

项目公示信息

一、项目名称：矿用相机防爆玻璃折射校正与井下视觉定位控制技术创新与应用

二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省教育厅

提名意见：

未来相当长一段时期，煤炭依然是我国的主体能源，发挥着重要的能源安全“压舱石”作用。智能掘进技术及装备研发是实现井下少人甚至无人作业的攻坚领域。井下掘进工作面设备位姿的实时、准确测量与控制是巷道智能掘进面临的瓶颈问题，唯有破解之才能实现装备的定向导航、定形截割和装备协同，是实现掘进工作面掘-锚-支-运并行高效作业的基础技术。

该提名项目将计算机视觉检测技术用于煤矿井下掘进设备位姿测量，联合多个科研单位开展视觉定位与导航应用攻关。在国家绿色制造系统集成项目、国家自然科学基金等项目资助下，首创了煤矿井下矿用防爆相机折射成像建模及校正理论，研发了振动工况下矿用相机运动去模糊方法，发明了基于激光点线特征的掘进装备定位方法，自主研发了数字孪生驱动的掘进工作面智能管控系统。项目相关成果在西安重工装备制造集团西安煤矿机械有限公司、山东天河科技股份有限公司等掘进主机厂家配套，并在陕煤黄陵矿业有限公司、陕西榆林大海则、中煤华晋集团王家岭、阳泉煤业（集团）股份有限公司二矿、陕西能源赵石畔矿业运营有限责任公司等多家企业推广应用。井下长距离视觉定位与装备群智能管控的各项关键技术满足煤矿对掘进装备智能化和高效运行的要求，经济与社会效益显著。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科技科技进步奖提名条件。特提名为陕西省科技进步奖二等奖。

三、项目简介

本成果属于国民经济行业的采矿业，是视觉测量在煤矿采掘领域的典型应用。

未来相当长一段时期，煤炭依然是我国的主体能源，发挥着重要的能源安全“压舱石”作用。智能掘进技术及装备研发是实现井下少人甚至无人作业的攻坚领域。井下掘进工作面设备位姿的实时、准确测量与控制是巷道智能掘进面临的瓶颈问题，唯有破解之才能实现装备的定向导航、定形截割和装备协同，是实现掘进工作面掘-锚-支-运并行高效作业的基础技术。国内外研究者在井下装备定位与控制方面做了大量有益探索，现有 UWB、里程计等煤矿井下掘进装备机身位姿测量方法均存在不足，长期依赖进口的惯导定位技术封闭、价格昂贵且因累积误差影响并未解决煤矿井下设备精确定位难题。近年来，采煤智能化技术极大提升了生产效率，现场“采掘失衡”愈显严重，以智能感知与控制技术赋能掘进安全高效生产，是国家战略导向和行业战略转型的必然选择，对提高煤矿掘进效率和煤矿安全生产具有重大意义。

本课题组从 2016 年开始将矿用相机视觉定位技术用于煤矿井下掘进设备位姿测量，联合多个科研单位开展视觉定位与导航应用攻关。在国家绿色制造系统集成项目、国家自然科学基金、陕西省创新能力支撑计划以及 10 余项省部级项目资助下，以煤矿掘进工作面少人或无人化生产为目标，发明了面向煤矿井下恶劣环境的激光点线单目视觉定位系统及配套技术，在矿用相机成像校正与掘进装备视觉定位理论方面取得了一系列重大突破并实现了工业化应用。

主要创新成果有：

创新点 1：（1）首创了煤矿井下矿用防爆相机折射成像校正理论与方法，发明了井下单目视觉位姿测量方法，创新设计了视觉成像系统的防爆与除尘装置，创建了几何驱动的矿用相机共面约束成像模型，实现了矿用相机成像像素点与空间点映射的数学表征，揭示了防爆玻璃引起的矿用相机成像非单视点成像规律，攻克了矿用相机多层防爆玻璃成像折射畸变校准难题，形成了具有防爆玻璃的矿用相机成像机理及理论，实现了矿用图像测量理论的重要突破，为提高煤矿图

像测量精度提供了新的理论与方法。

创新点 2：发明了掘进工况下矿用图像去模糊与超分辨率重构方法，煤矿掘进工况振动引起的图像模糊导致视觉定位误差急剧增大，考虑掘进振动和防爆玻璃双重影响，发明了振动工况下矿用图像质量启发的盲图像去运动模糊方法，揭示了矿井振动工况下矿用相机图像退化机理，创新了矿用相机非均匀振动模糊核变分估计与参数优化方法，实现了矿用相机非均匀模糊核估计，攻克了工况振动和运动引起的图像模糊表征难题，发明了多路特征校准的轻量级矿井图像超分辨率重建方法，揭示了粉尘、水雾和振动多因素耦合影响下的矿井图像退化机理，实现了振动工况下矿井低质图像的超分辨率清晰化重构。征。

