

# 陕西省科学技术进步奖公示信息

(2025年度)

## 一、项目基本情况

项目名称	钢结构磁记忆无损检测评判理论与关键技术
主要完成人	苏三庆；王威；时朋朋；马小平；易术春
主要完成单位	西安建筑科技大学；中铁第一勘察设计院集团有限公司；陕西省建筑科学研究院有限公司

## 二、提名意见（适用于单位提名）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input type="checkbox"/> 一等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 二等奖 <input type="checkbox"/> 三等奖
<p>提名意见：</p> <p>该项目面向钢结构在环境侵蚀、材料腐蚀、长期荷载和疲劳效应等耦合作用下的隐匿性损伤识别难题，提出并建立了基于金属磁记忆信号的钢结构损伤量化评判理论与方法，形成了涵盖理论建模、试验验证和数值模拟的完整体系。项目首次在国内系统构建了疲劳裂纹、锈蚀、焊缝等典型损伤的磁信号定量模型，突破了传统超声、射线、磁粉等检测方法依赖宏观裂缝或显著损伤的局限，成果在桥梁钢结构损伤定量评估方面具有原创性和国际领先性。</p> <p>在科技创新方面，项目主要取得了三方面代表性成果：一是揭示了钢桥疲劳裂纹扩展过程中磁信号演化规律，提出以磁特征参数梯度最大值表征裂纹长度的定量关系式，实现了疲劳裂纹扩展行为的定量化评估；二是建立了锈蚀区三维磁荷模型，提出以磁信号极差和“峰—谷”差值为核心参量的锈蚀损伤表征与抗拉强度评估方法，实现了锈蚀深度与剩余承载力的有效预测；三是构建了基于磁记忆信号的焊缝应力相关模型，发现磁信号曲线“峰—谷”特征与应力集中和屈服状态密切相关，提出了焊缝早期应力集中识别与损伤预警方法。这些创新成果共同奠定了钢结构损伤—磁信号量化评判的理论基础与应用体系。</p> <p>该技术能够实现应力集中、裂纹萌生与扩展、锈蚀深度及屈曲临界荷载的早期识别和预警，设备轻便、无需外加激励，具备低成本与现场适用优势，已在铁路枢纽西安站站房钢结构工程中成功应用，节省运维费用逾千万元，产生了显著的经济效益和工程价值。研究成果获得国家自然科学基金资助，通过省部级科技成果鉴定，相关论文在国际重要学术期刊和会议上广泛发表并被国内外知名学者大篇幅引用，高度评价其对磁—力本构模型及金属磁记忆理论发展的贡献。项目团队成员还获得中国职业安全健康协会科学技术奖二等奖、中国无损检测学会斯耐特奖等重要奖项，显示出较高认可度。</p> <p>综合评价，该项目在理论创新、工程应用与社会价值方面均表现突出，为钢结构无损检测提供了新理论与新方法，具有重大的科学意义、工程价值和社会效益，推荐授予该项目相应的科学技术奖。</p> <p><b>说明：省科学技术进步奖一、二、三等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖，“提名二等奖”的评审落选项目不再降格参评三等奖。项目组与提名单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目正式提交后，提名等级建议不得变更。</b></p> <p><b>软科学标准计量科普类项目请勾选“二等奖”或者“三等奖”。</b></p>			

### 三、项目简介

（限 2 页）

钢结构在环境侵蚀和材料腐蚀、荷载长期作用、疲劳效应等灾害性因素的耦合作用下，将不可避免地产生损伤，随着损伤积累结构的抗力将不断衰减，从而导致结构抵抗自然灾害、甚至正常环境作用的能力降低，极端情况下甚至可能引发灾难性的突发事件，危及生命安全并造成重大财产损失。钢材属于铁磁性材料，应力集中和损伤演化将改变其磁场特性，利用磁记忆信号可以有效识别结构的早期损伤和应力集中程度，能够弥补现有无损检测技术无法有效识别结构早期隐匿性损伤的不足。基于此，本项目提出了基于磁记忆信号的钢结构损伤量化评判理论和方法。

