

自然科学奖公示内容

一、 项目名称：织物基柔性电极成型机理及可穿戴器件性能调控机制

二、 提名者及提名意见（包含提名等级）：

提名者：陕西省教育厅

提名意见：该项目面向可穿戴智能纺织品的国家战略需求与行业关键技术瓶颈，围绕织物基柔性器件制造中的性能调控难、舒适性不足、集成度低等核心难题，开展了长达十年的系统深入研究，取得了多项原创性理论与技术突破，具有重要的科学价值与显著的应用前景。项目的主要科技创新点包括：第一，创新性地提出了织物表面微滴喷射打印原电池置换柔性导电路径直接成型新方法，揭示了其成型机理，攻克了织物基表面金属图案高精度、高性能成型的技术难题。第二，建立了织物金属银电极的打印成型方法与性能调控模型，解决了传统工艺制备流程复杂、成本高且柔性适配性不足的问题。第三，突破了多功能一体化集成的技术瓶颈，实现了织物基柔性器件在传感、能量收集等多元功能与穿戴舒适性的有效统一，确立了从基础材料、核心工艺到系统集成的完整技术体系。该项目研究成果在柔性电子与智能纺织交叉领域具有明显的创新性和先进性，理论成果丰硕，技术实用性强，已形成自主知识产权，为高端可穿戴设备的发展提供了重要支撑，契合《纺织行业“十四五”科技发展指导意见》的重点方向，整体技术达到国际先进水平。

该项目研究目标明确、内容系统、创新显著，对行业科技进步具有重要推动作用，经济效益和社会效益潜力巨大。提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

三、 项目简介：

1 项目主要研究内容

可穿戴智能纺织品将电子技术与纺织品相结合，在具备传感、通讯、学习等功能基础上，具有柔性、舒适性和透气性，已成为可穿戴技术的重要发展方向，《纺织行业“十四五”科技发展指导意见》将其作为重点突破的关键技术之一。织物基柔性器件是可穿戴智能纺织品的重要组成部分，在健康监测、人机感知交互等领域具有广泛应用前景。但性能调控难、舒适性不足、器件与织物集成度低等难题制约了该技术发展。

基于上述问题，本成果提出了织物表面微滴喷射打印原电池置换柔性导电路径直接成型新方法，揭示了织物基柔性电路原电池置换成型机理，形成了织物基高性能柔性金属电极直接成型理论，实现了织物基柔性器件柔性传感、能量收集等多功能一体化集成，确立了织物基可穿戴柔性器件制造方法。面向国家重大需求，立足于解决织物基柔性器件制造理论和技术难点，在国家自然科学基金面上项目的支持下，围绕关键科学问题开展十年持续研究，在理论和应用方面取得了多项突破。

2 本项目的科学发现点与科技价值

（1）提出了织物表面微滴喷射打印原电池置换柔性导电路径直

接成型新方法。针对织物基表面成型金属导电图案电学性能不足、与织物集成度不高等问题，系统研究了微滴喷射打印系统设计、微滴按需喷射打印过程、织物基表面微滴喷射沉积过程、原电池置换反应机理等科学技术问题，确立了织物基柔性金属导电路径打印成型方法。

（2）提出织物金属银电极打印成型方法。针对织物金属电极制备工艺复杂、成本高且柔性不足等问题，本成果基于微滴喷射打印原电池置换反应成型机理，建立织物金属银电极性能分析及成型电极数值模型，探明关键工艺参数对电极性能的影响规律。

（3）确立了织物基可穿戴柔性器件制造与性能调控方法。针对现有的柔性器件存在与织物结合度不足以及功能性单一等问题，在突破织物基电极制造难题的基础上，进行织物基柔性器件集成制造。开展织物柔性器件传感性能、能量收集和透气舒适性等多功能集成研究，实现织物柔性器件多尺度性能调控。