创新点 3：发明了基于激光点线合作标靶的掘进装备单目视觉定位方法创新设计激光点-线合作标靶，自主研发了巷道长距离单目视觉精确定位与定向导航方法，提出了高粉尘、低照度环境下激光束标靶图像亚像素级精确分割、特征提取算法，发明了基于 3P3L 的掘进机机身位姿视觉解算方法，创新了基于多点 LED 合作标靶的截割头位姿视觉定位方法，建立视觉测量误差传递函数模型揭示了多因素影响的误差传播规律，形成了掘进装备位姿精确测量与动态定位理论与方法，属于掘进装备定位方面国产化替代的重大创新，以其测量精度高、无累积误差、性价比高等优势在国内煤矿智能化建设中得到广泛应用。

创新点 4：首创数字孪生驱动的掘进工作面远程智能管控技术体系，自主研发了巷道成形截割轨迹规划与跟踪控制系统，实现了视觉测量数据驱动的掘进机定形截割控制与超欠挖报警，有效提升了巷道掘进效率和生产安全，发明了掘进工作面设备群远程虚拟操控与自主决策方法，构建了掘进装备智能体与虚拟巷道场景数字孪生体模型，实现了数字孪生驱动的设备群智能感知与协同控制，课题组承担了煤炭行业标准化相关工作，主持或参与制定了煤炭行业《煤矿巷道掘进机器人系统》《智能矿井掘进工作面建设标准》等标准和规范，“视

觉+”定位与控制技术在山西王家岭、榆林大海则、彬长孟村等煤矿智能化建设中表现突出，相关应用为国内煤矿掘进智能化发展提供了典型示范。

紧密围绕“矿用相机防爆玻璃折射校正与井下视觉定位控制技术创新与应用”项目，各单位协同攻关，取得了一系列煤矿井下视觉定位与控制相关核心成果，截止 2024 年 12 月项目授权且有效国家发明专利 18 项，发表高水平学术论文 51 篇，其中 SCI、EI 收录 33 篇。

四、客观评价

1. 成果鉴定情况

项目负责人承担的陕西省创新能力支撑计划项目“煤矿机电设备智能监测与控制创新团队”等项目，聚焦煤矿掘进机器人精确定位与定向导航方法研究，通过采用激光点、激光线合作标靶并构建掘进机身及截割头视觉测量模型，解决了掘进工作面设备精确定位、自主导航和自主截割难题。2024 年 11 月 18 日陕西省科技厅组织专家评审验收，专家认为该项目有效解决了下场巷道中掘进装备定位、定向和定形的控制难题，一致同意通过验收。

中国煤炭工业协会对成果“煤矿井下掘进装备精确定位与可视化截割控制技术及应用”鉴定结论：技术可行性很高，项目整体水平达到国际先进水平，对推动煤矿智能化掘进和我国煤炭行业科技进步具有重大作用。

2 科技查新情况

2024 年 12 月教育部科技查新工作站（G01）本成果进行查新，报告显示：“该查新课题针对矿用相机折射成像建模与参数非线性辨识、非均匀振动模糊建模与图像复原、煤矿井下移动目标视觉精确定位与导航等技术开展研究，在检索到的国内中文文献中，未见与该课题查新点内容完全相同的文献报道。

3 论文发表引用情况

成果中创新点一发明了矿用防爆相机折射校正理论及方法，攻克

了矿用相机多层防爆玻璃成像折射畸变校准难题，实现了矿用图像测量理论的重要突破。该创新点被山东师范大学教授曾庆良教授，中国矿业大学吴淼教授，大连理工大学霍军周教授等评价为“建立了双层玻璃和球形玻璃折射模型并校正，具有较好的应用效果”，“一种新的几何驱动的掘进机摄像机校正方法”。

成果中创新点二发明了掘进工况下矿用图像去模糊与超分辨率重构方法，实现了矿用相机非均匀模糊核估计，攻克了工况振动和运动引起的图像模糊表征难题，以及实现了振工况下矿井低质图像的超分辨率清晰化重构。该创新点被湖南大学何志成教授评价“相对于传统方法校正过程无需特定目标”，“空气介质中的玻璃折射精确建模可应用于多种场合”。