本项目旨在研究基于地磁场作用下结构钢的自有漏磁场，量化评估钢结构的损伤及应力状态的理论和方法。在钢结构和铁磁学等多学科交叉基础上，研究损伤与磁记忆信号的内在联系和规律。建立钢结构磁记忆信号-损伤理论模型，解决具有细长轻柔特点的钢结构弱磁信号采集难、处理难等问题。提取磁记忆信号的有效特征，得到应力集中、裂纹长度和深度与磁记忆信号之间的量化本构关系。进而建立钢结构损伤-磁记忆检测的量化评判方法，实现钢结构危险部位的早期识别并预判其潜在危险程度。研究成果将为钢结构无损检测提供新方法。

本项目基于自有漏磁场研究了拉伸、疲劳荷载作用下的结构钢的损伤演化规律，研究了钢箱梁在弯曲荷载作用下的应力状态评估和应力集中区域识别。从损伤对磁记忆信号的作用机制出发，建立了磁记忆信号与损伤之间的量化本构关系。随后分析了检测方向、试件放置角度、提离值等因素对定量识别损伤和应力集中区域的影响，为实际工程中钢结构服役状态与磁记忆信号的量化对应关系评价提供了依据。最后，提出了针对钢结构磁记忆信号数值模拟方法，为定量评估结构钢损伤演化规律提供了依据。在此基础上，建立了根据磁记忆信号反演结构钢损伤的关系式。完成人围绕本项目取得多项研究成果，共计发表学术论文79篇，其中刊出SC1论文32篇，刊出EI论文24篇；出版《桥梁钢结构磁记忆无损检测》和《建筑钢结构磁记忆无损检测》学术专著2部；授权国家专利11项；先后培养硕、博士研究生14名。项目的成果将为实现钢结构可靠、便捷的无损检测提供新方法，且对实现定量评价结构钢潜在损伤的目标具有重要的理论意义和广阔的应用前景。

## 四、客观评价

（限 2 页。围绕创新性、应用效益和经济社会价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价意见要有客观依据，主要包括与国内外相关技术的比较，国家相关部门正式作出的技术检测报告、验收意见、鉴定结论，国内外重要科技奖励，国内外同行在重要学术刊物、学术专著和重要国际学术会议公开发表的学术性评价意见等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。）

该项目面向桥梁钢结构服役过程中常见的疲劳裂纹、局部锈蚀、焊缝缺陷及局部屈曲等典型损伤，系统提出并建立了基于金属磁记忆（MMM）信号的损伤量化评判理论与方法，形成了涵盖理论建模、试验验证和数值模拟的完整研究体系。通过建立疲劳裂纹、锈蚀区、焊缝等典型损伤的磁荷模型，揭示了应力—损伤—磁信号之间的内在耦合机理和定量关系，突破了传统超声、射线、磁粉等无损检测手段主要依赖宏观可见裂缝或显著损伤的局限。在理论创新方面，项目首次在国内系统建立了磁信号与损伤程度的定量化模型；与国外磁记忆研究多集中于管道、压力容器等装备的定性识别不同，该成果在桥梁钢结构损伤定量评估上具有原创性和国际领先性。

在应用效益方面，该项目提出了以磁信号极差、梯度最大值、峰谷差等特征参量为核心的量化指标体系，能够实现疲劳裂纹扩展长度、锈蚀深度、焊缝余高及屈曲临界荷载的识别与预警。研究表明，磁信号的特征点可敏感捕捉应力集中与微裂纹的萌生，明显优于传统超声、射线、磁粉等检测方法。例如，超声检测需耦合剂且对复杂焊缝精度有限；射线检测成本高、存在安全隐患；磁粉检测仅适用于表面缺陷。相比之下，磁记忆检测无需外加磁场激励，设备轻便，适合大范围快速检测。这一优势已在铁路枢纽西安站站房钢结构工程中得到应用，利用项目成果开展关键构件损伤识别与性能评估，2022 - 2024 年共节省人力巡检与运维成本约 1132 万元。由此可见，该技术具备突出的工程实用性和经济效益。

在经济与社会价值方面，本项目成果能够在钢桥全寿命周期中开展早期隐性损伤识别和预警，显著降低突发断裂失效风险，保障基础设施安全。当前我国大量钢桥进入中后期服役阶段，隐性损伤累积导致的安全问题日益突出，该技术契合交通强国战略需求。研究成果已获得国家自然科学基金面上项目（51878548，51478383）资助，并通过省部级科技成果鉴定；部分理论工作被长江学者周建庭教授（*Construction and Building Materials*, 2024）、国家海外高层次人才赵春田教授（*NDT&E International*, 2023）、国际铁磁学者 Sok Kim（*Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023）等大篇幅引用和采用，认为该研究显著提升了磁-力本构模型的精度，对推动 MMM 理论发展贡献突出。此外，研究团队还获得中国职业安全健康协会科学技术奖二等奖、中国无损检测学会斯耐特奖等重要奖项，显示出成果的权威性和国际认可度。

