

一、项目名称

高速列车-轨道-桥梁系统随机动力模拟技术及应用

二、提名者及提名意见

提名者：国家铁路局

提名意见：

该项目针对高速铁路桥梁及桥上行车安全保障的重大需求，发明了高速列车-轨道-桥梁系统动力及抗震性能物理随机模拟技术。提出了单一转向架垂横向随机作用和 350km/h 轮轨垂横向高频移动荷载模拟控制技术；创建了列车-轨道-桥梁系统空间振动响应足尺试验装置和地震作用下列车-轨道-桥梁系统综合动态性能模拟试验装置；揭示了轨道-桥梁系统和关键构件损伤演化规律，解决了缩尺模型的准确性、移动列车模拟技术和动力试验同步控制等技术难题。发明了高速列车-轨道-桥梁系统动力及抗震性能数值随机模拟技术。建立了基于混合动力学模型、异步长分析模型、开放式建模和概率密度演化理论的高速列车-轨道-桥梁系统随机动力分析方法，突破了高速列车-轨道-桥梁系统行车安全动力可靠度评估技术瓶颈。发明了高速铁路轨道-桥梁系统新型抗震及减隔震技术。建立了关键构件地震易损性分析方法及数据库，提出了高速铁路轨道-桥梁系统“两状态三水准”抗震设防新准则和基于行车安全性能的抗震设计方法，研发了多摩擦副运动匹配、触发式功能转化、摩擦系数及隔震周期调控等减隔震成套装置，解决了高速列车-轨道-桥梁系统安全防控技术难题。

研究成果获授权发明专利 17 项、实用新型专利 12 项、软件著作权 11 项，发表学术论文 100 余篇，部分成果已纳入《高速铁路设计规范》(TB10621-2014)，获 2017 年度中国铁道科学技术特等奖。成果在贵广、沪昆、云桂、京沪等 21 条高铁线路 1100 余座桥梁中应用，取得显著的社会经济效益。“该项目成果对引领高速铁路技术可持续发展具有重要意义，该项成果达到了国际领先水平”。

提名该项目为国家技术发明奖二等奖。

三、项目简介

我国高速铁路运营里程已接近 3 万公里，其中桥梁占线比达 50%以上，确保桥梁及桥上行车安全是我国高速铁路可持续发展与持续引领全球的重大需求。以往确定性车-桥振动分析和传统随机分析方法不能考虑车-轨-桥复杂系统多重高维随机特征，导致高速铁路桥梁动力设计缺乏合理性；以往高速铁路桥梁抗震设计未考虑桥上行车安全，地震作用下高速列车-轨道-桥梁系统安全防控面临巨大挑战。本项目聚焦高速

列车和地震作用下列-轨道桥梁系统动力性能物理和数值随机模拟技术以及基于行车安全性能新型抗震与减隔震技术等核心技术发明，突破了高速列车-轨道-桥梁系统动力特性随机模拟、行车安全评估和安防控重大技术瓶颈。主要发明点如下：

1、发明了高速列车-轨道-桥梁系统动力及抗震性能物理随机模拟技术。提出了单一转向架垂横向荷载随机作用、350km/h 轮轨垂横向高频移动荷载模拟技术和地震作用下列车-轨道-桥梁系统动力性能随机模拟技术，研发了多台阵和配套系统切换毫秒级同步控制和空间位形毫米级同步控制技术，创建了国内外唯一的列车-轨道-桥梁系统空间振动响应足尺模拟装置和抗震性能的物理随机模拟装置，解决了高速列车与地震作用的综合物理随机模拟及同步控制技术难题。完成了我国各类轨道-桥梁系统高频移动荷载下足尺模拟试验和 80%以上的轨道-桥梁系统抗震性能试验，揭示了轨道-桥梁系统和关键构件损伤演化规律。

2、发明了高速列车-轨道-桥梁系统动力及抗震性能数值随机模拟技术。创立了基于混合动力学模型、异步长分析模型和开放式建模和概率密度演化理论的系统随机分析方法，建立了列车和地震作用下轨道-桥梁系统行车安全动力可靠度评定方法，完成了铁路各类桥梁随机动力分析和高烈度区高速铁路轨道-桥梁系统行车安全可靠度评估，揭示了高速列车-轨道-桥梁系统动力响应随机特性和轮轨随机接触特征，解决了该复杂系统动力性能数值随机模拟难题。

