

陕西省科技进步奖公示

1 项目名称：

精密滑动基础支承部件界面摩擦控制及气体润滑关键技术研究与应用

2 提名者及提名意见：

陕西省教育厅

该成果实现了精密滑动基础支承部件界面摩擦学性能控制和气体润滑稳定特性的长足提升，丰富和完善了精密滑动基础支承部件摩擦、磨损与润滑理论和关键技术体系，为我国高精密运动润滑支承部件的开发和应用提供了理论和技术保障，对社会经济发展和国防建设具有广阔的应用前景和推广价值。

该成果材料属实、齐全、规范，符合陕西省科技进步奖提名条件；参研单位、参研人员无异议，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省技术发明奖提名条件。提名该项目为陕西省科学技术进步奖 三 等奖及以上。

3 项目简介：

精密滑动基础支承部件作为精密运动核心支承部件被广泛应用于高端精密机床、测量仪器、航空发动机等高端精密装备中，其运行环境处在高温、高速、高精度、低摩擦等苛刻工况，如何有效提升滑动基础支承部件的润滑能力，降低其接触界面的摩擦磨损成为亟需解决的科学和技术难题。固体自润滑联合气体润滑技术突破了传统润滑油、脂在高温、低摩擦等苛刻服役工况下润滑及支承精度能力不足的限制，成为实现滑动基础支承部件实现低摩擦、绿色环保功能最常用和有效的手段之一，展现出很好的核心竞争力和巨大的工程应用前景。

服务于国家“制造强国”重大战略及十四五制造业发展规划重大需求，依托多项国家、省市级重大项目，项目以高端机械装备中滑动轴承、导轨、主轴等精密基础支承部件的安全与稳定性服役需求为导向，从“新型宽温域固体润滑剂设计方法开发”、“新型复合节流研发及流场演变机制”、“有序微孔摩擦界面与精密制造工艺方法构建”、“自适应摩擦调控技术与油污染解决方法”等四方面入手，构建了精密滑动支承部件摩擦控制自适应调控体系及增稳抑振方法，突破了摩擦行为及承载表面制造精度难控等关键技术瓶颈，解决了精密滑动支承部件油污染问题的困扰且降低了温升，实现了精密滑动支承部件摩擦磨损性能和稳定性的长足提升，丰富和完善了精密滑动支承部件的摩擦、磨损与润滑理论及关键技术体系，为我国精密滑动基础支承部件的开发和应用提供了理论和技术保障。团队经过 10 余年的持续研究，取得了以下主要创新性成果：

(1) 建立了宽温域润滑的新型软金属固体润滑剂设计方法。

从软金属 Sn、Ag、Cu 高温低剪切性能出发，揭示了 Sn、Ag、Cu 三元素融合过程中的内在作用机理，建立了考虑热膨胀性、高温润湿性及润滑性的三元软金属合金润润滑剂 SnAgCu 的设计准则；发现了新型固体润滑剂 SnAgCu 在实现高温润滑过程中的物相转变机制及对摩擦性能的增强作用。

(2) 研发了新型复合节流气体静压支承部件并揭示了其增稳抑振机理。

提出并构建了具有新型复合节流结构的气体静压支承模型，建立了气体静压支承的气膜流场跨流区域混合计算方法；探索了新型复合节流各表征参数对气膜流场的承载刚度和稳定性的影响规律，揭示了其节流孔出口区域流场物理现象演变机理，丰富和完善了气体静压润滑理论体系，为高端精密滑动支承部件研发及应用奠定了基础。

(3) 构建了有序微孔摩擦界面结构和气体静压支承部件制造方法。

建立了摩擦表面微孔参数与强度关系的仿真模型，揭示了微孔结构参数与材料强度间的内在影响规律；采用“激光熔覆+微纳加工+高温熔渗”手段实现硬质涂层表面微孔封装固体润滑剂 SnAgCu 的摩擦界面成型；开发了新型复合节流气体静压支承部件的制造工艺规程与最优制造工艺参数组合技术，发现了电火花微加工电参数对其微节流孔加工效率和精度的影响规律，获得了气体静压支承部件微节流孔参数与电火花加工电参数的自适应调控方法。

(4) 突破了自适应摩擦调控技术及掌握了油污染问题解决方法。

阐明了宽温域下固体润滑剂 SnAgCu 升温发汗式自适应释放行为，发现了复合润滑层动态形成规律及润滑剂间内在协同作用机理，揭示了多组元固体润滑体/涂层协同下形成的减摩耐磨层特性控制要素，获得了宽温域/大载荷工况摩擦自适应调控机制；创新性的提出了采用气体静压支承解决高速装备油污染的难题，揭示了气体静压运动支承表面的气膜润滑层的形成机制和规律，显著延长了设备有效服役寿命。

