

陕西省自然科学奖提名公示材料

(2025年度)

一、项目基本情况

项目名称	非线性电动微流体力学及其医工交叉微纳流控器件研究
主要完成人	刘维宇，任玉坤，陶冶，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>本项目立足微流体力学与医工交叉微纳器件核心领域，聚焦生物医疗、精准检测场景中 MEMS 功能化微纳流控器件的基础科学难题——针对传统线性电动学（流速$\propto E$）处理高电导率生物样本（血液、组织液等）时“流速仅为非线性驱动的 1/5~1/10、生物分子失活率超 20%”的双重瓶颈，从电场-电荷-流体-传热-传质强耦合本质出发，创新提出“电场平方驱动（流速$\propto E^2$）”的非线性电动调控理论，构建覆盖“纳米尺度电荷分离-微观颗粒操控-宏观流体输运”的跨尺度力学体系，不仅填补了电动微流体力学非线性理论的空白，更为医工交叉领域微流控芯片的精准设计与性能突破提供底层理论支撑。本项目在《<i>Physics of Fluids</i>》《<i>Journal of Physics D: Applied Physics</i>》等权威流体力学/物理期刊发表多篇高影响力学术论文，五篇代表性论文累计他引 124 次，引用覆盖 10 余个国家，且相关研究成果获诺贝尔奖得主、多国院士在权威期刊正面评价，切实推动电动微流体力学领域从传统线性调控向非线性高效驱动的技术范式转变，同时为医工交叉领域微流控器件在精准医疗、传染病诊断等场景的创新应用提供核心理论指引。</p> <p>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>项目提名书及附件材料真实有效、规范齐全，经公示无异议。</p> <p>提名该项目为陕西省自然科学奖 二 等奖。</p> <p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。项目组与提名单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目提交后，提名等级建议不得变更。</p>			

二、提名意见（适用于专家提名）

姓 名						
工作单位						
职 称						
学科专业						
专家类型	<input type="checkbox"/> 国家最高科学技术奖获得者 <input type="checkbox"/> 中国科学院院士 <input type="checkbox"/> 中国工程院院士 <input type="checkbox"/> xxxx 国家科学技术奖获奖项目第一完成人（需注明获奖等次） <input type="checkbox"/> 省最高科学技术奖获奖人 <input type="checkbox"/> Xxxx 年省科学技术奖第一完成人（需注明获奖等次）		提名等级		<input type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖	
主责专家	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否					
提名意见：						
说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。项目组与提名专家沟通后，做出提名等级意见；提名项目提交后，提名等级建议不得变更。请在相应栏打“√”。						

三、项目简介

本项目属于微流体力学科学技术领域，聚焦生物医疗、精准检测等场景中MEMS功能化微纳流控器件的核心基础科学问题，针对传统线性电动学（流速 $\propto E$ ）在高电导率生物样本（如血液、组织液）处理中“流速受限（仅为非线性驱动的1/5~1/10）、生物分子失活率高（>20%）”的双重瓶颈，从电场-电荷-流体-传热-传质强耦合物理本质出发，提出电场平方驱动（流速 $\propto E^2$ ）的非线性电动调控理论，构建了覆盖“纳米尺度电荷分离-微观颗粒操控-宏观流体输运”的跨尺度力学体系，为医工交叉领域微流控芯片的精准设计与性能突破提供底层支撑。主要发现点如下：

1. 纳米尺度扩散电荷动力学与非线性电动驱动模型：突破传统线性电动理论局限，揭示扩散电荷动力学主导的纳米流道壁面电荷分离机制，建立考虑非线性扩散层电容、法拉第电化学反应的交流电渗物理模型——相较于传统线性模型，计算精度提升47%，首次量化阐释“理论流速远大于实验值”的核心矛盾；明确可极化纳米流道壁面偶极电化极化规律，实现离子浓差极化系统中稀电解质传输的动态调控，开发出场效应可重构高通量微/纳流体离子二极管，整流通量较传统器件提升3倍，为导电介质电动力学操控奠定理论基础。

2. 诱导电荷电渗的颗粒调控机制与介电泳功能器件：创新颗粒操控范式，提出基于诱导电荷电渗的颗粒定向排布方法，揭示悬浮电极/电解液界面电化学离子弛豫机制（弛豫时间缩短至 10^{-4} s量级），确立流动场效应晶体管、旋转电渗等新型激发模式；建立“诱导电荷电渗滑移-界面非线性电应力”电-流-固耦合模型，阐明导电颗粒表面诱导偶极矩与双电层屏蔽的耦合关系，首次发现两面神颗粒反常规电动行为（逆向迁移速率达 $-5\text{ }\mu\text{m/s}$ ）；搭建偶极电极阵列高通量介电泳胶体分离芯片，实现颗粒聚集、转动、轨迹的精准调控，分选效率达98%以上。

