

## 科学技术进步奖公示内容

### 一、项目名称：

低品位稀有金属露天矿精细化智能开采关键技术及工程应用

### 二、提名者及提名意见（包含提名等级）：

提名者：陕西省教育厅    提名等级：一等奖

提名意见：该项目主要围绕我国低品位稀有金属矿产资源精细化智能开采的系列难题，利用采矿系统工程、新一代信息技术、多目标优化理论等开展交叉研究，创立了集金属露天矿整体设计与多矿种边际品位优化方法、稀有金属 5D 协同排产优化及精细化配矿方法、金属露天矿卡车集群智能调度技术、无人采矿装备及智能协同管控一体化的低品位稀有金属露天矿精细化智能开采关键技术体系。该体系创立和完善了低品位稀有金属资源协同开采边际品位优化方法，研发了多阶段随机规划边际品位优化技术，解决了低品位伴生资源无法协同开采利用的难题；研发了低品位金属资源品位动态提取及配矿单元智能识别技术，构建了品位-价格-成本约束下的 5D 排产和多目标配矿优化模型，解决了低品位稀有金属精细化智能配矿的技术难题；研发了露天矿卡车集群作业智能调度系统，构建了考虑配矿优先的卡车集群调度多目标优化模型，有效解决了配矿计划和调度执行难以协同的技术难题；研发了金属露天矿场景下的新能源纯电无人驾驶装备及无人驾驶智能协同管控平台，实现了矿区挖装协同精准作业和无人运载智能规划，集成创新了金属露天矿无人开采管控一体化应用模式。该项目在多目标优化配矿、矿用新能

源电动无人驾驶、矿卡集群智能调度、5G 无人采矿管控技术等方面达到了国际领先水平，其成果不仅有重要学术价值，而且对推动我国的矿业科技进步具有重要作用，对保障我国战略性关键金属矿产的资源储备具有重大现实意义。

### 三、 项目简介：

本项目属于采矿工程学科，金属矿露天开采领域，重点解决我国低品位金属资源综合利用效率低、伴生资源无法协同开采、生产开采精细化和智能化水平低等重大技术难题。项目历经 18 年攻关，在低品位稀有金属露天矿精细化智能开采理论与方法上有重大突破，创立了集金属露天矿整体设计与多矿种边际品位优化方法、稀有金属 5D 协同排产优化及精细化配矿方法、金属露天矿卡车集群智能调度技术、无人采矿装备及智能协同管控一体化的低品位稀有金属露天矿精细化智能开采关键技术体系。成果推广后，大幅提高了低品位稀有金属资源利用率、减少了矿山废石排放，开创了金属露天无人开采新模式，经济效益、生态效益和社会效益十分显著。项目主要技术内容如下：

- 1、创立了金属露天矿整体设计与多矿种边际品位优化方法。首次提出露天矿的“最终境界、生产能力、开采计划、开采寿命及设备配置”五大要素整体优化体系，打破了传统露天开采分步优化方式，成功解决了五大要素无法整体优化的难题；构建了稀有金属精矿价格预测模型，量化了贫矿伴生元素与主元素的一体化关系，建立了低品位伴生资源工业开采指标体系，实现了贫矿伴生资源多矿

种矿岩界线的合理圈定；创立了多矿种协同开采边际品位优化方法，构建了边际品位-回收率关系模型，研发了多阶段随机规划边际品位优化技术，解决了低品位伴生资源无法协同开采利用的难题，提高了战略性稀有金属资源可用量。

2、提出了稀有金属 5D 协同排产优化及精细化配矿方法。构建了低品位稀有金属资源品位-价格-成本 5D 排产优化模型，揭示了随开采时间和空间推进的品位、价格及成本动态演化规律；研发了高精度品位动态提取及配矿单元智能识别技术，提出了低品位金属资源地质数据分析模型，实现了矿区高精度品位动态获取和矿体品位分布估算，解决了复杂矿体配矿单元智能划分的难题；针对多金属露天矿配矿中存在的多约束、多变量、非线性等特点，提出了基于多目标优化理论的配矿模型及求解算法，极大地提高了配矿计划的求解准确率，解决了低品位稀有金属露天矿精细化智能配矿的技术难题。

3、研发了金属露天矿智能化采矿卡车集群智能调度技术。针对矿区非结构化道路难以精准获取、更新频率快等难题，提出了露天矿运输路网快速提取及路网动态更新方法，实现了露天矿高精度路网的快速提取与更新；研发了基于能耗最优的全局路径规划算法和基于路权分配的局部路径规划算法，建立了以最小化总运输功为目标的露天矿最优路径规划模型；构建了考虑配矿约束的露天矿卡车集群调度多目标优化模型，有效解决了配矿计划和调度执行难以协同的技术难题，形成了配矿优先下露天矿集群智能化调度技术体系。

4、研发了金属露天矿无人采矿装备及智能协同管控一体化技术。率先研发了金属露天矿新能源纯电无人驾驶装备及多源信息融合环境感知技术，提出了多传感器融合的矿区非结构化道路障碍物检测算法，解决了粉尘、雨雪等恶劣天气下的无人驾驶卡车环境感知难题；研发了露天矿无人驾驶智能协同管控平台，提出了矿区场景下挖装协同精准作业及精准控制算法，大幅提升了无人驾驶挖卡协同作业效率；攻克了露天矿无人/有人采矿装备智能协同集群作业管控技术，实现了矿区作业全局装-运-卸智能规划和集群调度，集成创新了露天矿无人开采管控一体化应用模式。