3、发明了基于行车安全性能的高速铁路轨道-桥梁系统新型抗震与减隔震技术。建立了高速铁路轨道-桥梁系统关键构件地震易损性分析方法和数据库，提出了基于行车安全性能的高速铁路轨道-桥梁系统“两状态三水准”抗震设防新理念和设计方法，发明了高速铁路桥梁新型减隔震系列支座，研发了多摩擦副运动匹配、触发式功能转化、摩擦系数及隔震周期调控等减隔震成套技术，解决了地震作用下高速列车-轨道-桥梁系统安全防控关键技术难题。经 9 次 5.5 级以上实际地震考验，保障了小震条件下桥上正常行车的安全。

研究成果获授权发明专利 17 项、实用新型专利 12 项、软件著作权 11 项，发表论文 100 余篇，已纳入《高速铁路设计规范》(TB10621-2014)，经专家评审，“整体达国际领先水平”。2017 年获中国铁道科学技术特等奖。核心发明技术在贵广、沪昆、云桂、渝利、京沪等 21 条高铁和客专线路 1100 余座桥梁中应用，并在重载铁路等领域推广，社会效益显著，对引领高速铁路技术可持续发展具有重要意义。

四、客观评价

1.成果评审结论

2019年1月，由国家铁路局组织卢春房院士为主任、欧进萍院士和毛志兵教授为副主任的评审委员会对“高速列车-轨道-桥梁系统随机动力模拟技术及应用”项目成果进行了评审，“专家组一致认为，该项成果达到了国际领先水平”。

2.项目验收意见

(1) 2011年8月，由科技部高技术中心组织，以徐坚教授为主任的验收专家组对“客运专线铁路桥梁用橡胶支座（2008AA030707）”进行结题验收，专家认为：“课题组研制的剪力樨、隔振支座等产品达到了考核指标，并在郑西铁路客运专线上得到成功应用，取得了较好的经济和社会效益。同意该课题通过验收。”

(2) 2012年2月，由原铁道部科技司组织，以李涛教授为主任的验收组对“高速铁路工程结构动力学及其关键技术研究（2008G31-Q）”进行结题验收，专家认为：“课题组提出了针对高速列车移动荷载、侧风和地震荷载三种动力作用源，提出了轨道、路基、桥梁和隧道工程结构动力学计算方法，并在京沪高速铁路开展了现场测试，研发了4套工程结构动力学试验装备，提出了高速铁路工程结构动力设计参数。同意通过课题技术验收。”

(3) 2012年2月，由原铁道部科技司组织，以李涛教授为主任的验收组对“高速铁路桥梁抗震试验及关键技术研究（2009G-24）”进行结题验收，专家认为：“课题组研发了高速铁路多功能振动台试验系统及相应试验方法，完成了高速铁路桥墩抗震性能试验，提出了桥墩分析方法、设计原则和减隔震设计方法及基于位移和损伤的高速铁路简支梁桥抗震设计方法。同意通过课题技术验收。”

(4) 2015年7月，由中国铁路总公司科管部组织，殷宁骏教授为主任的验收组对“高速铁路大跨度预应力混凝土连续梁桥抗震性能试验及风险评估研究（2013G002-A）”进行结题验收，专家认为：“课题组提出了高速铁路大跨度预应力混凝土连续梁桥地震易损性分析和风险评估方法，构建了关键构件易损性数据库，提出了高速铁路大跨度预应力混凝土连续梁桥地震损伤性能指标及基于位移和性能的抗震设计方法。同意通过课题技术验收。”

3. 技术检测报告

2011年和2014年，由上海同济建设工程质量监测站对项目组研发的“防落梁双曲面球型减隔震支座（KZQZ-4000-ZX-150）”和“双曲面球型减隔震支座（KZQZ-5000-ZX-100）”分别进行了检测。2016年，由上海同纳建设工程质量检测有限公司对项目组研发的“桥梁双曲面球型减隔震支座（KZQZ-J-3000-ZX-0.3g-8160）”进行了检测。检测结论：“支座压缩变形量、竖向承载力、滞回曲线、屈后刚度、屈后摩擦系数、自复位性能等指标均符合《桥梁球型支座》（GB/T17955-2009）、《桥梁双曲面球型减隔震支座》（JT/T 927-2014）规范的技术要求”，其中应用于川藏铁路拉林段的桥梁双曲面球型减隔震支座压缩变形量仅为总高度的0.756%，屈服刚度偏差仅1.5%。

