensional high-rise steel frame structures equipped with oil dampers with variable stiffness[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 179: 106542.
- [14] 张大义, 夏颖, 张启成, 等. 金属橡胶力学性能研究进展与展望[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(6): 1432-1445.
- [15] 梁睿君, 郝文龙, 陈蔚芳. 金属橡胶力学性能及应用研究进展[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(1): 36-52.
- [16] 吴瑞先, 阮仕鑫, 吴芳, 等. 金属橡胶粘弹性阻尼迟滞力学与数值模型[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(1): 83-88.

- [17] 李雪红, 李文琳, 顾以明, 等. 新型耗能防落梁装置研发及其效应研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 139-144.
- [18] 张钦宇, 闫聚考, 许宏伟, 等. 地震作用下桥梁防碰撞及防落梁措施研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(2): 132-141.
- [19] 王渭锋, 朱文正, 袁向荣. 拉索式连梁装置设计参数对简支梁桥抗震效果的影响[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2013, 12(1): 52-57.
- [20] Shrestha B, Hao H, Bi K. Devices for protecting bridge superstructure from pounding and unseating damages: an overview[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016, 13(3): 313-330.
- [21] Gao H, Li J, Chen X, et al. Combined concrete and cable restrainers to prevent longitudinal unseating of highway bridges during earthquakes[J]. Engineering Structures, 2024, 314: 118388.
- [22] Guo J, Gao K, Dang X, et al. Seismic fragility assessment for highway bridges incorporating multi-level shape memory alloy cable dampers[J]. Engineering Structures, 2023, 287: 116172.
- [23] 俎林, 黄勇. 维修加固桥梁的抗震韧性评价方法[J]. 地震研究, 2020, 43(3): 522-530.
- [24] 刘振亮, 苑激, 李素超. 地震及次生突发灾害下公路桥梁网络韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 176-184.
- [25] 袁万城, 王思杰, 李怀峰, 等. 桥梁抗震智能与韧性的发展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 98-117.
- [26] 徐岳武, 同乐. 桥梁加固工程生命周期成本横向对比分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004(3): 30-34.

- [27] Zhang Y, Ding Y, Xu G. Investigation of an impact-buffered viscous damper: a new mechanical model, experiments, and numerical simulations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2025, 597: 118852.
- [28] Zhang Y, Ding Y, Xu G. Limit states of impact-buffered viscous dampers: a new model and the implications for the seismic fragility of bridges subjected to near-fault pulse-like ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2025, 195: 109416.
- [29] Zhang Y, Ding Y, Xu G. A continuous contact-force model for the impact analysis of viscoelastic materials with elastic aftereffect[J]. Multibody System Dynamics, 2024, 61(3): 435-451.
- [30] 李戈, 秦权, 董聪. 用遗传算法选择悬索桥监测系统中传感器的最优布点[J]. 工程力学, 2000, 17(1): 25-30.
- [31] 王贞, 侯金佑, 吴斌, 等. 高速磁浮列车-桥梁耦合振动实时混合试验的数值仿真研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(8): 270-276.
- [32] 丁勇, 常英, 张志强. 车桥耦合系统实时混合试验方法研究[C]//第二十届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 2020.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题

- (1) 提升新装置在大变形条件下的工作能力，避免其因变形过大而失效；
- (2) 揭示新型装置在极端荷载下提升桥梁韧性的机理；
- (3) 构建能够准确反映桥梁和新装置耦合系统时变特性的模型，并进行优化设计。

2. 主要研究内容及实施方案

(1) 新型阻尼-防落梁装置的设计与力学性能研究

本项目的首要任务是针对量大面广的梁式桥，研发一种新型阻尼-防落梁装置，结合粘滞阻尼器、金属橡胶材料和钢绞线，形成具备高效减振与防落梁功能的装置。该装置将特别针对极端荷载工况（如地震、洪水等），确保在极端荷载工况下装置能够防止桥梁梁体脱落并提升整体结构的安全性。

1) 新型阻尼-防落梁构造及其力学模型

首先将对新型阻尼-防落梁装置的结构设计进行深入研究。粘滞阻尼器在正常工况下主要提供减振功能，而钢绞线在极端荷载情况下与粘滞阻尼器协同工作，即采用“粘滞阻尼器+金属橡胶缓冲+钢绞线约束”三级协同工作模式防止梁体脱落，确保结构在极端工况下的安全性。金属橡胶将作为缓冲材料，为粘滞阻尼器提供一定的缓冲效果并附加耗能能力。为了优化金属橡胶在粘滞阻尼器中的布置方式，将探讨不同截面形状（如圆形和方形等）的金属橡胶缓冲物对装置性能的影响。通过静态与动态加载试验，分析各截面形状的缓冲效果，选择最佳的金属橡胶布置方式，确保装置在多种工况下的最佳工作状态。

在力学模型的构建上，将基于非线性接触力模型、麦克斯韦模型和双线性模型分别来模拟金属橡胶缓冲物、粘滞阻尼器和钢绞线的力学特性。并通过试验对力学模型的准确性进行验证，力-位移模型关键参数将作为设计依据。

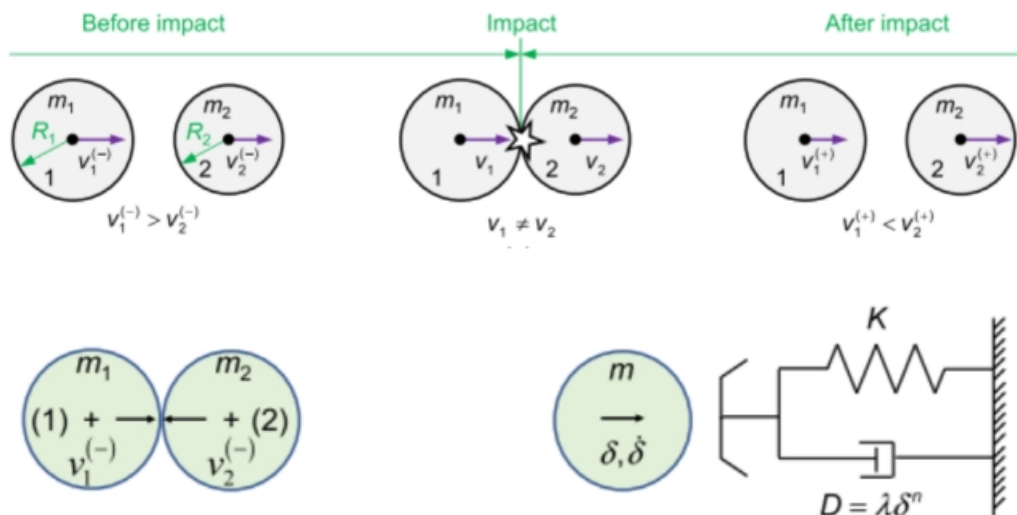


图 11 非线性接触动力学模型

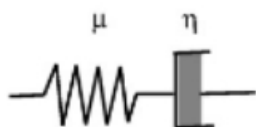


图 12 Maxwell 模型

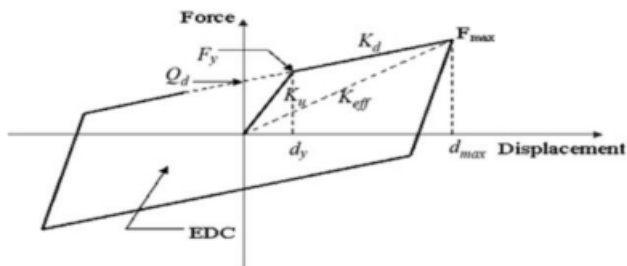


图 13 双线性模型

2) 试验设计与实施

试验部分将在哈尔滨工业大学结构与抗震试验中心进行。本项目将使用 250 吨 MTS 电液伺服试验机进行静力加载、正弦加载试验和复杂工况模拟加载试验。试验设计包括以下几个工况：

金属橡胶缓冲物的静力压缩试验：为了研究金属橡胶缓冲物在不同工况下的性能，本项目将使用 50kN/250kN 电子万能试验机（J216）进行静力压缩试验。试验设计将对不同相对密度、丝径和截面形状的金属橡胶试件进行测试。试验将设置不同的压缩速率和加载量，通过测量试件的压缩力、应变、位移等数据，分析不同金属橡胶参数对装置性能的影响。试验结果将为后续装置的优化设计提供数据支持。

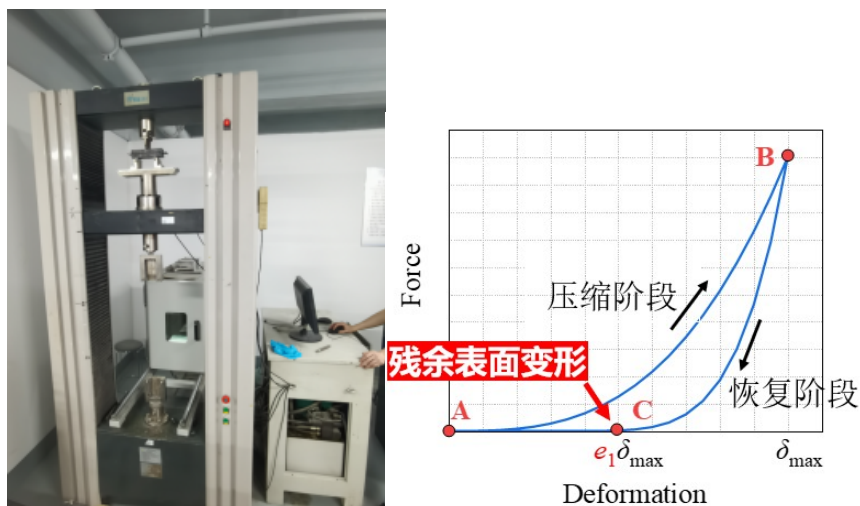


图 14 50kN/250kN 电子万能试验机即初步实验结果（二次缓冲示意图）

正弦加载试验：正弦加载将模拟装置在日常振动条件下的工作状态。本项目将设置多个振动频率（例如 0.5Hz、1Hz、2Hz）和不同幅值的正弦波形加载，通过试验测量装置的阻尼性能和变形响应。试验将探讨不同频率下粘滞阻尼器、金属橡胶和钢绞线的协同作用，以及装置的滞回特性。试验的主要目的在于优化粘滞阻尼器的布置方式和阻尼参数，以确保装置能够在不同频率和幅值下稳定工作。



