

陕西省自然科学奖公示信息

(2022 年度)

一、项目基本情况

项目名称	微纳流体的非线性电动调控力学机制及实验研究
主要完成人	刘维宇、陶冶、任玉坤、李艳波、姚博彬、武奇生
主要完成单位	长安大学、哈尔滨工业大学

二、提名意见（适用于提名单位）

提名者	陕西省教育厅	提名等级	二等奖
<p>提名意见：</p> <p>本项目面向多学科交叉背景下的 MEMS 功能化电动微纳流体器件的共性基础科学问题，针对传统线性电动力学导致的流速过低且不能规避电化学反应的自身缺陷，提出了非线性电动微纳流体力学的解决方法，即一类电场作用于其自身诱导自由电荷从而驱动与电场平方成正比的流体输运现象，形成了特色鲜明的电动微纳流体力学理论体系，并开展了面向应用的 MEMS 功能化微纳流体器件研究，为微纳流控系统精准电动流体调控与多学科交叉应用奠定了基础。在本领域国际权威期刊上发表多篇高影响力论文，研究成果促进了电动微纳流控器件领域新理论、新技术的应用，取得了显著的社会、经济效益。项目成果获“2022 年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖”。</p> <p>鉴于本项目的科学研究价值、成果的创新性贡献、以及良好的应用效果，满足“陕西省自然科学二等奖”遴选的标准条件，特此郑重提名推荐。</p> <p>提名该项目为陕西省自然科学奖 二 等奖。</p>			

三、项目简介

(限 2 页)

本项目属于微流体力学科学技术领域。项目面向多学科交叉背景下的MEMS功能化电动微纳流体器件的共性基础科学问题,针对传统线性电动学导致的流速过低且不能规避电化学反应的自身缺陷,提出了非线性电动微纳流体力学的解决方法,即一类电场作用于其自身诱导自由电荷从而驱动与电场平方成正比的流体输运现象,形成了特色鲜明的电动微纳流体力学理论体系,并开展了面向应用的MEMS功能化微纳流体器件研究,为微纳流控系统精准电动流体调控与多学科交叉应用奠定了基础。主要发现点如下:

(1) 揭示了基于扩散电荷动力学的纳米尺度电荷分离与毫米尺度离子浓度调控的微观机制,建立了考虑非线性扩散层电容和法拉第电化学反应的交流电渗非线性物理模型,相对于传统线性模型,计算精度提高了近47%,为导电介质的电动力学操控奠定了理论基础;

(2) 提出了基于诱导电荷电渗的颗粒排布新方法,揭示了悬浮电极/电解液界面的电化学生离子弛豫机制,确立了流动场效应晶体管、旋转电渗、液滴导向电渗等诱导电荷电渗的多种新型激发模式,开发了用于颗粒聚集、转动、轨迹调控及微流体混合等多种功能化电动微流控器件;

(3) 揭示了交流电场作用下高电导率微流体的电热驱动机理,建立了交流电热的物理修正模型,提出了利用多频交流电热效应加速抗原-抗体结合效率的新方法,研发了牛的副结核等疾病的早期快速检测 MEMS 器件,实现了几类动物疾病的快速检测目标;

(4) 建立了考虑诱导电荷电渗滑移和界面非线性电应力协同作用的流固耦合模型,揭示了导电颗粒表面诱导偶极矩与双电层屏蔽的耦合作用关系,发现了两面神颗粒的反常规非线性电动力学行为,搭建了基于偶极电极阵列的高通量微流控介电泳胶体分离芯片;

(5) 提出了基于低压交流电场的双乳液滴内核融合、释放等精准操控的新方法,建立了诱导偶极子互动、切向电流体漩涡流动以及液滴电致变形三种电流体动力学效应之间的平衡关系,实现了利用高通量液滴进行 RNA 病毒颗粒的定量分析及检测;

