

陕西省交通运输科学技术奖公示

(2023年度)

一、项目基本情况

项目名称	集群桥梁结构动力性能评价与韧性提升关键技术
主要完成人	周勇军，赵煜，郑万山，柯亮亮，谢皓宇， 景媛，张小亮，唐光武，雷浪，药天运
主要完成单位	长安大学，招商局重庆交通科研设计院有限公司， 西安公路研究院有限公司，重庆物康科技有限公司

二、项目简介

本项目属于交通运输建筑工程技术领域。

截至 2022 年底，陕西省公路总里程为 18.5604 万公里，公路桥梁 3.9443 万座，我国公路总里程 535.48 万公里，公路桥梁 103.32 万座，是现代交通生命系统中至关重要的“动脉血管”。然而，近些年超重车压垮桥梁以及地震引起桥梁垮塌的事故屡见不鲜（图 1），造成人民生命、财产损失惨重。为把我国从桥梁大国建设成为桥梁强国，《交通强国建设纲要》明确提出“完善交通基础设施安全技术标准规范，持续加大基础设施安全防护投入，提升关键基础设施安全防护能力”，“十四五”规划也明确了将“增强城市基础设施韧性能力”列为重点任务。如何在有限时间实现数量庞大的桥梁（集群桥梁）的诊治尤为重要与迫切。因此，深入开展集群桥梁动力性能评价及韧性提升研究，是面向国家重大需求和经济主战场的紧迫议题之一。



(a)江苏高架桥垮塌



(b)沪渝高速公路车辆撞击主梁



(c)青海玛多地震桥梁坍塌

图 1 桥梁动力损伤与灾变现场

本项目以常遇的车辆冲击、撞击及地震问题为突破口，针对该领域内现有桥梁动力致损机理不明确、性能感知与评价手段不成熟、韧性提升方技术不完备的现状，采用理论分析、数值仿真、室内外试验验证与工程应用相结合的方法，围绕集群桥梁动力响应分析理论、评价方法与韧性提升技术三个方面进行十余年的系统研究，建立集群桥梁动力性能评价与韧性提升关键技术体系。

项目取得如下创新成果：

(1) 建立了桥梁典型动力响应分析理论与方法。首创了连续梁桥负弯矩冲击系数计算理论，揭示了不同响应冲击系数的力学特性，构建了车辆侧面撞击桥梁上部结构最大撞击力计算方法，提出了桥梁减隔震简化计算理论，完善了桥梁动力性能基本理论体系。

(2) 创新了集群桥梁动力性能感知与评价方法。研制了桥梁高精度动挠度感知系统及预紧弹簧-悬锤系统，提出了基于轻量化荷载的集群桥梁动力性能快速评价方法，建立了车辆撞击桥梁的损伤评估方法，构建了集群桥梁地震风险评估和分级方法，完善了动力性能评估内容和评价体系。

(3) 研发了桥梁动力韧性提升技术与装备。确定了集群桥梁车辆荷载作用下的振动减速体系形式及设计参数，开发了智能化识别超高车辆预警系统，研发了基于可变刚度原理的桥梁抗震韧性提升体系，攻克了动力韧性提升关键技术难关。

项目成果纳入国家行业标准 5 部：《公路桥梁荷载试验规程》(JTG TJ21-01-2015)、《公路桥梁荷载试验规程（英文版）》(JTG/T J21-01-2015 (EN))、《城市桥梁检测与评定技术规程》(CJJT 233-2015)、《公路桥梁施工监控技术规程》(JTG/T 3650-01—

2022)、《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01- 2020)和**地方标准 1 部**:《公路桥梁(梁式桥)荷载试验技术规程》(DB 61/T 916-2014)。项目成果引领了桥梁动力领域进步,为加快智慧交通建设、响应科技强国战略提供有力支撑。

授权国家发明专利 12 项,软件著作权 9 项;出版专著 5 部,发表高水平期刊论文 26 篇,SCI、EI 检索 12 篇;参加国内外学术研讨会 40 余次;举办业务培训班 10 余次;培养正高级职称 3 人和省部级人才 3 人,获批交通运输部创新团队 2 支,培养研究生 17 名,对带动西部地区的人才培养和人才储备起到了积极作用,是贯彻“深入推进科教兴国战略、人才强国战略、创新驱动发展战略”二十大精神的具体举措,**社会效益显著**。