经过 10 余年的研究与实践，本成果形成了精密滑动基础支承部件界面摩擦调控和气体静压润滑支承体系，在机械学科领域国内外知名期刊机械工程学报、Tribology International、Surface and Coatings Technology、兵工学报、摩擦学学报等共发表论文 50 余篇，授权发明专利 20 件，授权实用新型专利 18 件；培养博士研究生 4 人、硕士研究生 30 余人。相关成果已成功在相关企业的装备产品中应用并取得了良好的经济社会效果，力推动了陕西省精密机械行业高精度、低摩擦、绿色环保发展，增强了我国高端精密测量和制造装备的核心竞争力，为推动精密滑动基础支承部件向智能减摩抗磨和实现高精度、低摩擦方向可持续发展创新探索做出了重要贡献。

4 客观评价:

经过 10 余年的研究与实践, 形成了高端精密机械装备滑动基础支承部件自适应调控与气体静压润滑体系, 并在精密测量和制造装备中得到了良好应用和推广, 具有极其重要的工程应用价值。相关创新点曾获如下科技奖励: 1) “精密气浮静压支承部件关键技术研究及应用” 获 2025 年陕西高等学校科学技术优秀成果奖 二等奖; 2) “滑动基础部件摩擦自适应复合界面构建与调控机制研究” 获 2024 年陕西高等学校科学技术优秀成果奖 二等奖; 3) “超精密气浮静压轴承的润滑机理与研抛工艺研究” 获 2019 年西安工业大学科学技术奖 二等奖。

教育部科技查新工作站科技查新报告结果显示: 本项目取得的如下成果, 在除项目委托方公开发表的研究文献外, 国内公开的中文文献中, 未见与其查新点技术内容完全相同的文献报道: 1) 以滑动基础支承部件为基体材料, 在基体表面制造镍基硬质涂层将固体润滑剂 MoS_2 沉积于镍基硬质涂层, 在涂层表面制备有序微孔结构, 封装固体润滑剂 SnAgCu/NiTi 于微孔中, 通过镍基硬质涂层/复合软质润滑层的软硬界面实现宽温域减摩耐磨性能的提升及摩擦行为的调控; 2) 提出多孔集成节流器以及弹性薄板气体静压支承部件有效解决了气体静压支承的增稳抑振问题, 创建了研磨抛光与电火花微孔加工方法相结合解决了气体静压支承部件的精密制造问题。

相关成果已发表 50 余篇高水平论文 (如: *Journal of Alloys & Compounds*, 2018, 765:7-17; *Tribology International*, 2018, 128:365-375; *Tribology International*, 2021, 160:107033; *Surface and Coatings Technology*, 2023, 454:129159), 得到了本领域权威学者及同行的广泛认可, 被中国、美国、澳大利亚、新加坡、波兰、埃及、韩国、奥地利等多个国家的同行广泛引用, 其中国际权威同行加州大学 Ashlie Martitz 教授、清华大学雒建斌院士、南洋理工大学 Zhou K 教授、固体润滑国家重点实验室副主任杨军教授相继在顶级期刊 *Tribology International*、*Advanced Science*、*Applied Surface Science* 对该项目研究成果给予引用和高度评价。

5 应用情况:

随着我国产业升级的不断发展,航空航天、集成电路、高端数控机床等不同工业领域对精密滑动支承部件提出了大量的迫切要求,尤其是航空发动机、三坐标测量机、光刻机、超精密机床等尖端机械装备中,精密轴承、导轨、主轴等基础运动支承部件工作环境向高速、高精度、低摩擦等多工况发展,如何构建多工况环境自适应的减摩抗磨结构及调控能力以及气体静压润滑体系,突破承载表面制造精度难控等是本成果的关键技术瓶颈和核心问题。