4. 国内外重要奖励

(1) “多动力作用下高速铁路轨道-桥梁结构随机动力学研究及应用” 2017 年获中国铁道科技进步特等奖。

(2) 中铁二院主持设计的“海南东环铁路工程设计”项目荣获 2013 年四川省住房和城乡建设厅颁发的工程勘察设计“四优”一等奖。

(3) 中铁二院主持设计的“渝利铁路”荣获 2015 年国际咨询工程师联合会 (FIDIC) 杰出工程项目奖。

(4) 中铁二院主持设计的“贵阳-广州高速铁路”荣获 2016 年国际咨询工程师联合会 (FIDIC) 杰出工程项目奖。

5. 同行学术性评价意见

翟婉明院士在国际权威期刊《Vehicle System Dynamic》和《Mechanical System and Signal Processing》肯定余志武发表在国际权威期刊《Journal of Sound and Vibration》和《Probabilistic Engineering Mechanics》上基于概率密度演化理论的三维列车-轨道-桥梁耦合随机振动理论的研究，自 2016 年 11 月发表至今已被他引 12 次。朱志辉发表在国际权威期刊《Computers & Structures》和《Advances in Structural Engineering》的论文自 2017 年 11 月发表至今已被引 6 次。夏禾教授在《Engineering》发文肯定了蒋丽忠教授发表在《Journal of Central South University》上列车-轨道-桥梁系统的近场地震动输入方法，并开展了数值仿真和试验验证工作。

五、应用情况

该项目发明了高速列车和地震作用下列车-轨道-桥梁系统动力性能物理随机模拟试验技术、数值随机模拟分析技术与行车安全动力可靠度评定方法、基于行车安全性能的高速铁路轨道-桥梁系统新型抗震与减隔震技术。相关技术成果获国家发明专利 17 项、实用新型专利 12 项、软件著作权 11 项，发表学术论文 100 余篇，部分成果被纳入《高速铁路设计规范》(TB10621-2014)。本项目研发的核心技术成果具有完全自主知识产权，并在贵广、沪昆、云桂、渝利、京沪等 21 条线路中应用，取得直接经济效益 14.6 亿元，经济社会效益显著。

本项目研发的高速列车-轨道-桥梁系统动力及抗震性能物理随机模拟试验技术及装备完成了我国各类无砟轨道-桥梁系统足尺随机模拟试验；高速铁路多功能台阵试验系统完成了我国 80% 以上的轨道-桥梁系统抗震性能试验。

本项目研发的高速列车-轨道-桥梁系统随机动力分析和评估方法等数值随机模拟技术广泛应用于我国高速铁路简支梁桥、连续梁桥、拱桥、刚构、斜拉桥、悬索桥及拱梁组合结构桥梁等各类桥梁数百座，其中包括最大跨度（445 米）铁路混凝土拱桥-沪昆高铁北盘江大桥、最大跨度（416 米）客货共线铁路混凝土拱桥-云桂铁路南盘江

大桥、最大跨度（168 米）无砟轨道连续刚构桥-沪昆高铁坝陵河特大桥、最大墩高（139 米）铁路桥-渝利铁路蔡家沟特大桥、最大跨度（300 米）无砟轨道斜拉桥-昌吉赣客专铁路赣江特大桥、最大跨度（660 米）铁路悬索桥-丽香铁路金沙江特大桥。

本项目完成了我国高烈度地震区铁桥梁动力设计与减隔震技术应用。其中包括沪昆高铁（最高设防烈度 9 度）、云桂客专（最高设防烈度 8 度）、拉林铁路（最高设防烈度 8 度）、成兰铁路（最高设防烈度 8 度）、玉磨铁路（最高设防烈度 8 度）、鲁南高铁（最高设防烈度 8 度）。项目组研发了我国最大吨位（140000KN）铁路桥梁减隔震支座，应用于成昆铁路米易金沙江大桥。

本项目技术成果已推广辐射到重载铁路等领域。

六、主要知识产权和标准规范等目录

- 1.发明专利：高速铁路轮轨垂横向力耦合加载模拟装置，专利编号：ZL201610933206.9
- 2.发明专利：一种桥梁空间耗能限位装置，专利编号：ZL201310236380.4
- 3.发明专利：可熔断锁定装置，专利编号：ZL201010134164.5
- 4.发明专利：车辆-轨道-桥梁-地基基础耦合系统及其动力分析方法，专利编号：ZL201310111505.0
- 5.发明专利：一种具有位移锁定装置的减隔震支座，专利编号：ZL201510488281.4
- 6.发明专利：一种铅剪切阻尼器，专利编号：ZL201310216215.2
- 7.发明专利：一种桥梁横向防落梁装置，专利编号：ZL201310236968.X
- 8.发明专利：一种桥梁螺旋式支座，专利编号 ZL201310238096.0
- 9.发明专利：一种纵向防落梁系统，专利编号 ZL 201310237139.3
- 10.发明专利：一种由钢板橡胶-软钢-铅组成的三阶段耗能隔震支座，专利编号 ZL201310195354.1

七、主要完成人情况

1. 余志武：中南大学教授，对该项目发明点 1、2 和 3 均有重要贡献，负责项目总体规划、技术方案、技术路线、组织研究实施和推进成果产业化。具体包括：发明了高频移动荷载下轨道-桥梁系统空间动力性能、高速列车-轨道-桥梁系统随机动力分析、高速列车-轨道-桥梁系统行车安全动力可靠度评定与防控技术。