项目成果应用于陕西、重庆、广东、江苏、云南、新疆等十五个省市七百余座桥梁的动力性能设计、评估与提升,服务了**港珠澳大桥**(世界最长跨海大桥)、**沪苏通长江公铁大桥**(世界最长公铁两用斜拉桥)、**普立特大桥**(中国首座山区钢箱加劲梁悬索桥)、**三亚海棠湾河心岛景观桥**(世界上第一座独塔万向铰斜拉人行景观桥)等国家重大项目;保障了公路桥梁安全与质量水平,避免或减少了因桥梁损伤、维护造成交通中断带来的工期、费用、安全等间接经济和人员损失,为我国交通基础设施建养和人民生命财产安全提供有力的技术保障。此外,项目的实施可完善桥梁结构现有设计标准的不足,为提升集群桥梁设计和精细化养护水平提供有力指导,进而显著提高交通基础设施运营管理和决策的科学程度,对我国现代化交通基础设施建设与运维模式向信息化、智能化转型提供前瞻性技术储备,响应了国家交通强国战略及“十四五”规划和 2035 远景计划,**生态、环境效益显著**。

三、国内外对比

本项目研究成果特点与国内、外同类技术对比如表 1 所示。

表 1 研究成果国内、外同类技术对比

本项目成果	国内、外同类成果
构建了负弯矩冲击系数计算理论	多为挠度冲击系数的分析方法，无关于负弯矩冲击系数的具体计算理论。本项目揭示了连续梁桥负弯矩冲击系数力学特性，构建了连续梁桥负弯矩冲击系数分析方法。
提出了基于改进单振型反应谱法的桥梁减隔震简化计算方法	改进的简化计算模型对于结构响应、地震内力的计算精度与国内传统的单自由度计算模型相比提升60%以上。
基于悬锤系统的参数优化设置与考虑预紧弹簧效应的冲击系数测试方法	无
研发了 QBD-A 远距离挠度测试仪	GPS 及全站仪：距离短精度低，单点测量，手动计算；阿美特克（AmetekTest）图像挠度仪：采样频率低，测点漂移；思莫特 SMTN：测点标定复杂，环境适应性差。本设备：距离远精度高：0.01mm(10m)；免靶标：捕捉任意目标；测点：多点动态选点；配套软件功能强大，数据丰富：挠度、滤波、冲击系数、功率谱、区间频率
建立了轻量化荷载动力性能评价指标	仅分析了单车荷载作用或者随机车流等重车荷载效应下的桥梁冲击效应的影响，规范中冲击系数不能直接用作实际桥梁的动力评价指标，设计与评价脱耦。本项目建立了轻量化荷载评价等效设计荷载动力性能的指标，将设计与评价有效联系。
提出了考虑剩余承载力的车辆撞击桥梁损伤评估方法	现有研究对于车撞桥梁的评估准则及损伤区间的界定不清晰。本项目提出了超高车辆撞击下桥梁损伤指标并明确了损伤评估区间。
建立了路网桥群地震风险分步筛选的评估方法	美国抗震加固手册、我国抗震性能评价细则从能力需求比的角度仅考虑单个桥梁，不考虑桥群风险分级，也无量化结论。本项目实现了既有集群桥梁抗震加固优先级的多尺度量化分级目标。
研发了可变刚度的桥梁抗震实时复位装置	传统的减隔震装备不具备自复位功能，且存在耐久性和造价昂贵等问题。本项目研发装备基于预压力技术实现了可变刚度特性和自复位的功能，同时装置具备经济性优势且耐久性强。

四、应用情况

集群桥梁结构动力性能评价与韧性提升关键技术在全国应用广泛，目前在陕西、重庆、广东、江苏、云南、新疆等十五个省市十家单位几百座桥梁的设计、检测项目中得到应用（表2），服务了港珠澳大桥（世界最长跨海大桥）、沪苏通长江公铁大桥（世界最长公铁两用斜拉桥）、普立特大桥（中国首座山区钢箱加劲梁悬索桥）、三亚海棠湾河心岛景观桥（世界上第一座独塔万向铰斜拉人行景观桥）等国家重大项目。形成的部分科技成果作价入股400万元，达到了商业化应用程度。研究成果范围覆盖了公路交通、城市交通等桥梁群的动力性能评估及韧性提升，应用前景广阔。