图 15 MTS 公司 2500kN 电液伺服试验机

复杂工况模拟加载试验：地震模拟试验将采用混合试验方法，新型阻尼装置作为试验子结构，桥梁作为数值子结构，结合 Dspace 系统进行控制。混合试验具有实时模拟复杂边界条件和实时控制的优势，能够精确反映装置在地震等多种荷载下的工作状态。本项目将设计多个地震波形（如 El Centro 地震波、Northridge 地震波）和不同强度洪水冲击进行试验，测试新型阻尼装置在多种地震工况下的减振和防落梁性能。通过实时混合模拟，本项目可以在试验开始前提前验证数值模型的精确性，确保试验过程中误差最小化。

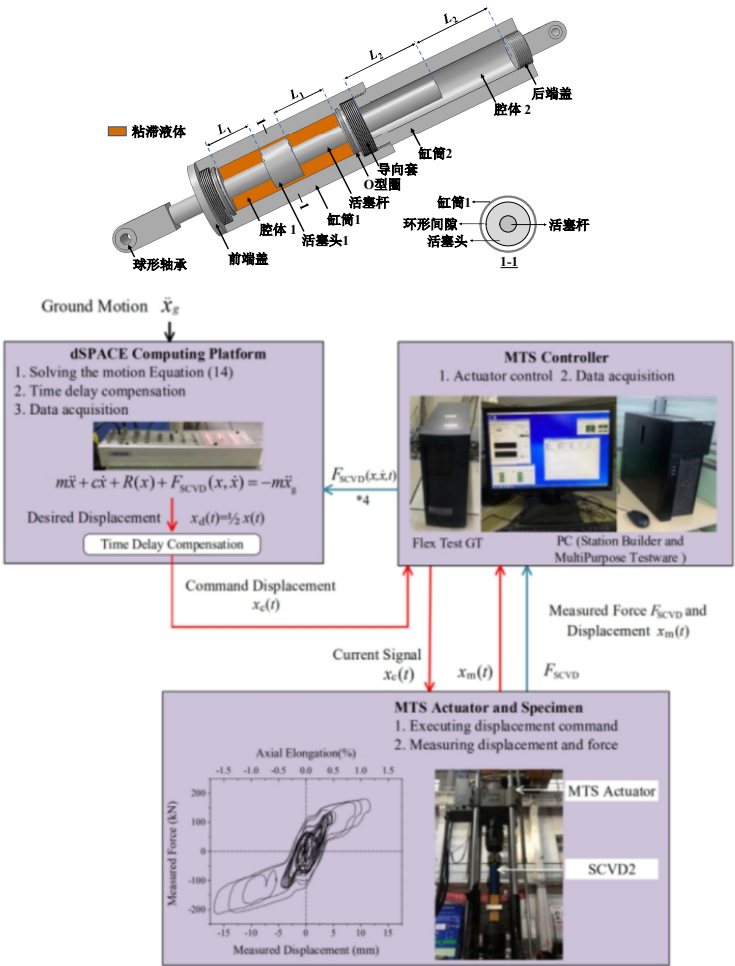


图 16 预期构造及混合实验方法示意图

3) 疲劳与耐久性试验

为了评估新型阻尼-防落梁装置的长期性能，本项目还将进行装置的疲劳试验和耐久性测试。本项目计划使用疲劳试验机进行多组加载试验，模拟装置在长期服役状态下的性能衰减情况。试验将设置不同的疲劳加载工况（如 20000 次、50000 次循环加载），并测量装置的滞回曲线，记录数量不少于 600 个循环。疲劳试验将帮助评估装置在长期振动和极端荷载作用下的性能变化，并通过试验结果对装置进行相应的改进和优化设计。

4) 模型优化与验证

试验数据将用于验证和修正装置的力学模型。通过对比试验数据与理论模型的预测结果，本项目将优化装置的设计参数，并调整金属橡胶的布置方式和粘滞阻尼器的阻尼系数。模型验证和优化的过程将反复进行，直到理论模型与试验结果高度一致。优化后的装置将具备更高的抗冲击能力、更强的减振效果以及更长的使用寿命。

(2) 基于新型阻尼-防落梁装置的桥梁结构韧性提升机理

本研究的核心任务之一是揭示新型阻尼-防落梁装置如何在极端荷载条件下提升桥梁结构的韧性，尤其是通过调控桥梁动力响应的方式来增强其抗震性能和延缓损伤积累。将采用有限元方法建立包含桥梁结构与阻尼装置的动力学模型，探索装置在极端荷载下的力学行为及其对桥梁韧性提升的具体作用机制，并考虑斜弯坡桥、连续梁边孔在强震作用下的落梁损伤累积分析。

建模与结构反应分析

在结构建模中，将采用欧拉-伯努利梁单元来对桥梁进行离散化

建模，并通过一致质量矩阵来精确计算桥梁的动力响应。为了描述系统耗能机制并捕捉桥梁结构在振动中的能量耗散特点，模型将采用瑞利阻尼，这种阻尼方式能够更准确地反映结构在极端振动条件下的真实动态行为。

在桥梁荷载模拟中，车辆动荷载的模拟通过移动集中荷载来实现，定义车辆的路径和速度以反映其对桥梁产生的动力效应。同时，洪水冲击力的模拟基于流体力学原理，施加时变荷载来研究桥梁在洪水条件下的动力响应。通过这些加载工况，能较全面地模拟桥梁在实际服役条件下的动态表现。动力学求解采用 Newmark- β 方法进行数值积分，这是一种适用于处理非线性问题的数值积分方法，能够在较大变形和复杂动态条件下精确模拟桥梁与阻尼装置在极端工况下的动力学行为。通过这一建模与分析手段，揭示新型阻尼装置如何通过能量耗散与变形控制，增强桥梁结构的整体韧性。

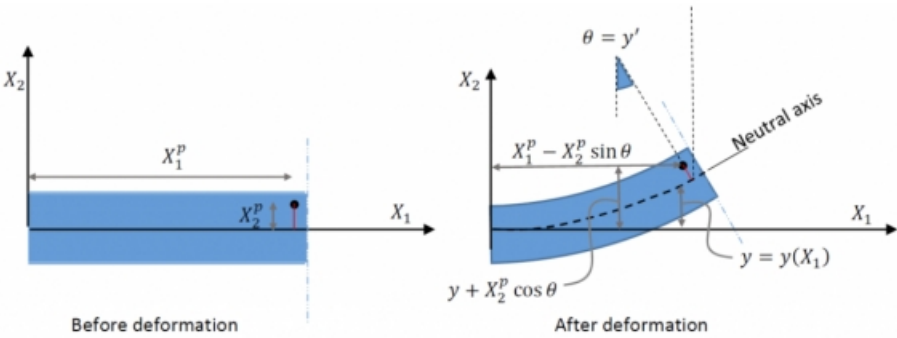


图 17 欧拉-伯努利梁理论

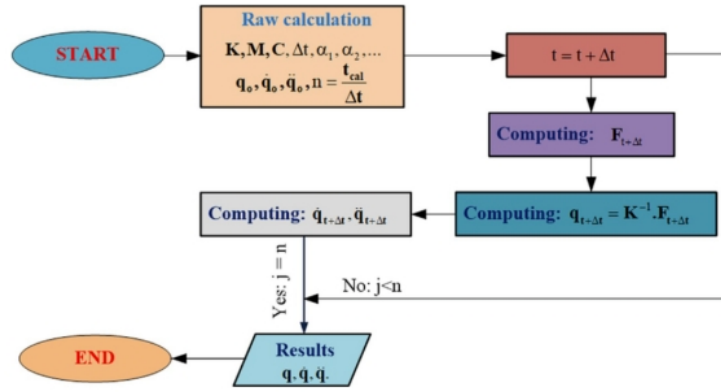


图 18 Newmark-beta 方法

缩尺试验验证

为了验证理论模型的准确性，本项目将在试验室进行缩尺试验。试验模型将根据桥梁结构与新型阻尼装置进行相应比例缩放。通过对不同荷载工况开展试验分析，对桥梁结构在极端荷载条件下的实际动力响应进行测量。

缩尺试验将为数值模型的精度提供有效的数据支持，通过将试验结果与数值模型的计算结果进行对比，确保数值模型能够反映真实的桥梁结构与阻尼装置的力学特性。这些数据不仅能够验证新型阻尼装置在提升桥梁韧性方面的实际表现，还能为后续的设计优化提供详细的试验数据依据，进一步完善装置的参数设计与配置。

结构韧性提升机理研究

在验证了模型准确性后，数值仿真将进一步研究新型阻尼-防落梁装置如何提升桥梁结构的韧性。首先，通过随机激励模拟桥梁在复杂工况下的动力响应，重点关注装置在低频和高频复合振动条件下的能量耗散机制。通过这一研究，本项目将揭示装置在减小结构内力和变形水平的同时，如何通过优化能量耗散来减缓结构的疲劳和损伤。

