

## 2016 年摩擦学国家重点实验室年度报告

2016 年，摩擦学国家重点实验室在科学研究及成果转化、平台建设、团队建设和人事制度改革、国际化方面实施了多项重要的变革，并取得一些标志性进展。在摩擦学基础研究方面，进一步鼓励原始创新，代表性的成果如二维材料摩擦演化机制的合作论文在 *Nature* 发表、测量水龟行走中腿部受力方法的论文被 *Applied Physics Letters* 选为封面论文和推荐论文、飞秒激光微纳连接的论文在 *Advanced Functional Materials* 作为封面论文发表等；在面向国家重大需求的应用研究方面，实验室的研究工作进一步聚焦在《中国制造 2025》重大发展战略所确定的十大领域，并加速研究成果的转化和产业化，所研制的超大规模集成电路制造的化学机械抛光装备、光刻机工件台等成功进入市场，被选为十二五重大科技成就展的代表，受到党和国家领导人的关注；在研究平台建设方面，本年度实验室整体顺利搬迁进入新建的李兆基科技大楼，科研面积、实验仪器设备和环境条件得到显著充实和改善，为实验室的发展奠定了良好的基础；本年度实验室固定人员开始按照学校新的人事制度实行管理，建立了教研系列教师和研究系列教师的分类评价管理体系，引进了“外专千人计划”教授和“青年千人计划”教授各一位，汪家道教授获教育部长江学者特聘教授；启动了教育部国际合作联合实验室的建设，积极引进国际学者来实验室开展科学研究，实验室创办的国际刊物 *Friction* 2016 年先后被 Scopus 和 SCI 数据库收录，并获得中国科协科技期刊影响力提升计划 B 类项目资助。

实验室的主要研究工作集中在以下 5 个方向：（1）摩擦学理论与技术；（2）机械表面/界面科学与性能控制；（3）生物摩擦学与生物机械；（4）微纳制造理论与技术；（5）微纳光电测试理论与技术。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 376 篇，其中 SCI 收录（含网络版 SCI-EXPANDED）论文 236 篇，EI 收录 155 篇，其中在 1 区（JCR 分区）论文 112 篇，影响因子  $IF > 2$  的论文总数为 117 篇。实验室获授权发明专利 158 项，并且多项研究成果在工程领域获得转化和应用。获国家级奖励 1 项：赵乾副研究员获国家自然科学奖二等奖 1 项（排名 2）；获省部级科技奖励 3 项：李培杰教授获教育部科学技术进步奖二等奖 1 项（排名 1）；赵海燕教授获教育部科学技术进步奖二等奖 1 项（排名 1）；瞿体明副研究员获云南省技术发明奖三等奖 1 项（排名 3）。中国机械工业科学技术奖两项：贾晓红副教授获中国机械工业科学技术奖一等奖 1 项（排名 9）；蔡志鹏副研究员获中国机械工业科学技术奖二等奖 1 项（排名 7）。瞿体明副研究员获中国电力技术发明奖三等奖 1 项（排名 3）和南方电网科技进步奖二等奖 1 项（排名 3）。叶佩青教授获中国专利奖优秀奖 1 项（排名 2）。王立平教授、吴军副教授等获机械工业优秀创新团队。维

建斌教授获 2016 年度全国优秀科技工作者荣誉称号。田煜研究员荣获 2016 年度“中国青年科技奖”。胡楚雄副教授获 IEEE-ICIA 最佳自动化论文奖 1 项。

学术交流方面，实验室于 2016 年成功主办了“清华-特拉维夫大学”前沿科学与技术研讨会、Advanced design concept and practices,ADCP2016 workshop、ADCP2016 spring workshop 等会议。实验室的研究人员参加了 2016 Tribology Gordon Research Conference、20th International Colloquium Tribology、International Conference on Acoustics and Vibration(ICAV2016)、The Thirteenth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies 等约 20 多个国际会议，并在国内外重要会议上作邀请报告 23 次。

