

陕西省科技进步奖公示

项目名称：

复杂曲面光学元件制造技术及装备

提名者及提名意见：

中共陕西省委军民融合发展委员会办公室

该成果针对先进光学系统中复杂曲面光学元件批量制造的迫切需求，解决了非球面、自由曲面、阵列曲面的低成本、低损伤、批量化高效制造技术难题，突破了等离子体射流加工、机器人智能磨抛、超精密车削共三类复杂曲面光学元件制造的核心技术，研制了2类7款复杂曲面光学元件制造装备。该成果创新性强，技术方案合理有效，实用性强，对行业进步和产业结构优化升级有明显的促进作用，具有广阔的应用前景和推广价值。

成果材料属实、齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术进步奖提名条件。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖 二 等奖。

项目简介：

本成果属于先进光学制造技术领域，涉及光学、机械、精密仪器等交叉学科。

光学成像是监控探测、物质识别、环境感知的“眼睛”，光学元件决定了光学成像系统的性能。传统以平面、球面为主的光学成像系统无法满足轻量化、小型化、集成化的迫切需求；而复杂曲面光学元件是光学系统的小型轻薄化的唯一技术手段。现有技术方法和装备无法实现复杂曲面光学元件的低损伤、低成本、批量化高效制造，成为制约轻量化、小型化光学成像的技术瓶颈。

成果历经近十年的研究，在国家自然科学基金、陕西省重点研发计划、四川省重点研发计划等相关计划项目支持下，围绕等离子体射流的光学加工技术、多抛光头机器人智能磨抛技术、单点金刚石超精密车削技术，突破抛光工具头定标、等离子体组合工艺、加工轨迹高效规划、多工序加工检测一站式定位、多自由度空间位姿匹配及误差解算等关键技术，研制了新型磁流变子孔径抛光装置、工具

头定标方法与装置、大口径光学元件抛光新设备，以及复杂曲面批量制造一站式定位装置，实现了复杂曲面光学元件的加工，解决了非球面、自由曲面、阵列结构等光学元件的低损伤、低成本、批量化高效制造的技术难题，在引力波探测、无人机载荷、低空经济、监控识别等领域实现规模应用。主要的科技创新点如下：

（1）构建了柔性非接触等离子体射流加工的多参数去除模型，发明了多场耦合的等离子体射流特性调控方法，优化了等离子体射流调控工艺参数优选策略，研制了一种新型高稳定性分体式等离子体射流去除装备，解决了复杂曲面光学元件等离子体柔性去除函数不准确和长时稳定性差的难题，去除函数特征参数半高宽度优于 0.2mm，最大去除深度稳定性优于 7nm，确保复杂曲面光学元件的表面损伤降低 50%和加工收敛率提高到 70%。

（2）发明了末端直接推力输出的力位一体化气囊抛光部件和 TSP 非周期抛光轨迹规划方法，构建了基于机器学习的抛光工艺参数智能决策模型，突破了 Be-SA 误差辨识与空间误差补偿等关键技术，解决了低频振动、绝对定位及多工艺参数耦合影响的加工稳定性等技术难题，研制了光学元件超精密加工机器人智能磨抛装备，最大加工口径达到 $\Phi 1200\text{mm}$ 、加工精度优于 1/60 波长、单次加工收敛率高于 70%，全面超越离子束、磁流变等技术，达到国际先进水平。

（3）发明了基于拼接检测的阵列结构光学元件的面形误差测量方法，构建了多自由度复杂曲面车削加工面形误差解算的数学模型，突破了车削补偿加工中多自由度复杂曲面面形误差在线定位测量的关键技术，形成了非旋转对称元件多工序加工检测一站式定位技术，研制了复杂曲面车削误差补偿的加工装置，解决了车削补偿加工中的“空间坐标系对不齐”难题，匹配误差解算精度 $\leq 1\text{nm}$ ，加工收敛率 $\geq 70\%$ ，使复杂曲面光学元件的大批量制造效率提高 50%。