此外，结合近场地震动特性，分析新型阻尼装置在不同地震条件下对桥梁结构的保护效果。近场地震动中常见高速脉冲，容易引起结构较大的位移和内力，将重点讨论地震动类型以及速度脉冲周期对结构的冲击缓冲需求的影响。将研究装置中金属橡胶附加刚度和粘滞阻尼器耗能能力之间的影响。此外，金属橡胶附加的刚度可能会在一定程度上减小结构变形，但这可能会引起粘滞阻尼系统所耗散的能量减小。由粘滞阻尼器和金属橡胶所组成的新型阻尼器的荷载与金属橡胶的刚度之间的关系尚不清晰，本课题将通过敏感性分析对上述内容展开研究。

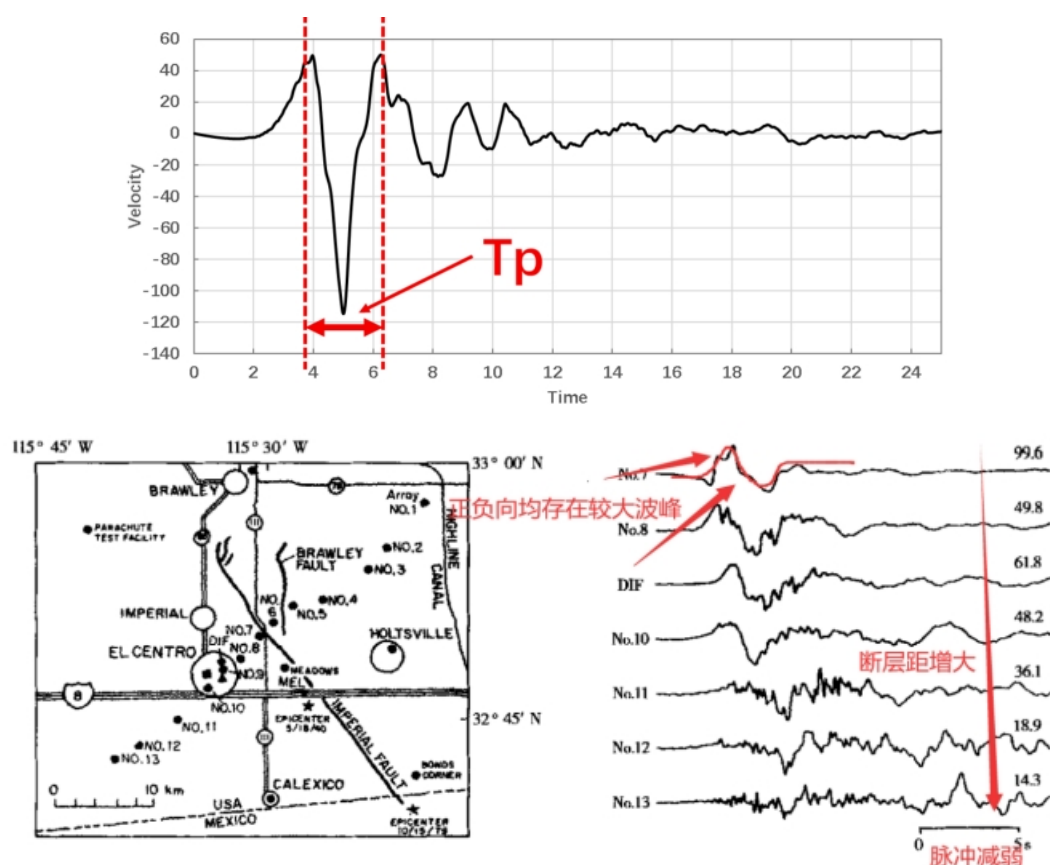


图 19 近场地震速度脉冲特征

(3) 多桥型多目标参数优化设计

为了确保新型阻尼装置在不同桥梁结构中的广泛适用性,本项目

将开展多桥型多目标参数优化设计。优化的重点在于如何通过调节阻尼系数、金属橡胶材料特性、钢绞线截面面积等设计参数，确保装置在各种荷载条件下实现最优性能。

1) 参数敏感性分析

参数敏感性分析是优化设计的第一步。在本项目中，本项目将使用正交试验设计方法对多个关键参数（如金属橡胶的相对密度、丝径、粘滞阻尼器的阻尼系数等）进行敏感性分析。例如，金属橡胶的相对密度可以在 0.1 到 0.5 之间变化，丝径可以在 0.1mm 到 0.5mm 之间变化，通过分析各个参数对装置整体性能（如减振效果、防落梁能力）的贡献，初步确定最优参数组合。

2) 改进的自适应遗传算法优化

为了提高优化的效率与精度，本项目不采用传统的标准遗传算法，而是采用改进的自适应遗传算法。自适应遗传算法具有动态调整交叉率与变异率的能力，使得在优化初期保持较高的搜索范围，并在优化后期通过降低变异率提高收敛速度。相比于标准遗传算法，自适应遗传算法在解决复杂、多目标优化问题时表现出更好的全局搜索能力和更高的收敛效率。

AGA 的主要优化流程如下。首先进行编码与初始化。本项目对装置的设计参数（如粘滞阻尼器的阻尼系数、金属橡胶的材料特性等）进行编码，并通过随机初始化生成初始种群。然后对自适应交叉与变异进行考虑。在每一代中，AGA 动态调整交叉和变异概率。对于种群中适应度较低的个体，提高变异率以扩大搜索空间；而对于适应度

较高的个体，降低变异率，保持种群多样性，同时加快收敛速度。最后确定适应度函数与选择策略。适应度函数将结合装置的减振效果、防落梁能力和成本效益等多目标进行评估。本项目采用基于轮盘赌选择的策略，确保适应度高的个体有更高的遗传几率，但也为适应度较低的个体提供一定的变异机会，以避免陷入局部最优解。

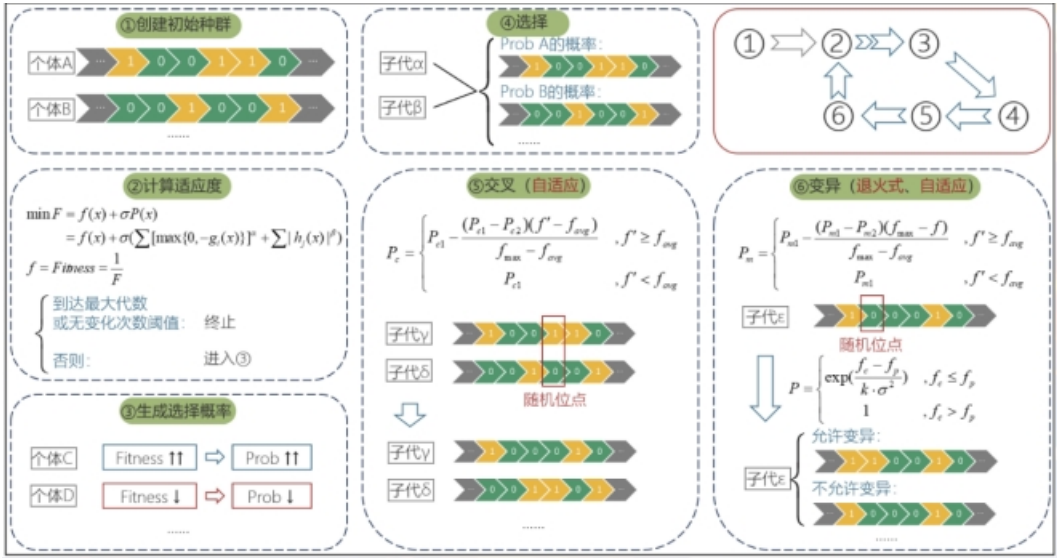


图 20 自适应遗传算法总示意图

3) 设计方法与施工建议

在本研究中，设计方法将围绕多目标优化原则，通过调节关键设计参数（如粘滞阻尼器的阻尼系数、金属橡胶的材料特性和钢绞线的截面面积等），确保新型阻尼-防落梁装置在各种桥梁结构中的最佳性能。首先，建立多目标优化函数，以减振效果最大化、防落梁能力最大化和成本最小化为优化目标。减振效果将通过减少桥梁结构的最大加速度响应来实现，防落梁能力通过优化钢绞线的最大应力和最大变形来实现，而成本最小化则通过减少材料使用量来控制。

在设计方法方面，将采用逐步优化法，根据参数敏感性分析结果，

先优化对装置性能影响较大的关键参数，逐步缩小优化范围，确保全局最优解的收敛。在此过程中，将对不同桥梁结构的设计需求进行匹配，制定适应不同荷载工况的最佳配置方案。在施工方面，将提出装置的选型步骤、安装要点、维护指南等相关实用办法。

为了验证设计方法的有效性，本项目将通过数值仿真对优化方案进行验证。有限元仿真将模拟桥梁在各种极端荷载条件下的动力响应，分析装置在不同设计参数下的表现。通过反复验证和调整，最终确保设计方法的有效性。

(4) 极端荷载-桥梁时变系统模型研究

在极端荷载作用下，桥梁结构的刚度、阻尼等参数可能随时间发生变化，这种时变特性对结构的动力响应有重要影响。为了更好地模拟这种动态变化，本项目将建立时变系统模型，通过引入时变刚度矩阵和阻尼矩阵，准确模拟桥梁结构在极端工况下的响应行为。

1) 时变系统理论

时变系统理论的研究旨在揭示桥梁结构在极端荷载下，其动力学特性如何随着时间发生变化。在实际工程中，桥梁结构的刚度和阻尼等关键参数会随着荷载持续作用或结构的局部损伤而逐渐发生变化，尤其是在长时间的强烈振动或多次地震作用下，桥梁的力学特性会表现出明显的时变特性。因此，本节的研究内容将重点关注以下几个方面。