## 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要科研任务，目前在研项目共计 307 项，其中作为课题负责人的项目有 287 项。本年度进校科研经费约 1.71 亿元。主要在研课题包括：国家“973 计划”课题 8 项、国家科技重大专项课题 5 项、国家自然科学基金项目 63 项等。2016 年度新增 5 项代表性科研任务如下：

序号	课题名称	项目(课题)编号	负责人及单位	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	高分辨原位实时摩擦能量耗散测量系统	51527901	雒建斌 清华大学	2016/01/01-2020/12/31	8229.59	3141.098	国家基金委	主要负责	国家重大科学仪器设备开发专项	摩擦学理论与技术
2	纳米摩擦学机理研究	61050200116	马明 清华大学	2016/06/22-2019/06/22	300	100	中组部	主要负责	中组部千人计划	摩擦学理论与技术
3	纳米制造中的摩擦表/界面物理化学行为及控制	51522504	刘宇宏	2016/01/01-2018/12/31	150	6.6	国家基金委	主要负责	优秀青年基金	机械表面/界面科学与性能控制
4	聚合物包覆钢丝绳摩擦学性能研究	20163000237	邵天敏	2016/09/30-2018/03/31	100	50	KONE Elevators Co., Ltd. 通力	主要负责	国际合作	机械表面/界面科学与性能控制
5	舱上运动测试系统自检工装研制	20162001283	唐晓强	2016/03/24-2016/12/31	332	265.6	北京空间飞行器总体设计部	主要负责	横向	微纳制造理论与技术

## [2]研究工作水平

本年度的代表性研究进展如下：

### 1) 摩擦学理论与技术

本年度代表性成果：

序号	成果名称	完成人	刊物、出版社或授权单位名称	年、卷、期、页或专利号	类型	类别	研究方向
1	The evolving quality of frictional contact with graphene	Li, SZ; Li, QY; Carpick, RW; Gumbsch, P; Liu, XZ; Ding, XD; Sun, J; Li, J	NATURE	2016,539(7630), 541	论文	非第一完成人(非独立完成)	摩擦学理论与技术
2	Stratified effect of continuous bi-Gaussian rough surface on lubrication and asperity contact	Hu, ST; Huang WF; Brunetiere N; Liu XF; Wang YM	Tribology International	2016, 104: 328-341	论文	第一完成人(非独立完成)	摩擦学理论与技术

**二维材料摩擦演化机制的揭示：**近代摩擦学研究表明，三维固体材料在无磨损情况下的摩擦行为往往与界面真实接触面积的大小直接相关。而李群仰课题组研究表明界面摩擦对于二维材料存在独特的机理：二维材料由于其超薄的几何特性和超大的柔性，能够通过改变自身构型来影响接触界面的钉扎状态，进而可从界面的“质”而不仅是“量”上来调控其摩擦性能。相关工作发表于 Nature 杂志，并被 ScienceDaily、Nanowork、MIT News、ChinaDaily、科学网、搜狐网、网易、新浪、中国科协、中国国家自然科学基金委网站等多家国内外媒体所报道。针对此成果，Nature 专题评论到：“尽管人们提出过很多关于（摩擦演化）实验行为的猜想，但李等人通过计算机模拟揭开了该独特现象的谜底；李等人通过相对简单的系统来提高界面摩擦强度的途径为探究接触界面的演化过程开辟了一种更为可控的新方法”。

**连续双高斯方法在润滑密封中的应用研究：**基于表面分层理论建立了连续双高斯重构方法，进一步将连续双高斯重构方法应用于密封润滑和接触问题的研究，对比了连续双高斯方法与传统的 ISO-13565-3 型方法及约翰逊方法之间的差异。结果表明，连续双高斯方法获得的重构表面在最高压力值、空化比例、承载力等参数上的计算结果明显更佳。这显示了连续双高斯重构方法的优越性，为基于统计理论研究磨损表面间粗糙峰接触问题提供了一种新途径。相关的研究成果发表在 Tribology International 上。

