

## 2013 年摩擦学国家重点实验室年度报告

2013 年，摩擦学国家重点实验室继续面向学科前沿和国家重大需求开展研究工作，针对超大规模集成电路制造装备、飞机和航空发动机、高温气冷堆核能装备、高档数控机床、风力发电装备、核聚变装置等国家重大工程中的表面界面问题和关键技术需求，在摩擦、润滑、减磨、延寿等方面开展了大量基础性和应用基础性研究工作，取得了一系列理论成果和关键技术突破。

一年来，相关方面的研究结果在国内外学术刊物和会议上共发表论文 326 篇，其中 SCI 收录（含网络版 SCI-EXPANDED）论文 201 篇， Ei 收录 116 篇，其中在 1 区刊物发表的论文约占总论文数的 11%，影响因子  $IF > 2$  的论文总数为 54 篇；实验室获发明专利授权 84 项，并且多项研究成果在工程领域获得转化和应用。雒建斌院士荣获 2013 年美国摩擦学与润滑工程师学会（STLE）国际奖（International Award），是该奖项设立 40 多年来首次授予中国学者；温诗铸院士获得中国机械工程学会授予的科技成就奖，雒建斌院士获得中国摩擦学学会授予的最高学术成就奖；刘辛军教授获国家自然科学基金二等奖 1 项（排名 2）、吴爱萍教授国家技术发明二等奖 1 项（排名 3），孟永钢教授等获高等学校科学研究优秀成果奖自然科学一等奖 1 项（排名 1），此外，实验室固定人员还获其它省部级奖励 6 项；2 位研究生获“第三届上银优秀机械博士论文奖”。

本年度，实验室在国际交流与合作方面上了新的台阶，创办了国内首个英文国际学术期刊《Friction》，按期出版了 4 期、共 30 篇论文，其中来自国外发达国家的论文占 60%，平均被引频次已达 1.8 次/篇，与本领域影响因子最高的国际刊物的被引频次相当，并入选“中国科技期刊国际影响力提升计划”。实验室还主导了中国申办 2017 年世界摩擦学大会（本领域规模和影响力最大的国际会议），并于 2013 年 9 月申办成功。此外，实验室于 2013 年 4 月成功主办了第 4 届“摩擦学高层论坛”（Advanced Forum on Tribology）国际会议。实验室的研究人员参加了 WTC2013, STLE Annual Meeting, IFToMM-ITS 等 10 多个国际会议，并在国内外重要会议上作特邀报告 13 次。

2013 年，实验室参加了科技部组织的工程与材料领域国家重点实验室的评估，再次取得优异成绩，在工程类 43 个国家重点实验室中被评为优秀国家重点实验室。

### 1. 研究水平与贡献

#### 1) 承担任务

摩擦学国家重点实验室承担了多项国家重大科研任务，目前在研项目共计 468 项，其中作为课题负责人的项目有 430 项。本年度进校科研经费约 2.15 亿元。主要在研课题包括：国家“973 计划”课题 18 项、“863 计划”课题 7 项、国家科技重大专项课题 33 项、国家科技支撑计划课题 9 项、国家自然科学基金项目 75 项、国际合作研究项目 27 项等。以雒建斌教授为首的基金委创新群体第二次获得滚动支持，这也是机械学科首个获得连续两次滚动支持的创新群体项目。

| 序号 | 课题名称  | 编号              | 负责人 | 起止时间            | 总经费(万元) | 本年度经费(万元) | 经费来源      | 类别          | 类型                 | 研究方向        |
|----|---|-----------------|-----|-----------------|---------|-----------|-----------|-------------|--------------------|-------------|
| 1  | 纳米界面超润滑检测技术与机理研究                                | 2013CB934200    | 郑泉水 | 2013.1-2017.12  | 2400    |           | 科技部       | 首席专家        | 国家重大科学研究计划(973)    | 摩擦学理论与技术    |
| 2  | 纳米尺度下液态超润滑机理与实验研究                               | 2013CB934202    | 张晨辉 | 2013.1-2017.12  | 474     | 80        | 科技部       | 主要负责        | 国家重大科学研究计划(973)    | 摩擦学理论与技术    |
| 3  | LED芯片衬底材料近极限光滑表面高效平坦化原理与方法                      | 91223202        | 潘国顺 | 2013.01-2016.12 | 290     | 116       | 国家自然科学基金委 | 主要负责        | 国家自然科学基金重大研究计划重点项目 | 微纳制造理论与技术   |
| 4  | 国产高档数控机床与数控系统在飞机筋肋梁等加工单元中的应用 - 国产数控机床应用技术成果转化平台 | 2013ZX04001-021 | 刘辛军 | 2013.6-2016.12  | 550     | 197.6     | 科技部       | 主要参与(副组长单位) | 国家科技重大专项           | 微纳制造理论与技术   |
| 5  | 基于 Ho:BaY2F8 晶体的新型中红外激光动力学及输出特性研究               | 61275146        | 柳强  | 2013.1-2016.12  | 84      | 67.2      | 国家自然科学基金委 | 主要负责        | 国家自然科学基金           | 微纳光电测试理论与技术 |