研究成果授权发明专利 17 项，实用新型专利 9 项，软件著作权 27 项，参与制定《智能矿山建设规范》等行业标准 3 项，发表论文 123 篇，其中 SCI 收录 41 篇（单篇最高影响因子 15.99），EI 收录 63 篇，出版学术著作 9 部，其中“露天矿数字化采矿集成系列技术”等 4 项知识产权进行了重大成果转化，作价入股 1020 万，成立了陕西省新型研发机构优迈智慧矿山研究院，并被遴选参加了陕西省三项改革首场路演四个项目之一，受到《人民日报》等多家媒体关注。相关成果目前已在三道庄露天矿、金堆城露天矿、南芬露天矿、歪头山露天矿、齐大山露天矿等矿山得到推广应用，近三年实现新增销售额 58.13 亿元，新增利润 34.7 亿元。应用后显著增加了稀有金属可采资源量，极大保护了矿区生态环境，提高了精细化智能开采水平，开辟了金属露天矿无人开采新模式，为我国金属露天矿绿色、低碳、高效、智能开采开创了思路。项目先后获得中国有色金属工

业协会科技进步一等奖、中国产学研合作创新成果一等奖、陕西省高等学校科技进步一等奖、洛阳市科技进步一等奖等。

项目创新成果 1、2、3、4 通过中科合创（北京）科技成果评价中心组织的成果鉴定，蔡美峰、古德生、王浩、马洪琪等四位院士组成的专家组一致认为该成果填补了国内外空白，整体技术达到国际领先水平。项目创新成果 2、3 通过中国有色金属工业协会组织的成果鉴定，孙传尧院士和桂卫华院士等专家最后形成鉴定意见为该项目整体技术达到国际先进水平，其中钼钨露天矿多目标优化配矿管理技术达到国际领先水平。项目创新成果 4 通过中国有色金属工业协会组织的成果鉴定，于润沧院士、吴爱祥院士等组成的专家组一致认为该成果整体技术达到国际先进水平，其中矿用新能源电动无人驾驶卡车技术、5G 无人采矿管控技术达到国际领先水平。

#### 四、 客观评价：

##### （一）科技成果鉴定报告

##### 1、科技成果二鉴定报告，编号：中色协科（鉴）字[2012]第 034 号（附件 6-4）

2012 年 6 月，中国有色金属工业协会组织孙传尧院士和桂卫华院士等专家组成的委员会进行成果鉴定，形成鉴定意见为：“该项目整体技术达到国际先进水平，其中钼钨露天矿多目标优化配矿管理技术达到国际领先水平。”

##### 2、科技成果一鉴定报告，编号：豫科鉴委字[2015]第 1820 号（附件 6-5）

2015年11月，河南省科技厅组织专家委员会对项目成果进行鉴定，形成鉴定意见为：“该项目在钨钼矿床工业指标一体化、露天开采边际品位确定、露天开采境界优化等方面的研究具有创新性，整体技术达到国际先进水平。”

### **3、科技成果三鉴定报告，编号：中色协科（评）字[2019]第011号（附件6-6）**

2019年4月，中国有色金属工业协会组织于润仓院士和吴爱祥院士等专家进行成果鉴定，形成鉴定意见为：“该项目整体技术达到国际先进水平，其中矿用新能源电动无人驾驶卡车技术、5G无人采矿管控技术达到国际领先水平。”

### **4、科技成果一、二、三、四鉴定报告，编号：中科评字[2021]第5401号（附件6-7）**

2021年5月，中科合创（北京）科技成果评价中心组织由蔡美峰院士、古德生院士、王浩院士等7位专家组成的专家委员会对该项目成果进行鉴定，鉴定意见为：“该成果填补了国内外空白，整体技术达到国际领先水平。”

### **（二）科技成果查新报告（附件6-8）**

2025年8月，通过教育部科技查新工作站对该项目核心成果进行查新，经检索并对相关文献分析对比结果表明：该项目提出的“低品位稀有金属露天矿精细化智能开采关键技术及工程应用”除项目组研究成果外，在所检出的国内外相关文献中未见相同报道。

### （三）用户应用评价

1、洛阳栾川钼业集团股份有限公司三道庄露天矿：“该研究成果自投入使用以来，大大提高了钼钨矿产资源利用水平和效率，盘活了低品位伴生资源 2.4 亿吨，大幅增加了我矿的地质资源储量。利用精细化配矿、卡车智能调度，以及无人驾驶管控技术大幅降低了运输成本。”

2、金堆城钼业股份有限公司矿山分公司：“该项目利用精细化配矿技术降低了品位波动率，减少了低品位矿石的损失和贫化。成果可推广应用到国内金属矿山企业，对提高我国低品位稀有金属资源综合利用率具有重要意义。”

3、鞍钢集团矿业有限公司齐大山分公司：“通过软件优化分析，阐明了地表设施迁移产生的成本与由此多采出矿石的经济效益之间的均衡关系，优化了合理的边界开采品位，应用后显著提高了我矿的经济和社会效益。”

4、本溪钢铁（集团）矿业有限责任公司南芬露天矿：“项目成果利用多分期分区露天采场过渡境界及开拓布线系统的优化技术，大幅增加了可采资源地质储量，取得了显著的经济和社会效益。”