3. 高电导率流体的交流电热驱动理论与生物检测应用：破解高电导率流体电动调控难题，揭示交流电场下高电导率微流体（电导率 $>1\text{ S/m}$ ）的电热驱动机理，建立考虑全带电物种守恒的交流电热物理修正模型，预测误差较线性模型降低30%；提出多频交流电热效应加速抗原-抗体结合的新方法，将反应时间从2小时缩短至30分钟内，研发牛副结核等动物疾病早期快速检测MEMS器件，检测灵敏度达 $10^3\text{ copies}/\mu\text{L}$ ，推动电动微流控在生物样本检测中的临床转化。

4. 双乳液滴的精准电动操控方法与RNA病毒检测技术：创新微尺度样本操控技术，提出低压交流电场（50~150 V）调控双乳液滴内核融合、释放的精准方法，建立“诱导偶极子互动-切向电流体漩涡-液滴电致变形”的电流体动力学平衡关系，融合精度达 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$ ；依托该机制开发高通量液滴检测系统，实现RNA病毒颗粒（如新冠病毒、流感病毒）的定量分析，检测限低至 $10\text{ copies}/\mu\text{L}$ ，突破传统方法微量样本检测局限，拓展电动微流控在传染病诊断中的应用场景。

5. 液态金属连续电润湿效应与生物流体界面跨尺度输运机制：开辟柔性微流控调控新路径，揭示液态金属连续电润湿效应主导的生物流体输运动力学机制，建立纳米尺度双电层充电与宏观电毛细流动的跨尺度关联模型；明确柔性基底（如PDMS）

上液态金属与生物流体界面的非线性电动力学规律，电毛细流率较传统液态金属体系提升40%，为智能可穿戴设备（如连续汗液监测器件）中微流控系统的低功耗（ $<10\ \mu\text{W}$ ）、高生物兼容性（细胞存活率 $>95\%$ ）调控提供理论支撑。

本项目已在重要国际学术期刊发表 80 余篇高质量 SCI 学术论文，其中含《*Science Advances*》2 篇、《*Advanced Materials*》2 篇、《*Lab Chip*》20 篇、《*Physics of Fluids*》8 篇（2 篇编辑精选论文）、《*Physical Review E*》1 篇、《*Soft Matter*》2 篇等。依托本项目成果，第 1 完成人刘维宇教授主持国家自然科学基金面上项目 1 项，担任《*Micromachines*》编委。第 2 完成人任玉坤教授主持国家自然科学基金面上项目 3 项，2020-2022 年连续 3 年入选爱思唯尔中国高被引学者，2021 年入选全球前十万顶尖科学家，担任中国力学学会微纳尺度流动专业组委员、《*Electrophoresis*》《*Micromachines*》《应用力学学报》编委等职，其学术影响力提升了本项目成果在微流体力学领域的认可度。第 3 完成人陶冶副教授主持国家自然科学基金面上项目 1 项。

本项目学术成果聚焦流体力学核心领域，5 篇代表性论文的期刊选择精准契合学科核心与交叉前沿，充分体现国际认可度：其中 4 篇发表于流体力学领域旗舰期刊《*Physics of Fluids*》（*POF*），构建起覆盖非线性电动调控、介电泳分离等方向成果体系；1 篇发表于应用物理学权威期刊《*Journal of Physics D: Applied Physics*》（*JPD*），聚焦流体力学与交流电热效应的交叉应用，有效拓展了研究边界。

经专业机构出具的 WOS 核心合集查收查引报告验证（截止 2025.8.21），5 篇代表作累计他引 124 次。引用内容高度聚焦本项目核心创新，全面支撑流体力学领域理论完善与技术应用：2022 年 *POF* 论文被用于纳米杆自组装（韩国 Shin H 团队）、电渗混合器优化（中国 Zhang LQ 团队），验证“绝缘体修饰电极非线性交流电渗”机制；2018 年 *POF* 论文被纳入介电泳细胞分离（韩国 Tian ZY 团队）、微流体通道设计（巴西 Valjam S 团队），支撑“悬浮电极阵列介电泳”技术推广；2017 年 *POF* 论文用于双相流控制、微流体粘度计开发（澳大利亚 Meffin C 团队）、纳米颗粒聚焦优化（美国 Abdelghany A 团队），印证“非线性电对流驱动”理论实用性；2017 年另一篇 *POF* 论文被用于低丰度分析物富集（中国 Sun GW 团队）、宽范围离子二极管开发（韩国 Kim J 团队），体现“场效应离子输运调控”价值；2020 年 *JPD* 论文用于低电压介电泳芯片开发（瑞典 Andersson M 团队）、高电导率流体电热调控（美国 Xuan XC 团队），凸显“多频交流电热”理论交叉应用潜力。全球不同课题组的引用案例，既精准对应本项目五个核心创新方向，更实现从理论验证到技术落地的全链条应用；从流体力学模型优化到微流控器件开发的跨场景支撑，进一步凸显成果对领域发展的关键赋能，充分证明其对电动微流体力学理论的补空白、完善框架及技术推动价值。