首先，基于时变随机振动理论，建立桥梁结构的时变刚度矩阵和阻尼矩阵随时间演化的模型。这个模型将考虑桥梁在长时间动力荷载

下刚度衰减和阻尼变化的非线性特性，尤其是针对钢筋混凝土桥梁的疲劳和损伤积累效应进行分析。本项目将通过对桥梁在不同类型荷载下的响应进行模拟，研究桥梁结构的刚度如何随着荷载的施加逐步降低，进而影响结构的整体动力响应。

其次，通过引入累积损伤模型，结合时变随机振动模型，进一步分析结构损伤对时变系统的影响。累积损伤模型可以反映桥梁在多次地震或其他极端荷载作用下的损伤积累过程，并与时变系统模型结合，揭示结构的局部损伤如何引起整个桥梁动力响应的变化。通过这种模型，可以精确模拟桥梁在长期荷载下的动态特性变化，研究其在关键时刻可能出现的非线性效应及由此引发的局部破坏或失效。

2) 模型参数校准与验证

为了确保时变系统模型的准确性，本节将重点研究如何通过试验和数值仿真数据对时变模型中的关键参数进行校准。试验将结合桥梁的缩尺模型，通过加载试验获取桥梁在不同荷载条件下的刚度变化和损伤演化数据。具体而言，将通过多次加载试验（包括静态加载和动态加载）测量桥梁在不同时间段的刚度、阻尼等参数，并将这些试验数据用于校准时变系统模型的参数。

此外，针对模型中累积损伤的研究，将使用基于疲劳损伤理论的桥梁损伤演化模型，并通过对比实际的桥梁损伤数据（如局部开裂、钢筋屈服等）来验证模型的精度。通过试验校准和模型验证，最终形成一个能够准确反映桥梁结构在复杂荷载下时变特性的系统模型。

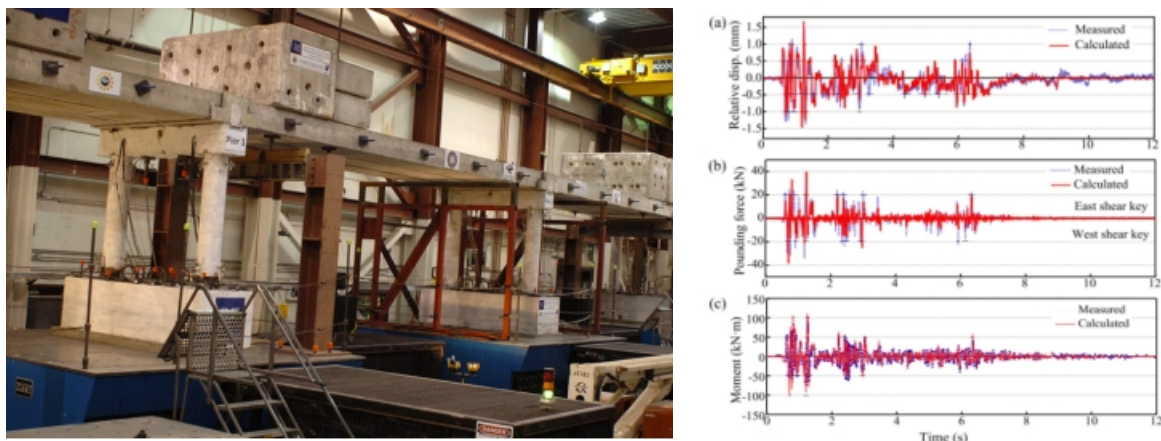


图 21 时变系统动力模型验证

3) 时变系统仿真与动态响应分析

在建立并校准时变系统模型后,本节将通过数值仿真深入分析桥梁结构在极端荷载条件下的动态响应。首先,模拟桥梁在地震作用下的响应变化,研究在近场地震和远场地震条件下,桥梁的刚度和阻尼如何随时间变化。仿真将包括多次强震的累积作用,分析桥梁在地震前、中、后不同阶段的动力响应。

其次,通过仿真桥梁在复杂动态荷载下的时变响应,研究不同频率和幅值组合的随机荷载如何加速桥梁的损伤积累。具体来说,本项目将模拟桥梁在多频随机振动条件下的响应,包括车辆动荷载与风荷载的叠加作用,分析桥梁在多种工况下的时变动态行为。通过这些仿真分析,可以进一步理解桥梁结构在长时间多重动力荷载作用下的损伤机制及结构性能衰减规律。

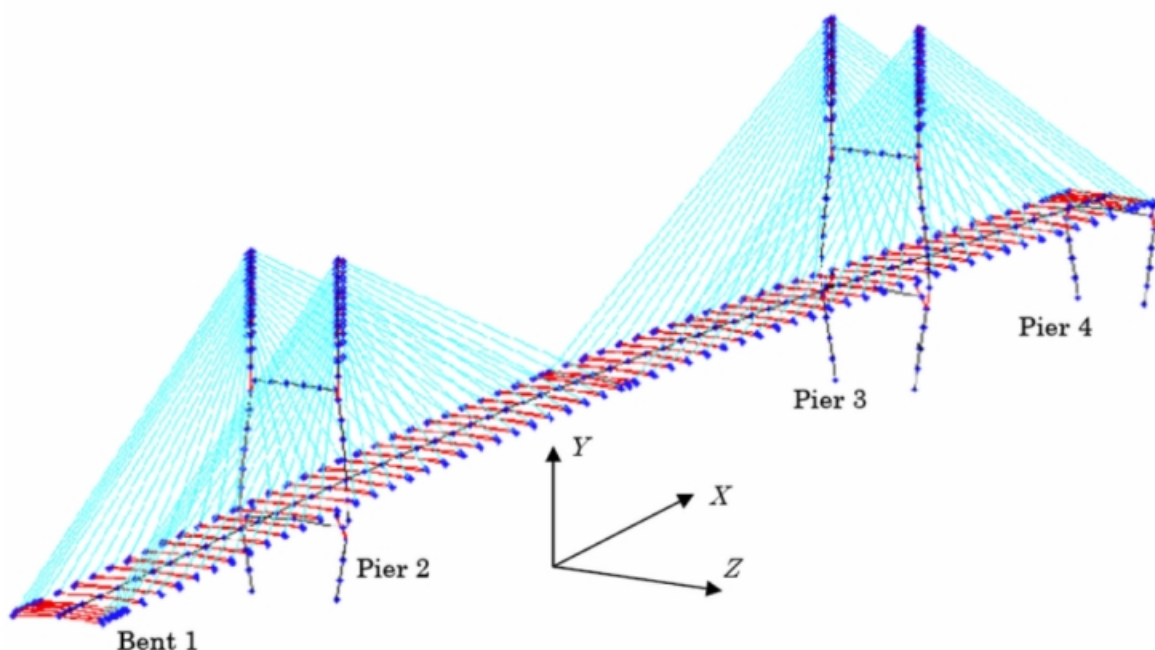


图 22 时变系统动力响应分析

4) 时变系统优化设计与破坏机理分析

在时变系统仿真的基础上，本节将进一步探讨如何通过优化设计提高桥梁结构在复杂环境下的抗灾能力。具体而言，通过调整粘滞阻尼器、金属橡胶和钢绞线的参数，优化它们在桥梁的布置方式和工作状态，以延缓桥梁刚度和阻尼衰减的速度，减少结构损伤积累。同时，还将基于时变系统模型的仿真结果，研究桥梁的破坏机理，特别是在累积损伤条件下的局部破坏模式。通过这些研究，揭示桥梁在极端荷载下从局部损伤到整体失效的演化过程。

通过这一节的研究，本项目将不仅能够预测桥梁结构在长期复杂荷载作用下的时变动力响应，还能够通过参数优化和模型分析，提出延长桥梁寿命、增强结构韧性和提高抗灾能力的设计方案。同时，这些研究成果还将为桥梁结构的健康监测和安全预警提供重要的理论

支持。

3. 技术路线

本项目围绕新型阻尼-防落梁装置的研发与桥梁结构韧性提升机制展开，采用构造设计、力学建模、试验研究、理论分析、数值仿真和优化设计等多种技术手段，形成系统而可行的研究方案。研究方案包括装置设计与力学性能评估、桥梁结构韧性机制探析、多桥型适应性设计以及极端荷载作用下桥梁时变系统建模与响应分析四个阶段，贯穿理论与工程应用。

在装置设计与性能研究方面，项目将综合运用非线性接触力理论、粘滞阻尼力学模型及双线性钢绞线模型，构建新型阻尼-防落梁装置的力学分析体系。针对装置中的金属橡胶缓冲材料，将通过静态压缩试验探究其相对密度、截面形状与丝径等参数对能量耗散能力和刚度特性的影响，使用 50kN 及 250kN 电子万能试验机进行加载，采集力和位移等数据，为模型参数标定与设计优化提供依据。粘滞阻尼器与钢绞线的协同作用则通过正弦加载与复杂工况模拟试验评估，试验采用哈尔滨工业大学结构实验中心的 2500kN 电液伺服加载系统，加载频率范围覆盖 0.5~2Hz，幅值设置多级，以验证阻尼性能和滞回特性。

为了评估装置在实际极端荷载下的响应表现，项目将基于实时混合试验方法展开复杂工况模拟试验，装置作为物理子结构，桥梁作为数值子结构，通过 dSPACE 系统实现两者协同控制，模拟 El Centro、Northridge 等典型地震波及冲击荷载作用下的桥梁响应，重点考察装