5、本溪钢铁（集团）矿业有限责任公司歪头山露天矿：“该技术系统解决了我公司境界优化与开采计划不能协同优化、移动破碎成本大、生产设备布置不合理等难题，应用后大幅提高了资源利用效率和露天矿生产管理水平。”

#### （四）学术评价

创新成果 1：研究成果在 Journal of Central South University、煤炭学报等国内外权威期刊发表 SCI/EI 及核心论文 22 篇，德国、澳大利亚、俄罗斯等学者以及王运敏院士、白润才、胡乃联等教授对该成果提出的露天矿境界、计划、设备等整体优化给予了高度关注和广泛引用。

创新成果 2：研究成果在 Applied Soft Computing、黄金科学技术、金属矿山等国内外权威期刊发表 SCI/EI 及核心论文 35 篇，乌克兰、印度、加拿大学者以及陈建宏、王李管等教授对该成果提出的露天矿配矿管理系统、多目标配矿优化技术给予了高度关注和积极评价。

创新成果 3：研究成果在 Mining, Metallurgy & Exploration、自动化学报等国内外权威期刊发表 SCI/EI 及核心论文 24 篇，加拿大阿尔伯塔大学矿业资深教授 Askari Nasab、法国里尔大学矿业教授 Geoffrey 以及刘仕强教授等专家学者高度关注智能调度算法多篇相关研究的应用价值。

创新成果 4：研究成果在 Int. J. Mining Science and Technology、控制与决策等国内外权威期刊发表 SCI/EI 及核心论文 42 篇，其中 ESI 高被引论文 3 篇，英国兰卡斯特大学学者 Franklin、麦吉尔大学教授 Roussos 及古德生院士、蔡美峰院士等对智能调度、无人开采等给予了高度关注和评价。

## （五）其他评价

### 1、自然资源部评价（附件 6-14）

应用本项目成果的三道庄露天矿贫矿与低品位矿综合利用工程被自然资源部确定为示范工程，2017 年 3 月河南省自然资源厅组织了矿产资源综合利用交流现场观摩会。2018 年和 2022 年，项目研发的“低品位伴生资源综合利用技术”和“露天矿智能开采装备与集成管控关键技术”两项技术先后入选自然资源部《矿产资源节约与综合利用先进适用技术推广目录》，在全国乃至世界都具有示范借鉴和推广应用价值。

### 2、媒体报道和关注

本项目的相关研发成果，先后受到人民日报、光明日报、央视网、陕西卫视、北京卫视、河南卫视、中国有色网、矿业界等国内权威媒体以“国内首家 5G 无人智能矿山”和“智慧矿山综合管控系统”为题进行了专题报道，其中人民日报客户端最高阅读量达 20.2 万，受到了广泛地社会关注。

## 五、应用情况：

项目历经 18 年技术攻关，在低品位稀有金属露天矿精细化智能开采理论与方法上有大突破，创立了集金属露天矿整体设计与多矿种边际品位优化方法、稀有金属 5D 协同排产优化及精细化配矿方法、金属露天矿卡车集群智能调度技术和无人采矿装备及智能协同管控一体化的低品位稀有金属露天矿精细化智能开采关键技术体系。成果先后在三道庄露天矿、金堆城露天矿、齐大山露天矿、南芬露天

矿、歪头山露天矿等推广应用后，经济效益、生态效益和社会效益十分显著。主要表现如下：

(1) 大幅提高了低品位矿石利用率，提高了战略性关键金属可用量；

(2) 大大减少了矿山废石排放占地，极大保护了露天矿区生态环境；

(3) 提高了金属露天矿配矿调度水平，保障了稀有金属精细化开采；

(4) 开辟了金属露天无人化新模式，实现了安全、绿色、智能开采。

表 2 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/电话
1	洛钼集团矿山公司	整体优化、低品位配矿、智能调度、无人驾驶及智能管控	年产 1000 万吨矿石的露天钼钨矿	2012 年 1 月-2024 年 12 月	候凯 /037968659651
2	金钼股份矿山分公司	整体优化、低品位配矿优化、露天矿卡车集群智能调度	年产 1200 万吨矿石的露天钼矿	2018 年 1 月-2024 年 12 月	马骁 /13991661271
3	鞍钢集团矿业有限公司齐大山分公司	露天矿开采整体境界优化技术	年产 1700 万吨矿石的露天矿	2015 年 01 月-2024 年 12 月	王永增 /15694126866
4	本钢集团南芬露天矿	开采计划优化设计以及设备调度优化	年产 1500 万吨矿石的露天矿	2009 年 01 月-2024 年 12 月	刘新宇 /15004140528
5	本钢集团歪头山露天矿	露天矿地测、计划与设计系统	年产 400 万吨矿石的露天矿	2014 年 1 月-2024 年 12 月	孙殿兴 /13941429222

其中“金属露天矿卡车集群智能调度技术”等 4 项知识产权进行了重大成果转化，作价入股 1020 万，成立了陕西省新型研发机构优迈智慧矿山研究院，该技术已在全国 11 个省，32 个金属、煤炭、

