



附表 1

完成人合作关系说明

本项目由西安航晨机电科技股份有限公司牵头实施，围绕“熔融石英半球谐振子超精密制造关键技术研发及产业化应用”，由本人马波作为第一完成人和核心技术负责人组织开展自主技术攻关。卜石、陈仲恒、李乐、黄帅、姚良、周腾、张森、渠聚鑫、徐果均为项目核心研发与工程化人员。项目合作关系不仅体现为本人与各完成人之间的组织、研发和验证协作，也体现为各完成人在工艺、装备、测量、仿真、试验及产业化环节之间形成的相互支撑关系。

总体技术路线与工艺攻关方面，本人负责项目技术路线设计、任务分解和工艺迭代组织，提出范成法弹性自动跟踪球面展成超精密加工方法，建立主轴转速、研磨头转速、摆动幅角和弹性加载力四参数协同控制模型。卜石围绕制造设备、球径测量及抛光参数优化开展试验验证；陈仲恒、李乐共同参与谐振子结构与制备工艺研究，分别在磨头匹配、全流程工艺验证、刚度增强灌封及低应力倒圆等方面协同推进；黄帅将结构仿真、几何精度和振动性能测试结果反馈至制造工艺，形成设计、加工、测量和性能评价的闭环。

专用装备研发方面，本人与卜石共同完成制造设备和球径测量设备相关技术研究，并形成共同发明成果。姚良参与范成法球面展成加工装备机电系统及多轴协同运动控制调试；周腾围绕应力场优化型面和支撑杆根部低应力加工开展装备结构与工艺模块开发；渠聚鑫负责灌封、装夹和辅助定位模块的研发验证；徐果参与自动化化学抛光、真空测试等配套设备的调试及运行数据归集。上述人员与工艺组反复开展设备—工艺匹配试验，共同解决薄壁球壳装夹变形、运动误差和批产稳定性等问题。

精密测量、抛光与性能验证方面，卜石与张森围绕磁流体—化学协同抛光、抛光参数数据库和亚表面损伤去除开展多轮对比试验，黄帅参与多截面测量基准统一、振型与应力仿真以及成品性能测试；陈仲恒、李乐配合完成多批次样件制备和工艺一致性验证；徐果提供设备调试和试验数据支撑。本人组织各环节进行问题复盘和参数修正，使球面加工、抛光、测量、真空击震及 Q 值测试相互衔接，共同支撑产品几何精度、频差、表面粗糙度和品质因数等指标实现。

知识产权与成果形成方面，项目成员在共同研发基础上形成了可核验的合作



陕西省科学技术奖励工作办公室

关系：本人与卜石共同完成“一种半球谐振子加工的制造设备”和“一种陀螺生产用的球径测量设备”两项发明；本人、卜石参与“基于抛光组合加工的球面抛光参数优化方法及系统”研发，张森承担相关抛光工艺试验与参数优化工作；陈仲恒、李乐参与“一种熔融石英半球谐振子及制备方法”研发，黄帅通过仿真和性能试验对制备工艺进行验证。相关成果并非单一人员独立完成，而是由结构工艺、装备、测量、抛光和测试人员持续协同形成。

工程化与应用阶段，本人统筹样件试制、第三方检测、用户试用和产业化推进，全体完成人依据各自职责持续参与工艺固化、装备完善、质量验证和应用反馈闭环。团队共同构建了“材料与结构设计—微应力超精密加工—精密测量—真空性能测试—工程应用”完整技术链，建成年产 2000 支的生产能力，并推动 10 型、20 型、30 型产品在科研用户中试用或应用。各完成人分工明确、协作连续，合作成果和贡献可由项目情况简介、完成人情况表及相关知识产权材料相互印证。

第一完成人签名：

马波

2026年度提名书



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	共同研发、共同知识产权	马波 1、卜石 2、陈仲恒 3、李乐 4、黄帅 5、姚良 6、周腾 7、张森 8、渠聚鑫 9、徐果 10	2019.4	2024.6	构建材料与结构设计、微应力超精密加工、精密测量、真空性能测试及工程应用完整技术链	其他附件： 2025SR2471202、 2-21 立项报告
2	共同知识产权	马波 1、卜石 2	2019.4	2024.6	一种半球谐振子加工的制造设备；一种陀螺生产用的球径测量设备	必备附件： ZL202311618450.2 ； ZL202311804482.1
3	共同知识产权	马波 1、卜石 2、张森 8	2019.4	2024.6	磁流体—化学协同抛光及参数优化，抑制亚表面损伤并保障表面质量和Q值	其他附件： ZL202411902758.4
4	共同知识产权	陈仲恒 3、李乐 4、黄帅 5	2019.4	2024.6	熔融石英半球谐振子结构与制备、灌封增强、磨头适配及仿真—制造—测试闭环	其他附件： ZL202211170663.9
5	共同知识产权	马波 1、卜石 2、姚良 6、周腾 7、渠聚鑫 9、徐果 10	2019.4	2024.6	专用制造、装夹灌封、低应力加工、自动化抛光及真空测试配套装备	其他附件： ZL202311618450.2

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。

第一完成人签名：马波