2. 蒋丽忠：中南大学教授，对该项目发明点1、发明点2和发明点3均有重要贡献，主要负责铁路轨道-桥梁系统抗震性能综合模拟试验技术、基于行车安全性能的抗震设计，参与高速列车-轨道-桥梁系统的安全防控技术研发。

3. 陈克坚：中铁二院工程集团有限责任公司教授级高工，对该项目发明点2和3均有重要贡献，主要负责高速列车-轨道-桥梁系统的安全防控技术研发和推广应用，参与地震下桥上行车性能试验技术、基于行车安全性能的抗震设计。

4. 朱志辉：高速铁路建造技术国家工程实验室教授，对该项目发明点 2 有重要贡

献，负责试验组织、软件开发，发明了高速列车-轨道-桥梁耦合系统高效动力分析方法。

5. 国巍：中南大学副教授，对该项目发明点1和发明点3有重要贡献，发明了地震作用下高速铁路桥上行车性能试验关键技术，发明了高速铁路桥梁用新型减震装置。

6. 宋建平：中国船舶重工集团公司第七二五研究所洛阳双瑞特种装备有限公司研究员，对技术发明点3有创造性贡献，对该项目发明点3有重要贡献，研发了多种形式的高速铁路桥梁减隔震支座系列产品，形成了高速铁路桥梁新型减隔震支座成套技术，并在工程中推广应用。

八、完成人合作关系说明

本项目完成单位中南大学、中铁二院工程集团有限责任公司（简称中铁二院）、中国船舶重工集团公司第七二五研究所洛阳双瑞特种装备有限公司（简称七二五所特装公司）和高速铁路建造技术国家工程实验室。四个单位涵盖产、学、研、用领域，各单位之间有着良好的长期合作关系。中南大学和中铁二院是高速铁路建造技术国家工程实验室的理事单位。中南大学与中铁二院、七二五所特装公司所均有长期的项目研发合作，中铁二院与七二五所特装公司在支座制造上有着密切的设计和应用合作。本项目四个单位中的相关研究人员有长期合作关系，关系融洽和谐，是一支团结协作、相互支持、能打硬仗的科研团队。

该技术发明，由中南大学余志武团队（主要成员：余志武/1、蒋丽忠/2、国巍/5）、中铁二院陈克坚/3、七二五所特装公司宋建平/6 和高速铁路建造技术国家工程实验室朱志辉/4 共同完成。项目完成人余志武、蒋丽忠、朱志辉、国巍一直是中南大学和高速铁路建造技术国家工程实验室“高速铁路桥梁服役安全创新团队”的骨干成员，十多年来共同围绕高速列车和地震作用下轨道-桥梁系统动力学分析理论、试验技术、设计方法与安全防护技术开展了系统研究与发明，共同承担并完成了原铁道部重大科技计划、中国铁路总公司重大科技项目和国家自然科学基金委重点课题等多个项目，余志武团队共同获得发明专利 13 项。

自 2008 年以来，余志武团队和中铁二院陈克坚团队一直保持密切的合作关系，共同完成了高速列车-轨道-桥梁系统随机动力分析与安全防护关键技术研究及应用，共同完成了贵广、遂渝等高速铁路线路桥梁行车安全的动力性能分析和桥梁抗震设计，合作完成了高速铁路桥梁用减隔震系列支座的研发和试验研究，共同完成“多动力作用下高速铁路轨道-桥梁结构随机动力学研究及应用”，2017 年获中国铁道科技技术特等奖，余志武、蒋丽忠、陈克坚、朱志辉、国巍均作为主要完成人参加。共同发表论文“多动力作用下高速铁路轨道-桥梁结构体系动力学及关键技术研究. 土木工程学报. 2017(11): 1-9.”等。

七二五所特装公司宋建平自 2008 年以来与余志武团队一直保持密切合作关系，余志武、蒋丽忠和宋建平共同完成了“铁路桥梁减隔震支座抗震性能试验”项目合作，完成了多种支座的研发。

中铁二院陈克坚和七二五所特装公司宋建平共同完成了“大吨位减隔震装置设计

研究”，七二五所特装公司研发的系列减隔震支座在中铁二院所设计的 10 余条高速铁路桥梁中应用。

此次申报 2019 年国家科学技术发明奖的行为以及主要完成人情况和排名，都是经过既认真严肃的讨论又友好协商所确定的，所有完成人均已表示无异议。本项目所列知识产权用于报奖的情况，已征得未列入项目主要完成人的权利人的同意。