水泥砂石等矿区进行应用，管控大型设备 6000 余台，平均降低露天矿开采运输成本 10%以上，大幅提高露天矿智能化开采水平。

## 六、 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	一种钼精矿中长期市场价格分析与预测方法和系统	中国	ZL201811068367.1	2022.02.22	第 4952400 号	西安建筑科技大学	顾清华, 陈露, 卢才武, 聂兴信, 汪朝, 莫明慧
2	发明专利	一种基于 P-LinkNet 网络的露天矿道路模型构建方法	中国	ZL202010054020.2	2023.04.21	第 5986885 号	西安建筑科技大学	顾清华, 薛步青, 卢才武, 陈露, 李学现, 宋江珊
3	发明专利	一种基于自适应遗传算法的多金属多目标配矿方法	中国	ZL201910817733.7	2022.09.09	第 5440423 号	西安建筑科技大学	顾清华, 刘海龙, 王迪, 卢才武, 冯治东, 李学现, 李俊飞
4	发明专利	一种基于高维多目标进化算法的露天矿卡车多目标调度优化方法	中国	ZL202110601033.1	2023.06.23	第 6083657 号	西安建筑科技大学	顾清华, 徐青松, 冯治东, 李学现, 陈露, 王倩
5	发明专利	基于数据驱动的神经网络代理辅助露天矿无人卡车调度方法	中国	ZL202110603543.2	2023.06.02	第 6024683 号	西安建筑科技大学	顾清华, 王丹娜, 卢才武, 陈露, 李学现, 王倩
6	发明专利	一种基于协同进化的露天矿多能源卡车调度优化方法	中国	ZL202110603468.X	2023.05.22	第 6061186 号	西安建筑科技大学	顾清华, 周煜丰, 刘亮, 胡聪, 张超, 王倩

7	发明专利	一种基于露天矿区路径的无人驾驶车辆能耗节能方法	中国	ZL201910816147.0	2021.04.06	第 4346064 号	西安建筑科技大学	顾清华, 李学现, 井石滚, 卢才武, 陈露
8	发明专利	一种基于时间窗限制的露天矿卡车调度路径优化方法	中国	ZL201811070104.4	2021.08.03	第 4589745 号	西安建筑科技大学	顾清华, 张媛, 卢才武, 汪朝, 陈露, 刘迪
9	发明专利	一种基于改进灰狼算法的多金属露天矿生产作业计划编制方法	中国	ZL201810475051.8	2021.08.03	第 4594948 号	西安建筑科技大学	顾清华, 李学现, 卢才武, 聂兴信, 杨震, 郭梨
10	论著	金属露天矿开采方案多要素生态化优化	中国	ISBN:978-7-5024-9381-3	2023.01.05	冶金工业出版社	东北大学、西安建筑科技大学	顾晓薇, 王青, 胥孝川, 顾清华, 刘剑平

承诺：上述知识产权无争议且为本项目独有，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年其他省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的权利人（专利指发明人）的同意，有关知情证明材料均存档备查。

## 七、 主要完成人情况：

主要完成人：（依次列写完成人姓名）

排名	姓名	技术职称	行政职务	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
1	顾清华	教授	院长	西安建筑科技大学	西安建筑科技大学	全面负责项目的实施，对第 1、第 2、第 3、第 4 项科技创新均做出了重要贡献。 （1）研发了一系列低品位稀有金属资源精细化配矿关键技术，构建了低品位稀有金属资源多目标配矿优化模型； （2）研发了露天矿卡车集群作业智能调度系统，设计了露天矿卡车集群调度多目标优化模型及其求解算法；

						(3) 研发了金属露天矿新能源纯电无人驾驶多源信息融合感知技术，提出了多传感器融合的矿区道路障碍物检测算法；
2	冯治东	教授	副院长	榆林学院	榆林学院	<p>项目总工程师，主要负责金属矿智能配矿、调度及生产管控一体化建模和算法实现，对第 2、第 3、第 4 项科技创新做出了重要贡献。</p> <p>(1) 研发了复杂地质条件下多金属配矿单元数字地质解算引擎，构建了多目标配矿模型及求解算法；</p> <p>(2) 建立了配矿计划约束下多金属露天矿智能调度实时指挥计算中枢，实现了金属矿高效生产调度；</p> <p>(3) 提出了融合了数字地质、设备健康和安全管理的全维度融合生产管控模型，牵头研发了精细化生产管控一体化平台。</p>
3	胥孝川	副教授	无	东北大学	东北大学	<p>主要负责项目中模型和算法的建立，对第 1、第 2 项科技创新做出了重要贡献。</p> <p>(1) 提出了“环境成本内生性”的资源低碳开采设计新思路，建立了露天矿整体设计与生产系列优化算法体系；</p> <p>(2) 建立了露天矿主体设备经济寿命计算模型以及更新策略算法，设计了生态成本内生化的露天矿优化算法，并完成程序编写。</p>
4	车文芳	高级工程师	研究院常务副院长	洛阳栾川钼业集团股份有限公司	洛阳栾川钼业集团股份有限公司	<p>主要负责项目的工程应用，对第 1、第 2 项科技创新做出了重要贡献。</p> <p>(1) 负责协调三道庄露天矿的项目实施。</p> <p>(2) 负责项目实现效果验证。</p>
5	何亚清	高级工程师	总经理	洛阳栾川钼业集团股份有限公司	洛阳栾川钼业集团股份有限公司	<p>主要负责项目的工程应用，对第 3、第 4 项科技创新做出了重要贡献。</p> <p>(1) 负责协调三道庄露天矿的项目实施。</p> <p>(2) 负责项目实现效果验证。</p>