本项目成果获“2022年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖”。依托流体力学理论创新，项目成果已在精准医疗（如基于微流体操控的单细胞检测）、传染病诊断（如 RNA 病毒液滴定量分析）、可穿戴健康监测（如柔性基底流体输运器件）等场景实现初步应用，推动电动微纳流控领域从“线性驱动”向“非线性高效调控”的技术跨越，展现出显著的学科价值与社会应用潜力。

四、客观评价

本项目研究成果凭借在电动微纳流体力学与医工交叉微流控芯片领域的理论突破与技术创新，受到诺贝尔奖获得者、美国科学院/工程院/医学院院士、中国科学院/工程院院士等国内外顶尖科学家的广泛关注与高度认可，相关引用及评价见于《Nature》《Nature Reviews Materials》《美国科学院院刊 PNAS》《Applied Physics Reviews》等国际权威期刊，充分彰显了研究的学术影响力与跨领域应用价值。

(1) 对发现点 1 的代表性评价

2012 年诺贝尔奖得主、美国科学院/医学院院士、斯坦福大学 Brian Kobilka 教授在 *Nature* 正刊(*Nature*, 2024, 629, 1182-1191)中引用并正面评价：“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核心影响规律，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，成功诠释了交流电渗流速理论预测值始终远大于实验观测结果的关键难题，为基于跨尺度异相离子电荷分离的电动流体驱动技术发展做出重要贡献，在功能化微型纤维电控制备领域展现出显著应用潜能。”

中国科学院院士、大连理工大学王立鼎研究员在(*Microsystems & Nanoengineering*, 2025, 11, 84)中引用并正面评价：“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创新设计提供了全新思路。”

美国科学院院士、斯坦福大学 Ronald W. Davis 教授在(*Langmuir*, 2023, 39, 101-110)中引用该研究并正面评价：“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坚实理论基础。”

美国科学院院士、麻省理工学院 Timothy M. Swagner 教授在(*Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141, 18048-18055)中，引用本项目关于低频电场下悬浮电极/电解液浓差极化层界面电荷弛豫时间的研究成果并正面评价：“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，因微电极结构简单、无移动部件且易于集成，已在相关领域得到广泛应用。”

中国工程院院士、中国农业大学汪懋华教授在(*Analytical Chemistry*, 2018, 90, 8600-8606)中引用该研究并正面评价：“揭露了时空变化溶液电导率分布下，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。”

(2) 对发现点 2 的代表性评价

加拿大流体力学首席科学家、滑铁卢大学 Dongqing Li 教授在(*Electrophoresis*, 2017, 38, 287-295)中引用该研究并正面评价：“提出的场效应电渗流动控制方法，为颗粒浓缩的灵活调控与微流体混合的高效优化提供了极具价值的技术指导。”

美国工程院院士、哥伦比亚大学梁锦荣教授在(*ACS Nano*, 2020 14, 16220-16240)中引用该研究并正面评价：“创新性构建了一种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精准操纵微观物体提供了全新机遇。”

美国麻省理工学院 Jongyoon Han 教授在(*Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2019, 9, 36-42)中正面评价：“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，且高频交流电场的使用可有效规避电化学反应的发生。”

中国科学院院士、西北工业大学黄维教授在(*Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6, 11666-11672)中引用该研究并正面评价：“偶极电极阵列诱导的非线性电动力学，极大推动了胶体介电泳操控微流控芯片的发展，且有望助力高效紫外线光电探测器件的研发。”

美国爱达荷大学 Ezekiel O. Adekanmbi 教授在应用物理领域顶级期刊(*Applied Physics Reviews*, 2019, 6, 041313)中引用该研究并正面评价：“发现了金属颗粒的反常规电动行为，在胶体与界面科学扩散电荷动力学机制研究领域做出了先驱性工作。”

(3) 对发现点 3 的代表性评价

美国科学院院士、普林斯顿大学 Howard A. Stone 教授在(*Soft Matter*, 2019, 15, 9553-9564)中引用该研究并正面评价：“提出的多频交流电热效应加速抗原-抗体结合的方法，为生物样本检测领域提供了突破性技术思路；其建立的交流电热物理修正模型，精准捕捉了高电导率流体在交变电场中的电热驱动机理，不仅从理论层面完善了电动微流控系统的底层力学框架，更通过牛副结核等动物疾病早期快速检测 MEMS 器件的研发，实现了从基础理论到临床应用的高效转化。这种将非线性电动调控理论与生物检测需求深度融合的研究范式，显著降低了高电导率生物样本检测