(6) 揭示了基于感应电荷电动现象的非线性电动纳米流体驱动机制,建立了可极化纳米流道壁面/电解液界面的偶极电化极化物理模型,完成了对离子浓差极化系统中稀电解质离子传输的灵活控制,实现了场效应可重构的高通量微/纳流体离子二极管整流功能;

(7) 揭示了基于液态金属连续电润湿效应的两相流动力学行为机制,明确了纳米尺度双电层充电与宏观尺度电毛细流动之间的跨尺度力学关系,利用镓基液态金属精准驱动了含能离子液体,实现了离子推进器电推进供液功能,为航天器系统结构设计提供新的思路。

本项目目前已发表学术论文 63 篇,其中 SCI 检索论文 58 篇,获得发明专利 1 项,软件著作权 5 项。成果得到了包括诺贝尔奖获得者、美国科学院院士、中组部万人计划科技创新领军人才、国家杰出青年基金获得者等国内外同行的高度关注和认可。在流体力学著名期刊 *Physics of Fluids* 上发表 4 篇论文,1 篇论文被遴选为 *Small* 封面,1 篇论文被遴选为 *Lab on a Chip* 封面文章,1 篇论文被遴选为 *Physics of Fluids* 首页亮点论文,1 篇论文入选 2018 年 ESI 高被引(Top 1%)。2015 年发表于 *Soft Matter* 的论文被国际学术媒体 *Atlas of Science* 进行了专访报道。依托本项目成果,第 1 完成

人于 2021 年获批主持国家自然科学基金面上项目 1 项；第 3 完成人于 2020 年获批主持国家自然科学基金面上项目 1 项，并于 2021 年入选中组部“万人计划”青年拔尖人才。研究成果促进了电动微纳流控器件领域新理论、新技术的应用，取得了显著的社会、经济效益。

四、客观评价

【限 2 页。围绕科学发现点的原创性、公认度和科学价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价内容要有客观依据，主要包括国内外同行在重要学术刊物（专著）和重要国际学术会议等公开发表的学术性评价意见，国内外重要科技奖励等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。】

研究成果受到了诺贝尔奖获得者、美国科学院院士、中组部万人计划科技创新领军人才、国家杰出青年基金获得者在内的国内外知名学者的广泛关注和正面评价。

对发现点 1 的代表性评价如下：

辽宁省“百千万人才工程”千层次人才获得者、大连海事大学王俊生教授在其发表的论文中引用该研究并正面评价指出：“利用离子选择薄膜外部浓度极化效应显著提高了微流体离子电流整流的通量，为下一代液相集成电路中高通量功能化离子器件的设计提供了一种新的思路”。

浙江省 151 人才工程第一层次入选者、宁波诺丁汉大学石泳教授在其发表的论文中引用该研究并正面评价指出：“揭示了扩散双层非线性表面电容和法拉第电荷相迁反应对交流电渗的影响规律，阐明了与外加交流电场成 $\alpha(1<\alpha<2)$ 次方的非线性电渗泵速特征关系，诠释了关于交流电渗流速的理论预测值总是远大于实验观测结果的难题，为基于跨尺度异相离子电荷分离的电动流体驱动做出贡献”。

对发现点 2 的代表性评价如下：

加拿大流体力学首席科学家、滑铁卢大学 Dongqing Li 教授在其发表的论文中引用该研究并正面评价指出：“提出的场效应电渗流动控制方法为灵活可调的颗粒浓缩和微流体混合提供了有价值的指导方针”。

新加坡南洋理工大学机械与航空学院 Chun Yang 教授，在 *Soft Matter* 期刊发表的同 1 篇论文中 3 次引用我们的成果，并正面评价指出：“构建了一种新颖的悬浮电极微流控系统，为利用诱导电荷电渗在现代微流体系统中操纵微观物体提供了新的机会”。

新加坡-麻省理工学院科技联盟的首席科学家之一、美国麻省理工学院 Jongyoon Han 教授正面评价指出：“建立了有损介电固体障碍物/电解液界面扩散双层极化的电流体动力学模型，有效拓宽了能够激发诱导电荷电渗流动的可极化固体材料范畴，高频交流电场的使用有效规避了电化学反应的发生”。