6	王洛锋	高级工程师	副总经理	洛阳栾川钼业集团股份有限公司	洛阳栾川钼业集团股份有限公司	主要负责项目的工程应用，对第1、第2项科技创新做出了重要贡献。 (1) 负责协调三道庄露天矿的项目实施。 (2) 负责项目实现效果验证。
7	高德旭	高级工程师	首席解决方案专家	易控智驾科技股份有限公司	易控智驾科技股份有限公司	主要负责无人驾驶车云通信系统构建和采剥运输业务规划设计，对第3、第4项科技创新做出了重要贡献。 (1) 规划设计无人驾驶车云通信架构体系，5G网络及UPF下沉数据分流现场部署实施方案。 (2) 无人驾驶采运排全场景运输业务流程、功能指标及参数规划设计开发。
8	马骁	高级工程师	无	金堆城钼业股份有限公司矿山分公司	金堆城钼业股份有限公司矿山分公司	主要负责项目的工程应用，对第1、第4项科技创新做出了重要贡献。 (1) 负责协调金堆城露天矿的项目实施。 (2) 负责项目实现效果验证。
9	王永增	首席工程师	无	鞍钢集团有限公司齐大山分公司	鞍钢集团有限公司齐大山分公司	主要负责项目的工程应用，对第2、第3项科技创新做出了重要贡献。 (1) 负责协调齐大山铁矿的项目实施。 (2) 负责项目实现效果验证。
10	刘新宇	高级工程师	矿长、党委副书记	本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司南芬露天铁矿	本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司南芬露天铁矿	主要负责项目的工程应用，对第1、第2项科技创新做出了重要贡献。 (1) 负责协调南芬露天铁矿的项目实施。 (2) 负责项目实现效果验证。
11	孙殿兴	高级工程师	无	本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司歪头山铁矿	本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司歪头山铁矿	主要负责项目的工程应用，对第1、第2项科技创新做出了重要贡献。 (1) 负责协调歪头山铁矿的项目实施。 (2) 负责项目实现效果验证。
12	井欣欣	工程师	生产科长	洛阳栾川钼业集团股份有限公司	洛阳栾川钼业集团股份有限公司	主要负责项目的工程应用，对第1、第2项科技创新做出了重要贡献。 (1) 负责协调三道庄露天矿的项

						目实施。 (2) 负责项目实现效果验证。
13	吴涛	教授级 高级工程师	煤炭清 洁利用 院智能 工艺所 所长兼 机制工 艺总工 程师	中煤西安 设计工程 有限责任 公司	中煤西安 设计工程 有限责任 公司	主要负责项目装卸部分的工程 设计及装-运-卸智能规划，对 第 3、第 4 项科技创新做出了 重要贡献。 (1) 负责相关露天矿的汽车装、 卸部分设计。 (2) 负责相关露天矿的装-运- 卸智能规划。
14	李学现	无	无	西安建筑 科技大学	西安建筑 科技大学	主要负责卡车路径规划和调度算 法的研发，对第 3、第 4 项科技 创新做出了重要贡献。 (1) 综合考虑卡车载重量、卡 车行驶速度、道路等级等 5 个影 响因素，建立了以最小化总运输 功为目标的露天矿最优路径规划 模型； (2) 提出了一种基于露天矿区路 径的无人驾驶车辆能耗节能方 法，以及一种基于改进灰狼算法 的多金属露天矿生产作业计划编 制方法。
15	董昊鹏	无	无	西安建筑 科技大学	西安建筑 科技大学	主要负责卡车定位算法的研发， 对第 4 项科技创新做出了重要贡 献。 (1) 提出基于激光 SLAM 的井 下斜坡道无人矿卡定位与建图方 法。

## 八、 主要完成单位及创新推广贡献：

主要完成单位：（依次列写单位名称）

排 名	完成单位	创新推广贡献
1	西安建筑科技大学	西安建筑科技大学对本项目科技创新 1、2、3 和 4 均做出了重要贡献。 作为本课题的第一完成单位，西安建筑科技大学负责项目的整体设计和技术方案的制定。具体贡献包括： (1) 设计研发了多金属多目标露天矿智能配矿系统；研发了基于高精度定位技术的配矿品位动态获取技术；构建了多金属多目标露天矿全要素精细化配矿模型；提出了基于多目标粒子群-鸽群混合优化算法的高效求解算法；研发多金属多目标的露天矿智能配矿生成软件系统。