项目提出一种复杂工况自适应软硬复合界面结构,建立了复合固体润滑剂的设计方法,获得了复合界面的可控制备方法,阐明了复合界面对摩擦性能的影响规律,揭示了宽温域/大载荷工况下摩擦自适应调控机制;建立了气体静压支承的气膜流场跨流区域的混合计算方法,探索了新型复合节流气体静压支承各表征参数对气膜流场自适应承载刚度和稳定性的影响机制;采用“带气研抛制造工艺+气缸直接加载”手段解决了弹性薄板新型复合节流充气研抛气管缠绕与连续稳定加载问题,开发了新型复合节流气体静压支承部件的制造工艺规程与最优制造工艺参数组合技术;创新性的提出了采用气体静压支承实现并解决了高速装备的油污染难题,显著延长了设备有效服役寿命。该成果推动了复杂工况下机械部件摩擦结构设计方法和气体静压支承技术研究,有望从根本上解决基础摩擦部件摩擦性能不足和滑动支承部件的高精度、低摩擦性能的难题,增强我国高端装备服役可靠性。

依据本成果项目研究团队与相关企业在精密滑动基础支承部件关键技术方面签订了多项研发合同,开发了多种不同规格和系列的精密滑动基础支承部件如气体静压轴承、导轨与主轴等,提升了合作企业机械装备的承载性能和运动精度,并逐步进行了相关产品的市场化推广以及共同拓宽成果应用范围和深度。在本成果的坚实支撑下成果成员又获批了多类纵向项目基金,是本成果在自然科学基础研究和重点技术研发等方面的进一步延伸与发展,将推动并影响摩擦界面结构设计及调控以及气体静压润滑支承关键部件及其关键技术研究与应用的发展。本研究成果成功应用于精密制造装备,将会有力地促进和增强我国高端精密测量和制造装备的核心竞争力并具有很好的市场应用前景。

6 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	超精密直驱气浮静压导轨组件	中国	ZL201810192875.4	2024-01-26	6646549	西安工业大学	卢志伟, 李子昂, 刘波, 张君安
2	发明专利	基于方箱的超精密 X-Y 气浮平面定位平台	中国	ZL201811020124.0	2023-06-02	6081979	西安工业大学	卢志伟, 张君安, 刘波, 黄鹏, 董皓, 方舟, 李博
3	发明专利	一种智能驱动的 M50 基自润滑材料及其制备方法	中国	ZL202010226718.8	2021-10-01	4713745	西安工业大学	刘锡尧, 卢志伟, 张君安, 刘波, 王亚娟, 孙小亮, 闫斌
4	发明专利	全圆周向滑动径向测试及加载装置	中国	ZL201810092793.2	2024-03-08	6762354	西安工业大学	卢志伟, 张君安, 刘波, 方舟, 王永振, 李子昂, 陈登弟, 王月娇
5	发明专利	轴向回转测量加载装置	中国	ZL201810249780.1	2024-02-13	6709416	西安工业大学	卢志伟, 刘波, 王月皎, 张君安
6	发明专利	多孔集成节流的整体式气体静压轴承	中国	ZL201710347830.5	2023-06-23	6022374	西安工业大学	卢志伟, 张君安, 刘波, 刘晨帆, 王永振, 陈登弟, 魏明明
7	发明专利	一种 M50-Sn-Cu 微孔流道自润滑复合材料及其制备方法	中国	ZL201710536273.1	2020-10-16	4030806	武汉理工大学	史晓亮, 刘锡尧, 黄玉春, 刘骁斌, 闫昭, 薛冰, 章桥新
8	发明专利	一种有序微孔耐磨自润滑涂层及其制备方法	中国	ZL202210682973.2	2023-09-15	6329290	西安工业大学	刘锡尧, 郭增飞, 卢志伟, 董皓, 赵晓龙, 王亚娟, 袁冰
9	论文	二维运动平台气浮静压导轨承载性能计算与研究	中国	2022, 58(23):240-250	2022-12-05	机械工程学报	西安工业大学	卢志伟, 刘锡尧, 鹿菡, 黄鹏, 朱思达, 刘波, 张君安
10	论文	The influence mechanism of MoS ₂ and NiTi microparticles on the friction and wear properties of bearing steel	中国	2021, 160:107033	2021-04-01	Tribology International	西安工业大学	刘锡尧, 董皓, 卢志伟, 张君安, 刘波