对发现点 3 的代表性评价如下：

意大利莫德纳和勒佐艾米利亚大学 Pierpaolo Greco 教授在其发表的论文中引用该研究并正面评价指出：“所建立的考虑强热电耦合效应的交流电热流物理修正模型，相对于线性模型更好的预测了实验观测到的真实的电热泵流速，对电动微流控领域的发展起到了很好的促进作用。”

2017 年诺贝尔奖得主、美国三院院士、冷冻电镜领域创始人 Joachim Frank 教授依据本项目组前期的理论成果，指导研制的器件直接应用于冷冻电镜的样品制备，发表了学术论文并正面引用评价了本成果：“该三维微混合器能有效降低压降，加工简单，在时间分辨冷冻电镜样品制备方向将有重大应用”。

对发现点 4 的代表性评价如下：

以色列特拉维夫大学机械工程学院名誉教授 Touvia Miloh 教授在其发表的论文中引用该研究并正面评价指出：“发现了金属颗粒反常规电动行为，在胶体与界面科学扩散电荷动力学机制方面做出了先驱性的工作”。

德国斯图加特大学航空航天热力学研究所首席研究员 Bernhard Weigand 教授在其发表的论文中引用该研究并正面评价指出：“基于微流控芯片内偶极电极阵列的非线性电动力学极大促进了胶体介电泳分离微流控芯片的发展”。

国家杰出青年基金获得者、西安交通大学刘红忠教授在其发表的论文中引用该研究并正面评价指出：“揭示了导电颗粒表面诱导偶极矩与双电层屏蔽的耦合机制，为基于导电颗粒的电动微流控芯片设计奠定了理论基础。”

对发现点 5 的代表性评价如下：

美国三院院士、中科院外籍院士、哈佛大学 David Weitz 教授在 Nature 系列刊物 Nature Reviews Drug Delivery 发表的论文中正面评价指出：“建立了微液滴界面电动力平衡方程，所提出的光电耦合液滴微流控技术有效改变了目前肿瘤检测通量低、时间长的现状”。

英国皇家化学会 Fellow、中科院大连化学物理研究所微流控芯片中心主任秦建华教授在其发表的论文中引用该研究并正面评价指出：“克服了传统方法制备的液滴填充的水凝胶纤维结构简单的困难，促进了在水凝胶纤维液滴中装载疏水物质的发展”。

加州大学旧金山分校著名分子生物学与免疫学领域 Raul Andino 教授，在同其发表的同 1 篇论文中引用本项目的成果 4 次并正面评价指出：“所设计的单个微流体器件的液滴生成效率可达 2000 个/秒，延伸并行系统可达百万个/十分钟通量，同时兼容介电泳与液滴微流体系统，可实现高通量的样本筛选功能”。

对发现点 6 的代表性评价如下：

国家万人计划科技创新领军人才、西北工业大学常洪龙教授在其发表的同 1 篇论文中 6 次引用该研究并正面评价指出：“揭露了在时空变化溶液电导率分布的影响下理想可极化悬浮电极表面各向异性扩散双层充电力学机制，突破了长期以来离子浓差极化系统离子选择性难以调控的技术瓶颈”。

哈尔滨工业大学“千人计划”特聘教授朱永刚教授在其发表的论文中引用了本项目关于低频电场下的悬浮电极/电解液浓差极化层界面处的电荷弛豫时间的研究成果，并正面评价指出：“利用微纳流道界面诱导空间电荷层实现微流体混合的成果由于微电极结构简单，无移动部件，易于集成而得到广泛应用”。

对发现点 7 的代表性评价如下：

国家优秀青年基金获得者、深圳大学周学昌教授在其发表的论文中引用该研究并正面评价指出：“首次揭示了液态金属/离子液体接触面的电毛细两相流体动力学物理机制，并利用室温离子液体的离子吸附特性实现了更高的电毛细流率，为离子推进器电推进供液功能提供了一种有效的解决方案，极具用于航天器系统结构设计的潜能”。