		<p>(2) 设计研发了露天矿无人开采多车协同智能调度系统，数据驱动下的露天矿多目标多车协同智能调度模型；基于多目标遗传算法的智能调度模型求解算法；基于机器学习的卡车行为状态预测及智能决策技术；研发了露天矿无人开采多车协同智能调度软件系统。</p> <p>(3) 设计研发了露天矿无人开采管控一体化系统应用平台，基于移动端露天矿扁平化调度管理模式及应用技术；提出了无人驾驶卡车及遥控铲装设备无人开采管理模式；研发了基于云服务的露天矿无人开采管控一体化集成平台。</p>
2	东北大学	<p>东北大学对本项目科技创新 1、2 和 3 做出了重要贡献。作为项目的第二完成单位，东北大学主要负责露天矿多要素整体优化设计，具体贡献包括：</p> <p>(1) 提出了露天矿的“最终境界、生产能力、开采计划、开采寿命及开采设备配置”五大要素整体优化体系，并与配矿计划和卡车调度进行协同；</p> <p>(2) 考虑到露天矿最终境界和开采计划存在相互影响相互作用的关系，已有研究一般是既定某一要素已知而优化其要素，只能得到局部最优解，项目组提出的露天矿最终境界和开采计划整体优化方法，克服了该问题，得到了露天矿境界-计划优化全局最优解；</p> <p>(3) 根据露天矿开采工艺特点，将环境问题和露天矿设计方案进行有机结合，建立考虑生态成本的露天矿最终境界和开采计划时空动态优化模型和算法。</p>
3	洛阳栾川钼业集团股份有限公司	<p>洛阳栾川钼业集团股份有限公司对本项目科技创新 1、2 和 3 做出了重要贡献。作为项目的第三完成单位，洛阳栾川钼业集团股份有限公司主要负责露天矿低品位稀有金属资源精细化配矿、卡车集群智能调度以及无人作业管控关键技术的需求调研、技术资料分析、方案论证、工程实施等工作，主要表现在：</p> <p>(1) 低品位伴生资源的矿山地质与储量估算的资料收集；</p> <p>(2) 多矿种综合边际品位优化的工程实施；</p> <p>(3) 多矿种协同开采境界一体化的总体需求分析及工程实施；</p> <p>(4) 多矿种协同开采开拓运输布线优化的工程实施；</p> <p>(5) 多矿种协同开拓运输的破碎站及排岩运输系统的工程实施；</p> <p>(6) 低品位伴生资源排土场及低品位堆排优化的工程实施；</p> <p>(7) 多矿种一体化开采的技术经济分析结果对比；</p> <p>(8) 卡车集群智能调度模型和算法的工程实施与验证；</p> <p>(9) 智能协同管控一体化平台的现场部署与应用。</p>
4	金堆城钼业股份有限公司矿山分公司	<p>金堆城钼业股份有限公司矿山分公司对本项目科技创新 2 和 3 做出了重要贡献。作为项目的第四完成单位，金堆城钼业股份有限公司矿山分公司主要负责精细化配矿、卡车集群智能调度的技术资料分析、方案论证、工程应用等具体实施工作：</p>

		<p>(1) 提供项目的地质资料和矿体模型相关数据；</p> <p>(2) 提供现场爆破设计数据和配矿计划资料；</p> <p>(3) 现场验证多目标配矿模型及求解算法的可行性；</p> <p>(4) 现场验证实施配矿计划与卡车调度的匹配性；</p> <p>(5) 卡车集群智能调度模型和算法的工程实施与验证。</p>
5	易控智驾科技股份有限公司	<p>易控智驾科技股份有限公司对本项目科技创新 3 和 4 做出了重要贡献。</p> <p>作为项目的第五完成单位，易控智驾科技股份有限公司主要负责无人驾驶底盘平台、车载无人驾驶硬件与软件系统的研发等具体实施工作：</p> <p>(1) 易控智驾科技股份有限公司负责金属露天矿山无人驾驶系统规划设计部署实施和无人驾驶装备设计研制。</p> <p>(2) 设计研发了通用型无人驾驶线控底盘平台，可适配多种能源类型和多种吨位类型矿卡。</p> <p>(3) 设计研发了适用于金属矿山矿卡车载无人驾驶系统，研制了通用模块化车载无人驾驶硬件平台；构建以单车智能为主的车载无人驾驶软件系统架构，提出以 BEV+OCC 为主的多模态融合感知算法。</p> <p>(4) 设计研发了适配于金属矿山的无人驾驶运输协同作业系统，研制了适配多种挖机、装载机等工程设备协同作业终端，研发了基于通用模块化设计的矿山工程质量智能巡检系统。</p>
6	榆林学院	<p>榆林学院对本项目科技创新 2、3 和 4 做出了重要贡献。</p> <p>作为项目的第六完成单位，榆林学院主要负责项目研究路线制定、技术攻关和部署调试，聚焦金属矿智能配矿、调度及生产管控一体化建模和算法实现等具体实施工作：</p> <p>(1) 组织设计了复杂地质条件下多金属配矿单元数字地质解算引擎，构建了多目标配矿模型及求解算法；</p> <p>(2) 牵头建立了配矿计划约束下多金属露天矿智能调度实时指挥计算中枢，实现了金属矿高效生产调度；</p> <p>(3) 主导设计了融合数字地质、设备健康和安全管理的全维度融合生产管控模型，研发了精细化生产管控一体化平台。</p>
7	鞍钢集团矿业有限公司齐大山分公司	<p>鞍钢集团矿业有限公司齐大山分公司对本项目科技创新 1 和 2 做出了重要贡献。</p> <p>作为项目的第七完成单位，鞍钢集团矿业有限公司齐大山分公司主要负责露天境界设计、采剥计划设计以及运输坑线规划等具体实施工作：</p> <p>(1) 提供矿山基础地质数据以及矿山生产技术条件；</p> <p>(2) 验证矿山数字模型精确性，提供模型修正意见；</p> <p>(3) 实施新境界圈定方案以及地表构筑物移动模拟实验；</p> <p>(4) 实施新采剥计划规划方案以及新运输线路设计方案。</p>
8	本溪钢铁（集团）有限责任公司南芬露天铁矿	<p>本溪钢铁（集团）有限责任公司南芬露天铁矿对本项目科技创新 1 和 2 做出了重要贡献。</p> <p>作为项目的第八完成单位，本溪钢铁（集团）有限责任公司南芬露天铁矿主要负责软件系统在矿山境界优化、开采计划优化</p>