置的减振能力、防落梁功能与滞回性能。此外，为研究装置的长期服役性能，将开展疲劳加载试验，模拟疲劳循环加载下装置性能退化过程，评估其耐久性与使用寿命。

理论研究方面，项目将采用有限元建模方法，建立装置-桥梁耦合系统的动力学模型，并考虑装置对下部结构的影响。桥梁结构采用欧拉-伯努利梁单元离散建模，计算效率高；质量矩阵采用一致质量矩阵，引入瑞丽阻尼，能有效模拟结构在小应变下的耗能特性；数值求解采用 Newmark- β 积分方法，以高精度求解多种荷载（车辆动荷载、洪水冲击、地震波等）下结构响应行为。同时，设立缩尺物理模型进行结构试验验证，对比试验结果与数值模型，反向修正模型参数，提高模型的可靠性与工程适用性。

针对桥梁结构的韧性提升机制，项目将通过随机激励分析装置对桥梁在低频与高频复合振动下的能量耗散效率；分析地震速度脉冲特征对装置响应的影响，研究金属橡胶刚度与粘滞阻尼器阻尼系数之间的相互作用，采用敏感性分析法揭示关键设计参数对整体性能的控制机制。同时研究金属橡胶的应力-应变曲线、极限压缩率、缓冲机理。

在多桥型设计适应性方面，将采用正交试验设计进行参数敏感性分析，提取影响性能的关键参数，并引入改进的自适应遗传算法进行多目标优化设计，优化目标包括减振效果、防落梁能力与成本控制，适应度函数结合多因素综合评价，动态调整交叉与变异概率，提升全局搜索能力与收敛效率。优化结果将通过有限元仿真验证其合理性与工程推广潜力。

在极端荷载作用下桥梁结构的时变响应研究方面，项目将构建时变刚度与阻尼系统模型，考虑累积损伤理论，引入时变随机振动理论对刚度衰减、阻尼演化规律进行建模；同时通过结构缩尺试验采集关键参数变化数据，对时变模型进行反演校准。仿真部分将模拟多次地震、多频振动及车辆-风荷载复合作用下结构时变响应规律，分析局部损伤演化过程与整体失效路径，并在此基础上提出针对性的抗震优化设计方案。

上述研究内容具有明确的理论基础、成熟的试验条件与先进的仿真手段，研究思路清晰，技术路线完整，保障了项目从装置设计到结构响应分析、从试验验证到优化应用全过程的科学性与可行性。

本项目以“新型阻尼-防落梁装置研发—桥梁韧性提升机理揭示—多桥型多目标参数优化—极端荷载时变系统建模与分析”为主线，综合运用力学建模、室内试验、实时混合试验、有限元数值模拟、参数敏感性分析、多目标优化算法及时变系统理论等方法，形成“模型建立—试验验证—机理分析—参数优化—系统扩展”的闭环技术路线，实现装置性能提升与桥梁结构韧性增强的系统研究。

工作流程：

首先，在新型阻尼-防落梁装置设计阶段，完成构造方案制定与力学模型初步建立，明确粘滞阻尼器、金属橡胶与钢绞线的协同作用机制。

随后，进入试验研究阶段，开展静态压缩试验、正弦加载试验和混合试验，全面获取装置在多种工况下的力学性能数据，并结合疲劳

加载试验评估其长期使用可靠性。

而后进行机理分析，基于试验结果构建精确的装置-结构耦合动力学模型，并将模型扩展至多种桥型结构与复杂荷载场景中进行响应分析与性能评估。在模型验证阶段，将通过缩尺试验对比仿真结果，进一步校准模型参数，确保模型可信度。

下一阶段进行参数敏感性分析与多目标优化设计，利用正交试验与自适应遗传算法对关键参数进行优化，输出最优设计配置。在此基础上，开展极端荷载作用下的桥梁时变响应研究，分析装置在长期、多次荷载作用下对结构性能的影响，提出抗灾能力提升的设计建议。

最后，形成综合性能评估体系，基于实验、仿真与理论研究成果，提出具有推广价值的阻尼-防落梁装置设计与桥梁结构韧性提升策略。整个研究流程具有逻辑完整性与技术连续性，为实现项目目标提供了有力支撑。

本课题的技术路线图如下：

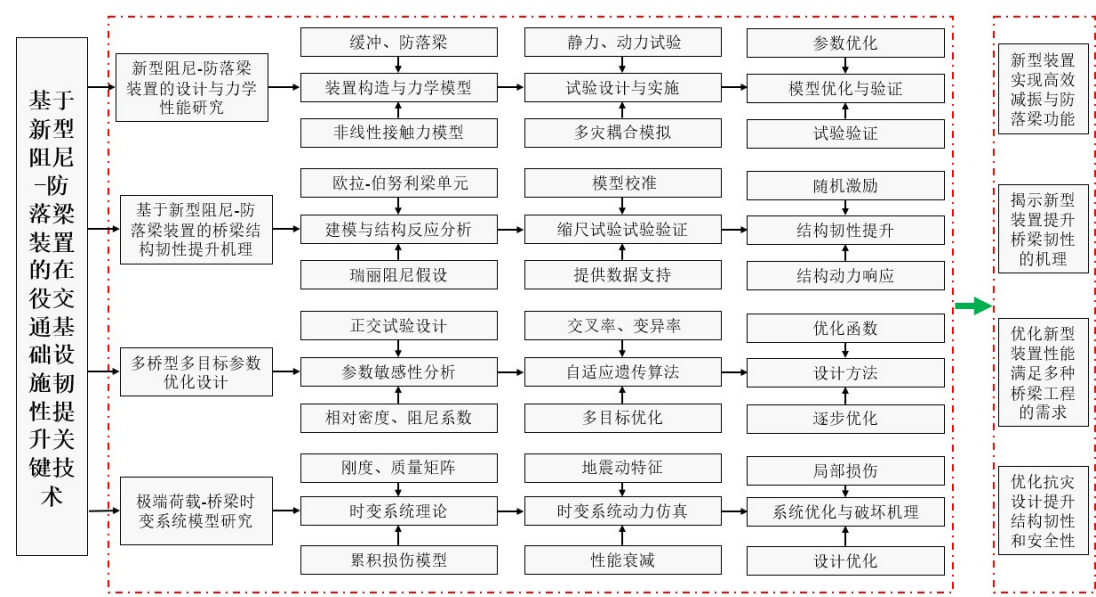


图 23 技术路线图

4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目在完成新型阻尼-防落梁装置的构造设计、力学性能试验验证及桥梁结构韧性提升机理研究的基础上,拟将研究成果逐步向工程应用转化,为后续桥梁结构的技术改造与新建工程提供可靠的技术支撑。项目形成的装置构造方案、力学模型、参数设计方法及数值分析流程,可直接服务于既有桥梁的抗震加固、防落梁改造以及新建桥梁的减震与安全设计。后续可结合区域桥梁运维与基础设施建设需求,开展示范工程应用与工程化优化,推动研究成果在实际工程中的推广应用,分阶段降低金属橡胶成本使其成为桥梁防震减灾领域核心产品。同时,相关理论模型与试验数据可作为工程设计和技术标准编制的重要参考,为桥梁抗灾性能提升及基础设施安全保障提供持续支撑,体现本项目成果良好的成熟度与应用前景。

5. 有关技术经济指标

本项目的新型阻尼-防落梁装置具备显著的经济效益,通过提高桥梁抗震性能和减小灾害损失,能够有效减少维护和加固成本。预计装置推广后,可为桥梁管理单位节省大量的维修和加固费用,经济效益预计超千万元。此外,装置的广泛应用将带动相关产业链的发展,如材料生产和工程施工。同时,装置的推广应用将显著提升桥梁结构的耐久性,延长其使用寿命,进一步降低长期维护成本。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

(1) 项目承担单位

陕西省交通规划设计研究院有限公司是本项目总牵头。本团队依托陕西省绿色低碳与智能建造工程技术研究中心、省级企业技术中心开展研究工作，负责装置整体设计与优化、项目策划及方案论证、桥梁结构计算分析、材料与结构试验方案制定，统筹项目实施与成果汇总。

陕西省交通规划设计研究院有限公司始建于 1958 年，是国内交通工程领域集勘察设计、科研创新、技术咨询于一体的综合型技术服务企业，是陕西省交通基础设施建设与科技创新的核心骨干单位，拥有深厚的行业积淀与交通基础设施全生命周期一体化技术服务能力。

公司资质体系完备，现持有工程设计公路行业甲级，市政行业道路、桥梁、城市隧道工程专业甲级，工程勘察综合甲级，测绘甲级等共计 30 项专业资质。核心业务覆盖各等级公路、桥梁、隧道、交通工程、港口码头、民用建筑、市政工程的勘察设计，同时深耕公路交通规划、遥感与地理信息技术应用、材料试验、工程技术咨询、地质灾害治理、设计施工总承包等多元领域，可全方位满足交通基础设施建设全流程技术需求。

公司科技创新属性突出，2009 年被认定为国家高新技术企业，2022 年入选“全国科改示范企业”，2024 年入选陕西省“省属重点科技型企业”。公司建有博士后科研工作站，并依托陕西省绿色低碳与智能建造工程技术研究中心、省级企业技术中心、西安市绿色智造交通工程研究中心、西安市智慧与低碳交通工程技术研究中心、BIM 技术与全装配结构研究中心、交通安全产业技术研发中心等科

研平台，形成了完善的科技创新体系。依托科研平台，公司累计完成 200 余项省部级科研课题研究，在公路桥梁抗震减振、绿色低碳建造、智能交通等领域形成了成熟的技术体系与丰富的研究成果。

截至目前，公司累计取得知识产权 450 项、软件著作权 50 项；先后斩获陕西省科学技术进步一等奖、二等奖，中国公路学会科技进步一等奖，中国钢结构协会科学技术特等奖，陕西省交通运输科学技术奖、陕西省优秀专利奖等 200 余项科技类奖项，科技创新实力与工程服务能力稳居区域交通行业前列。