创新点三发明了发明了基于激光点线合作标靶的掘进装备单目视觉定位方法，以激光点-线标靶为特征信息源，自主研发了悬臂式掘进机机身及截割头视觉精确位姿测量与动态定位方法，实现了井下掘进装备的位姿精确测量。该创新点被中煤科工西安研究院总工程师程建远研究员、毛君教授等专家评价为“突破了掘进机在巷道狭长空间中位姿解算关键技术”，“推动了掘进机定位导航发展”，“为煤矿井下综采综掘工作面设备的远程智能监测与控制提供了全新的思路”。项目完成人杨文娟副教授、张旭辉教授在煤矿井下装备视觉测量与导航研究领域研究成果发表于电气电子领域国际顶级期刊 **IEEE Transactions on Industrial Electronics**，该刊主编 **Makoto Iwasaki** 教授及审稿人对该工作给予较高评价，认为几何驱动的井下相机共面约束建模与标定有效克服井下相机防爆玻璃和振动等因素影响。另外，成果第一完成人张旭辉教授分别在全国性学术会议作报告 20 余次，研究成果得到行业专家的高度评价。

创新点四首创了数字孪生驱动的掘进工作面远程智能管控技术体系，自主研发了巷道成形截割轨迹规划与跟踪控制系统，发明了掘进工作面设备群远程虚拟操控与自主决策方法实现了数字孪生驱动的设备群智能感知与协同控制。主持或参与制定了煤炭行业《煤矿巷道掘进机器人系统》《智能矿井掘进工作面建设标准》等标准和规范，

“视觉+”定位与控制技术在山西王家岭、榆林大海则、彬长孟村等煤矿智能化建设中表现突出，相关应用为国内煤矿掘进智能化发展提供了典型示范。

五、代表性知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权名称	国家(地区)	授权号	授权公告日	权利人(标准起草单位)	发明人(标准起草人)
1	发明专利	基于直线定位模型的掘进机机身位姿单目视觉测量方法	中国	ZL 201810966751.7	2020-09-11	西安科技大学	张旭辉，杨文娟
2	发明专利	一种煤矿井下掘进装备位姿检测系统及方法	中国	ZL202211438343.7	2024-11-22	西安科技大学	张旭辉，杨骏豪，杨文娟，张超，万继成，石硕，杨红强
3	发明专利	基于视觉导航的煤矿悬臂式掘进机截割控制方法及系统	中国	ZL202010783915.X	2022-05-03	西安科技大学	张旭辉，谢楠，张超，杨文娟，张楷鑫，周创
4	发明专利	一种悬臂式掘进机空间位姿自动检测方法及其系统	中国	ZL202010850770.0	2022-03-15	西安科技大学	张旭辉，谢楠，张超，杨文娟，张楷鑫，周创
5	发明专利	一种结合语义信息的矿井图像超分辨率重建方法	中国	ZL20221992327.6	2023-06-16	中国矿业大学	程德强，王子强，寇旗旗，韩成功，王晓艺，徐飞翔，吕晨，张皓翔
6	发明专利	一种基于三激光点标靶的掘进机机身位姿确定方法及系统	中国	ZL202210098038.1	2024-11-22	西安科技大学	杨文娟;张旭辉;张超;万继成;杜昱阳;杨红强
7	发明专利	矿用悬臂式掘进机可视化辅助导引方法和系统	中国	ZL201811330833.9	2020-05-19	西安科技大学	张旭辉，赵建勋，杨文娟，张超，谢亚洲
8	发明专利	基于图像质量启发的盲图像去运动模糊算法	中国	ZL202310985961.1	2024-02-13	中国矿业大学	宋天舒，程德强，寇旗旗，李雷达，陈亮亮，江鹤
9	实用新型	可除尘的矿用图像测量标靶	中国	ZL201820778260.5	2019-04-23	西安科技大学	张旭辉;张超;赵建勋;王冬曼
10	实用新型	一种基于LED标靶的掘进机定位装置	中国	ZL 2023 2 2644022.9	2024-06-07	西安科技大学	张旭辉;杨文娟;赵典;汤杜伟;任志腾;冀洋