成果形成了制造可行性评估-加工技术-检测反馈-工艺流程-制造设备的全链条、知识产权可控的复杂自由曲面光学元件高效超精密制造技术体系，具备了完全自主的生产制造能力。围绕上述项目成果，授权发明专利 25 项，登记软件著作权 7 项，支持了我国先进光学制造技术的快速发展。成果发表 SCI 收录论文 22 篇，EI 收录论文 16 篇，受邀作国际学术会议报告 18 次，入选《红外与激光工程》青年编委，当选中国光学学会光学制造委员会秘书长，学术影响广泛。培养了陕西省青年科技新星、陕西高校杰出青年人才等省部级人才 2 人次，四川省

产业领域人才、发明创业人物奖等产业人才 3 人次，国内重要期刊、学会任职 6 人才。

发明的复杂曲面光学元件三类制造技术和方法，研制了 2 类 7 款商用批量制造装备，包括等离子体射流抛光设备、机器人智能磨抛系统、多机器人协同抛光设备等。相关技术与产品应用到中科院成都光电所、西安北方光电科技防务有限公司，保障了国家多项重点任务的顺利实施，提升了多款型号装备的市场竞争力；研发的商用产品还协助多家单位建立了光学元件制造生产线，协助实现了复杂曲面光学元件的低成本大批量制造，为这些单位带来了巨大的经济效益。自 2016 年以来，新增销售额超过 7.6 亿元，新增利润 7151 万元。

本成果形成了具有我国自主知识产权和技术特色的复杂曲面光学元件制造体系，促进了我国光学制造技术的发展，为保障我国引力波探测、无人机载荷、低空经济、监控识别等重大科学装置、国计民生、国防安全领域的安全、可靠、经济运行做出了重要贡献。

客观评价：

1. 科学技术创新点的首创性和先进性评价

1.1 国内外重要科技奖励

（1）成果完成人李世杰依托该成果的部分内容，2022 年入选陕西高校第五批“青年杰出人才”，2024 年入选陕西省创新人才攀登工程“青年科技新星”；

（2）成果完成人施春燕依托该成果的部分内容，2023 年获得中国发明协会第十三届“发明创业奖人物奖”，2022 年入选成都市产业领军人才；

（3）该成果的部分内容，“波长调谐干涉面形检测关键技术及应用”，荣获 2024 年中国发明协会发明创业创新一等奖。

（4）该成果的部分内容，“光学元件面测量技术及应用”，荣获 2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖。

（5）该成果的部分内容，荣获 2022 年度首届“金燧奖”中国光电仪器品牌榜获奖项目。

（6）成果完成人施春燕依托该成果的部分内容，荣获 2017 年中国江苏创新创业大赛三等奖。

1.2 项目结题、验收或第三方检测

(1) “自由曲面镜头制造关键技术研究”，通过陕西省科技厅组织的评审验收，验收专家组认为：“该项目解决了自由曲面光学元件的高精度制造、小口径自由曲面光学元件表面形貌检测及面形误差数据处理、自由曲面镜头的定位与装配等问题，研制出自由曲面镜头两套样机”。“基于轮廓拟合技术的非球面光学元件制造技术及装备研发”，通过陕西省科技厅组织的评审验收，验收专家组认为：“该项目提高了非球面光学零件制造效率，实现制造非球面快速研磨成形和抛光加工的技术体系，为非球面光学零件制造提供了一种途径。”

(2) 研制的“自由曲面镜头”通过国家光学仪器质量检验检测中心的第三方测试计量验证。研制的“宽光谱镜头”通过中国科学院西安精密机械研究所测试与试验中心的第三方测试计量验证。

3. 用户和媒体评价

(1) 成果应用到四川中科朗星光电科技有限公司，协助该公司建立了复杂曲面光学元件制造生产线，为该公司产品成本降低约 20%，生产效率提升约 25%，提升了该公司产品的市场竞争力，为其带来了巨大的经济效益。

(2) 成果研发的装备，应用到上海延目光电技术有限公司，为该公司大量的复杂曲面光学元件的高精度制造提供了设备和工艺保障，为该公司带来了巨大的经济效益。

(3) 成果中的车削加工技术与机器人加工技术，应用到苏州六阳光电科技有限公司，为该公司的非球面、自由曲面光学元件的批量制造，提供了稳定的技术支持。这些复杂曲面光学元件应用于多个光学系统中，运行良好，给该公司带来了巨大的经济效益。