（2）项目参与单位

哈尔滨工业大学概况

哈尔滨工业大学是隶属于工业和信息化部在全国顶尖理工类研究型大学，为国家“双一流”建设 A 类高校、“985 工程”“211 工程”重点建设高校，以“工程师的摇篮”著称，在结构工程、抗震防灾、智能建造等领域积淀深厚，拥有国家级重点实验室、工程研究中心等顶尖科研平台，是我国交通基础设施领域高端人才培养与关键技术研发的核心力量。

华路有道（北京）信息科技有限公司概况

华路有道（北京）信息科技有限公司是专注于交通基础设施智慧感知与健康监测的高新技术企业，聚焦公路、桥梁等工程的数字化技术服务，依托重载车辆 - 桥梁耦合作用分析、结构健康监测等核心技术，与高校及行业龙头企业开展产学研合作，为交通管理与工程建设单位提供全生命周期的智慧养护解决方案，助力交通基础设施智能

化升级。

2. 技术力量及人员构成

姓 名	单 位	性别	出生年月	技术 职称	专业	在项目中担 任具体工作
赵昕	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	女	1982.07	正高级	道路工程	项目总负责
杨浩军	陕西交通控股集团有 限公司延定分公司	男	1982.02	副高级	道路工程	项目协调
傅震	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	男	1976.10	副高级	桥梁工程	技术负责
边陇超	陕西交控大修专项工 程管理处	男	1983.03	副高级	公路工程	项目协调
丁勇	哈尔滨工业大学	男	1984.11	副高级	桥梁工程	高校技术负 责
杨欣	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	男	1980.02	正高级	桥梁工程	结构计算分 析
王建飞	华路有道（北京）信 息科技有限公司	男	1988.01	副高级	桥梁工程	项目具体实 施
李大军	清华大学	男	1967.05	副高级	桥梁工程	项目具体实 施
牛永喆	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	男	1989.06	副高级	桥梁工程	项目策划与 方案论证
王帅	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	男	1992.01	副高级	桥梁工程	结构计算分 析
付成林	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	男	1993.09	副高级	桥梁工程	结构计算分 析
申晓剑	陕西交通控股集团有 限公司延定分公司	男	1985.02	副高级	桥梁工程	项目策划与 方案论证

黄旭峰	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1981.10	正高级	道路工程	项目具体实施
李鑫	陕西交通控股集团有限公司延定分公司	男	1982.02	副高级	道路工程	项目策划与方案论证
赵金凯	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1996.02	中级	桥梁工程	结构计算分析
崔晓晓	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	1997.07	中级	桥梁工程	材料与结构试验方案
刘宇飞	清华大学	男	1988.05	中级	桥梁工程	装置研发及结构实验
张翼飞	哈尔滨工业大学	男	1994.07	副高级	桥梁工程	装置研发及结构实验
屈文新	哈尔滨工业大学	男	2000.05	助理级	桥梁工程	结构实验与报告编写
杨兴东	哈尔滨工业大学	男	1998.09	助理级	桥梁工程	结构实验与报告编写
黎佳莹	哈尔滨工业大学	女	1999.11	助理级	桥梁工程	结构实验与报告编写

3. 各自承担的主要工作

陕西省交通规划设计研究院有限公司：项目总牵头，负责装置整体设计与优化、项目策划及方案论证、桥梁结构计算分析、材料与结构试验方案制定，统筹项目实施与成果汇总。

陕西交通控股集团有限公司延定分公司和陕西交控大修专项工程管理处：协助完成应用现场测试，衔接科研与工程应用。

哈尔滨工业大学：高校技术负责，主导新型装置研发及结构实验、

力学模型验证，利用试验平台开展静力加载、正弦加载及混合试验，编写结构实验报告。

华路有道（北京）信息科技有限公司：负责项目具体实施，提供交通基础设施智慧感知、健康监测相关数字化技术支持，助力装置工程化落地。

4. 项目主要负责人情况

赵昕，正高级工程师，陕西省科技创新领军人才，长安大学硕士研究生校外指导教师，陕西省公路学会青年专家委员会委员，中国公路勘察设计协会“数字化设计与BIM技术应用推广”分会理事。自2007年以来长期从事科研创新工作，先后主持和参与行业、地方、团体标准编制16项；主持参与省部级科技项目20项，研发新产品10项，其中3项获得陕西省重点新产品认证；获得国家专利20项，软件著作权9项；发表核心论文10余篇。多项项目成果纳入行业、地方和团体标准，并获得陕西省科学技术二等奖，河南省科学技术二等奖，中国公路学会科技进步一等奖、中国钢结构协会科学技术特等奖、中国设备管理协会设备管理与技术创新成果特等奖、陕西省交通运输科学技术一等奖、河南省交通科技技术二等奖、周口市科学技术进步一等奖、陕西省三新三小创新竞赛奖、陕西省秦汉杯BIM创新竞赛一、二等奖，陕西省匠心杯建设工程BIM技术应用大赛一等奖等奖项，产生了显著的社会、经济效益，获得业界同行专家的广泛认可。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

1. 依托工程（工作）概况

本项目依托 G5 京昆高速西安至陕川界段安全韧性提升工程开展研究，G5 京昆高速西安至陕川界段安全韧性提升工程路线全长 326.03 公里，桥涵 134 座，用于实桥测试与应用验证。

此外，S16 延吴高速和 S23 定吴高速（全长 202.147 公里，桥梁 142762.95 米 / 680 座），可为本项目提供实桥测试。

2. 投资来源

本项目研究经费由陕西省交通运输厅补助经费、陕西省交通规划设计研究院有限公司自筹经费以及其他资金组成。

3. 工程进度与项目科研进度的配合

本项目依托 G5 京昆高速西安至陕川界段安全韧性提升工程开展研究，坚持“科研融入工程、成果服务工程”的原则，确保科研工作与工程实施同频共振、协同推进。项目团队将依托沿线丰富的桥梁结构类型和典型的工况条件，深入开展装置的研发、试验与验证工作，充分发挥依托工程在场景支撑、数据获取与应用验证方面的综合优势。同时，科研工作将主动对接工程建设各阶段的技术需求与关键问题，适时调整研究节奏和任务侧重，推动成果在工程中转化应用，实现科研与工程的深度融合与良性互动。

4. 组织管理形式

本项目实行项目负责人负责制，在依托单位统一领导下开展组织实施。由项目负责人全面统筹研究计划制定、任务分解与进度控制，负责项目的整体协调与质量把关；各研究专题分别设立责任人，具体承担装置设计与试验研究、数值模拟与机理分析、参数优化与方法研

究及时变系统模型等相关工作，形成分工明确、协同推进的研究团队。项目组建立定期会议与阶段性汇报制度，及时交流研究进展、协调关键问题，确保各专题之间的有效衔接。依托哈尔滨工业大学结构与抗震试验中心等平台条件，统一安排试验资源与数据管理，加强过程监督与成果审核，保证研究工作规范有序开展。同时，建立过程检查与成果评估机制，对项目实施情况进行动态管理，确保项目按计划高质量完成。

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	19.988	合 计	100	19.988	80.012
工程配套研 究经费	0	（一）直接费用	75	19.988	55.012
单位自筹	60.012	1.设备费	0	0	0
其他经费	20	（1）购置设备费	0	0	0
		（2）设备改造与租赁 费	0	0	0
		2.业务费	68	19.988	48.012
		（1）材料费	30	12	18
		（2）测试化验实验加 工费	23	7.988	15.012
		（3）燃料动力费	0	0	0
		（4）差旅费/会议费/国际合 作与交流费	10	0	10
		（5）出版/文献/信息传播/ 知识产权事费	5	0	5
		（6）其他费用	0	0	0
		3.劳务费	7	0	7
		（1）专家咨询费	2	0	2
		（2）聘用人员劳务费	0	0	0
		（3）其他劳务费	5	0	5
		（二）间接费用	25	0	25
		4.管理费	8	0	8
		5.绩效支出	17	0	17

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。

七、项目绩效指标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1、专利授权数（项）	3
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	3
		（3）外观设计	
		2、软件著作权授权数（项）	
		3、发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其它	2（其中，中文核心 1 篇）
		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
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	1
		（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	否
		（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	
		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	
		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	带动桥梁加固等相关产业高质量发展
		7、技术集成示范（项）	
		8、建立示范基地（亩数）	
		9、节约资源能源	减少桥梁重建材料消耗
		10、环保效益	降低建筑废弃物排放
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

1.项目预期目标

项目开发的新型阻尼-防落梁装置可提升桥梁结构在极端荷载下的抗震韧性和安全性。可应用于大型桥梁工程项目试点，通过实验验证其减振和防落梁效果，确保在复杂工况下的性能可靠性。随后逐步推广至桥梁结构改造与新建项目中，特别是在抗震设防高度区及重载交通区的桥梁中应用。通过标准化设计和施工方案的制定，通过细化依托工程的具体桥梁段、桥型、支座类型及施工进度安排确保装置的快速应用和推广。

2.提交的研究成果及其形式

- (1) 发表学术论文 2 篇（其中，中文核心 1 篇，注明依托陕西交通科技项目及编号）；
- (2) 形成研究报告 1 份；
- (3) 申报专利 3 项；
- (4) 形成自主研发的新型阻尼-防落梁装置产品。

3.经济、社会、环境效益分析

(1) 经济效益分析

1) 成本节约

新型阻尼-防落梁装置虽然涉及设备购置、安装、维护等成本，但相对于桥梁整体成本而言，这些费用是较小的，其经济成本在桥梁总造价中所占比例极低。然而，这些阻尼器系统却能在很大程度上降低桥梁落梁的风险，从而避免了因桥梁损坏或倒塌造成的巨大经济损失。这种成本节约效应在地震等自然灾害频发的地区尤为显著。