达姆施塔特工业大学 Annette Andrieu-Brunsen 教授在其发表的论文中引用该研究并正面评价指出：“建立了以含能离子液体和镓基液态金属为代表的特殊流体/壁面材料的连续电润湿效应电动力学模型，明确了纳米尺度双电层充电与宏观尺度特殊电毛细流体流动之间的跨尺度力学关系，为基于表面张力梯度的电解液驱动奠基了理论基础”。

五、代表性论文专著目录

(不超过 8 条。其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部)

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码 (xx年xx卷xx页)	发表时间 (年月日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	A universal design of field-effect-tunable microfluidic ion diode based on a gating cation-exchange nanoporous membrane	Physics of Fluids	Weiyu Liu, Yukun Ren, Ye Tao, Bobin Yao, Ni Liu, Qisheng Wu	2017年29卷112001页	2017年11月16日	Yukun Ren	Weiyu Liu	刘维宇、任玉坤、陶冶、姚博彬、刘妮、武奇生	4	SC I	是
2	Control of two-phase flow in microfluidics using out-of-phase electroconvective streaming	Physics of Fluids	Weiyu Liu, Yukun Ren, Ye Tao, Xiaoming Chen, Bobin Yao, Meng Hui, Lin Bai	2017年29卷112002页	2017年11月27日	Yukun Ren	Weiyu Liu	刘维宇、任玉坤、陶冶、陈晓明、姚博彬、惠萌、白璘	15	SC I	是

3	Dielectrophoretic separation with a floating-electrode array embedded in microfabricated fluidic networks	Physics of Fluids	Tianyi Jiang, Yukun Ren, Weiyu Liu, Dewei Tang, Ye Tao, Rui Xue, Hongyuan Jiang	2018年30卷11200-11203页	2018年11月7日	Yukun Ren, Weiyu Liu, Hongyuan Jiang	Tianyi Jiang	姜天一、任玉坤、刘维宇、唐德威、陶冶、薛睿、姜洪源	14	SCI	是
4	Multiple frequency electrothermal induced flow: theory and microfluidic applications	Journal of Physics D: Applied Physics	Weiyu Liu, Yukun Ren, Ye Tao, Zhuofeng Zhou, Qisheng Wu, Rui Xue, Bobin Yao	2020年53卷1753-1764页	2020年2月24日	Yukun Ren	Weiyu Liu	刘维宇、任玉坤、陶冶、周卓峰、武奇生、薛睿、姚博彬	8	SCI	是
5	Controllable rotating behavior of individual dielectric microrod in a rotating electric field	Electrophoresis	Weiyu Liu, Yukun Ren, Ye Tao, Yanbo Li, Xiaoming Chen	2017年38卷1427-1433页	2017年6月1日	Yukun Ren	Weiyu Liu	刘维宇、任玉坤、陶冶、李艳波、陈晓明	5	SCI	是
合 计									46	SCI	是

补充说明（视情填写）：

六、主要完成人情况表

姓名	刘维宇	排名	1
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	长安大学		
完成单位	长安大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目的第 1 完成人，是本项目的组织、设计、指导与直接参与者，是代表性论文 1、2、4、5 的第 1 作者，和代表作论文 3 的通讯作者。在本项目的 7 个主要发现点中，建立了完善的非线性电动微流体力学的理论体系，并分别指导其余项目完成人开展相关研究工作。对发现点 1 做出了创新性贡献：揭示了基于扩散电荷动力学的纳米尺度电荷分离与毫米尺度离子浓度调控的微观机制，建立了考虑非线性扩散层电容和法拉第电化学反应的交流电渗非线性物理模型，相对于传统线性模型，计算精度提高了近 47%。对发现点 2 做出了创新性贡献：提出了基于诱导电荷电渗的颗粒排布新方法，揭示了悬浮电极/电解液界面的电化学离子弛豫机制。</p>			