3 本项目的同行引用及评价

本项目 5 五篇代表性论文发表在 IEEE Sensors Journal（中科院 2 区）、Sensors and Actuators: A. Physical（中科院 2 区）等柔性智能可穿戴领域高影响力期刊，并出版《织物基柔性器件喷射打印成型技术》学术专著 1 部，累计被引频次 64 次，获得了 Nature Reviews Materials、Nano Energy、Chemical Engineering Journal 等顶尖期刊论文的褒扬引述。本成果聚焦织物基可穿戴柔性器件制造，形成的研究成果被广泛关注。先后有来自美国、新加坡等多个国家，以及国内香港理工大学、复旦大学等知名院校科研机构的院士和专家学者对该成果做出了正

面评述和引用。此外，有关成果也受到了《机械工程学报》公众号 JME 文章推荐栏目、《纺织学报》公众号、网易等多个媒体的报道和高度评价。

四、 客观评价：

1. 学术性评价

（1）中国机械工程领域的顶级学术刊物《机械工程学报》微信公众号 JME 文章推荐栏目介绍本项目提出的织物表面微滴精确打印化学沉积导电线路直接成形方法具有流程短、成本低、非接触、柔性化、可控性强等优点，是现阶段颇具发展潜力的柔性导电线路制备方法。

（2）《纺织学报》微信公众号推荐栏目介绍本项目微滴印原电池置换成型织物导电线路具有优异导电性，导电复合材料涂覆式全织物基柔性传感器制备工艺简单，成本低，透气性良好。



图 1 研究内容被媒体报道

2. 重要学术影响

本成果聚焦织物基可穿戴柔性器件制备成型及性能调控，研究成

果被广泛关注。有来自美国、新加坡等多个国家，以及国内香港理工大学、复旦大学等知名院校机构的院士和顶级专家学者在 *Nature Reviews Materials*、*Chemical Engineering Journal* 等主流学术期刊对该成果做出了正面评述和引用。以下为部分引用论文对成果的客观评价：

中国科学院院士、复旦大学彭慧胜院士发表在期刊《*Nature Reviews Materials*》(IF=76) 的文章《*Design, fabrication and assembly considerations for electronic systems made of fibre devices*》对本项目代表作[1]发表评述“印刷和转印技术可使纺织品基底取代柔性薄膜基底而应用于电子纺织品”(Printing and transfer techniques are two mature methods for realizing planar circuits^{80,81} that could be applied to electronic textiles by replacing the flexible film substrate with a textile substrate.)。

可穿戴智能纺织品领域著名专家香港理工大学郑子剑青年科学院青年院士发表在期刊《*Science Advance*》(IF=12.5) 的文章《*A monolithically integrated in-textile wristband for wireless epidermal biosensing*》引用了本项目代表作[1]，在文中高度评价了使用本项目提出的在织物上沉积成型导电金属银颗粒，在电子设备和电路集成需求很高。

华南理工大学人工智能领域顶级专家舒琳教授级高工发表在期刊《*IEEE Internet of Things Journal*》(IF=8.9) 的文章《*QRS Complexes Detection Using UNet-BiLSTM Model Combined With Adaptive Post-Processing for Multi-Lead Wearable ECG Smart T-Shirt System*》，

引用本成果的代表作[1]，并评述到“织物干电极得到了广泛的研究，在舒适性、高集成度、抗干扰、高精度等方面进一步优化，可满足长期监测的需求。”

全国纺织科技青年创新领军人才，全国纺织学术带头人，江南大学纺织科学与工程学院教授付少海发表在期刊《Advance Materials Technologies》(IF=6.2)的文章《Textile Electrodes for Electrocardiogram Monitoring》，对本项目代表作[1]评述到“提出了一种反应性喷墨打印策略，结合新的液相化学还原方法，将银电路沉积在不同的纺织基材上，包括机织、针织和非织造布。”(Xiao and coworkers proposed a reactive inkjet printing strategy combined with a new liquid phase chemical reduction method to deposit silver electrical circuits on different textile substrates including woven, knitting, and nonwoven.)