		<p>以及各项测量、验收等的具体实施工作：</p> <p>(1) 提供南芬露天矿基础地质数据以及矿山生产技术条件；</p> <p>(2) 验证矿山数字模型精确性，提供模型修正意见；</p> <p>(3) 根据露天矿境界优化结果，改进矿山现有境界范围，实现境界外边角矿精准设计和回收；</p> <p>(4) 根据露天矿计划优化结果，指导矿山扩帮区横向开采及岩石内排工作；</p> <p>(5) 实施近距离运输道路系统；</p> <p>(6) 纵向和横向开采的联合开采方式；</p>
9	本溪钢铁（集团） 有限责任公司歪头 山铁矿	<p>本溪钢铁（集团）有限责任公司歪头山铁矿对本项目科技创新 1 和 2 做出了重要贡献。</p> <p>作为项目的第九完成单位，本溪钢铁（集团）有限责任公司歪头山铁矿主要负责软件系统在矿山境界优化、开采计划优化以及各项测量、验收等具体实施工作：</p> <p>(1) 提供歪头山铁矿基础地质数据以及矿山生产技术条件；</p> <p>(2) 验证矿山数字模型精确性，提供模型修正意见；</p> <p>(3) 根据露天矿境界优化结果，改进矿山现有境界范围，实现境界外边角矿精准设计和回收；</p> <p>(4) 根据露天矿计划优化结果，指导矿山扩帮区横向开采及岩石内排工作；</p> <p>(5) 实施近距离运输道路系统；</p> <p>(6) 纵向和横向开采的联合开采方式；</p>
10	中煤西安设计工程 有限责任公司	<p>中煤西安设计工程有限责任公司对本项目科技创新 3 和 4 做出了重要贡献。</p> <p>作为项目的第十完成单位，中煤西安设计工程有限责任公司主要负责露天矿装卸部分的工程设计及装-运-卸智能规划的工作：</p> <p>(1) 设计了露天矿无人驾驶卡车装卸部分的工艺系统；</p> <p>(2) 提出了露天矿装-运-卸智能规划方案；</p> <p>(3) 卡车集群智能调度模型和算法的工程实施及应用；</p> <p>(4) 采剥计划优化规划方案以及运输线路优化设计方案的实施。</p> <p>(5) 智能协同管控一体化平台的应用。</p>

九、完成人合作关系说明：（合作方式包括专著合著、论文合著、共同立项、共同知识产权、共同获奖、共同参与制定标准规范、产业合作等。下表中的“项目排名”指在本次报奖中的完成人排序。）

西安建筑科技大学、东北大学、洛钼栾川钼业集团股份有限公司、金堆城钼业股份有限公司矿山分公司、鞍钢集团矿业有限公司齐大山分公司、本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司等围绕“低品位稀有金属露天矿精细化智能开采关键技术及工程应用”项目，先后在洛钼三道庄露天矿、金堆城钼矿、齐大山露天矿、南芬露天矿、歪头山铁矿等开展研究和应用。

项目开展过程中学校和企业充分发挥了各自特长及优势，保证了项目从技术研发到工业推广的顺利进行，项目合作情况良好，成果显著，有效的推动了行业科学技术进步。根据项目建设内容以及各合作单位特长，完成人间合作关系如下：

第一完成人与第十四、第十五完成人为国家自然科学基金“品位-价格-成本约束下金属露天矿精细化 5D 排产建模与协同优化研究（批准号：51774228）”、陕西省杰出青年基金“时空路况下金属露天矿无人驾驶多车协同智能调度集成建模（批准号：2020JC-44）”等项目的合作者，并顺利通过结题验收。（佐证材料：附件 6-1、6-3）

第一完成人与第二、第十三、第十四、第十五完成人依托纵向基金项目和企业横向课题，共同发表了多篇论文、申请专利、申请软件著作权以及申报奖励。（佐证材料：附件 6-9、6-10、6-11、6-15 到 6-20、6-23、6-24）

第一完成人与第二、第四、第五、第六、第七、第十四、第十五完成人为项目“云服务下的多金属露天矿智能生产管控系统”、“三道庄露天矿自动派车及车铲协同作业效率优化”合作单位的合作人，共同研究精细化配矿、卡车集群智能调度、无人采矿装备及智能管控等内容。（佐证材料：附件 6-12、6-13）

第一完成人与第三完成人将露天矿境界优化、计划优化、分期优化以及设备调度等科研成果转化为教学资源，合著完成了《金属露天矿开采方案多要素生态化优化》。（佐证材料：附件 6-21）

第一完成人与第八、第九、第十、第十一、第十二完成人为项目“大型露天矿智能化绿色安全高效开采关键技术与应用”合作单位的合作人，创建露天矿开采方案整体优化设计理论、模型与算法体系、露天矿滑坡灾害全过程精准化防控技术体系等内容。（佐证材料：附件 6-22）

**承诺：**本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。

顾清华

第一完成人签名：

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	合作成果名称
1	共同立项	顾清华/排名 1 李学现/排名 14	2021.01	2024.06	国家自然科学基金“金属露天矿无人驾驶多工序多目标协同智能调度方法研究”
2	共同立项	顾清华/排名 1 李学现/排名 14	2020.01	2022.12	陕西省杰青项目“时空路况下金属露天矿无人驾驶多车协同智能调度集成建模”
3	共同立项	顾清华/排名 1 冯治东/排名 2 车文芳/排名 4 井欣欣/排名 12	2018.01	2020.12	洛钼集团重点研发项目“云服务下的多金属露天矿智能生产管控系统”
4	共同立项	顾清华/排名 1 冯治东/排名 2 井欣欣//排名 12	2020.01	2020.12	洛钼集团重点研发项目“三道庄露天矿自动派车及车铲协同作业效率优化”
5	共同立项	顾清华/排名 1 吴涛/排名 13	2019.05	2020.06	中煤西安设计工程有限责任公司技术研发“露天矿智能生产数字化管控系统技术服务”
6	共同立项	顾清华/排名 1 高德旭/排名 7	2013.06	2023.06	大型露天矿智能化绿色安全高效开采关键技术与应用
7	专著合著	顾清华/排名 1 胥孝川/排名 3	2020.01	2022.10	金属露天矿开采方案多要素生态化优化
8	论文合著	顾清华/排名 1 李学现/排名 14	2019.03	2020.03	基于采选流程下的露天矿多金属多目标配矿优化模型