### 2) 机械表面/界面科学与性能控制

序号	成果名称	完成人	刊物、出版社或授权单位名称	年、卷、期、页或专利号	类型	类别	研究方向
1	Controllable friction and wear of nitrided steel under the lubrication of [DMIm]PF <sub>6</sub> /PC solution via electrochemical potential	Yang, XY; Meng, YG; Tian, Y	WEAR	2016, 360-361, 104-113	论文	第一完成人(独立完成)	机械表面/界面与性能控制
2	Approach and Coalescence of Gold Nanoparticles Driven by Surface Thermodynamic Fluctuations and Atomic Interaction Forces	Wang, JD; Chen, S; Cui, K; Li, DG; Chen, DR	ACS NANO	2016, 10(2), 2893-2902	论文	第一完成人(独立完成)	机械表面/界面与性能控制

**含离子液体添加剂的碳酸丙二醇酯润滑液的可控摩擦磨损:** 离子液体具有挥发性极低、热稳定性高、不易燃烧和液态温度范围宽的优良特性, 在金属表面能形成一层物理吸附膜甚至化学反应膜, 起到良好的润滑作用, 被认为是一类有重要应用前景的新型润滑材料。本研究发现, 当把一葵基三甲基咪唑六氟磷酸盐 ([DMIm]PF<sub>4</sub>) 离子液体添加到碳酸丙二醇酯 (PC) 润滑液中使用, 通过改变不锈钢金属试样表面的电位, 可以调控不锈钢材料的摩擦系数和磨损量的大小, 当表面电位处于-0.6V 至-1V (相对于甘汞电极) 时, 等离子渗氮处理不锈钢的摩擦系数稳定在约 0.15 的较低值, 且磨损量很小, 这是由于[DMIm]<sup>+</sup>离子富集在摩擦表面形成了良好的边界润滑膜, 并显著抑制腐蚀磨损的发生; 当表面电位处于 0-1V 的正电位区间时, 摩擦系数则高达 0.28 左右, 不锈钢的磨损量也显著增大, 原因在于摩擦表面吸附了更多的 PF<sub>4</sub><sup>-</sup>阴离子。当表面电位处于-0.6V 至 0V 的区间时, 摩擦系数和磨损量介于两者之间。研究还发现, 等离子渗氮处理可以显著减缓离子液体对不锈钢的腐蚀。相关研究结果发表在 *Wear* 刊物。该研究不但首次报道了离子液体添加剂的电控摩擦特性, 而且进一步证明了摩擦表面与添加剂分子之间的静电相互作用对边界润滑膜的调控能力。

**纳米金胶体颗粒间的吸附及聚合现象和机理研究:** 实验中发现, 将纳米金颗粒沉积在硅片上, 放入加热炉加热到873 K时, 纳米颗粒之间发生相互吸附和聚合现象。分子动力学仿真研究中发现, 当温度在800至1000K之间时, 纳米金颗粒未熔化, 但发生了相互吸附聚合, 此仿真结果和实验现象实现了很好的匹配。机理分析表明, 远低于熔点情况下纳米金颗粒间的吸附及聚合源于热力学波动和原子间作用力。原子间作用力使得纳米颗粒表面原子热力学波动具有方向性, 从而促进相邻纳米颗粒表面上的原子发生相互靠近的定向“流动”; 由于表面原子的“流动”, 颗粒相互靠近; 靠近颗粒表面的原子间作用力增强, 从而继续促进

更大范围的表面原子相互靠近“流动”，直至两个颗粒表面接触，实现聚合。相关研究在ACS Nano上发文，研究发现的低于熔点时纳米颗粒靠近和聚合机理尚未见其它报道，研究对纳米颗粒的应用、相关金属催化的老化机理等研究具有重要的指导意义。