六、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
张旭辉	1	院长	教授	西安科技大学	西安科技大学	主要完成人之一。负责设计煤矿井下视觉测量技术架构,在全国率先提出并推动“视觉+”在煤矿恶劣环境下定位技术与系统,推动“视觉+”定位系统在全国近20个煤矿推广应用。对创新点1,2,3,4均有重要贡献。
杨文娟	2	无	副教授	西安科技大学	西安科技大学	项目主要完成人之一,负责矿用相机防爆玻璃折射校正、基于激光点线特征的掘进设备单目视觉位姿测量技术攻关。对创新点1,2,3,4均有重要贡献。
寇旗旗	3	副主任	副教授	中国矿业大学	中国矿业大学	项目主要完成人之一,负责视觉图像处理与特征提取,保证视觉定位图像基础。对创新点2有重要贡献。
李长安	4	无	教授级高工	西安重工装备制造集团有限公司	西安重工装备制造集团有限公司	项目主要完成人之一。负责矿用相机防爆玻璃折射校正性能分析与工程测试。对创新点4有重要贡献。
同娟	5	无	高工	中国重型机械研究院股份公司	中国重型机械研究院股份公司	项目主要完成人之一。负责掘进工作面导航定位系统研发搭建以及相关测试,对创新点3有重要贡献。
刘永伟	6	无	高工	MARCO(北京)自动控制系统开发有限公司	MARCO(北京)自动控制系统开发有限公司	项目主要完成人之一,负责振动工况下矿用相机非均匀建模标定方法研究及现场实验验证。对创新点4有重要贡献。
张超	7	无	无	西安科技大学	西安科技大学	项目主要完成人之一,负责掘进工作面视觉+定位系统研发搭建以及精度验证测试,对创新点3、4有重要贡献。
王亮	8	部长	高工	西安煤矿机械有限公司	西安煤矿机械有限公司	项目主要完成人之一。完成“视觉+”定位技术验证和工业测试,共同研发基于视觉定位数据的掘进机智能管控系统。对创新点4具有重要贡献。
董云峰	9	副总经理	高工	陕西能源赵石畔矿业运营有限责任公司	陕西能源赵石畔矿业运营有限责任公司	项目主要完成人之一,负责掘进工作面视觉+定位系统搭建以及精度验证测试。对创新点4有重要贡献。
万继成	10	无	无	西安科技大学	西安科技大学	项目主要完成人之一,揭示了基于梯度比估计的失焦图像不同区域梯度信息表征,解决

						了井下非焦平面的图像多尺度失焦模糊量估计。对创新点 2、3、4 均有重要贡献。
--	--	--	--	--	--	---

七、主要完成单位情况

1. 西安科技大学

西安科技大学全面负责项目的制定与组织实施。作为本项目的依托单位，为项目的顺利完成并取得优异成绩做出了重要贡献，组织并完成了项目策划和实施工作，为项目的顺利实施提供了人力资源与优质的工作环境与场所，提供了本项目所需的设备、能源、图书资料和数据库等资源，为本项目提供配套经费支持。

2. 中国矿业大学

中国矿业大学是教育部直属的全国重点高校，先后进入国家“211工程”“985优势学科创新平台项目”和国家“双一流”建设高校行列。学校为全国首批具有博士和硕士授予权的高校之一，设有国家批准的研究生院。学校现有2个国家“双一流”建设学科、1个一级学科国家重点学科，8个二级学科国家重点学科，21个一级学科博士点，9个国家级科研平台，55个省部级科研平台。作为本项目的参与单位，为项目的顺利完成并取得优异成绩做出了重要贡献，负责视觉图像处理与特征提取，保证视觉定位图像基础技术研究。

3. 西安重工装备制造集团有限公司

西安重工装备制造集团有限公司是全国最早具备专业煤机成套装备制造和配套技术服务保障能力的国有大型装备制造企业集团之一。作为本项目的参与单位，负责矿用相机防爆玻璃折射校正性能分析与工程测试，为项目的顺利完成并取得优异成绩做出了重要贡献。

4. 西安煤矿机械有限公司

西安煤矿机械有限公司主要负责项目的推广及应用。应用西安科技大学研发的“矿用井下长距离单目视觉定位技术”到公司的掘进装备上，提高了公司掘进装备智能化水平，相关技术通过了中国煤炭工业协会鉴定，鉴定结果为“国际先进”。完成“视觉+”定位技术验证和工业测试，共同研发基于视觉定位数据的掘进机智能管控系统。

5. 中国重型机械研究院股份公司

中国重型机械研究院股份公司负责掘进工作面导航定位系统研发搭建以及相关测试。

6. MARCO(北京)自动控制系统开发有限公司

MARCO(北京)自动控制系统开发有限公司负责矿用相机视觉测量性能测试,包括畸变校正、视觉定位等方面的工程应用。

7. 陕西能源赵石畔矿业运营有限责任公司

陕西能源赵石畔矿业运营有限责任公司作为陕投集团旗下陕西能源投资股份有限公司的全资子公司,承担着赵石畔煤矿的建设与运营管理职责。作为本项目的重要参与和实施单位,公司在科技创新与应用推广方面做出了实质性贡献。在智能控制技术方面,公司积极参与研发了悬臂式掘进机视觉/惯导组合定位系统,实现了井下长距离、高精度、实时的位姿测量与控制,为掘进机定向导航、定形截割和防碰撞提供了坚实的技术支撑。在应用推广方面,赵石畔煤矿作为关键技术落地的重要试验基地,全程配合完成了系统的现场应用测试、优化完善与工程实施工作,有效保障了项目安全高效推进,显著提升了技术方案的实用性与可靠性,为项目成果的工业化应用和推广提供了关键支撑。

