

2019 年度高等学校科学研究优秀成果奖（科学技术）推荐项目

公示

项目名称	结构混合试验理论与应用
推荐单位	哈尔滨工业大学
项目简介	<p>本项目属土木工程领域。</p> <p>混合试验是评估结构地震响应的有效工具，该方法把原型结构分为数值与试验两个子结构，并通过液压伺服加载系统实现两子结构界面耦合。该方法存在的关键科学问题包括：（1）难以保证复杂非线性系统数值积分算法稳定性及数值模型精度；（2）难以准确复现复杂边界条件；（3）缺少面向工程实际的通用混合试验平台软件；（4）缺乏大型工程结构的试验验证。针对以上问题，本项目经历多年研究形成了结构混合试验基础理论与工程应用方面系统性成果，包括结构混合试验的理论、方法、技术、平台以及规范和工程应用等。具体包括以下四个方面的科技创新成果：</p> <p>第一，混合试验数值方法。（1）针对时间域数值离散问题，提出了基于自适应时滞补偿、变采样数、卡尔曼滤波器三类等效力控制方法，提高了混合试验方法的稳定性、精度和适用性；修正了经典 Simo 算法的理论缺陷，提出了非线性无条件稳定的能量一致积分方法一般形式，该方法不仅可以从理论上保证混合试验的稳定性，还可以用在结构动力有限元分析中提高结构抗倒塌分析的可靠性。（2）针对空间域数值模型问题，在国际上率先提出了基于本构模型更新的混合试验方法，从单元、截面、材料三个层次上全方位地建立了本构模型更新技术，该方法显著降低了强非线性构件的数值模型误差。相关成果获得了本领域国际权威专家高度评价。</p> <p>第二，混合试验物理边界实现方法。（1）针对完整边界实现问题，提出了变时滞补偿方法和基于滑动模态、H_∞及控制点理论的多种加载策略，解决了复杂试件多维冗余加载控制难题，提高了混合试验复杂物理边界复现精度，保障了试验数据可靠性。（2）针对不完整边界实现问题，在国际上率先提出了基于有限元本构模型更新的在线数值模拟方法，显著降低了不完整边界带来的误差，在该混合试验领域世界难题上实现了创造性突破。本成果为结构混合试验平台开发及工程应用提供了理论基础和技术支撑。</p>

	<p>第三，混合试验平台。研发了全球首例面向工程应用的通用结构混合试验平台软件—HyTest，解决了通用结构混合试验软件研制的关键技术瓶颈，成为世界最大规模结构试验室等 3 个单位的试验平台，取得良好的社会、经济效益。</p> <p>第四，混合试验工程应用。混合试验研究成果成功应用于装配式混凝土剪力墙盒子结构、含 BRB 钢筋混凝土空间框架、防屈曲支撑钢框架、装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙、汽轮发电机组弹簧隔振框架式基础模型、装配式钢筋混凝土剪力墙和底框配筋砌块短肢砌体剪力墙结构等 10 余种大型足尺结构混合试验，为真实揭示各类型结构的抗震性能提供经济、有效的试验手段。</p> <p>本项目研究成果发表学术论文 85 篇，其中 SCI/EI 收录 57 篇；参与编制 2015 版《建筑抗震试验规程》；已授权国家发明专利 7 项，申请国家发明专利 6 项，获软件著作权 5 项。2018 年 12 月 16 日，黑龙江省住房和城乡建设厅科学技术委员会组织相关专家对哈尔滨工业大学、武汉理工大学、黑龙江科技大学完成的“结构混合试验理论与应用”成果进行了鉴定。鉴定委员会一致认为：“该研究成果丰富、系统，在理论方法、试验技术和实际工程应用等方面创新性突出、社会经济效益显著、推广应用前景广阔，成果总体上达到了国际领先水平”。</p>
主要完成单位	<p>单位 1：哈尔滨工业大学</p> <p>主要贡献：对项目 4 个主要科技创新点均作出了贡献。</p>
	<p>单位 2：武汉理工大学</p> <p>主要贡献：对项目 4 个主要科技创新点均作出了贡献。</p>
	<p>单位 3：黑龙江科技大学</p> <p>主要贡献：对项目第 1、3 主要科技创新点作出了贡献。</p>
主要完成人（职称、完成单位、工	<p>1. 吴斌</p> <p>职 称：教授</p> <p>工作单位：武汉理工大学</p> <p>完成单位：武汉理工大学</p> <p>主要贡献：完成人吴斌为本项目的团队负责人，提出本项目的关键学术思想，全面规划组织并研究了本项目的研究内容。对项目 4 个主要科技创新点均作出了贡献。</p>