姓名	陶冶	排名	2
行政职务	无		
技术职称	讲师		
工作单位	哈尔滨工业大学		
完成单位	哈尔滨工业大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目的第 2 完成人，是代表性论文的 1、2、3、4、5 的合作作者。对发现点 3 做出了创新性贡献：揭示了交流电场作用下高电导率微流体的电热驱动机理，建立了交流电热的物理修正模型，提出了利用多频交流电热效应加速抗原-抗体结合效率的新方法。</p>			

姓名	任玉坤	排名	3
行政职务	系部副主任		
技术职称	教授		
工作单位	哈尔滨工业大学		
完成单位	哈尔滨工业大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目的第 3 完成人，是代表性论文 1、2、3、4、5 的通讯作者。对发现点 4 做出了创新性贡献：建立了考虑诱导电荷电渗滑移和界面非线性电应力协同作用的流固耦合模型，揭示了导电颗粒表面诱导偶极矩与双电层屏蔽的耦合作用关系，发现了两面神颗粒的反常规非线性电动力学行为，搭建了基于偶极电极阵列的高通量微流控介电泳胶体分离芯片。</p>			

姓名	李艳波	排名	4
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	长安大学		
完成单位	长安大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目的第 4 完成人，是代表性论文 5 的合作作者。对发现点 5 做出了创新性贡献：提出了基于低压交流电场的双乳液滴内核融合、释放等精准操控的新方法，建立了诱导偶极子互动、切向电流体漩涡流动以及液滴电致变形三种电流体动力学效应之间的平衡关系，实现了利用高通量液滴进行 RNA 病毒颗粒的定量分析及检测。</p>			

姓名	姚博彬	排名	5
行政职务	系部副主任		
技术职称	副教授		
工作单位	长安大学		
完成单位	长安大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目的第 5 完成人，是代表性论文 1、2、4 的合作作者。对发现点 6 做出了创新性贡献：揭示了基于感应电荷电动现象的非线性电动纳米流体驱动机制，建立了可极化纳米流道壁面/电解液界面的偶极电化学极化物理模型，完成了对离子浓差极化系统中稀电解质离子传输的灵活控制，实现了场效应可重构的高通量微/纳流体离子二极管整流功能。</p>			

姓名	武奇生	排名	6
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	长安大学		
完成单位	长安大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为本项目的第 6 完成人，是代表性论文 1、4 的合作作者。对发现点 7 做出了创新性贡献：揭示了基于液态金属连续电润湿效应的两相流动力学行为机制，明确了纳米尺度双电层充电与宏观尺度电毛细流动之间的跨尺度力学关系，利用镓基液态金属精准驱动了含能离子液体，实现了离子推进器电推进供液功能，为航天器系统结构设计提供新的思路。</p>			

七、主要完成单位情况表

单位名称	长安大学
<p>长安大学作为本项目第1完成单位，开展了非线性电动微流体力学的理论体系研究，取得了创新性成果，主要贡献包括对发现点1、2、5、6、7 做出了创新性贡献：揭示了基于扩散电荷动力学的纳米尺度电荷分离与毫米尺度离子浓度调控的微观机制，建立了考虑非线性扩散层电容和法拉第电化学反应的交流电渗非线性物理模型，相对于传统线性模型，计算精度提高了近47%；提出了基于诱导电荷电渗的颗粒排布新方法，揭示了悬浮电极/电解液界面的电化学离子弛豫机制；提出了基于低压交流电场的双乳液滴内核融合、释放等精准操控的新方法，建立了诱导偶极子互动、切向电流体漩涡流动以及液滴电致变形三种电流体动力学效应之间的平衡关系，实现了利用高通量液滴进行RNA病毒颗粒的定量分析及检测；揭示了基于感应电荷电动现象的非线性电动纳米流体驱动机制，建立了可极化纳米流道壁面/电解液界面的偶极电化极化物理模型，完成了对离子浓差极化系统中稀电解质离子传输的灵活控制，实现了场效应可重构的高通量微/纳流体离子二极管整流功能；揭示了基于液态金属连续电润湿效应的两相流动力学行为机制，明确了纳米尺度双电层充电与宏观尺度电毛细流动之间的跨尺度力学关系，利用镓基液态金属精准驱动了含能离子液体，实现了离子推进器电推进供液功能，为航天器系统结构设计提供新的思路。</p>	