表2 主要单位应用情况

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	陕西省交通规划设计研究院有限公司	集群桥梁结构动力性能评价与韧性提升关键技术	在陕西省黑河大桥、汉江特大桥在内的多座桥梁设计进行理论指导，保证了桥梁设计过程中力学性能更加合理、科学。	2020.1-2022.12	张翔 029-68718602
2	陕西交控交通宇交通研究有限公司	集群桥梁结构动力性能评价与韧性提升关键技术	对陕西马岭关汉江大桥、云南澜沧江特大桥在内的 30 余座桥梁进行动力评价，实现采用轻量化荷载进行集群桥梁动力性能评价。	2019.1-2022.12	舒涛 18149291023
3	陕西西公院工程试验检测有限公司	集群桥梁结构动力性能评价与韧性提升关键技术	对西安外环高速公路南段项目、子姚高速公路、宝坪高速公路等项目的共计 152 座桥进行了基于轻量化荷载的动力性能评价，提升了桥梁荷载作用下动力性能评价的准确性。	2020.1-2022.12	苗建宝 029-87827248
4	西安长安大学工程设计研究院有限公司	集群桥梁结构动力性能评价与韧性提升关键技术	在安康平利县西坝河大桥、汉中勉县堰河大桥、延安麻地坪大桥在内的十余座桥梁和多项道路工程中进行了设计应用，提升了动力特性。	2020.1-2022.12	胡建荣 029-82334257
5	西安长大公路	集群桥梁结构动力性能评价与韧性	在陕西西安的昆明路高架桥、新疆果子沟大桥、浙江甬台温高速项目等 500 余座桥梁的挠度测试	2018.1-2022.12	周志军 029-62630002

	工程检测中心有限公司	提升关键技术	中应用了该项技术成果，对桥梁特征点图像进行高精度处理及视觉成像摄像机的畸变校正。		
6	中铁大桥局集团第四工程有限公司	集群桥梁结构动力性能评价与韧性提升关键技术	对施工过程中超高桥梁主塔变形进行监测，实现了桥梁特征点图像高精度识别处理。	2018.11-2019.10	周鹏飞 17312270916
7	中免（三亚）海棠湾投资发展有限公司	集群桥梁结构动力性能评价与韧性提升关键技术	采用项目研发的远距离桥梁动挠度测试系统对桥塔施工转体等重要环节进行了实时监测，实现桥梁特征点图像高精度识别处理。	2019.1-2019.12	李涛 13833395926
8	郑州市市政工程勘探设计研究院	集群桥梁结构动力性能评价与韧性提升关键技术	在郑州航空港经济综合实验区迎宾大道快速路等工程项目中对桥群复杂受力分析、动力分析中输入地震动高精度拟合方法以及集群桥梁风险等级评估等方面的研究。	2020.1-2022.12	安振源 13838271415
9	重庆交通大学工程设计研究院有限公司	集群桥梁结构动力性能评价与韧性提升关键技术	在重庆、四川等地数十座特殊桥梁的抗震设计项目中对特殊复杂受力分析、改进的桥梁减隔震简化计算理论以及桥群地震风险分级等应用中提供相关理论、试验研究经验。	2020.1-2022.12	姜广荣 13908312374
10	新疆公路桥梁检测中心有限责任公司	集群桥梁结构动力性能评价与韧性提升关键技术	在新疆果子沟大桥的检测、监控与管理养护的实施过程中，对桥梁特征点图像进行高精度识别处理，提高了测试效率和测试精度。	2016.1-2023.6	马胜 18199746836

五、主要知识产权和标准规范等目录

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家(地区)	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种中小跨径连续梁桥负弯矩冲击系数的计算方法	中国	201510717108.7	2018-10-12	3107321	长安大学; 西安公路研究院	周勇军; 石雄伟; 袁卓亚; 赵煜; 王业路; 徐婷婷
2	发明专利	斜桥荷载试验加载车辆定位系统及方法	中国	201410182696.4	2017-01-04	2332530	长安大学; 西安公路研究院有限公司; 云南省公路科学技术研究院	周勇军; 赵煜; 石雄伟; 杨敏; 袁卓亚; 韩智强; 申林
3	发明专利	一种路网中桥梁抗震加固优先级评估方法	中国	202011219864.4	2022-06-10	5218927	招商局重庆交通科研设计院有限公司	谢皓宇; 唐光武; 郑万山; 刘怀林; 高文军
4	发明专利	一种复杂结构抗震易损性输入地震波的选择方法	中国	202011219886.0	2022-07-05	5283987	招商局重庆交通科研设计院有限公司	谢皓宇; 郑万山; 刘怀林; 高文军; 刘海明
5	发明专利	一种耗能性桥梁防震挡块构造及防震方法	中国	201710213875.3	2019-05-24	3387507	长安大学	周勇军; 赵凯; 赵煜
6	发明专利	一种油压式减隔震支座及其使用方法	中国	202010109004.9	2021-04-27	4387410	长安大学	周勇军; 王业路; 宋一凡; 赵煜; 孙楠楠
7	规范	公路桥梁施工监控技术规程	中国	JTG/T 3650-01—2022	2022-10-08	中华人民共和国交通运输部	招商局重庆交通科研设计院有限公司	周勇军; 郑万山等人
8	规范	公路桥梁抗震	中国	JTG/T 2231-01-	2020-06-02	中华人民共和国交	招商局重庆交通科研设	郑万山; 唐光武等人