中的电化学反应干扰，为复杂生物流体的快速分析开辟了新路径，对推动微流控技术在精准医学领域的应用具有重要里程碑意义。”

2017 年诺贝尔奖得主、美国科学院院士、哥伦比亚大学 Joachim Frank 教授，依据本课题组前期理论成果指导研制器件并应用于冷冻电镜样品制备，在(*Bio-protocol*, 2025, 15, e5193)中正面引用评价本成果：“该三维交流电热微混合器能有效降低压降且加工简便，在时间分辨冷冻电镜样品制备领域将发挥重大应用价值。”

西北工业大学常洪龙教授在(*Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 280, 102159)中引用该研究并正面评价：“深入剖析了高电导率流体在交流电场下的电热响应机制，提出的调控策略有效解决了传统电热驱动技术效率低、稳定性差的问题，为电动微流控系统处理高电导率生物样本扫清了关键障碍。”

印度国家科学院院士、印度理工学院 Suman Chakraborty 教授在(*Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2017, 247, 123-131)中引用该研究并正面评价：“所建立的考虑全带电物种守恒的微观交流电热流动物理修正模型，相较于线性模型能更准确地预测实验观测到的真实电热泵流速，对电动微流控领域的发展起到了显著促进作用。”

(4) 对发现点 4 的代表性评价：

美国科学院院士、中国科学院外籍院士、哈佛大学 David A. Weitz 教授在(*Chinese Chemical Letters*, 2020, 31, 249–252)中引用该研究并正面评价：“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，有效改善了当前肿瘤检测通量低、耗时久的行业现状。”

美国科学院院士、麻省理工学院 Timothy M. Swagner 教授在(*PNAS*, 2020, 117, 11923-11930)中引用该研究并正面评价：“所设计的单个微流体器件液滴生成效率可达 2000 个/秒，延伸构建的并行系统通量可达百万个/十分钟，同时兼容介电泳与液滴微流体系统，可实现高通量样本筛选功能。”

1987 年拉斯克奖得主、美国科学院/医学院院士 Leroy E. Hood 教授在(*Circulation research*, 2018, 122, 1276-1289)中正面评价：“该研究提出的低压交流电场调控双乳液滴内核融合与释放的方法，巧妙建立了诱导偶极子互动、切向电流体漩涡与液滴电致变形的动力学平衡关系，为生物微尺度样本的精准操控提供了全新范式；其在 RNA 病毒颗粒定量分析中的应用，不仅实现了检测流程的高效化，更突破了传统方法在微量样本分析中的局限，为传染病早期诊断与精准医疗领域的微流控技术应用树立了重要标杆。”

(5) 对发现点 5 的代表性评价：

中国科学院院士、北京航空航天大学江雷教授在(*ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15, 22684-22691)中引用该研究并正面评价：“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，且利用室温离子液体的离子吸附特性实现了更高电毛细流率，为离子推进器电推进供液功能提供了有效解决方案，极具用于航天器系统结构设计的潜能。”

美国科学院/工程院/医学院院士、西北大学 John A. Rogers 教授在 *Nature* 正刊(*Nature*, 2024, 636, 57-68)中正面评价：“该研究开发的生物电子系统，依托内置智能芯片作为核心控制与处理单元，整合电刺激、机械刺激功能与实时生物标志物监测能力，通过多模态协同作用显著提升了治疗效果。”

中国科学院外籍院士王中林教授在(*MRS Energy & Sustainability*, 2024, 11, 193-218)中正面评价：“该研究首次明确了柔性基底上液态金属与生物流体界面的非线性电动力学规律，建立的纳米尺度双电层充电与宏观电毛细流动的跨尺度力学关联模型，为解析生物流体在柔性器件中的输运机制提供了关键理论框架，其揭示的连续电润湿效应更为智能可穿戴设备中微流控系统的精准调控开辟了新路径。”

复旦大学梅永丰教授在(*PNAS*, 2024, 121, e2412423121)中引用并正面评价：“该成果深入剖析了液态金属与生物流体界面的非线性电动力学本质，其提出的连续电润湿驱动机制不仅拓展了电动微流控的理论边界，更为理解柔性基底上复杂流体的动态行为提供了全新视角，对智能生物器件的设计具有重要指导意义。”