2) 减少维修与重建费用

传统的桥梁抗震措施往往难以完全避免地震造成的损坏。一旦桥梁受损，维修和重建费用将极为高昂。而新型阻尼-防落梁装置的应用，能够显著降低桥梁在地震中的受损程度，从而减少维修和重建的次数与费用。这种经济效益在长期运营中尤为明显，有助于提升桥梁的经济效益和使用寿命。

3) 提高桥梁通行能力

地震等自然灾害往往会导致桥梁通行中断，给交通运输带来极大不便。新型阻尼-防落梁装置的应用，能够保障桥梁在地震等极端条件下的通行能力，减少因桥梁损坏而导致的交通拥堵和延误。这种通行能力的提升，对于促进区域经济发展、提高交通运输效率具有重要意义。

4) 促进相关产业发展

新型阻尼-防落梁装置的研发成功，将带动相关产业的发展。例如，阻尼器制造、安装、维护等产业链将得到进一步拓展和完善。同时，该技术的推广与应用还将促进桥梁设计、建造、检测等领域的创新与发展，形成良性循环的产业链生态系统。

5) 提升区域投资吸引力

桥梁作为交通基础设施的重要组成部分，对于区域经济发展具有重要影响。新型阻尼-防落梁装置的应用，将提升桥梁的安全性和稳定性，增强区域交通系统的整体抗风险能力。这将有助于提升区域的投资吸引力，吸引更多的资金、技术和人才流入该区域，推动区域经济的繁荣发展。

6) 减少灾害损失

地震等自然灾害往往会造成巨大的经济损失和社会影响。新型阻尼-防落梁装置的应用，能够在很大程度上减少桥梁在地震中的受损程度，从而降低灾害损失。这种经济效益不仅体现在直接的经济损失减少上，还体现在减少因灾害导致的社会动荡、人员伤亡和救援成本等方面。

(2) 社会效益分析

1) 降低地震灾害风险

地震等自然灾害对桥梁等基础设施的破坏往往造成严重的社会影响。新型阻尼-防落梁装置通过其卓越的抗震性能，有效降低了桥梁在地震中的受损风险，从而减少了因桥梁倒塌或损坏引发的次生灾害。这种装置的应用，为公共安全提供了坚实的保障，降低了地震等自然灾害对人民生命财产安全的威胁。

2) 提升应急响应能力

在地震等灾害发生后，桥梁作为交通系统的关键节点，其安全状况直接影响到救援工作的效率和效果。新型阻尼-防落梁装置的应用，使得桥梁在地震中能够保持较好的通行能力，为救援车辆和人员的快速通行提供了便利。这不仅缩短了救援响应时间，还提高了救援效率，为减少灾害损失、保障人民生命财产安全提供了有力支持。

3) 促进交通物流的顺畅

桥梁作为交通系统的重要组成部分，其安全性和稳定性直接影响到区域交通物流的顺畅程度。新型阻尼-防落梁装置的应用，提升了桥梁的抗震能力和通行能力，保障了交通物流的顺畅运行。这有助于

降低物流成本、提高物流效率，促进区域经济的繁荣发展。

4) 增强区域投资吸引力

一个地区的基础设施状况是吸引外来投资的重要因素之一。新型阻尼-防落梁装置的应用，提升了桥梁的安全性和稳定性，增强了区域基础设施的整体水平。这有助于提升该地区的投资吸引力，吸引更多的资金、技术和人才流入该区域，推动区域经济的持续健康发展。

5) 提高公众安全意识

新型阻尼-防落梁装置的研发成功和应用，引发了社会各界对桥梁安全问题的广泛关注。通过宣传和教育活动，公众对桥梁安全的重要性有了更深刻的认识，安全意识得到了显著提升。这种安全意识的提升，有助于形成全社会共同关注、共同参与桥梁安全工作的良好氛围。

6) 增强公众信心

桥梁作为公共设施的重要组成部分，其安全性和稳定性直接关系到公众的日常生活和出行安全。新型阻尼-防落梁装置的应用，使得桥梁在地震等极端条件下的安全性和稳定性得到了显著提升。这有助于增强公众对桥梁安全的信心，提高公众对政府和相关部门工作的满意度和信任度。

7) 促进科技创新

新型阻尼-防落梁装置的研发成功，是科技创新的重要成果之一。这一成果不仅推动了桥梁抗震技术的进步，还带动了相关领域的科技创新和产业升级。例如，在材料科学、结构工程、机械制造等领域，新型阻尼-防落梁装置的研发和应用都提出了新的挑战 and 机遇，促进

了这些领域的科技进步和创新发展。

8) 推动产业创新

新型阻尼-防落梁装置的研发成功，还推动了相关产业的创新发展。例如，在阻尼器制造、安装、维护等领域，新的市场需求和技术要求促进了这些产业的转型升级和创新发展。同时，新型阻尼-防落梁装置的应用还带动了相关产业链的发展和完善，形成了更加完善的产业生态系统。

(3) 环境效益分析

1) 降低地震等自然灾害对环境的破坏

地震等自然灾害往往对桥梁等基础设施造成严重的破坏，进而引发一系列的环境问题，如土壤侵蚀、水体污染等。新型阻尼-防落梁装置通过其卓越的抗震性能，有效降低了桥梁在地震中的受损风险，从而减少了因桥梁倒塌或严重损坏而可能引发的次生灾害和环境污染。这种装置的应用，为环境保护提供了有力的支持。

2) 减少重建过程中的资源消耗与废弃物产生

当桥梁因地震等原因受损时，其重建过程往往需要消耗大量的建筑材料、能源和人力资源，并产生大量的建筑废弃物。新型阻尼-防落梁装置的应用，通过减少桥梁受损的概率和程度，间接降低了重建过程中的资源消耗和废弃物产生。这不仅有助于节约资源，还减轻了环境压力。

3) 延长桥梁使用寿命

新型阻尼-防落梁装置通过提高桥梁的抗震能力和稳定性，显著延长了桥梁的使用寿命。这意味着桥梁在更长的时间内能够保持良好

的使用状态，减少了因频繁维修和更换而产生的资源浪费。这种资源节约的效益对于推动可持续发展具有重要意义。

4) 推动环保材料的应用

在新型阻尼-防落梁装置的研发和生产过程中，环保材料的应用得到了广泛的关注。这些材料不仅具有优异的性能，还能够降低对环境的负面影响。通过推动环保材料的应用，新型阻尼-防落梁装置为桥梁工程领域的绿色发展做出了积极贡献。

5) 促进绿色建筑的发展

新型阻尼-防落梁装置作为桥梁工程领域的重要创新成果，其研发和应用推动了绿色建筑的发展。绿色建筑强调在建筑物的全寿命周期内，最大限度地节约资源、保护环境和减少污染。新型阻尼-防落梁装置通过提高桥梁的安全性和稳定性，延长了桥梁的使用寿命，减少了资源浪费和环境污染，与绿色建筑核心理念相契合。

6) 提升公众环保意识

新型阻尼-防落梁装置的研发成功和广泛应用，将引发公众对桥梁安全、抗震以及环保等问题的关注。这种关注有助于提升公众的环保意识，促进社会各界共同参与环保事业。通过宣传和教育活动，公众将更加了解环保的重要性，并积极参与环保行动，共同推动环境保护事业的发展。

九、其它需要说明的问题

无。

十、申请单位意见

陕西省交通规划设计研究院有限公司全力支持该项目立项，为该项目提供充足的配套经费，并确保项目研究成果在依托工程落地、实施。

陕西交通控股集团有限公司延定分公司和陕西交控大修专项工程管理处协助完成应用现场测试，衔接科研与工程应用。

哈尔滨工业大学和华路有道（北京）信息科技有限公司全力支持该项目立项，为项目提供技术开发和试验研究等支持，并全力配合项目研究成果在依托工程落地、实施。



单位负责人：（签字）

张健

2026 年 3 月 26 日

（公章）

单位负责人：（签字）

杜子平

2026 年 3 月 26 日

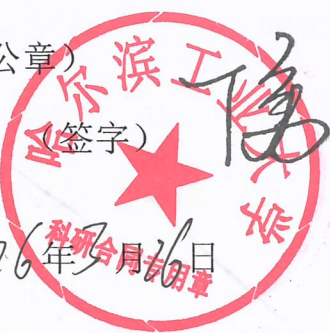


单位负责人：（签字）

李锐

2026 年 3 月 26 日

(公章)
单位负责人: (签字)
2026年3月16日



(公章)
单位负责人: (签字)
2026年3月16日



基于新型阻尼-防落梁装置的在役公路桥梁 韧性提升关键技术 大纲评审意见

2026年3月12日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“基于新型阻尼-防落梁装置的在役公路桥梁韧性提升关键技术”（项目编号：25-62K）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容比较全面，研究目标明确，技术路线可行。

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

三、预期成果覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

聚焦依托工程新型阻尼-防落梁装置的应用场景，强化应用技术研究。

主任委员：王彦科

2026年3月12日

专家审查意见表

项目名称	25-62k 基于新型阻尼防落梁装置的在役公路桥梁韧性提升关键技术				
专家姓名	王登科	职务/职称	正高级工程师	专 业	桥梁与隧道
专家单位	陕西省铁路集团公司			联系电话	13709260508

评 审 意 见

本项目研究必要，前期研究成果和研究支撑条件满足研究，实施方案及技术路线可行，依托工程落实，预期目标成果明确，同意项目立项研究。

建议：

(钢桥，混凝土桥)