作 单 位)	<p>(1) 混合试验数值方法;</p> <p>(2) 混合试验物理边界实现方法;</p> <p>(3) 混合试验平台;</p> <p>(4) 混合试验工程应用。</p> <p>曾获奖励:</p> <p>(1) 2013 年, 国家科技进步二等奖 (吴斌, 排名第 3);</p> <p>(2) 2009 年, 教育部科技进步一等奖 (吴斌, 排名第 3);</p> <p>(3) 2005 年, 第九届黑龙江省青年科技奖 (吴斌, 排名第 1)。</p>
	<p>2. 许国山</p> <p>职 称: 副教授</p> <p>工作单位: 哈尔滨工业大学</p> <p>完成单位: 哈尔滨工业大学</p> <p>主要贡献: 对项目 4 个主要科技创新点均作出了贡献。</p> <p>(1) 研究了采用比例-积分控制器的等效力控制方法;</p> <p>(2) 提出了三自由度加载系统的力-位移混合控制方法;</p> <p>(3) 作为重要参与人研发了建筑结构混合试验平台 HyTest;</p> <p>(4) 作为重要参与人完成了装配式混凝土剪力墙盒子结构、BRB 支撑混凝土框架结构等大型结构混合试验。</p>
	<p>3. 王贞</p> <p>职 称: 讲师</p> <p>工作单位: 哈尔滨工业大学</p> <p>完成单位: 哈尔滨工业大学</p> <p>主要贡献: 对项目 4 个主要科技创新点均作出了贡献。</p> <p>(1) 提出了变采样数等效力控制方法;</p> <p>(2) 提出了基于时滞上界的变时滞补偿方法, 提出了多维多作动器冗余加载控制方法;</p> <p>(3) 作为重要参与人研发建筑结构混合试验平台 HyTest;</p> <p>(4) 作为重要参与人完成了装配式混凝土剪力墙盒子结构、BRB 支撑混凝土框架结构等大型结构混合试验。</p>
	<p>4. 杨格</p> <p>职 称: 讲师</p>

	<p>工作单位：武汉理工大学</p> <p>完成单位：武汉理工大学</p> <p>主要贡献：对项目 4 个主要科技创新点均作出了贡献。</p> <p>(1) 提出了 OpenSees 有限元模型中任意类型的材料、截面以及单元本构模型参数的更新方法；</p> <p>(2) 在国际上率先提出了基于控制点的加载控制方法；</p> <p>(3) 作为重要参与人研发建筑结构混合试验平台 HyTest；</p> <p>(4) 作为重要参与人完成了装配式混凝土剪力墙盒子结构、BRB 支撑混凝土框架结构等大型结构混合试验。</p>
	<p>5. 王涛</p> <p>职 称：副教授</p> <p>工作单位：黑龙江科技大学</p> <p>完成单位：黑龙江科技大学</p> <p>主要贡献：对项目第 1、3 个主要科技创新点作出了贡献。</p> <p>(1) 提出了约束 UKF 算法和基于构件模型更新混合试验方法，完成了首例防屈曲支撑结构在线模型更新混合试验；</p> <p>(2) 参与研发建筑结构混合试验平台 HyTest。</p>
	<p>6. 史鹏飞</p> <p>职 称：高级工程师</p> <p>工作单位：中建科技有限公司四川分公司</p> <p>完成单位：哈尔滨工业大学</p> <p>主要贡献：对项目第 1、3、4 个主要科技创新点作出了贡献：</p> <p>(1) 提出了基于卡尔曼滤波器实时混合试验等效力控制方法；</p> <p>(2) 参与研发建筑结构混合试验平台 HyTest；</p> <p>(3) 作为参与人完成了 BRB 支撑混凝土框架结构混合试验。</p>
	<p>7. 陈再现</p> <p>职 称：教授</p> <p>工作单位：哈尔滨工业大学</p> <p>完成单位：哈尔滨工业大学</p> <p>主要贡献：对项目第 1、4 个主要科技创新点作出了贡献：</p> <p>(1) 研究了比例-积分控制器等效力控制方法；</p>

	<p>(2) 完成了足尺装配式剪力墙混合试验示范应用。</p>
	<p>8. 梅竹</p> <p>职 称：助理研究员</p> <p>工作单位：四川大学</p> <p>完成单位：哈尔滨工业大学</p> <p>主要贡献：对项目第 1、4 个主要科技创新点作出了贡献：</p> <p>(1) 提出了基于材料本构模型参数更新的混合试验方法；</p> <p>(2) 完成了高墩大跨钢筋混凝土连续刚构桥混合试验示范应用。</p>
	<p>9. 曾聪</p> <p>职 称：副教授</p> <p>工作单位：东北电力大学</p> <p>完成单位：哈尔滨工业大学</p> <p>主要贡献：对项目第 2 个主要科技创新点作出了贡献：</p> <p>(1) 提出了力-位移双闭环混合控制方法；</p> <p>(2) HyTest 软件应用。</p>
	<p>10. 周惠蒙</p> <p>职 称：副研究员</p> <p>工作单位：中国地震局工程力学研究所</p> <p>完成单位：哈尔滨工业大学</p> <p>主要贡献：对项目第 1 个主要科技创新点作出了贡献：</p> <p>(1) 提出了基于滑动模态控制的等效力控制方法。</p>
	<p>11. 宁西占</p> <p>职 称：讲师</p> <p>工作单位：华侨大学</p> <p>完成单位：哈尔滨工业大学</p> <p>主要贡献：对项目第 2 个主要科技创新点作出了贡献：</p> <p>(1) 提出了基于有限元本构模型更新的在线数值模拟方法。</p>
	<p>12. 潘天林</p> <p>职 称：讲师</p> <p>工作单位：东北电力大学</p>