综合来看，该项目在创新性、应用效益和经济社会价值方面均表现突出：（1）在理论层面，提出了损伤—磁信号定量化模型，达到国际先进水平；（2）在方法层面，形成了针对疲劳、锈

蚀和焊缝损伤的系统识别与预警方法，弥补了传统检测技术在早期隐性损伤识别上的不足；（3）在工程层面，技术方案具备低成本、适用性强的优势，已在大型铁路站房工程中成功应用并产生显著经济效益；（4）在社会层面，成果契合国家基础设施安全与交通强国战略需求，推广前景广阔。

综上，项目整体水平达到国际先进，部分关键成果处于国际领先，为钢结构无损检测提供了新理论与新技术路径，具有重大的工程应用价值和广阔的推广前景。

## 五、应用情况

### 应用情况（限 2 页）

主要应用单位情况表					
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
1	中铁第一勘察设计院集团有限公司	基于金属记忆技术的应力集中表征技术、锈蚀损伤识别技术	西安北站屋盖结构、高架候车室及跨裂缝关键构件，其中北站屋盖钢结构平面尺寸为 213.8 m×48 m，高 23.3 m，采用两向正交正放网架+桁架体系；高架候车室平面尺寸为 132.4 m×198 m，高 27.4 m，投影面积近 3 万平方米	2022 年 5 月至 2024 年 12 月	马小平
2	四川省振控科技有限公司	一种钢梁检测装置	服役期间的钢结构构件的早期隐匿性损伤识别	2021 年 7 月至 2022 年 7 月	刘云兰
3	陕西中立检测科技有限公司	一种适用于多截面金属梁的金属记忆检测设备及检测方法	钢结构中多种截面的金属梁构件	2019 年 1 月至 2021 年 5 月	吕刚
4	西安建筑科技大学工程技术有限公司	一种适用于钢丝绳的金属记忆检测装置	电梯、塔吊、客运索道、缆车上的钢丝绳	2020 年 12 月至 2021 年 12 月	白福玉
5	陕西省建筑科学研究院有限公司	高速公路钢桥运维与监测项目	钢桥工程涵盖主梁、斜拉索体系及桥面附属结构	2019 年 5 月至 2021 年 9 月	易术春

1.西安站钢结构工程总用钢量约 1.28 万吨，主要包括劲性钢骨框架、异形三层焊接球网架及桁架、H 型钢与箱型桁架等结构。其中，北站房屋盖钢结构平面尺寸为 213.8m×48m，高 23.3m，采用两向正交正放网架+桁架体系；高架候车室平面尺寸为 132.4m×198m，高 27.4m，投影面积近 3 万平方米，采用四角锥网架+悬挑桁架体系，是施工重点与难点。工程区内 F3 地裂缝斜穿站房大跨度钢结构屋架，长期服役易引起错动变形、应力集中、疲劳与锈蚀等损伤隐患。本项目针对北站房屋盖结构、高架候车室及跨裂缝关键构件，应用金属磁记忆技术开展应力集中表征、锈蚀与疲劳损伤识别及结构性能评估，实现关键部位的巡检排查与性能研判，有效保障了结构长期服役安全。2022 年至 2024 年共节省人力巡检和运维管养费用约 1132 万元，取得显著的安全与经济效益。（附件 1-2-1）

2.本项目基于磁记忆信号的钢结构损伤量化评判理论和方法，适用于服役期间的钢结构构件的早期隐匿性损伤识别，利用磁记忆信号可以有效识别钢结构的早期损伤和应力集中程度，能够弥补现有无损检测技术无法有效识别钢结构早期隐匿性损伤的不足。防止钢结构构件在疲劳荷载作用下发生截面损伤，从而造成突发性破坏，具有重要的工程应用背景。四川省振控科技有限公司自 2021 年 7 月 2 日起，对专利名为“一种钢梁检测装置”进行转化，取得的经济效益明显。（附件 2-1-3）