八、完成人合作关系说明

本项目由西安科技大学联合中国矿业大学、西安重工装备制造集团有限公司、西安煤矿机械有限公司、中国重型机械研究院股份公司、MARCO(北京)自动控制系统开发有限公司、陕西能源赵石畔矿业运营有限责任公司合作完成。西安科技大学与中国矿业大学负责项目成果研究与开发,西安重工装备制造集团有限公司、西安煤矿机械有限公司、中国重型机械研究院股份公司、MARCO(北京)自动控制系统开发有限公司、陕西能源赵石畔矿业运营有限责任公司负责项目的成果应用与推广。

项目实施期间,项目完成人杨文娟、张超、万继成由主持人张旭辉教授指导攻读博士学位;寇旗旗、李长安、同娟、刘永伟、王亮、董云峰等合作参与项目的研究与实施应用工作,主要取得如下成果:

1. 张旭辉/1、杨文娟/2合作主要知识产权和标准规范1、2、3、4、

- 6、10，合作中国煤炭工业协会鉴定，合作完成项目研发。
2. 张旭辉/1、寇旗旗/3合作完成项目研发与工程应用。
3. 张旭辉/1、李长安/4合作完成项目研发与工程应用。
4. 张旭辉/1、同娟/5合作完成项目研发与工程应用。
5. 张旭辉/1、刘永伟/6合作完成项目研发与工程应用。
6. 张旭辉/1、张超/7合作主要知识产权和标准规范2、3、4、6、
- 7，合作中国煤炭工业协会鉴定，合作完成项目研发。
7. 张旭辉/1、王亮8合作完成项目研发与工程应用。
8. 张旭辉/1、董云峰/9合作完成项目研发与工程应用。
9. 张旭辉/1、万继成/10合作主要知识产权和标准规范2、6，合作中国煤炭工业协会鉴定，合作完成项目研发。

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	合作时间	合作成果	证明材料
1	发明专利	张旭辉/1；杨文娟/2	2020年09月11日	基于直线定位模型的掘进机机身位姿单目视觉测量方法	主要知识产权和标准规范 1
2	发明专利	张旭辉/1;杨文娟/2;张超/7;万继成/10	2024年11月22日	一种煤矿井下掘进装备位姿检测系统及方法	主要知识产权和标准规范 2
3	发明专利	张旭辉/1；张超/7；杨文娟/2	2022年05月03日	基于视觉导航的煤矿悬臂式掘进机截割控制方法及系统	主要知识产权和标准规范 3
4	发明专利	张旭辉/1；张超/7；杨文娟/2	2022年03月15日	一种悬臂式掘进机空间位姿自动检测方法及系统	主要知识产权和标准规范 4
5	发明专利	杨文娟/2;张旭辉/1;张超/7;万继成/10	2024年11月22日	一种基于三激光点标靶的掘进机机身位姿确定方法及系统	主要知识产权和标准规范 6
6	发明专利	张旭辉/1；杨文娟/2；张超/7	2020年5月19日	矿用悬臂式掘进机可视化辅助导引方法和系统	主要知识产权和标准规范 7
7	实用新型	张旭辉/1;张超/7	2019年4月23日	可除尘的矿用图像测量标靶	主要知识产权和标准规范 9

8	实用新型	张旭辉/1；杨文娟/2	2023 年 9 月 27 日	一种基于 LED 标靶的掘进机定位装置	主要知识产权和标准规范 10
9	成果鉴定	张旭辉/1;杨文娟 /2; 张超/3;万继成/10	2020 年 12 月 21 日	煤矿井下掘进装备位姿测量与远程虚拟控制技术应用	成果鉴定
10	项目合作	张旭辉/1；杨文娟/2; 寇旗旗/3；李长安/4; 同娟/5;刘永伟/6；张超/7;王亮/8;董云峰/9;万继成/10	2025 年 05 月 20 日	煤矿掘进工作面智能管控系统研发	项目合作 1
11	项目合作	张旭辉/1；杨文娟/2; 寇旗旗/3；李长安/4; 同娟/5;刘永伟/6；张超/7；董云峰/9;万继成/10	2024 年 6 月 10 日	掘锚一体机姿态监测、长距离精确定位技术研究课题	项目合作 2