单位名称	哈尔滨工业大学
<p>哈尔滨工业大学作为本项目第2完成单位，开展了基于非线性电动力学效应的纳流控芯片研究，取得了创新性成果，主要贡献包括对发现点3、4做出了创新性贡献：揭示了交流电场作用下高电导率微流体的电热驱动机理，建立了交流电热的物理修正模型，提出了利用多频交流电热效应加速抗原-抗体结合效率的新方法；建立了考虑诱导电荷电渗迁移和界面非线性电应力协同作用的流固耦合模型，揭示了导电颗粒表面诱导偶极矩与双电层屏蔽的耦合作用关系，发现了两面神颗粒的反常规非线性电动力学行为，搭建了基于偶极电极阵列的高通量微流控介电泳胶体分离芯片。</p>	

完成人合作关系说明

项目完成人刘维宇/1、李艳波/4、姚博彬/5、武奇生/6 就职于长安大学电子与控制工程学院。项目完成人陶冶/2、任玉坤/3 就职于哈尔滨工业大学机电工程学院。

刘维宇/1 在西安交通大学就读博士研究生期间于 2013 年就电动微流控关键实验技术问题向哈尔滨工业大学的任玉坤/3 求教，从此两人开启并一直保持紧密的学术合作关系。刘维宇/1 在 2016 年 9 月于西安交通大学获得博士研究生学位后，以专任教师身份加入了长安大学电子与控制工程学院。从此，刘维宇/1 与作为同事的李艳波/4、姚博彬/5、武奇生/6 组成科研团队，与哈尔滨工业大学的陶冶/2、任玉坤/3 就电动微流体力学中的关键科学问题开展了合作研究。刘维宇/1 于 2017 年获批主持国家自然科学基金青年项目《基于微/纳流道界面诱导空间电荷层极化的非线性电渗微流体驱动机制和实验研究》，且于 2019 年获批主持陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目《组织芯片中交流电热流体驱动研究》。作为这 2 项科研项目的预研究阶段成果和正式研究阶段成果，代表性论文 1、2、3、4、5 全部发表于 2017 年到 2020 年间。其中，刘维宇/1 是代表性论文 1、2、4、5 的第 1 作者，和代表性论文 3 的通讯作者；陶冶/2 是代表性论文 1、2、3、4、5 的合作作者；任玉坤/3 是代表性论文 1、2、3、4、5 的通讯作者；李艳波/4 是代表性论文 5 的合作作者；姚博彬/5 是代表性论文 1、2、4 的合作作者；武奇生/6 是代表性论文 1、4 的合作作者。依托本项目成果，刘维宇/1 于 2021 年获批国家自然科学基金面上项目 1 项；任玉坤/3 于 2020 年获批国家自然科学基金面上项目 1 项，并于 2021 年入选中组部“万人计划”青年拔尖人才。

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	合作时间	合作成果	证明材料
1	学术合作	刘维宇, 陶冶/1, 2	2016年9月-2020月12月	代表性论文1、2、3、4、5	代表性论文1、2、3、4、5
2	学术合作	刘维宇, 任玉坤/1, 3	2016年9月-2020月12月	代表性论文1、2、3、4、5	代表性论文1、2、3、4、5
3	学术合作	刘维宇, 李艳波/1, 4	2016年9月-2020月12月	代表性论文5	代表性论文5
4	学术合作	刘维宇, 姚博彬/1, 5	2016年9月-2020月12月	代表性论文1、2、4	代表性论文1、2、4
5	学术合作	刘维宇, 武奇生/1, 6	2016年9月-2020月12月	代表性论文1、4	代表性论文1、4