		设计规 范		2020		通运输部	计院有限公 司	
9	论文	桥梁冲击系数理论研究和应用进展	中国	10.1972 1/j.cnki. 1001-73 72.2021. 04.003.	2021- 04-15	中国公路 学报	长安大学	周勇军;薛宇 欣;李冉冉;战 家旺;赵煜
10	论文	基于预紧弹簧系统的桥梁挠度冲击系数测量方法	中国	10.1972 1/j.cnki. 1001-73 72.2022. 10.016.	2022- 10-09	中国公路 学报	长安大学	王业路;周勇 军;高徐军; 张鹏利; 赵煜; 黄平明

六、主要完成人情况表

姓 名	周勇军	排 名	1
行政职务	副主任		
技术职称	教授		
工作单位	长安大学		
完成单位	长安大学		
对本项目主要学术贡献：负责项目总体组织工作，制定了整个项目实施方案、现场试验方案和实桥应用方案；首创了融合多模态信息的连续梁桥负弯矩冲击系数计算理论，揭示了不同响应作用下桥梁冲击系数的力学机理，探明了冲击系数测试技术机理并创新了预紧弹簧-悬锤测试技术；建立了基于轻量化荷载的中小跨径桥梁冲击系数评价指标，确定了集群桥梁车辆荷载下振动减速体系形式及设计参数。			

姓 名	赵煜	排 名	2
行政职务	处长		
技术职称	教授		
工作单位	长安大学		
完成单位	长安大学		
对本项目主要学术贡献：参与项目总体规划和研究方案；负责超高车辆最大撞击力预测公式的提出；研制了高精度动挠度感知系统，开发了智能化识别超高车辆预警系统；参与提出轻量化车辆荷载动力性能评价指标，负责协调桥梁动力性能评价体系的推广应用。			

姓 名	郑万山	排 名	3
行政职务	副总经理兼总工程师		
技术职称	研究员		
工作单位	重庆物康科技有限公司		
完成单位	招商局重庆交通科研设计院有限公司		
对本项目主要学术贡献：参与制定了项目实施方案，构建了区域路网桥群地震风险多尺度评估和分级方法，开发了基于可变刚度装置与新型减隔震支座的韧性提升体系。			

姓 名	柯亮亮	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	高级工程师		
工作单位	西安公路研究院有限公司		
完成单位	西安公路研究院有限公司		
对本项目主要学术贡献：负责集群桥梁动力性能评价指标的研究、智能化超高车辆预警系统的研究，参与协调超高车辆智能感知系统的研发，并进行项目成果的推广应用。			

姓 名	谢皓宇	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	助理研究员		
工作单位	招商局重庆交通科研设计院有限公司		
完成单位	招商局重庆交通科研设计院有限公司		
对本项目主要学术贡献：参与提出了桥梁抗震评估的输入地震动高精度模拟和选取方法，对集群桥梁减隔震简化计算理论的建立，以及区域路网桥群地震风险多尺度评估和分级方法的构建作出主要学术贡献。			

姓 名	景媛	排 名	6
行政职务	无		
技术职称	讲师		
工作单位	长安大学		
完成单位	长安大学		
对本项目主要学术贡献：参与建立了车辆撞击桥梁上部结构最大撞击力预测方法。协调建立了车辆撞击混凝土桥梁损伤评估方法，研究了不同车辆参数和桥梁参数对被撞击混凝土构件损伤破坏程度的影响规律，提出了基于剩余抗弯承载力的结构损伤指数。参与提出了基于轻量化荷载的集群桥梁动力性能快速评价方法。			