(4) 成果应用到北京泰和兴光科技有限公司，为该公司的光学仪器研发提供了关键支撑，保障了其产品的性能与质量。2024 年 5 月，与该公司签订专利转让合同，将该成果的部分技术内容转化到该公司，转化金额 120 万元。

(5) 四川至臻精密光学有限公司，凭借其在复杂曲面光学元件方面的研发能力与装备制造能力，被四川省经济和信息化厅认定为四川省“专精特新”中小企业，被成都市经济和信息化局认定为“成都市军民融合企业”。

(6) 四川至臻精密光学有限公司利用该成果研发的“机器人抛光机（规格型号：IRP）”被认定为 2024 年度四川重大技术装备省内首台套产品。并相继推出了包括 IRP500、IRP1000、SK200 等多个型号，实现了批量销售，为该公司带来了巨大的经济效益。

(7) 2021 年 3 月 24 日，习总书记到福建福光股份有限公司视察工作，专门参观了公司的超精密光学制造生产线（这其中包括由四川至臻光学制造的复杂曲面光学元件制造设备，成果完成人施春燕博士负责详细讲解）。习总书记肯定说：“用国产化的设备加工如此高精度的光学元件，是我国科技的一大进步，大家要继续加强创新，加强科技自立自强步伐。创新不问“出身”，只要谁能为国家作贡献就支持谁。”

(8) 2025 年 12 月 18 日，央视财经对四川至臻精密光学有限公司的复杂曲面光学元件制造技术和装备进行了专门宣传报道。

应用情况：

通过产品销售、技术服务、科研合作、专利转让、人才联合培养等多种方式，项目关键技术发明已在科研院所、国有企业、民营企业等得到推广应用。

(1) 项目完成单位西安工业大学、中国科学院光电技术研究所，四川至臻精密光学有限公司，西安北方光电科技防务有限公司，四川科奥达技术有限公司通过产学研合作，应用项目创新点研制了 2 类 7 款包括等离子体射流抛光设备、智能机器人抛光设备、多机器人协同抛光设备等，技术属于领先水平，填补了我国自主研发低成本、高精度光学元件制造设备的空白。

(2) 成果在中国科学院光电技术研究所得到应用，实现了非球面、自由曲面、阵列结构元件的高精度加工，为该单位多个国家重大任务的顺利实施提供了保障。在西安北方光电科技防务有限公司，该成果缩短了制造周期约 30%，降低了制造成本约 20%，提升了多款型号产品的市场竞争力，取得了良好的社会效益。

(3) 成果应用到四川中科朗星光电科技有限公司、苏州六阳光电科技有限公司、上海延目光电技术有限公司等单位，建立了光学元件生产线，提升了其复杂曲面光学元件的生成效率，降低了生成成本，给这些单位带来了显著的经济效益。

(4) 自 2017 年来，由西安工业大学研发的复杂曲面光学元件制造技术，以及其制造的高精度非球面、自由曲面、衍射面元件、阵列结构元件，应用于北京万腾达斯科技有限公司和武汉红星杨科技有限公司，为产品研发与销售提供技术支持与保障，为它们带来了巨大的经济效益。

(5) 部分成果于 2024 年，与北京泰和兴光科技有限公司完成了科技成果转

化，转化金额 120 万元。该公司利用转化的成果，为其公司的光学仪器开发提供了关键支撑，保障了产品的性能与质量，为该公司带来了良好的经济效益。

本成果攻克的相关技术和完成的复杂曲面光学制造技术在国防安全、国计民生等领域应用前景明显。成果在我省秦创原先进技术产业创新聚集区的西安北方光电科技防务有限公司得到广泛应用，为该公司的广角、车载、摄录、AR-VR 目镜等光学产品提供新的技术路径，助力于激光导引头、光电吊舱、红外热像瞄准等多款型号产品的市场竞争力的提升。