### 3) 生物摩擦学与生物机械

序号	成果名称	完成人	刊物、出版社或授权单位名称	年、卷、期、页或专利号	类型	类别	研究方向
1	Three-dimensional topographies of water surface dimples formed by superhydrophobic water strider legs	Yin, W; Zheng, YL; Lu, HY; Zhang, XJ; Tian, Y	APPLIED PHYSICS LETTERS	109(16), 163701	论文	第一完成人(独立完成)	生物摩擦学与生物机械
2	Critical Structure for Telescopic Movement of Honey bee (Insecta: Apidae) Abdomen: Folded Intersegmental Membrane	Zhao, JL; Yan, SZ; Wu, JN	JOURNAL OF INSECT SCIENCE	2016, 16(1), 79	论文	第一完成人(独立完成)	生物摩擦学与生物机械

**水龟腿与水界面弯液面的三维结构研究:** 水龟利用其腿的超疏水特性，能够在水面上停留、快速滑行和跳跃。虽然国内外学者普遍认同以下观点，即根据改进的阿基米德定律（updated Archimedes principle），水龟腿排开水的重量等于其所受的浮力，但是在实验上还从来未能对其各条腿上的浮力进行过同步在线测量。该论文根据光的折射原理，光线在水龟腿压弯的空气/水界面处发生更大角度的折射，从而将水龟腿阴影放大并在阴影边缘形成亮环，根据水龟腿的阴影可以重建弯曲水面的三维形状，从而计算出水龟腿排开水的体积和腿受到的浮力。将阴影法测得结果与用电子天平称量水龟的结果进行对比分析，发现测量误差小于5%，证明了该阴影方法的有效性，并发现腿上的浮力与其阴影面积近似成正比关系，浮力的测量分辨率可以达到 nN~pN/pixel。研究还将阴影测量力的原理拓展到微小表面力测量，得到了接触时间对单根头发与硅橡胶表面之间的粘附力的影响规律。这种阴影方法还可以用于在线测量和分析其它水上行走昆虫（水蜘蛛、水蝽等）运动中的力学行为，从而可为仿生微型水上机器人的设计与控制提供参考。该工作以封面文章和推荐文章（Featured Article）发表在 Applied Physics Letters 上。

**蜜蜂腹部的变形机制:** 当蜜蜂在花朵丛中飞来飞去、采集花蜜的时候，它们的腹部会不停地伸缩和弯曲运动。为了揭示蜜蜂腹部的变形运动机理，利用高速摄影机成功捕捉到了蜜蜂在飞行及在受到约束时如何自如地弯曲和伸缩腹部；采用扫描电镜和同步辐射相衬 CT 技术在亚微米尺度上观察和分析了蜜蜂背腹板的

连接结构，发现了蜜蜂节间褶的超微结构型式，这种超微结构在蜜蜂腹部实现高频伸缩和向腹部内侧的大角度弯曲上发挥了主要作用。研究还发现蜜蜂吸食花蜜时，其腹部进行高频的“呼吸”运动，配合口器吸食动作，提高了饮食效率。这种节间褶的特殊构型使得蜜蜂腹部具有高度机动的伸缩能力和弯曲变形能力，这或许对设计高机动性和特殊变形需求的空间几何变体结构如空天变体飞行器结构具有重要的参考价值。相关成果发表在 Journal of insect Science 上，并被新华社、科技日报、解放军报、中国航空报、美国科学促进会（AAAS）Eurekalert 网站、美国昆虫学会、每日科学（ScienceDaily）、物理学家网（Phys.org）、美国合众国际社（www.upi.com）、英国每日邮报、伊朗日报等上百家媒体报道。

#### 4) 微纳制造理论与技术

序号	成果名称	完成人	刊物、出版社或授权单位名称	年、卷、期、页或专利号	类型	类别	研究方向
1	Plasmonic-Radiation-Enhanced Metal Oxide Nanowire Heterojunctions for Controllable Multilevel Memory	Lin, LC; Liu, L; Musselman, K; Zou, GS; Duley, WW; Zhou, YN	ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS	26(33), 5979-5986	论文	第一完成人(非独立完成)	微纳制造理论与技术
2	Geometric error identification and compensation of linear axes based on a novel 13-line method	Li, J; Xie, FG; Liu, XJ; Li, WD; Zhu, SW	INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY	87(42863), 2269-2283	论文	第一完成人(非独立完成)	微纳制造理论与技术