## 2) 标志性成果与奖励

### ① 并联机器人机构拓扑与尺度设计理论:

在并联机构基础理论研究方面,本年度从机构构型创新、性能评价和尺度综合三方面进行了深入研究。在机构构型创新方面,利用线图法将机构的自由度和约束表述为线几何中相应维数的线簇,实现了机构自由度和约束的可视化描述。将机构动平台的自由度空间进行对偶转换获得其约束空间,并对该空间进行降维等效拆分处理,获得各个支链子空间,为机构支链的配置提供理论指导和依据。进而建立了一套简洁实用的构型综合新方法,并给出了详细的综合流程。基于该方法,综合得到了若干具有工程实用价值的新型少自由度并联机构,并申请了多项国家发明专利,如:一种可实现 SCARA 运动的四自由度单动平台并联机构、一种三移一转四自由度空间并联机构等。在性能评价方面,提出了并联机构全域的定量评价模型。把机构末端特征的转动和移动分量分离,利用拉各朗日乘子建立出矩阵特征值表达的广义速度(线速度和角速度)极值、广义力(力和力矩)极值、广义刚度(线位移刚度和角位移刚度)极值、广义精度(线位移精度和角位移精度)极值全域的定量评价指标。在尺度综合方面,在机构参数设计空间中表达出并联机构全域参数与各种性能可视化

关系。在设计空间中，利用等高线表达出工作空间体积、各向同性度、全域速度极值、全域承载极值、全域变形极值等各种性能与机构尺度关系的图谱集，揭示了 2 至 6-DOF 并联机构全域尺度参数与各种性能间的映射关系，该可视化性能图集为并联机器人尺度性能优化设计提供了方便有效的实用工具。该研究成果获 2013 国家自然科学基金二等奖（获奖人：刘辛军（第二完成人））。

## ② 机械润滑和界面行为的电磁场调控：

以机械润滑和界面行为的电磁场调控为目标，本实验室开展了长期系统深入的理论和实验研究，取得了如下三方面创新性成果：① 发现了水基边界润滑的电控摩擦现象并揭示了机理。通过外加电压调节摩擦副表面电位的极性和大小，控制润滑液添加剂分子在固液界面的吸附和脱附状态，可以使摩擦系数发生显著、可逆的变化，变化幅度可以达到 5-10 倍；系统揭示了表面电位区间、添加剂分子种类和浓度、外加电解质对电控摩擦的影响规律与机理；研制了电控摩擦湿式离合器，验证了工程应用的可行性。② 提出了电/磁流变效应机理的电磁力与机械摩擦共同作用的新物理模型。发现在强电/磁场下，剪切速率超过某临界值时，电 / 磁流变液的剪切应力跃变数倍的剪切增稠现象，打破了其低速率剪切强度仅由外加电 / 磁场强度决定的传统认识；通过引入修正的 Mason 数来考虑颗粒间摩擦，可用于表征场强与剪切速率对颗粒结构状态的影响；研制了电流变压电陶瓷蠕虫运动机构。③ 探索了其他机械润滑与摩擦的电磁力控制新方向。揭示了 5CB 液晶分子的分子取向矢和介电张量在外电场作用下的行为特性对边界润滑特性和近壁面粘弹性的影响规律和机理；用外电场调控金属结构基元和液晶复合膜结构的局域电磁场分布，首次实现了电谐振和磁谐振的调节；提出并实现了介电颗粒基元可调控智能超常磁性电磁器件，为解决电磁响应频段窄的问题提供了新思路，从而为界面间电磁作用力提供了新的场调节方式。上述研究结果对于深刻理解摩擦、润滑和界面作用与外加电磁场之间的相互作用具有重要的理论意义，也有助于大力推进摩擦控制由被动向主动的发展。该研究成果获得 2013 年高等学校科学研究优秀成果（自然科学奖）一等奖（获奖人：孟永钢、田煜、赵乾、张向军和温诗铸等）。

## 2. 队伍建设和人才培养

摩擦学国家重点实验室由中心实验室和 4 个分室组成，目前有固定人员 79 人，其中教授/研究员 32 名，副教授/副研究员 39 名，中级职称 8 人。长江特聘教授 5 人，国家杰出青年自然科学基金获得者 6 人，教育部跨/新世界人才 11 人。本年度多位工作人员荣获国内外荣誉奖项，温诗铸院士荣获中国机械工程学会科技成就奖，并于 2013 年出版两部著作，分别为《界面力学》和《纳米摩擦学》。雒建斌院士荣获美国摩擦与润滑工程师学会国际奖，这是美国摩擦学界的最高荣誉奖，此外雒建斌院士还获得中国机械工程学会摩擦学分会最高成就奖。张晨辉获第二届“温诗铸枫叶奖—优秀青年学者奖”。实验室吴丹同志晋升为正高职称；刘大猛、张建富、程嘉、黄伟峰、佟浩、王子羲同志晋升为副高职称。