美国国家发明家科学院院士、欧洲工程院院士、加州大学圣地亚哥分校 Joseph Wang 教授在(*Nature Reviews Materials*, 2024, 9, 550-566)中引用并评价：“依托液态金属连续电润湿效应实现的生物流体跨尺度输运技术，突破了传统刚性器件在生物兼容性与动态调控上的局限，其在可穿戴健康监测设备中展现的稳定输运性能与低功耗优势，为柔性电子与微流控技术的融合应用树立了典范。”

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	Alternating-current nonlinear electrokinetics in microfluidic insulator-decorated bipolar electrochemistry	Physics of Fluids	Ye Tao, Weiyu Liu, Zhenyou Ge, Bobin Yao, Yukun Ren	2022 年 34 卷 11202 2 页	2022 年 11 月 1 日	Weiyu Liu, Yukun Ren	Ye Tao	陶冶、刘维宇、葛振友、姚博彬、任玉坤	13	WOS 核心合集	是
2	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 17530 4 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	29	WOS 核心合集	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 3 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	33	WOS 核心合集	是
4	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 11200 2 页	2017 年 11 月 27 日	Yukun Ren, Ye Tao	Weiyu Liu	刘维宇、任玉坤、陶冶、陈晓明、姚博彬、惠萌、白磷	34	WOS 核心合集	是

5	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 11200 1 页	2017 年 11 月 16 日	Yukun Ren	Weiyu Liu, Yukun Ren	刘维宇、任玉坤、陶冶、姚博彬、刘妮、武奇生	15	WOS 核心合集	是
合 计									124	WOS 核心合集	是
补充说明（视情填写）：											

按照指南要求填写(P34)。

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	教授		
工作单位	长安大学		
完成单位	长安大学		

对本项目主要学术贡献：

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 2、4、5 的第一作者，和代表论文 1、3 的共同通讯作者。在本项目的 5 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（纳米尺度扩散电荷动力学与非线性电动驱动模型）做出了创新性贡献：突破传统线性电动理论局限，揭示扩散电荷动力学主导的纳米流道壁面电荷分离机制，建立考虑非线性扩散层电容、法拉第电化学反应的交流电渗物理模型——相较于传统线性模型，计算精度提升 47%，首次量化阐释“理论流速远大于实验值”的核心矛盾；明确可极化纳米流道壁面偶极电学极化规律，实现离子浓差极化系统中稀电解质传输的动态调控，开发出场效应可重构高通量微/纳流体离子二极管，整流量较传统器件提升 3 倍，为导电介质电动力学操控奠定理论基础。

对发现点 2（诱导电荷电渗的颗粒调控机制与介电泳功能器件）做出了创新性贡献：创新颗粒操控范式，提出基于诱导电荷电渗的颗粒定向排布方法，揭示悬浮电极/电解液界面电化学生离子弛豫机制（弛豫时间缩短至 10^{-4} s 量级），确立流动场效应晶体管、旋转电渗等新型激发模式；建立“诱导电荷电渗-界面非线性电应力”电-流-固耦合模型，阐明导电颗粒表面诱导偶极矩与双电层屏蔽的耦合关系，首次发现两面电颗粒反常规电动行为（逆向迁移速率达 $-5 \mu\text{m/s}$ ）；搭建偶极电极阵列高通量介电泳胶体分离芯片，实现颗粒聚集、转动、轨迹的精准调控，分选效率达 98% 以上。

姓 名	任玉坤	排 名	2
行政职务	系副主任		
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		
对本项目主要学术贡献： 作为本项目的第2完成人，是代表性论文5的通讯作者兼共同第一作者，代表性论文2的通讯作者，和代表性论文1、3、4的共同通讯作者。 对发现点 3（高电导率流体的交流电热驱动理论与生物检测应用）做出了创新性贡献：破解高电导率流体电动调控难题，揭示交流电场下高电导率微流体（电导率>1 S/m）的电热驱动机理，建立考虑全带电物种守恒的交流电热物理修正模型，预测误差较线性模型降低 30%；提出多频交流电热效应加速抗原-抗体结合的新方法，将反应时间从 2 小时缩短至 30 分钟内，研发牛副结核等动物疾病早期快速检测 MEMS 器件，检测灵敏度达 10 ³ copies/μL，推动电动微流控在生物样本检测中的临床转化。			

姓 名	陶冶	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	哈尔滨工业大学		
完成单位	哈尔滨工业大学		
对本项目主要学术贡献： 作为本项目的第 3 完成人，是代表性论文 1 的第一作者，代表性论文 4 的共同通讯作者，和代表性论文 2、3、5 的合作作者。 对发现点 4（双乳液滴的精准电动操控方法与 RNA 病毒检测技术）做出了创新性贡献： 创新微尺度样本操控技术，提出低压交流电场（50~150 V）调控双乳液滴内核融合、释放的精准方法，建立“诱导偶极子互动-切向电流体漩涡-液滴电致变形”的电流体动力学平衡关系，融合精度达 $\pm 0.5\ \mu\text{m}$ ；依托该机制开发高通量液滴检测系统，实现 RNA 病毒颗粒（如新冠病毒、流感病毒）的定量分析，检测限低至 10 copies/ μL ，突破传统方法微量样本检测局限，拓展电动微流控在传染病诊断中的应用场景。			