**飞秒激光纳米连接及界面电学性能调控新方法:** 针对电子器件的微型化高性能化的发展需求，以及纳米线材料自身优异的电学特性，研究了飞秒激光在电子器件中纳结构单元的材料集成互连及性能调控/修饰相关技术。通过激光激励纳器件单元中的局域等离子激元效应，在纳米线-电极结构中实现了大光斑辐照条件下的能量空间纳尺度的选择性精确输入，避免材料损伤，获得了机械强度稳定的接头的同时，对金属电极与氧化物纳米线材料界面之间的电学势垒进行调制，获得最高八级的记忆电阻特征，并获得了稳定的可选择及复合多级特征的忆阻器结构。该光学辅助调控技术实现了快速，高精度的纳电子器件的集成与功能修饰，为高性能器件的开发提供了可能。相关成果已在 Advanced Functional Materials 上作为封面论文发表。

**数控机床平动轴几何误差检测、辨识与补偿方法:** 数控机床是一切机械产品的工作母机，其加工精度决定了工件的质量和性能。几何误差、热误差、伺服误差等多种因素共同影响数控机床的加工精度，其中几何误差占据了重要比例，成为改善机床加工精度所要关注的重点。平动轴的几何精度为数控机床加工精度奠

定了重要基础，平动轴几何精度改善一直是国内外学者关注的热点。经过数十年持续研究，学者们以激光干涉仪为检测仪器提出了多种检测和辨识方法，为改善数控机床加工精度提供了理论指导。然而，随着大型结构件加工对于机床加工精度要求的不断提升，突破已有方法的局限，建立便捷的几何误差检测方法和高效的辨识算法成为平动轴几何误差补偿需要攻克的难点。在国家科技重大专项“高档数控机床与基础制造装备”的支持下，刘辛军教授课题组关于改善数控机床加工精度开展了持续性研究，在机床几何误差检测、辨识和补偿方面取得了重要进展。通过激光干涉仪专用辅助工装的设计有效提升了平动轴几何误差检测的效率，从避免误差建模的冗余表达、分离角度误差对误差检测的影响和避免误差解算中间接辨识偏差三个方面着手，提出了 13 线平动轴几何误差检测策略和辨识方法，有效提升了几何误差辨识精度，并通过修正数控系统误差补偿参数提升了误差补偿效果。相关研究通过软件进行集成，形成了平动轴几何误差补偿软件，可有效地改善机床加工精度，并逐步开始在成飞数控厂进行相关应用，在国家科技重大专项攻关中发挥了重要作用。相关理论成果发表在 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 上。

#### 5) 微纳光电测试理论与技术

序号	成果名称	完成人	刊物、出版社或授权单位名称	年、卷、期、页或专利号	类型	类别	研究方向
1	Efficient Room-Temperature Phosphorescence from Nitrogen-Doped Carbon Dots in Composite Matrices	Li, QJ; Zhou, M; Yang, QF; Wu, Q; Shi, J; Gong, AH; Yang, MY	CHEMISTRY OF MATERIALS	2016, 28(22), 8221-8227	论文	第一完成人 (独立完成)	微纳光电测试理论与技术
2	Triboluminescence dominated by crystallographic orientation	Wang, KF; Ma, LR; Xu, XF; Wen, SZ; Luo, JB	SCIENTIFIC REPORTS	2016, 6, 26324	论文	第一完成人 (独立完成)	微纳光电测试理论与技术

**长寿命高效率碳点基室温磷光材料：**室温磷光信号具有 Stokes 位移大、寿命长和信噪比高等优点，在生物成像，信息加密和显示等领域有着重要的应用价值。目前室温磷光材料大多数为有机金属配合物，制作成本高、毒性大、稳定性差，阻碍了室温磷光材料的发展。近年来，碳点（CDs）作为一种新型的光致发光材料，以生物相容性好、毒性低、制备方法简单等优点，受到研究者的广泛关