1、研究内容范围偏宽，偏大，宜对研究范围按梁式桥结构类型，或支座类型予以限定。

2、 研究斜弯坡桥，连续梁边孔和强震时的落梁损伤累计影响。

3. 补充防落梁装置对下部结构 (墩台，盖梁，柱) 的破坏影响。

评审专家（签字）：王登科

2026 年 3 月 12 日

(本意见入档，填写工整，纸面不敷，可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	基于新型阻尼-防落梁装置的在役公路桥梁韧性提升关键技术(25-62K)				
专家姓名	牛岳	职务/职称	正高	专业	桥梁工程
专家单位	中铁一局			联系电话	13981801018

评审意见

该项目的研究创新性很强，研究很有必要，评审意见及建议如下：

1. 对于新型阻尼-防落梁装置中的金属机械的可靠性加强研究，明确其长期工作性能衰减规律与服役寿命下限。
2. 建议补充完善耦合状态下的性能研究。
3. 补充优化结构的鲁棒性分析，验证材料参数取值时装置性能的稳定性。给出全部桥梁应用时的参数范围。
4. 建议增加材料规范/指南及施工标准作为考核指标。
5. 依据工程开展全寿命周期成本对比分析，用数据论证经济价值。
6. 建议加强政府相关部门的协作，使研究成果落地、应用，形成效益。

评审专家（签字）：

牛岳

2026 年 3 月 12 日

专家审查意见表

项目名称	基于新型阻尼-防落梁装置的在役公路桥梁韧性提升关键技术				
专家姓名	柴唐焰	职务/职称	正高	专 业	桥梁工程
专家单位	中铁第一勘察设计院集团有限公司			联系电话	13991256879

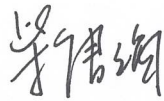
评 审 意 见

一、本项目通过研发集减振与防落梁功能于一体的新型阻尼-防落梁装置，显著提升装置的耐久性和适用性，为桥梁结构的安全性提供了较高保障。本项目选题明确，论述充分，团队分工清晰明确，研究内容针对性强，具有较好的社会、经济和工程价值，研究意义较高。

同意研究大纲。

二、建议

1. 建议项目名称中增加“研究”字样。
2. 建议补充文中关于欧拉-伯努利单元、瑞利阻尼模型选用的依据。
3. 建议补充文中关于疲劳加载工况关于 20000、50000 次循环加载的依据，及记录数量不少于 600 个循环的依据。
4. 本项目研究内容较多、较复杂，应提前选定适用的有限元分析软件。
5. 建议补充极端工况条件的界定。
6. 本项目依托工程过于宽泛，建议细化。

评审专家（签字）：

2016年3月12日

(本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	25-62K 基于新型阻尼-防落梁装置的在役公路桥梁韧性提升关键技术				
专家姓名	王玉银	职务/职称	党委书记 教授	专 业	结构工程
专家单位	哈尔滨工业大学土木工程学院			联系电话	13766831066
评 审 意 见 应明确给出“新型阻尼-防落梁装置”构造示意图和拟采用的主要原材料。 评审专家（签字）：王玉银 2026 年 3 月 12 日 （本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）					

专家审查意见表

项目名称	25-62K 基于新型阻尼-防落梁装置的在役公路桥梁韧性提升关键技术				
专家姓名	李立峰	职务/职称	教授	专 业	桥梁工程
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，具有很好的研究技术路线和前期研究基础，科研团队具有很好的科研和工程设计能力，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.阻尼-防落梁一般来说，是分开的。如何结合、采用什么方式来合理结合，这一单很难、建议细化。高烈度极端情况下的抗拉能力过高、增加桥墩的受力。防洛梁其实是一种极端情况下的保护主梁措施、目前 20 规范主要通过盖梁宽度来保证。本项目需要明确金属橡胶的力学性能，极限变形多大。详细阐述二次缓冲的概念。

2.新型阻尼-防落梁装置，关键要明确小、大变形情形下的力和位移关系，建议细化这点、并开展机理研究，特别是影响因素，明确其耗能机理。研究属于速度型、和速度之间的关系。

3.图 19 不存在落梁问题，应该是以简支梁为分析例子进行展开。

4.建议补充相关设计方法和施工建议。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 12 日

基于新型阻尼-防落梁装置在役公路桥梁韧性提升关键技术（项目编号：25-62K）

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签名
1	主任委员	王登科	陕西省铁路集团有限公司	路桥工程	路桥工程	正高工	王登科
2	委员	牛宏	中交第一公路勘察设计有限公司	桥梁工程	桥梁工程	正高工	牛宏
3	委员	柴唐焰	中铁第一勘察设计院	桥梁工程	桥梁工程	正高工	柴唐焰
4	委员	王玉银	哈尔滨工业大学	桥梁工程	桥梁工程	教授	线上评审
5	委员	李立峰	湖南大学	土木工程	土木工程	教授	线上评审

专家意见处理表

项目名称：基于新型阻尼-防落梁装置的在役公路桥梁韧性提升关键技术（项目编号：25-62K）

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应，详细说明修改情况)
1.	王登科	1. 研究内容范围偏宽，偏大，宜对研究范围按梁式桥结构类型，或支座类型予以限定。 2. 研究斜弯坡桥，连续梁边孔和强震时的落梁损伤累积影响。 3. 补充防震装置对下部结构（墩台、盖梁、柱）的破坏影响	第 1 条：已将研究对象限定为常用梁式桥（简支梁、连续梁桥），并结合板式橡胶支座、盆式支座等典型支座类型进行分析。 第 2 条：在韧性提升机理研究中增加斜弯坡桥、连续梁边孔在强震作用下的落梁损伤累积分析。 第 3 条：在装置-桥梁耦合系统分析中补充装置对下部结构（墩台、盖梁、柱）的附加力效应和破坏影响评估。
2	牛宏	1. 对行业和地区一方面的掌握是中心金属板块的龙头地位 2. 明确其参与此轮需求或批量化与承接者有限。 3. 建设好多支融合之下的子链环节。 4. 通过优化平台来精准地分析，确定技术方案策略并搭建起先发优势。经验丰富领域内的产品线布局。 5. 通过线下+线上模式/电商及线下转化做为新模型标的。 6. 在现有开展全青年项目或本计划中，周期较长的行动价值。 7. 解决公司内部业务运营协同下，使研究获得落	第 1、2 条：项目组将进一步明确金属橡胶材料在行业中的定位，并细化产业化承接方的合作机制。 第 3、4 条：将加强多学科融合，建立优化分析平台，确保技术方案的精准性和领先性。 第 5 条：成果推广将采取线下示范工程与线上技术展示相结合的模式，提升转化效果。 第 6 条：已考虑项目周期内的长期价值，后续将制定分阶段成果应用计划。 第 7 条：将加强项目内部协同，确保研究成果与实际工程需求紧密结合，实现落地应用。

		地、应用、形成立盘	
3	柴唐焰	1. 建议项目名称中增加“研究”字样。 2. 建议补充文中关于欧拉-伯努利单元、瑞利阻尼模型选用的依据。 3. 建议补充文中关于疲劳加载工况关于 20000、50000 次循环加载的依据，及记录数量不少于 600 个循环的依据。 4. 本项目研究内容较多，较复杂，应提前选定适用的有限元分析软件。 5. 建议补充极端工况条件的界定。 6. 本项目依托工程过于宽泛，建议细化。	第 1 条：项目名称无主要内容变化 第 2 条：已在研究大纲中补充欧拉-伯努利梁单元适用于细长梁、瑞利阻尼适用于小应变耗能模拟的理论依据。 第 3 条：将补充疲劳加载次数和记录循环数的选取依据。 第 4 条：已明确选合适商用有限元平台配合 OpenSees 进行地震响应验证。 第 5 条：将在研究背景中明确极端工况的定义，如罕遇地震、五十年一遇洪水、重载超载 20% 以上等。 第 6 条：已加入建议内容。
4	王玉银	应明确给出“新型阻尼-防落梁装置”构造示意图和拟采用的主要原材料	已新增装置构造示意图，明确标注粘滞阻尼器、金属橡胶、钢绞线的位置及连接方式；同时列出主要原材料，包括金属橡胶丝材规格、钢绞线型号、阻尼介质类型等。
5	李立峰	1. 阻尼-防落梁一般来说，是分开的。如何结合、采用什么方式来合理结合，这一单很难，建议细化。高烈度极端情况下的抗拉能力过高，增加桥墩的受力。防落梁其实是一种极端情况下的保护主梁措施，目前 20 规范主要通过盖梁宽度来保证。本项目需要明确金属橡胶的力学性能，极限变形多大。详细阐述二次缓冲的概念。	第 1 条：已细化阻尼与防落梁的结合方式，采用“粘滞阻尼器+金属橡胶缓冲+钢绞线约束”三级协同工作模式；明确金属橡胶的应力-应变曲线、极限压缩率，并图示“二次缓冲”工作原理；同时分析装置对桥墩受力的影响，确保不超限。 第 2 条：已补充小变形和大变形下的力-位移关系曲线，明确耗能机理为速度相关型（粘滞阻尼）与位移相关型（金属橡胶）的复合，并分析各参数影响规律。

	2. 新型阻尼-防落梁装置，关键要明确小、大变情形下的力和位移关系，建议细化这点，并开展机理研究，特别是影响因素，明确其耗能机理。研究属于速度型、和速度之间的关系。 3. 图 19 不存在落梁问题，应该是以简支梁为分析例子进行展开。 4. 建议补充相关设计方法和施工建议。	第 3 条：已将图 19 修改为以简支梁桥为例进行分析，避免误解。 第 4 条：在“多桥型多目标优化设计”后新增“设计方法与施工建议”内容，提出装置的选型步骤、安装要点、维护指南等。
--	---	---

大纲评审委员会专家（签字）： 王彦科

项目负责人（签字）： 赵昕