主要应用单位情况如下表所示。

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	中国科学院光电技术研究所	车削加工技术	红外光学元件的高精度制造难题，实现非球面、自由曲面、阵列结构元件的高精度加工	2016-2026	陈辉， 15982276315
2	四川至臻精密光学有限公司	复杂曲面制造技术以及机器人加工设备	用于非球面自由元件的批量制造与设备的销售	2018-2026	刘胜国， 13880157877
3	西安北方光电科技防务有限公司	复杂曲面光学元件加工技术	多款型号产品中的复杂曲面光学元件的制造	2021-2026	刘戊星， 18591408686
4	上海延目光电技术有限公司	光学元件制造设备	用于大量复杂曲面光学元件的高精度制造	2019-2026	季建成， 13862627619
5	北京泰和兴光科技有限公司	非球面、自由曲面的相关加工检测技术	非球面、自由曲面光学元件，用于光学仪器研发	2020-2026	郑玥， 14735517250
6	四川科奥达技术有限公司	复杂曲面光学元件制造技术	机器人加工设备的研发和应用	2022-2025	任曦， 18615747369
7	四川中科朗星光电科技有限公司	复杂曲面光学元件加工技术	建立光学元件制造生产线，完成离轴非球面等光学元件的批量制造	2021-2026	王艳娟， 18382186616
8	苏州六阳光电科技有限公司	车削加工技术与机器人加工技术	用于非球面、自由曲面光学元件的批量制造	2021-2026	杨晓飞， 13862053976

9	北京万腾达斯科技有限公司	单点金刚石车削加工技术	用于红外材料非球面、自由曲面、衍射面光学元件高精度制造	2018-2026	梁迪敏， 13466580941
10	武汉红星杨科技有限公司	复杂曲面制造技术	非球面、自由曲面、阵列结构元件等复杂曲面光学元件的销售及相关光学系统的研发	2017-2026	周谦， 17764005939

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	一种适用于大口径光学元件的磁流变子孔径抛光装置	中国	CN110722428B	2021-09-07		中国科学院光电技术研究所	辛强；刘海涛；万勇建
2	发明专利	大口径光学元件的抛光设备	中国	CN114102343B	2025-06-17		四川至臻精密光学有限公司	施春燕；袁贤莊；白亚飞；张振宇；高志雄
3	发明专利	一种阵列结构光学元件的面形误差测量方法	中国	CN114858090B	2023-10-03		西安工业大学	李世杰；李兆；黄岳田；杨陈；梁海锋；蔡长龙；刘卫国
4	发明专利	一种加工轨迹的生成方法	中国	CN104570931B	2017-08-08		中国科学院光电技术研究所	施春燕；李文宗；范斌；王佳
5	发明专利	一种等离子体与小工具组合工艺快速获得超光滑表面的方法	中国	CN119839695B	2025-12-12		中国科学院光电技术研究所	范斌；李威；焦培奇；辛强；陈强
6	发明专利	基于跟踪仪的机器人用磁流变抛光工具头定标装置与方法	中国	CN112484640B	2022-06-28		中国科学院光电技术研究所	辛强；刘海涛；万勇建
7	实用新型	一种闪耀柱面光栅的加工装	中国	CN223185628U	2025-08-05		西安工业大学	李世杰；樊家琦；黄岳田；

		置						梁海锋; 蔡长龙; 刘丙才; 朱学亮
8	论文专著	Distance deviation sensitivity on null test of convex hyperboloid mirrors with large relative aperture	中国	2024, 91: 707-715	2024-11-14	Precision Engineering	西安工业大学, 西安空间无线电技术研究所, 河南平原光电科技有限公司, 四川至臻精密光学有限公司	Shijie Li, Jiani Liu, Bingcai Liu, Ailing Tian, Sibon Niu, Lumin Zhao, Haitao Liu, Chunyan Shi, Jin Zhang, Haifeng Liang, Changlong Cai
9	论文专著	Establishment and analysis of feasibility evaluation system and ultra-precision manufacturing technology for small aperture free-form surface optical element	中国	2023, 127: 2299-2308	2023-06-03	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	西安工业大学, 西安北方光电防务有限公司	Shijie Li, Yuetian Huang, Fengyuan Zhao, Chen Yang, Jin Zhang, Haifeng Liang, Changlong Cai, Weiguo Liu
10	论文专著	衍射光学元件车削误差控制技术	中国	2023,52(3):20220504	2023-04-11	红外与激光工程	西安工业大学, 中国科学院光电技术研究所	黄岳田, 范斌, 李世杰, 梁海锋, 蔡长龙, 刘卫国