注。然而，到目前为止，对碳点的研究绝大多数是基于其荧光，对于磷光鲜有涉及。尽管有少数的研究已经实现了碳点基复合材料的磷光发射，但是磷光产生机理仍需要探索。此外较短寿命和较低的发射效率也不利于磷光材料的进一步应用。在此背景下，课题组通过对碳点表面态的调控，首次证明了碳点的磷光源于表面的 C=N 双键，获得了磷光寿命最长(1.06s),效率最高(7%)的碳点基室温磷光材料。此外，由于材料具有荧光/磷光双重发射特性，我们对其进行了在白光 LED 和安全防伪领域的应用。相关成果发表在 *Chemistry of Materials* 上。

**晶向调控的摩擦发光新现象：**摩擦发光是古老的自然现象之一，经过几十年的研究，人们发现摩擦发光不光能够应用于传感器、发光源开发等实际应用中，同时能够揭示材料在接触及摩擦过程中重要本质规律。晶体材料是发光材料中具有代表性的材料，也是在摩擦副材料中经常用到的材料。如能够通过摩擦发光现象掌握晶体材料在接触剪切过程中的内在本质，并同时寻找到主动调控摩擦发光强弱及颜色的方法，将对摩擦理论及应用的发展来说具有重要的意义。过去的二十年中，虽然国际上对摩擦发光现象和特性开展了一系列的研究，但缺乏对摩擦发光的主动调控的研究，尤其缺乏对于材料微观结构对摩擦发光的影响。经过大量尝试，雒建斌教授、温诗铸教授、马丽然副教授课题组发现了通过改变晶体材料晶向进而实现大幅度摩擦发光强度变化的新现象，提出有效地主动调控摩擦发光的方法和理论，最大调控范围可达 100 倍量级。并通过对上述现象的深入研究，揭示了典型晶体材料接触过程中的电荷转移、发光本质等微观机制。上述研究成果有力地揭示了晶体材料摩擦接触过程中的内在机制，并为开发新型发光材料提供了有效途径。

## 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 5 个分室组成，目前有固定人员 86 人，其中教授/研究员 31 名，副教授/副研究员 44 名，中级及其他职称 11 人。教育部长江学者特聘教授 10 人，国家杰出青年科学基金获得者 9 人，国家优秀青年科学基金获得者 6 人，万人领军人才支持计划 1 人、中组部青年拔尖人才支持计划 2 人、青年长江学者 1 人、中组部青年千人 3 人、教育部跨/新世纪人才 12 人。其中，本年度汪家道获批教育部长江学者特聘教授，吴军获得“国家优秀青年科学基金”资助。

汪家道 1999 年清华大学机械设计及理论专业博士毕业，随后加入清华大学摩擦学国家重点实验室从事摩擦学相关工作，2012 年升任研究员。研究主要涉及表面减阻、超疏水等润湿行为、胶体自组装、空蚀和防污等。在 *ACS Nano* 等期刊发表论文 170 余篇，SCI 收录 90 余篇，他引 1200 余次，SCI 他引 500 余次；获教育部自然科学一等奖、技术发明一等奖各 1 项，以及国内、外优秀论文奖等



奖励；入选科技部中青年科技创新领军人才、教育部新世纪人才计划等，负责团队入选天津市高层次创新创业团队

吴军于 2003 年进入清华大学攻读博士学位，2008 年继续在清华大学进行博士后研究，2011 年任副教授。作为实验室的重点骨干，主要从事先进制造装备设计及控制、数控技术方面的研究工作。2016 年获得国家优秀青年科学基金资助，在制造装备动力学及控制领域国际顶级学术期刊《IEEE-ASME Transactions on Mechatronics》、《Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control》等发表 SCI 收录论文 40 篇，SCI 他引 300 余次，获教育部自然科学二等奖 1 项。