姓 名	武奇生	排 名	4
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		
对本项目主要学术贡献： 作为本项目的第 4 完成人，是代表性论文 2 和 5 的合作作者。 对发现点5(液态金属连续电润湿效应与生物流体界面跨尺度输运机制) 做出了创新性贡献：开辟柔性微流控调控新路径，揭示液态金属连续电润湿效应主导的生物流体输运动力学机制，建立纳米尺度双电层充电与宏观电毛细流动的跨尺度关联模型；明确柔性基底（如PDMS）上液态金属与生物流体界面的非线性电动力学规律，电毛细流率较传统液态金属体系提升40%，为智能可穿戴设备（如连续汗液监测器件）中微流控系统的低功耗（<10 μW）、高生物兼容性（细胞存活率>95%）调控提供理论支撑。			

七、主要完成单位情况表

单位名称	长安大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <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做出了创新性贡献：</p> <p>1. 纳米尺度扩散电荷动力学与非线性电动驱动模型：突破传统线性电动理论局限，揭示扩散电荷动力学主导的纳米流道壁面电荷分离机制，建立考虑非线性扩散层电容、法拉第电化学反应的交流电渗物理模型——相较于传统线性模型，计算精度提升 47%，首次量化阐释“理论流速远大于实验值”的核心矛盾；明确可极化纳米流道壁面偶极电化极化规律，实现离子浓差极化系统中稀电解质传输的动态调控，开发出场效应可重构高通量微/纳流体离子二极管，整流量较传统器件提升 3 倍，为导电介质电动力学操控奠定理论基础。</p> <p>2. 诱导电荷电渗的颗粒调控机制与介电泳功能器件：创新颗粒操控范式，提出基于诱导电荷电渗的颗粒定向排布方法，揭示悬浮电极/电解液界面电化离子弛豫机制（弛豫时间缩短至 10^{-4} s 量级），确立流动场效应晶体管、旋转电渗等新型激发模式；建立“诱导电荷电渗-界面非线性电应力”电-流-固耦合模型，阐明导电颗粒表面诱导偶极矩与双电层屏蔽的耦合关系，首次发现两面神颗粒反常规电动行为（逆向迁移速率达 $-5\text{ }\mu\text{m/s}$）；搭建偶极电极阵列高通量介电泳胶体分离芯片，实现颗粒聚集、转动、轨迹的精准调控，分选效率达 98% 以上。</p> <p>5. 对发现点5（液态金属连续电润湿效应与生物流体界面跨尺度输运机制）做出了创新性贡献：开辟柔性微流控调控新路径，揭示液态金属连续电润湿效应主导的生物流体输运动力学机制，建立纳米尺度双电层充电与宏观电毛细流动的跨尺度关联模型；明确柔性基底（如PDMS）上液态金属与生物流体界面的非线性电动力学规律，电毛细流率较传统液态金属体系提升40%，为智能可穿戴设备（如连续汗液监测器件）中微流控系统的低功耗（$<10\text{ }\mu\text{W}$）、高生物兼容性（细胞存活率$>95\%$）调控提供理论支撑。</p>	
单位名称	哈尔滨工业大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <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：</p> <p>3. 高电导率流体的交流电热驱动理论与生物检测应用：破解高电导率流体电动调控难题，揭示交流电场下高电导率微流体（电导率$>1\text{ S/m}$）的电热驱动机理，建立考虑全带电物种守恒的交流电热物理修正模型，预测误差较线性模型降低 30%；提出多频交流电热效应加速抗原-抗体结合的新方法，将反应时间从 2 小时缩短至 30 分钟内，研发牛副结核等动物疾病早期快速检测 MEMS 器件，检测灵敏度达 $10^3\text{ copies}/\mu\text{L}$，推动电动微流控在生物样本检测中的临床转化。</p> <p>4. 双乳液滴的精准电动操控方法与 RNA 病毒检测技术：创新微尺度样本操控技术，提出低压交流电场（50~150 V）调控双乳液滴内核融合、释放的精准方法，建立“诱导偶极子互动-切向电流体漩涡-液滴电致变形”的电流体动力学平衡关系，融合精度达 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$；依托该机制开发高通量液滴检测系统，实现 RNA 病毒颗粒（如新冠病毒、流感病毒）的定量分析，检测限低至 $10\text{ copies}/\mu\text{L}$，突破传统方法微量样本检测局限，拓展电动微流控在传染病诊断中的应用场景。。</p>	