主要完成人情况：

- 1、李世杰，排名 1，无，教授，西安工业大学，
- 2、黄岳田，排名 2，无，讲师，西安工业大学，
- 3、辛 强，排名 3，无，副研究员，中国科学院光电技术研究所，
- 4、闫锋涛，排名 4，无，副研究员，中国科学院光电技术研究所，
- 5、施春燕，排名 5，董事长，副研究员，四川至臻精密光学有限公司，
- 6、赵逢元，排名 6，无，高级工程师，西安北方光电科技防务有限公司，
- 7、刘海涛，排名 7，副总经理，副研究员，四川至臻精密光学有限公司，
四川科奥达技术有限公司（完成单位）
- 8、刘丙才，排名 8，无，教授，西安工业大学，
- 9、范 斌，排名 9，党支部书记，研究员，中国科学院光电技术研究所，
- 10、蔡长龙，排名 10，学院书记，教授，西安工业大学，

主要完成单位及创新推广贡献：

- 1、西安工业大学，技术研发与应用验证
- 2、中国科学院光电技术研究所，技术研发与应用验证
- 3、四川至臻精密光学有限公司，技术研发与应用验证，技术推广
- 4、西安北方光电科技防务有限公司，应用研发与技术推广
- 5、四川科奥达技术有限公司，应用验证与技术推广

完成人合作关系说明：

第一完成人与第二、十完成人合作获批发明专利 3，与第二、八、十完成人合作获批发明专利 7，与第五、七、八、十完成人合作发表学术论文 1，与第二、六、十完成人合作发表学术论文 2，与第二、九、十完成人合作发表学术论文 3，与第二、七、八、十完成人合作完成项目 2，与第二、六、十完成人合作完成项目 3，与第二完成人合作完成项目 5。

第二完成人与第一、十完成人合作获批发明专利 3，与第一、八、十完成人

合作获批发明专利 7，与第一、六、十完成人合作发表学术论文 2，与第一、九、十完成人合作发表学术论文 3，与第一、七、八、十完成人合作完成项目 2，第一、六、十完成人合作完成项目 3，与第一完成人合作完成项目 5。

第三完成人与第七完成人合作获批发明专利 1，与第九完成人合作获批发明专利 5，与第七完成人合作获批发明专利 6，与第四、七完成人合作完成项目 4，是成果完成单位 2 的负责人。

第四完成人与第三、七完成人合作完成项目 4。

第五完成人与第九完成人合作获批发明专利 4，是专利 2 的第一完成人，与第一、七、八、十完成人合作发表学术论文 1，是成果完成单位 4 的负责人。

第六完成人与第一、二、十完成人合作发表学术论文 2，与第一、二、十完成人合作完成项目 3，是成果完成单位 3 的负责人。

第七完成人与第三完成人合作获批发明专利 1，与第三完成人合作获批发明专利 6，与第一、五、八、十完成人合作发表学术论文 1，与第一、二、八、十完成人合作完成项目 2，与第三、四完成人合作完成项目 4，是成果完成单位 5 的负责人。

第八完成人与第一、二、十完成人合作获批发明专利 7，与第一、五、七、十完成人合作发表学术论文 1，与第一、二、七、十完成人合作完成项目 2。

第九完成人与第五完成人合作获批发明专利 4，与第三完成人合作获批发明专利 5，与第一、二、十完成人合作发表学术论文 3。

第十完成人与第一、二完成人合作获批发明专利 3，与第一、二、八完成人合作获批发明专利 7，与第一、五、七、八完成人合作发表学术论文 1，与第一、二、六完成人合作发表学术论文 2，与第一、二、九完成人合作发表学术论文 3，与第一、二、七、八完成人合作完成项目 2，与第一、二、六完成人合作完成项目 3。