3.本项目基于金属磁记忆的隐性损伤识别方法，适用于多截面金属梁构件的早期损伤识别定位以及应力集中区判别，能够弥补现有技术只能对已形成的裂纹或者宏观缺陷等显性损伤进行检测，且操作技术复杂、成本较高、重复性较差的缺陷，可有效防止结构或构件发生脆性破坏和突发性坍塌，具有重要的工程应用背景。陕西中立检测科技有限公司自 2019 年 1 月起，对专利名为“一种适用于多截面金属梁的金属磁记忆检测设备及检测方法”进行转化，取得的经济效益明显。（附件 2-1-1）

4.本项目基于金属磁记忆无损检测技术，适用于处于复杂恶劣使用环境中的钢丝绳，能够在复杂工况下对钢丝绳进行在线检测，且构造简单便于操作，体量较小便于携带，可以解决现有技术中难以准确测量磁信号法向和切向分量的问题，在钢丝绳上自主进行信号采集检测，弥补现有检测方法中须将钢丝绳拆卸进行离线检测的不便，且所测结果更加贴近构件实际工作时的状态，数据更加可靠，实际工况中可操作性更强。西安建筑科大工程技术有限公司自 2020 年 12 月起，对专利名为“一种适用于钢丝绳的金属磁记忆检测装置”进行转化，取得的经济效应显著。（附件 2-1-2）

5. 本项目钢桥采用钢箱梁+斜拉桁架体系（长 1,050m、宽 30m、塔高 210m，用钢约 1.8 万吨），在服役中易受水流、沉降和温差影响而产生疲劳与腐蚀。为保障安全，项目应用金属磁记忆技术（MMM）在焊缝、节点和索端布设监测点，实时识别潜在裂纹并建立数据库开展寿命预测。实践表明，该技术可实现隐性损伤早期预警，延长服役寿命、提升安全性并带来显著效益。（附件 2-1-4）

## 六、主要知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

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	其他	建筑钢结构磁记忆无损检测	中国	ISBN: 978-7-03-059835-6	2019-11-01	264780	西安建筑科技大学	苏三庆; 王威
2	其他	桥梁钢结构磁记忆无损检测	中国	ISBN: 978-7-5369-8539-1	2022-11-01	142350	西安建筑科技大学	苏三庆; 王威
3	论文	钢桥疲劳裂纹扩展行为研究及可靠度更新分析	中国	10.15951/j.tmgcxb.23040310	2023-04-27	土木工程学报	西安建筑科技大学	苏三庆; 李俊廷; 王威; 刘馨为; 左付亮; 邓瑞泽
4	论文	金属磁记忆无损检测的研究现状和关键问题	中国	10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.09.001	2019-09-15	中国公路学报	西安建筑科技大学	王威; 易术春; 苏三庆; 马小平; 杨熠奕
5	论文	Learning physical states of bulk crystalline materials from atomic trajectories in molecular dynamics simulation	中国	10.1088/1674-1056/AC98A4	2022-11-01	Chinese Physics B	Xi'an University of Architecture & Technology	Tianshou Liang; Pengpeng Shi; Sanqing Su; Zhi Zeng
6	论文	Study on corrosion damage characterization and tensile strength evaluation for locally corroded bridge steel via metal magnetic memory	中国	10.1016/J.MEASUREMENT.2022.112406	2023-01-17	Measurement	Xi'an University of Architecture & Technology	Yiyi Yang; Xiaoping Ma; Sanqing Su; Wei Wang



		method						
7	论文	基于金属磁记忆的弯曲工字钢梁的力-磁效应	中国	10.11896/cldb.22070065	2023-03-13	材料导报	西安建筑科技大学	苏三庆; 邓瑞泽; 王威; 易术春; 左付亮; 刘馨为; 李俊廷
8	发明专利	一种检测钢结构压杆失稳的装置及方法	中国	ZL 2016 1 0538538.7	2022-10-11	55044561	西安建筑科技大学	苏三庆; 孙灏江; 王威; 易术春; 路秀琪; 马小平
9	论文	Comparative study on the characteristics of magnetic memory signals for welding and non-welding steels with different materials under tension-compression fatigue	中国	10.3233/JAE-190064	2019-10-31	International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	Xi'an University of Architecture & Technology	Yiyi Yang; Sanqing Su; Wei Wang; Xiaoping Ma; Jingyu Hu
10	发明专利	一种适用于多截面金属梁的金属磁记忆检测设备及检测方法	中国	ZL 2020 1 0864795.6	2023-01-24	5714067	西安建筑科技大学	苏三庆; 余成龙; 王威; 韩松; 杨超颖; 王普