多功能柔性/生物电子制造领域专家、浙江大学研究员徐凯臣发表在期刊《Science Partner Journal》(IF=10.7)的文章《Textile hybrid electronics for multifunctional wearable integrated systems》对本项目代表作[1]的成果评述到“由于附着力增强，打印银在弯曲过程中的电阻变化可以忽略不计。该方法无需高温烧结，从而扩大了基材兼容性。”

(Due to the enhanced adhesion, the resistance changes of printed Ag during bending were almost negligible. Moreover, this method eliminates the need for hightemperature sintering and thus broadening substrate compatibility.)

北京交通大学电子与信息工程学院李修函教授在其论文

《Metal-Gallium Arsenide Based Tribovoltaic Nanogenerators and its Application for High-Precision Self-Powered Displacement Sensors》(IF=26.1)充分肯定了本项目(代表作[2])的研究成果,认为本项目研究成果在生物运动低频能量收集领域具有巨大应用潜力。(… , which can effectively collect various forms of low-frequency mechanical energy in the environment, such as wind energy, water energy, sound energy, biological motion, …)

全国纺织科技青年创新领军人才,全国纺织学术带头人,江南大学纺织科学与工程学院教授付少海发表在期刊《Applied Polymer》的文章,对本项目代表作[2]评述到“利用具有优异力学性能和有序多孔结构的气凝胶作为原始传感元件,外界刺激转化为稳定的电信号输出,是获得优异柔性压阻应变传感器的有效方法。”(… , the use of aerogel with excellent mechanical properties and ordered porous structure as the original sensing element to convert external stimuli into a stable electrical signal output represents an effective means of obtaining excellent flexible piezoresistive strain sensors.)

韩国庆熙大学 Mandar Vasant Paranjape 发表在期刊《Advanced Powder Materials》(IF=24.9)的文章《Integrating luminescence with triboelectricity: Meticulously designed hybrid nanogenerator for multipurpose applications》对本项目代表作[3]发表相关评述“HNGs的制造通常采用两种方法:一种是通过外部电路将压电摩擦电器件结合起来,另一种是直接利用混合/复合材料/薄膜制造。”

五、 代表性论文专著目录：（注意：2023 年 8 月 1 日前公开发表，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；填写时请注意基于论文专著全部作者填写，且按原文中英文填写，“国内作者”填写中文姓名）

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	知识产权是否归国内所有
1	Fabrication of Silver Electrical Circuits on Textile Substrates by Reactive Inkjet Printing	IEEE Sensors Journal	Yuan Xiao, Qian Li, Chengkun Zhang, Wei Zhang, Weibo Yun, Leipeng Yang	2022 年 22 (11) 卷 11056-11064 页	2022-05-31	肖渊	肖渊	肖渊、李倩、张成坤、张威、负伟博、杨磊鹏	是
2	A jet printing highly sensitive cotton/MWCNT fabric-based flexible capacitive sensor	Sensors and Actuators A: Physical	Yuan Xiao, Hanchun Hu, Dongyuan Guo, Yao Tong, Xinlei Guo, Leipeng Yang	2023 年 351 卷 114152 页	2023-01-05	肖渊	肖渊	肖渊、胡汉春、郭栋源、童珪、郭鑫雷、杨磊鹏	是

3	Integrated Triboelectric-Electromagnetic-Piezoelectric Self-Rebounding Energy Harvester for Human Energy Harvesting	Advanced Materials Technologies	Yuan Xiao, Mingyuan Niu, Leipeng Yang, Jinchao Liu, Xiaolai Lv, Pengcheng Yang	2022 年 7 卷 2200340 页	2022-07-01	肖渊	肖渊	肖渊、牛明远、杨磊鹏、刘进超、吕晓来、杨鹏程	是
4	静电纺碳纳米管电阻式柔性湿度传感器的制备及其性能	纺织学报	代阳, 杨楠楠, 肖渊	2021 年 42 (06) 卷 51-56 页	2021-06-15	代阳	代阳	代阳、杨楠楠、肖渊	是
5	3D Printing of Carbon Nanotube (CNT)/Thermoplastic Polyurethane (TPU) Functional Composites and Preparation of Highly Sensitive, Wide-range Detectable, and Flexible Capacitive Sensor Dielectric Layers via Fused Deposition Modeling (FDM)	Advanced Materials Technologies	Yang Leipeng, Liu Xin, Xiao Yuan, Zhang Yongyan, Zhang Gaiping, Wang Yuping	2023 年 8 (7) 卷 202201638 页	2023-04-01	杨磊鹏, 肖渊	杨磊鹏	杨磊鹏、刘鑫、肖渊、张永燕、张改萍、王玉平	是