陈皓生同志于 1993 年进入清华大学，2003 年博士毕业后留校任助理研究员，2008 年升任副研究员。作为实验室重点培养的中青年骨干教师，开展软物质摩擦学与界面，微流体与复杂流体界面等方面的研究工作。2013 年，获基金委优秀青年基金计划资助，在国际顶级学术期刊

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA（美国科学院院刊）上发表题为 Ice lubrication for moving heavy stones to the Forbidden City in 15th-and 16th-century China（冰润滑技术运输故宫巨石）的代表论文，并被《Nature》评述和介绍。

### 3. 开放与合作交流

2013 年实验室参加出国讲学、短期工作访问或国际学术会议活动的师生有近 100 人次。实验室固定人员在国内外重要会议上作特邀报告共 13 次，其中雒建斌院士分别在意大利举行的“WTC 2013（世界摩擦学大会）”、瑞士举行的“3rd International Tribology Symposium of IFToMM-its2013”以及台湾举行的“The 14th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces (Met & Props 2013)”等会议上作大会报告和主题报告；孟永钢在中国北京举办的“4th Advanced Forum on Tribology”会议、在中国兰州举办的“第十一届全国摩擦学大会”和在中国上海举办的“BP Castrol-RSC International Symposium on Tribology and Lubricants”会议上分别作主题报告和邀请报告；邵天敏在中国青岛举行的“5th China-UK Symposium on Marine Tribology and Corrosion Aspects”会议上作邀请报告等；

本年度实验室邀请约五十多名国际知名专家学者来实验室访问、讲学和学术交流，其中包括以色列魏茨曼科学院的 Jacob Klein 教授、以色列 Technion 技术大学的 Izhak Etsion 教授、以色列摩擦学会主席 Lev Rapoport 教授等。实验室在 2013 年度分别与芬兰 KONE Elevators 公司、日本 IHI、日本佐贺大学理工研究生院、美国西北大学、美国波音航空航天公司等企业和研究单位开展合作项目，与英国壳牌公司、德国西门子公司和美国宾州州立大学签署了合作协议。此外，实验室主办了一次国际双边学术会议“Advanced Forum on Tribology（中日摩擦学高端论坛）”，会议促进了中日两国学者在摩擦学领域的交流和合作，在推动两国在学科领域中的发展方面发挥了重要作用。

摩擦学国家重点实验室还面向社会开放公共设备平台。实验室大型仪器设备年度总计对外服务机时近 1.9 万小时，其中如场发射环境扫描电子显微镜、摩擦磨损实验机、原子力显微镜等多台大型仪器设备年服务机时超过 2000 小时。实验室全年共接待大、中、小学学生团体参观约 550 人次；企业、社会机构、团体，包括天津市政府、江苏省省委常委、无锡市政府、解放军装甲兵工程学院等单位参观访问共计约 300 人次。

### 4. 专项经费执行情况与效益分析

根据科技部 2008 年国家重点实验室科研业务费的使用管理规定，实验室通过自主研究课题继续加大对新兴的研究方向和年轻教师支持。截至 2013 年底，实验室共设立自主研究课题重点课题 20 项，自由探索课题 48 项，培育项目 1 项和奖励课题（含主任基金）19 项。本年度，资助经费达 690 万元，其中重点课题资助总额达 350 万元。

本年度实验室进一步加强与国内和国际间的开放、交流和合作，通过设立开放课题，支持非重点实验室人员利用实验室开放平台进行摩擦学研究工作。今年，共有来自 20 余所高校和单位的研究人员提出 12 项开放课题重点项目和 21 项自由项目的申请。经实验室学术委员会审核批准，本年

度开放课题共设立 8 项重点课题和 14 项自由课题。资助经费合计 100 万元，其中重点课题的资助总额 64 万元。

2013 实验室学术委员会对执行和结题的自主研究课题与开放基金项目进行答辩和考核。今年结题的自主研究课题和开放课题均已完成了任务书所规定的研究内容，部分取得了重要理论研究进展和应用研究成果，但需要加强系统集成和成果申报。大多数在研项目根据项目计划书进展顺利，部分已取得了一定的研究成果，需要依据计划书进一步深入开展研究。

## 5. 依托单位的支持

摩擦学国家重点实验室依托清华大学，挂靠在机械工程系。依托单位对实验室的人事调整、固定资产和财务工作进行统筹管理。2013 年度，在实验室设备采购的过程中，清华大学设备处在严格执行有关采购程序的前提下，提供了高效的设备采购服务，包括对招标、谈判等关键环节严格把关，为实验室争取最优价格，并在外贸进口、海关手续办理等环节积极协调，这为实验室顺利完成设备采购提供有力支持和保障。

实验室管理工作也得到了机械工程系的大力支持，系领导非常关心和重视实验室的安全运行，多次亲临实验室视察督导和安全检查等工作，确保科研工作安全有序进行。为加强安全管理工作，系里还为实验室增设夜间值班岗位，并实现和机械系的安全统筹管理，为实验室的运行提供了有力支持和保障。