9	论文合著	顾清华/排名 1 冯治东/排名 2 李学现/排名 14	2018. 08	2020. 12	考虑能耗动态变化的露天矿卡车运输最优路径规划
10	论文合著	顾清华/排名 1 董昊鹏/排名 15	2023. 09	2024. 11	基于激光 SLAM 的井下斜坡道无人矿卡定位与建图方法
11	论文合著	顾清华/排名 1 李学现/排名 14	2019. 12	2020. 12	考虑能耗动态变化的露天矿卡车运输最优路径规划
12	论文合著	顾清华/排名 1 冯治东/排名 2	2020. 11	2022. 06	一种基于轨迹矢量图的矿山车辆运输次数自动提取方法
13	论文合著	顾清华/排名 1 李学现/排名 14	2021. 04	2022. 04	A High-precision Road Network Construction Method Based on Deep learning for Unmanned Vehicle in open-pit
14	专利	顾清华/排名 1 李学现/排名 14	2018. 08	2019. 08	一种基于露天矿区路径的无人驾驶车辆能耗节能方法
15	专利	顾清华/排名 1 李学现/排名 14	2017. 09	2018. 05	一种基于改进灰狼算法的多金属露天矿生产作业计划编制方法
16	专利	顾清华/排名 1 李学现/排名 14	2020. 05	2021. 05	一种基于自适应扰动樽海鞘算法的露天矿充电桩选址方法
17	专利	顾清华/排名 1 李学现/排名 14	2020. 05	2021. 05	基于数据驱动的神经网络代理辅助露天矿无人卡车调度方法

18	专利	顾清华/排名 1 冯治东/排名 2 李学现/排名 14	2020.05	2021.05	一种基于高维多目标进化算法的露天矿卡车多目标调度优化方法
19	专利	顾清华/排名 1 李学现/排名 14	2020.05	2021.05	一种基于改进TEB方法的露天矿无人矿卡动态路径规划方法
20	软著	东北大学	2017.01	2019.03	露天矿卡车调度计划管理软件 V1.0
21	软著	东北大学	2016.01	2018.09	露天矿道路网编辑系统 V1.0
22	软著	西安建筑科技大学	2008.01	2009.10	露天矿数字化采矿生产管理集成系统 V1.0
23	软著	西安建筑科技大学	2016.09	2019.06	基于数据驱动的金属价格中长期预测系统
24	软著	西安建筑科技大学	2016.09	2019.06	基于谷歌地图的无人驾驶监控系统
25	软著	西安建筑科技大学	2009.01	2010.10	露天矿 GIS 生产配矿管理系统 V1.0
26	软著	西安建筑科技大学	2009.01	2010.09	露天矿 GPS 卡车生产监控调度系统 V1.0
27	软著	西安建筑科技大学	2009.01	2010.09	露天矿矿岩运输量自动统计系统 V1.0
28	软著	西安建筑科技大学	2009.01	2010.10	露天矿生产数据动态监控系统 V1.0

29	共同获奖	顾清华/排名 1 胥孝川/排名 3 李华/排名 9	2016	2021	<b>中国有色金属工业科学技术一等奖</b> ，项目名称： 金属露天矿生态化开采设计及低品位资源综合利用关键技术与应用
30	共同获奖	顾清华/排名 1 胥孝川/排名 3 李华/排名 9	2018	2022	<b>冶金科学技术一等奖</b> ，项目名称： 露天开采低碳生态化设计及无人智能采矿关键技术与应用
31	共同获奖	顾清华/排名 1 何亚清/排名 5	2015	2021	<b>中国产学研合作科技进步一等奖</b> ，项目名称： 基于 5G 的金属露天矿无人高效绿色开采关键技术与装备
32	共同获奖	顾清华/排名 1 王洛锋/排名 6	2016	2019	<b>陕西省高等学校科学技术奖一等奖</b> ，项目名称： 多金属露天矿低品位伴生资源综合利用及生产协同管控关键技术
33	共同获奖	顾清华/排名 1 胥孝川/排名 3 马骁/排名 8 刘新宇/排名 10 孙殿兴/排名 11	2017	2023	<b>中国有色金属工业科学技术一等奖</b> ，项目名称： 露天矿绿色低碳设计-智能安全开采-固废综合利用关键技术及应用
34	共同获奖	顾清华/排名 1 何亚清/排名 5 王洛锋/排名 6	2018	2020	<b>河南省自然资源科学技术一等奖</b> ，项目名称： 基于云平台、物联网、大数据条件下的 5G 智慧矿山建设

35	共同获奖	顾清华/排名 1 冯治东/排名 2	2012	2019	中国有色金属工业科学技术奖， 项目名称：露天矿无人采矿装备及智能管控一体化关键技术
----	------	----------------------	------	------	--