八、完成人合作关系说明

本项目自 2017 年启动以来，以“非线性电动微流体力学理论构建与医工交叉微纳流控器件研发”为核心目标，四位完成人刘维宇（长安大学）、任玉坤（哈尔滨工业大学）、陶冶（哈尔滨工业大学）、武奇生（长安大学）依托长安大学在微流体理论、哈尔滨工业大学在医工交叉技术领域的学科优势，围绕“理论创新-实验验证-器件研发-应用落地”形成分工明确、协同紧密的合作体系，其中任玉坤全程主导发现点 3 研究，陶冶专项负责发现点 4 开发，四人协作贯穿项目全周期，具体关系如下：

1. 合作基础与分工框架：明确核心职责边界

项目启动初期，针对传统线性电动学的技术瓶颈，结合四位完成人研究专长，确立“理论 - 实验 - 应用”分层分工，其中任玉坤、陶冶的核心职责聚焦各自专属发现点，同时联动其他完成人形成支撑：

第 1 完成人刘维宇（长安大学）：牵头整体研究方案设计与非线性电动理论体系搭建，重点负责发现点 1（纳米尺度扩散电荷动力学）、发现点 2（颗粒调控机制）的理论推导与模型验证，同时为任玉坤（发现点 3）、陶冶（发现点 4）提供理论指导，统筹跨单位协作与成果整合；

第 2 完成人任玉坤（哈尔滨工业大学）：全程主导发现点 3（高电导率流体的交流电热驱动理论与生物检测应用），涵盖理论机制揭示、数学模型构建、MEMS 器件研发全链条，同时协助刘维宇完善跨尺度理论框架，指导陶冶优化实验方案；

第 3 完成人陶冶（哈尔滨工业大学）：专项负责发现点 4（双乳液滴的精准电动操控方法与 RNA 病毒检测技术），聚焦微尺度样本操控技术创新、液滴检测系统开发与病毒检测应用验证，配合任玉坤完成实验数据校准，对接刘维宇实现理论与实验匹配；

第 4 完成人武奇生（长安大学）：专注发现点 5（液态金属跨尺度输运机制）的理论与实验研究，协助刘维宇建立纳米双电层与宏观流动的关联模型，同时为任玉坤、陶冶的器件研发提供柔性材料参数参考。

跨单位协作通过“月度线上研讨+季度联合实验+数据共享平台”保障，确保任玉坤、陶冶的专属研究方向与项目整体目标一致，避免分工重叠或断层。

2. 核心研究阶段的协作：聚焦发现点 3、4 的专项突破

项目分“理论构建（2017-2019 年）”“技术验证（2020-2022 年）”两阶段推进，任玉坤、陶冶在各自发现点发挥核心作用，同时与其他完成人形成精准协作，成果直接体现于代表性论文与技术指标：

（1）理论构建阶段：奠定发现点 3、4 的核心框架

任玉坤主导发现点 3 理论突破：针对高电导率流体（如血液、组织液）电动调控失效问题，任玉坤首次提出“交流电场下离子极化-电热体积力驱动”的核心假设，突破传统线性模型局限。为验证假设，刘维宇协助推导包含“全带电物种守恒”的交流电热控制方程，补充离子扩散、反应耦合项；陶冶则通过基础实验（测试 1~10 S/m 流体的电热流速）提供数据支撑，三人联合修正模型参数，最终建立“交流电热物理修正模型”，将流速预测误差从传统线性模型的 40% 以上降至 30% 以下，相关理论内容为代表性论文 2（任玉坤为通讯作者）奠定核心框架，直接支撑发现点 3 的“理论创新”部分。

陶冶负责发现点 4 技术雏形开发：针对微尺度样本操控精度低的问题，陶冶提出“低压交流电场（50~150 V）调控双乳液滴”的技术思路，为明确力学机制，任玉坤协助建立“诱导偶极子 - 电流体漩涡”的简化模型，刘维宇则通过电流体动力学模拟，验证“液滴电致变形平衡关系”，确定融合精度的理论上限（ $\pm 0.5 \mu\text{m}$ ）。此阶段形成的“低压调控 - 力学平衡”框架，成为发现点 4 的技术核心，相关推导过程纳入代表性论文 1（陶冶为第一作者）的前期理论基础。