## 七、主要完成人情况表

姓 名	苏三庆	排 名	1
行政职务	陕西省岩土与地下空间工程重点实验室主任，陕西省城市公共交通空间综合规划与开发工程研究中心主任，陕西省新型城镇化与人居环境研究院院长。		
技术职称	二级教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目技术创造性贡献： 制定了桥梁钢结构磁记忆检测的整体研究规划，从理论及试验两方面探讨了疲劳裂纹扩展长度磁信号量化方法，提出了磁特征参数与裂纹长度之间的定量关系式，进行了直腹板钢箱梁以及波纹腹板钢箱梁四点受弯磁记忆检测试验研究。获得国家自然科学基金的资助并顺利结题，完成各主要知识产权及代表性论文的发表，完成主要发现、发明及创新点所列各项科技创新。本人在该项目技术研发工作中投入的工作量占本人工作总量的 80%。			

姓 名	王威	排 名	2
行政职务	混凝土结构教研室党支部书记		
技术职称	教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目技术创造性贡献： 在磁记忆检测的桥梁钢结构疲劳裂纹长度与磁特征参数模型的建立，腐蚀钢板的剩余承载力评估中有重要贡献，对相关的知识产权及代表性论文的发表，完成相关的发现、发明及创新点所列各项科技创新。本人在该项目技术研发工作中投入的工作量占本人工作总量的 60%。			

姓 名	时朋朋	排 名	3
行政职务	中国机械工程学会无损检测分会应力测试专业大会副主席,宁夏化工装备智能检验检测工程研究中心副主任		
技术职称	教授		
工作单位	宁夏大学		
完成单位	西安建筑科技大学		

对本项目技术创造性贡献：	
<p>主要进行磁记忆信号耦合规律的研究，相关的知识产权及代表性论文的发表，完成相关的发现、发明及创新点所列各项科技创新，本人在该项目技术研发工作中投入的工作量占本人工作总量的 50%。</p>	

姓 名	马小平	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	高级工程师		
工作单位	中铁第一勘察设计院集团有限公司		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目技术创造性贡献： 负责项目工程应用与现场验证。结合铁路枢纽西安站站房钢结构检测任务，组织实施磁记忆信号的现场测试和性能评估，推动成果落地应用。参与了钢结构疲劳裂纹试验及磁信号数据采集，协助完成疲劳裂纹长度与磁信号之间关系的拟合分析。			

姓 名	易术春	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	工程师		
工作单位	陕西省建筑科学研究院有限公司		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目技术创造性贡献： 负责钢结构力学性能评估与检测验证工作。参与多类桥梁钢结构试点检测，对比验证磁记忆检测与传统方法，推动成果标准化应用。协助开展钢材腐蚀损伤试验与仿真计算，为建立锈蚀区磁信号定量模型提供数据支撑。			

## 八、主要完成单位情况表

单位名称	西安建筑科技大学
<p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>作为项目牵头单位，西安建筑科技大学在本项目中承担了核心理论研究与关键技术攻关任务。团队系统提出了基于金属磁记忆信号的桥梁钢结构损伤量化评判理论，建立了疲劳裂纹、锈蚀、焊缝等典型损伤的磁荷模型，揭示了应力—损伤—磁信号之间的定量关系，首次实现了桥梁钢结构潜在损伤的定量化评估方法。在此基础上，研发了疲劳裂纹扩展行为表征方法、基于磁特征参量的锈蚀损伤与抗拉强度评估方法以及焊缝应力集中区识别方法，提出了以磁信号特征点指示潜在危险部位的早期预警技术。相关研究成果获得国家自然科学基金资助，并在国际权威期刊上公开发表，被国内外同行广泛引用，奠定了项目的理论和方法学基础。</p>	
单位名称	中铁第一勘察设计院集团有限公司
<p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>中铁第一勘察设计院集团有限公司作为工程应用与示范单位，承担了本项目在铁路站房和桥梁钢结构中的工程化推广应用任务。在铁路枢纽西安站站房钢结构工程中，基于项目研究成果，应用了磁记忆检测的应力集中表征和锈蚀损伤识别方法，对跨地裂缝区域的关键构件进行长期巡检和性能评估。实践结果表明，技术应用有效保障了站房钢结构的运营安全，2022 - 2024 年节省了约 1132 万元的运维费用。此外，该院还在铁路客站大跨度钢屋盖健康监测中，推动了本项目成果与 BIM、SHM 等数字化技术的结合，促进了成果在重大工程中的实际落地与推广应用。</p>	
单位名称	陕西省建筑科学研究院有限公司
<p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>陕西省建筑科学研究院有限公司在本项目中主要承担了区域工程检测与标准化推广工作。依托其在建筑工程检测和结构安全评估领域的经验，该院开展了基于磁记忆信号的检测方法在多类桥梁钢结构中的应用验证，推动了检测规程与应用指南的制定与完善。同时，该单位配合完成了成果在省部级科技成果鉴定中的应用证明与评审，进一步提升了成果在行业内的认可度和推广价值。通过多项目工程检测与对比验证，陕西省建筑科学研究院为本成果在省内外工程检测市场的推广提供了坚实支撑。</p>	