姓 名	张小亮	排 名	7
行政职务	无		
技术职称	工程师		
工作单位	西安公路研究院有限公司		
完成单位	西安公路研究院有限公司		
对本项目主要学术贡献：主要完成项目的推广应用与现场实施，对动力性能评价指标这一创新点做出主要学术贡献。			

姓 名	唐光武	排 名	8
行政职务	国家重点实验室主任/专业首席专家		
技术职称	研究员		
工作单位	招商局重庆交通科研设计院有限公司		
完成单位	招商局重庆交通科研设计院有限公司		
对本项目主要学术贡献：参与制定了项目实施方案，协调动力性能评价理论与抗震装备研发工作；对桥梁减隔震简化计算理论的提出，以及桥梁抗震韧性提升技术的开发做出主要学术贡献。			

姓 名	雷浪	排 名	9
行政职务	无		
技术职称	工程师		
工作单位	西安公路研究院有限公司		
完成单位	西安公路研究院有限公司		
对本项目主要学术贡献：参与提出了轻量化车辆荷载桥梁动力性能评价指标，并对其进行成果应用推广。			

姓 名	药天运	排 名	10
行政职务	无		
技术职称	讲师		
工作单位	长安大学		
完成单位	长安大学		
对本项目主要学术贡献：参与研发了高精度动挠度感知系统 Q-BDA；参与提出了轻量化车辆荷载桥梁动力性能评价指标。			

七、主要完成单位情况表

单位名称	长安大学
对本项目主要学术贡献： 作为项目主持单位，总体负责组织项目的立项申报、可行性报告审查、课题具体实施与进度控制、最终成果验收鉴定、奖项的申报等工作。 针对集群桥梁动力致灾机理不明确的问题，融合多模态信息首创了连续梁桥负弯矩计算理论，采用能量守恒原理建立了最大撞击力预测公式；针对集群桥梁动力性能感知与评价体系未建立的问题，研制了预紧弹簧-悬锤系统及远距离挠度测试系统，综合加权平均和数字滤波提出了考虑轻量化荷载动力性能评价指标，考虑剩余抗弯承载力建立了超高车辆撞击桥梁的损伤评估方法；针对集群桥梁动力性能亟待提升的问题，确定了集群桥梁车载振动减速体系形式及设计参数，研发了智能化识别超高车辆预警系统，降低了超高车辆撞击桥梁事故发生率。以上研究部分成果填补了国内外相关领域的空白，获得了相应的自主知识产权。 授权国家专利 7 项，软件著作权 6 项，出版专著 5 部，相关成果纳入行业标准 4 部（含 2 部与招商局重庆交通科研设计院有限公司合作），地方标准 1 部，指导学生参赛获奖 5 项，培养研究生 15 名，发表高水平期刊文章 15 篇，其中 SCI、EI 检索 10 篇。	

单位名称	招商局重庆交通科研设计院有限公司
对本项目主要学术贡献： 对本项目科技创新和应用推广情况的贡献： 作为项目参与单位，组织科研人员，大力协助项目计划的实施。参与项目大纲的制定，参与项目成果推广及应用的研究工作。 针对集群桥梁动力致灾机理不明确的问题，基于改进单振型反应谱法创立了桥梁减隔震简化计算理论；针对集群桥梁动力韧性评价体系未建立的问题，基于客观赋权法提出了区域路网桥群地震风险评估和分级方法；针对集群桥梁动力性能亟待提升的问题，研发了可变刚度的桥梁抗震实时复位装置。以上研究部分成果填补了国内外相关领域的空白，获得了相应的自主知识产权。 授权国家专利 5 项，软件著作权 3 项，相关成果纳入行业标准 4 部（含 2 部与长安大学合作），培养研究生 2 名，发表高水平期刊文章 11 篇，其中 SCI、EI 检索 2 篇。	

单位名称	西安公路研究院有限公司
对本项目主要学术贡献： 作为项目参与单位，负责推广应用的具体实施，提出很多建设性建议；进行了大量项目调研工作，为项目开展提供坚实基础，为项目的有序推进有重大积极贡献。	

单位名称	重庆物康科技有限公司
对本项目主要学术贡献： 作为项目参与单位，组织科研人员，大力协助项目计划的实施。 参与项目大纲的制定，参与抗震评价的推广及应用工作。 在集群桥梁结构动力性能评价与韧性提升关键技术及装备研发两项课题上开展了大量研究工作。	