	<p>完成单位：哈尔滨工业大学</p> <p>主要贡献：对项目第 1 个主要科技创新点作出了贡献： (1) 提出了非线性无条件稳定的能量一致积分方法。</p>
	<p>13. 陈永盛</p> <p>职 称：副研究员</p> <p>工作单位：中国地震局工程力学研究所</p> <p>完成单位：哈尔滨工业大学</p> <p>主要贡献：对项目第 1 个主要科技创新点作出了贡献： (1) 提出了基于截面本构模型更新混合试验方法。</p>
知 识 产 权 名 称	发明专利 1：陈再现，苏倩倩，王瑞。空间轴向随动加载装置。授权号：ZL 201310423615.0
	发明专利 2：陈再现，韩光，陈家辉，方韬，王瑞。一种截面内力测量传感器及标定方法。授权号：ZL 201410057795.X
	发明专利 3：王涛，黄俊奎，孟丽岩。自复位防屈曲支撑装置。授权号：ZL 201510329670.2
	发明专利 4：曾聪。一种预制装配式钢筋混凝土框架结构支撑加固节点构件。授权号：ZL 201710150120.3
	发明专利 5：许国山，王贞，杨格，吴斌，王涛，嵇壮壮。一种基于重启动的实时混合试验方法。申请号：201910144509.6
	发明专利 6：宁西占，吴斌。一种三角钢板阻尼器。授权号：201410624846.2
	发明专利 7：宁西占，李伟，吴斌。一种装配式大尺度防屈曲支撑构件。申请号：201811215743.5
	发明专利 8：王涛，黄俊奎，孟丽岩。弹簧式自复位防屈曲支撑装置。授权号：ZL 201510329811.0
	发明专利 9：陈再现，韩光，方韬，陈家辉，王瑞。一种应变式结构内部截面转角传感器及其标定方法。授权号：ZL 201410064371.6
	发明专利 10：王贞，王纯鹏。一种调谐质量阻尼器和减震装置。申请号：201710616365.0
	发明专利 11：王贞，颜雪琪，吴斌，许国山，杨格，王涛。一种基于模型更新

	的时程级迭代实时混合试验方法。申请号：201910389188.6
	发明专利 12：吴斌，杨格，王贞，许国山，史鹏飞，杨春雷，秦启亮，李丽。一种结构试验加载控制方法。申请号：201811110776.3
	发明专利 13：李金平，吴斌。一种适于桥梁的自复位耗能结构。申请号：201811140757.5
	软件著作权 1：吴斌，杨格，王贞，许国山。HyTest 混合试验软件[简称：HyTest] V1.0，登记号：2014SR060632
	软件著作权 2：王贞，吴斌，王纯鹏，许国山，杨格，王涛。双向混合试验模拟程序软件 V1.0，登记号：2019SR0351121
	软件著作权 3：吴斌，梅竹，杨格，王涛，王贞，许国山。模型更新混合试验软件[简称：MUM- HySIM] V1.0，登记号：2019SR0229638
	软件著作权 4：吴斌，宁西占，王涛，许国山，王贞，杨格。在线数值模拟混合试验软件[简称：ONS- HS] V1.0，登记号：2019SR0229630
	软件著作权 5：吴斌，周惠蒙，王涛，许国山，王贞，杨格。采用滑动模态控制的实时混合试验软件[简称：SMC-RHT] V1.0，登记号：2019SR0362587
曾获科技奖励	无
推广应用情况	本项目对我国结构抗震试验方法与技术的发展发挥了牵动和引领作用，混合试验研究成果成功应用于装配式混凝土剪力墙盒子结构、含 BRB 钢筋混凝土空间框架、防屈曲支撑钢框架、装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙、汽轮发电机组弹簧隔振框架式基础模型、装配式钢筋混凝土剪力墙和底框配筋砌块短肢砌体剪力墙结构等 10 余种大型足尺结构混合试验，为真实揭示各类型结构的抗震性能提供经济、有效的试验手段，取得了显著的社会效益和经济效益。