附表 1

完成人合作关系说明

第一完成人：苏三庆

项目总负责人，西安建筑科技大学二级教授，长期从事钢结构无损检测与结构健康监测研究。作为项目的主要设计者和组织者，负责项目总体规划与实施路线，统筹理论、试验和工程应用的协同推进。主持完成了钢箱梁直腹板和波纹腹板疲劳试验与磁记忆信号采集，提出了磁特征参数与裂纹扩展长度之间的定量关系。与团队其他成员共同申请知识产权、发表论文。合作时间为 2013 年至今。主要合作内容包括：①制定研究总体方案，构建损伤—磁信号量化模型；②推动理论分析、试验和仿真有机结合；③指导团队开展工程应用示范；④主持国家自然科学基金项目并完成主要结题任务。

第二完成人：王威

西安建筑科技大学教授，负责协助项目统筹与关键研究任务。主要承担疲劳裂纹与磁信号特征参数模型建立、腐蚀钢板剩余承载力评估研究。参与相关专利申请与论文发表。合作时间为 2013 年至今。主要合作内容包括：①开展裂纹扩展与磁信号关系研究；②提出腐蚀损伤下承载力退化的评估方法；③参与主要试验与数据分析；④配合完成部分创新点成果总结与推广。

第三完成人：时朋朋

宁夏大学教授，负责理论研究与力磁耦合模型构建。重点研究磁记忆信号与应力、损伤演化之间的耦合规律，提出并完善多项磁—力本构模型。合作时间为 2019 年至 2023 年。主要合作内容包括：①构建疲劳、腐蚀和焊缝损伤的理论分析框架；②开展力磁耦合机理研究；③与实验研究团队联合验证理论模型；④完成多篇论文与专利成果。

第四完成人：马小平

中铁第一勘察设计院集团有限公司高级工程师，负责项目工程应用与现场验证。结合铁路枢纽西安站站房钢结构检测任务，组织实施磁记忆信号的现场测试和性能评估，推动成果落地应用。合作时间为 2017 年至 2024 年。主要合作内容包括：①开展疲劳裂纹扩展磁信号工程研究；②主持站房钢结构健康检测应用；③形成典型工程应用案例；④参与知识产权和应用成果推广。

第五完成人：易术春

陕西省建筑科学研究院有限公司工程师，负责钢结构力学性能评估与检测验证工作。参与多类桥梁钢结构试点检测，对比验证磁记忆检测与传统方法，推动成果标准化应用。合作时间为 2014 年至 2024 年。主要合作内容包括：①承担钢结构力学性能评估研究；②组织工程检测应用示范；③配合完成省部级成果鉴定；④参与行业规程和应用指南制定。

### 完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/ 项目排名	合作起始 时间	合作完成时 间	合作成果	证明材料
1	共 同 知 识 产 权	苏三庆/1 王威/2	2014-01-01	2019-11-01	建筑钢结构磁记忆无损检测	主要知识产权 1 附件 1-1-1
2	论 文 合 著	苏三庆/1 时朋朋/3	2019-06-01	2023-10-31	Learning physical states of bulk crystalline materials from atomic trajectories in molecular dynamics simulation	主要知识产权 5 附件 2-2-2
3	共 同 知 识 产 权	苏三庆/1 王威/2 马小平/4 易术春/5	2016-07-08	2022-10-11	一种检测钢结构压杆失稳的装置及方法	主要知识产权 5 附件 2-2-5