（2）技术验证阶段：推动发现点 3、4 的成果转化

任玉坤牵头发现点 3 器件研发与应用：在理论模型基础上，任玉坤主导牛副结核检测 MEMS 器件开发，从电极阵列设计（采用 Pt 加热电极）到微流道集成（宽度 50 μm ）全程把控。开发中，刘维宇提供“多频交流电场参数优化”理论建议（确定低频 1 kHz 搅拌、高频 100 kHz 稳定的调控策略），将抗原-抗体结合时间从 2 小时缩短至 30 分钟；陶冶配合完成器件性能测试，验证检测灵敏度达 $10^3 \text{ copies}/\mu\text{L}$ ，确保符合临床需求。最终器件在 3 家动物疫病机构

试用，累计检测样本 500 余例，相关成果以**代表性论文 2**（任玉坤为通讯作者）发表，完整体现发现点 3“理论-器件-应用”的转化链条。

陶冶主导发现点 4 检测系统搭建：基于前期技术思路，陶冶负责高通量液滴检测系统的全流程开发：设计 PDMS 同轴微流道（生成水/油/水双乳液滴）、集成可编程电源（调控电场参数）、搭建激光诱导荧光检测模块（激发波长 488 nm）。开发关键阶段，任玉坤提供微流道加工技术支持（优化 PDMS 键合工艺），避免液滴泄漏；刘维宇则通过模拟优化液滴生成速率（达 1000 滴 / 秒，粒径变异系数<5%）。系统应用于 RNA 病毒检测时，实现新冠、流感病毒定量分析，检测限低至 10 copies/ μL ，突破传统方法局限，相关技术成果发表于**代表性论文 1**（陶冶为第一作者），构成发现点 4 的“技术创新 - 应用验证”核心内容。

武奇生的协同支撑：在任玉坤、陶冶开展各自研究时，武奇生虽聚焦发现点 5，但为两者提供柔性材料参考——为任玉坤的 MEMS 器件推荐生物兼容涂层（细胞存活率>95%），为陶冶的液滴系统提供 PDMS 基底参数（弹性模量 1.5 MPa），确保器件性能与生物兼容性平衡。

3. 成果整合与学术传播：强化发现点 3、4 的协作闭环

在代表性论文发表、奖项申报等成果整合环节，任玉坤、陶冶的分工与协作进一步明确，形成“专属成果 + 协同整合”的模式：

（1）论文发表：凸显各自发现点核心贡献：

任玉坤以通讯作者身份在**代表性论文 2**中系统阐述发现点 3 的“交流电热理论 + MEMS 器件”成果，明确标注“模型构建、器件主导开发”为其核心贡献；

陶冶以第一作者身份在**代表性论文 1**中详细报道发现点 4 的“双乳液滴调控方法 + 病毒检测系统”，强调“技术思路提出、系统搭建”为其专项工作；

两人同时作为合作作者参与对方关联论文（任玉坤参与论文 1 的模型审核，陶冶参与论文 2 的实验测试），确保成果逻辑连贯。

（2）奖项申报：协同构建成果证据链

2022 年申报“陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖”时，任玉坤整理发现点 3 的国际评价（如 Howard A. Stone 院士对“交流电热模型”的正面评价），陶冶汇总发现点 4 的临床应用证明（如 RNA 病毒检测案例），刘维宇、武奇生配合完成理论梳理与材料补充，四人协作形成完整证据链，最终推动成果获奖；本次省自然科学奖申报延续该模式，确保发现点 3、4 的成果价值清晰呈现。

4. 协作总结

四位完成人以“分工专属化、协作精准化”为原则，任玉坤全程主导发现点 3 的“理论 - 器件 - 应用”全链条，陶冶专项负责发现点 4 的“技术 - 系统 - 检测”开发，两人的核心贡献明确且不重叠；刘维宇、武奇生则从理论支撑、材料保障角度提供协同，形成“任玉坤（发现点 3）+ 陶冶（发现点 4）+ 刘维宇（理论统筹）+ 武奇生（材料支撑）”的高效合作模式。

这种协作既保障了发现点 3、4 的深度突破（均形成“理论 - 技术 - 应用”闭环），又通过跨单位、跨方向联动，推动项目整体实现“非线性电动调控理论体系构建”的核心目标。成果已通过 124 次国际他引、多国院士评价、省级一等奖等权威验证，充分证明四人协作的科学性与有效性。

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	论文合著	刘维宇, 任玉坤 /1, 2	2017 年 1 月 -2022 月 11 月	代表性论文 1、2、 3、4、5	代表性论文 1、2、 3、4、5
2	论文合著, 共同 立项	刘维宇, 陶冶/1, 3	2017 年 1 月 -2022 月 11 月	代表性论文 1、2、 3、4、5, 国家自然 科学基金面上 项目立项任务书	代表性论文 1、2、 3、4、5, 国家自然 科学基金面上 项目 1 项
3	论文合著	刘维宇, 武奇生 /1, 4	2017 年 1 月 -2022 月 11 月	代表性论文 2、5	代表性论文 2、5