### 3. 开放与合作交流

2016 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约 100 人次。实验室固定人员在国内外重要会议上作邀请报告共 23 次，其中雒建斌院士在“20th International Colloquium Tribology”作 Plenary 报告；褚福磊教授在“The Thirteenth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies”上作 Plenary 报告；郑泉水教授在“2016 Tribology Gordon Research Conference”作邀请报告；邵天敏教授在“17th Nordic Symposium of Tribology NordTrib 2016”上作邀请报告；张晨辉副教授在“The Seventh Advanced Forum on Tribology 2016”作邀请报告。

本年度实验室邀请约四十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、京都大学 Kunieda Masanori 教授等。实验室在 2016 年度分别与日本松下电器，德国西门子公司、芬兰 KONE Elevators 公司、日本三菱重工、美国波音公司、德国亚琛工业大学等企业和研究单位开展合作项目。此外，实验室主办了多次国际学术会议和双边会议，如“Tsinghua University - The University of Tokyo Joint Symposium on Multidiscipline--- Symposium on Mechanical & Precision Engineering”、“Advanced design concept and practices, ADCP2016 workshop”、“ADCP2016 spring workshop”等。会议促进了中国和国际学者在表/界面研究和摩擦学领域的交流合作，在推动学科领域发展方面发挥了重要作用。

本年度实验室首次同时召开学术委员会和国际咨询专家会议，58 位学术委员会委员和国内外咨询专家委员会委员参加了本次会议，几十位国际摩擦学领域的知名专家出席，就实验室的运行和发展提出了建设性的意见和建议。

2016 年实验室启动了教育部“高端装备创新设计制造”国际合作联合实验室的建设，积极引进国际学者来实验室开展科学研究，实验室创办的国际刊物 Friction 先后被 Scopus 和 SCI 数据库收录，并获得中国科协科技期刊影响力提升计划 B 类项目资助。

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约 2 万小时，其中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单机服务机时超过 5000 小时。实验室全年共接待大、中、小学学生团体参观约 170 人次；企业、社会机构、团体等单位参观访问共计约 130 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 2016 年底，实验室共设立自主研究课题重点课题 36 项，自由探索课题 76 项，其中重点项目群 3 项和奖励课题（含主任基金）43 项。本年度，资助经费达 508 万元，其中重点课题资助总额达 244 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 余所高校和单位的科研人员提出 11 项开放课题重点项目和 17 项自由探索项目的申请。经实验室学术委员会审核批准，本年度开放课题共设立 5 项重点课题和 18 项自由探索课题。资助经费合计 97 万元，其中重点课题的资助总额 50 万元。

2016 实验室对正在执行和结题的自主研究课题与开放基金项目进行了考核。本年度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。2016 年度，清华大学从多方面对实验室的建设提供了有力支持。首先，本年度实验室随机械工程系整体搬迁到新建成的李兆基科技大楼，实验条件和办公环境都显著得到改善；其次，学校投入学科建设经费 100 多万元，支持实验室的环境改造；此外，学校还投入 120 万元用于支持以实验室为支撑平台的教育部国际合作联合实验室的建设。

本年度是国家重点实验室仪器设备更新改造计划专项经费执行的重要时期，用于购置或改造仪器设备的经费累积达 4000 多万元。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了有力支持和保障。

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，对实验室工作进行了多次督导和检查，确保了科研工作安全有序进行。在实验室搬迁过程以及实验室装修改造过程中，机械工程系给予了多方面的指导和帮助，多为实验室的运行提供了有力支持和保障。

类别	2015 年度	2016 年度	增长数	增长比率
专职管理人员（个）	1	1	0	0
专职技术人员（个）	4	4	0	0
硕士研究生招生（个）	50	75	25	50%
博士研究生招生（个）	52	53	1	1.9%
单位配套运行费（万元）	0	0	0	0
单位配套设备费（万元）	0	0	0	0
实验室总面积（平米）	3820	3114.71	-705.29	-18.46%
实验室总资产（万元）	12029.0	14104.9	2454.4	17.3%