6	织物基柔性器件喷射打印成形技术	中国纺织出版社有限公司	肖渊	ISBN: 9787518089888	2021-10-01	肖渊	肖渊	肖渊	是
承诺： 该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的作者的同意，其中，未列入项目主要完成人的第一作者、通讯作者（含共同第一作者、共同通讯作者）已出具知情同意书面签字意见，与其他作者的有关知情证明材料均存档备查。因未如实告知上述情况而引起争议，且不能提供相应存档备查的证据，本人愿意承担相应责任，并接受处理。									

六、 主要完成人情况：

主要完成人：（依次列写完成人姓名）

排名	姓名	技术职称	行政职务	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
1	肖渊	教授	副院长(主持工作)	西安工程大学	西安工程大学	项目立项，代表作1-6的主要完成人。 (1) 针对创新点1,提出了织物表面微滴喷射打印原电池置换柔性导电路径直接成形新方法；(2) 针对创新点2,提出织物金属银电极打印成型方法；(3) 针对创新点3,确立了织物基可穿戴柔性器件制造与功能集成方法。
2	杨磊鹏	讲师	无	西安工程大学	西安工程大学	代表性论文1-3、5的主要完成人。(1) 针对创新点1,明确了织物基底成型金属银颗粒的影响因素,提出了在织物基底导电路径喷射打印成型方法,实现了多因素耦合织物基导电路径喷射打印成型；(2)

						针对创新点 2，明确了成型织物金属银电极各种参数间相互作用的关系，揭示了多参数耦合作用下织物基柔性电极成形机械及电学性能最佳匹配规律；（3）针对创新点 3，建立了“织物电极-摩擦敏感层”结合方式增强织物基能量收集装置的性能调控方法。
3	杨鹏程	副教授	系主任	西安工程大学	西安工程大学	代表性论文 3 的主要完成人。针对创新点 2，建立了织物金属银电极性能分析及成型电极数值模型，明确了银颗粒粒子分布密度对电极性能影响规律。
4	代阳	讲师	无	西安工程大学	西安工程大学	代表性论文 4 的主要完成人。针对创新点 3，阐明了双导电相协同作用改善复合材料压阻特性的调控方法。
5	童垚	无	无	西安工程大学	西安工程大学	代表性论文的 2 主要完成人。针对创新点 3，系统研究了织物基柔性电容压力传感器结构及性能调控。

七、 主要完成单位情况：

主要完成单位：（依次列写完成单位名称）

排 名	完成单位	贡 献
1	西安工程大学	西安工程大学是本项目的主要完成单位，本项目组主要成员所在的机电工程学院及科技处等单位在科

		研工作安排、研究条件、实验检测设备、技术支持和人员配备等方面给予了大力的支持，确保了项目的提前完成并在理论上和实际应用等方面均取得了显著的成绩，其主要贡献如下：1. 负责项目的管理和监督等工作；2.开放与项目实验研究开展相关的实验设备及设施；3. 人力、物力、财力等方面的支持。
--	--	---

八、 完成人合作关系说明（**合作方式**包括专著合著、论文合著、共同立项、共同知识产权、共同获奖、共同参与制定标准规范、产业合作等。下表中的“项目排名”指在本次报奖中的完成人排序。）

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	合作成果名称
1	论文合著	杨磊鹏/二	2020.9-2023.4	代表作 1-3， 5
2	论文合著	杨鹏程/三	2015.1-2023.4	代表作 3
3	论文合著	代阳/四	2019.1-2023.4	代表作 4
4	论文合著	童垚/五	2021.9-2023.4	代表作 2