7 主要完成人情况：

姓名	对本项目贡献
卢志伟	阐明了温度/载荷作用对材料界面摩擦行为的影响规律；创建了研磨抛光与电火花微孔加工相结合解决气体静压支承部件的精密制造方法，提出了采用气体静压润滑技术解决高速装备油污染问题的方法。
刘锡尧	建立了满足宽温域润滑的新型软金属固体润滑剂设计方法，揭示了宽温域/大载荷下多组元固体润滑剂/涂层协同的自适应摩擦调控机制。建立了气膜流场跨流区域的混合计算方法，揭示了复合集成节流孔出口处复杂物理现象演变机理。
史晓亮	揭示了微孔结构参数与材料强度间的内在联系；建立了多种类复合润滑剂的设计准则及揭示了润滑剂在复杂工况下的摩擦学行为。
朱寅	揭示了气体静压支承表面的气膜润滑层的形成机制和规律，发现了采用柔性联接和气体静压支承相结合显著延长了设备有效服役寿命。
张君安	阐释了研抛运动轨迹参数与表面质量精度的内在影响规律；解决了弹性薄板新型复合节流充气研抛气管缠绕与连续稳定加载问题。揭示了微节流孔参数对稳定性的协同影响机理，获得了气体静压支承部件微节流孔参数与电火花加工电参数的自适应调控机制。
朱强	采用柔性联接和气体静压支承相结合降低了往复运动机构平行度精度约束限制，将精密气体静压支承部件的研究成果成功应用于精密测量与制造装备中。
刘永	采用气体润滑技术对高速缝纫设备运动副机构进行润滑支承，实现了高速缝纫设备的气体润滑且避免了干摩擦对缝纫速度提高的影响。

8 主要完成单位及创新推广贡献：

西安工业大学 本成果的第 1 完成单位，成果创新点 1，2，3，4 的主要完成单位，从软金属 Sn、Ag、Cu 高温低剪切性能出发，揭示了 Sn、Ag、Cu 三元素融合过程中的内在作用机理；采用“激光熔覆+微纳加工+高温熔渗”手段实现硬质涂层表面微孔封装固体润滑剂 SnAgCu 的摩擦界面成型，开发了界面的自主制备技术；揭示了复合界面摩擦过程中减摩耐磨层的形成机制，发现了 SnAgCu 的塑性流动行为对磨损表面微裂纹的自修复效应；提出并构建了具有新型复合节流结构的气体静压支承模型，建立了气体静压支承的气膜流场跨流区域的混合计算方法，探索了新型复合节流气体静压支承各表征参数对气膜流场自适应承载刚度和稳定性的影响机制等。

西安标准工业股份有限公司 本成果的第 2 完成单位，成果创新点 4 的主要完成单位，主要为创建了气体静压支承关键零部件的装配方法，采用气体静压技术和方法解决了高速缝纫设备的油污染问题。创新性的提出了采用气体静压支承实现并解决高速设备的油污染难题，揭示了气体静压运动支承表面的气膜润滑层的形成机制和规律并取得了较好的经济和社会效益。

武汉理工大学 本成果的第3完成单位，成果创新点1、3的主要完成单位。主要为建立了复杂工况下摩擦自适应复合界面设计方法。建立了材料表面微孔参数与材料强度关系的数学模型，揭示了微孔结构参数与材料强度间的内在联系；开发了新型复合软金属固体润滑剂 SnAgCu，为后续界面摩擦结构动态形成演化及自适应协同摩擦调控机制研究提供了重要支撑。

9 完成人合作关系说明：

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	合作关系
卢志伟	1	无	副教授	西安工业大学	西安工业大学	项目创新工作1、2、3、4的主要完成人，发明专利1、2、4至6的第一发明人，项目1的立项与结题第一完成人。 (必备附件-1-1、2主要知识产权，其它附件-2-1-1、2、3主要知识产权，其它附件-2-2-1 结题材料)
刘锡尧	2	无	副教授	西安工业大学	西安工业大学	项目创新工作1、3、4的主要完成人，发明专利3、8的第一发明人。(必备附件-1-3主要知识产权，其它附件-2-1-5主要知识产权)
史晓亮	3	无	研究员	武汉理工大学	武汉理工大学	发明专利7的第一发明人。(其它附件-2-1-4主要知识产权)
朱寅	4	时任总经理	高级工程师	西安标准工业股份有限公司	西安标准工业股份有限公司	项目5的立项与结题的第一完成人。(必备附件-2-1 佐证材料)
张君安	5	时任副校长	教授	西安工业大学	西安工业大学	发明专利1至6的主要发明人。(必备附件-1-1、2、3主要知识产权，其它附件-2-1-1、2、3主要知识产权)
朱强	7	技术总监	正高级工程师	西安标准工业股份有限公司	西安标准工业股份有限公司	项目5的立项与结题的主要完成人之一。(必备附件-2-1 佐证材料)
刘永	8	技术中心主任	高级工程师	西安标准工业股份有限公司	西安标准工业股份有限公司	项目5的立项与结题的主要完成人之一。(必备附件-2-1 佐证材料)