

## 科学技术进步奖公示内容

一、 项目名称：柔性器件及供电技术与应用

二、 提名者及提名意见（包含提名等级）：陕西省教育厅，2025 年  
陕西省科学技术进步奖二等奖

柔性器件及供电技术与应用隶属于电气工程、控制科学与工程、计算机科学与技术、生物医学工程等学科的交叉领域，立足智能可穿戴电子设备柔性电能供给的瓶颈问题，从柔性材料、集成技术以及储能技术研究入手，构建与之对应的数学模型，提出相关的先进控制理论，实现了稳健的电能变换与传输。该研究工作先后得到了国家自然科学基金项目和省部级自然科学基金基础研究计划项目的持续资助。该项目成果中所开发的智能可穿戴电子设备柔性供电技术相关产品获得陕西省秦创原春种基金资助，项目落地陕西省秦创原（咸阳）创业湾，获得企业实际推广应用。该成果面向生物医疗和智能可穿戴设备的重大战略需求，具有前瞻性，研究起点高、理论创新性强，获得了国内外同行的广泛认同与肯定，在柔性器件及供电技术与应用研究方面起到了引领与示范作用。依托该项目出版陕西省优秀教材特等奖教材 1 部（《供电技术（第五版）》），授权国家发明专利 5 件，发表高水平 SCI 期刊论文 4 篇。培养了电力电子和电力系统领域的硕士研究生 10 名，博士研究生 3 名。我单位认真审阅了该推荐材料及完成人资格，项目申报材料真实完整、齐全规范，无知识产权纠纷，项目完成单位人员排序无异议，符合陕西省科学技术进步奖提名条件。提名该项目

为 2025 年陕西省科学技术进步奖二等奖。

### 三、 项目简介：

柔性器件及供电技术与应用研究隶属于电气工程、控制科学与工程、计算机科学与技术、生物医学工程等学科的交叉领域，立足智能可穿戴电子设备柔性电能供给的瓶颈问题，从柔性材料、集成技术以及储能技术研究入手，构建与之对应的数学模型，提出相关的先进控制理论，实现了稳健的电能传输。

### 四、 客观评价：

根据（1）教育部科技查新工作站 2025 年 08 月提供的-科技查新报告，本成果的客观评价阐述如下：

智能可穿戴电子设备是目前治疗心脑血管疾病和骨科疾病最有效的手段之一。该研究成果实现了柔性材料的有效集成。采用功耗低、开关比高、保持性好等无机铁电场效应晶体管的优点，也兼具柔性耐弯折的特点，在反复弯折和高温条件下仍能保持良好的 FeFET 电学性能。这项工作证明了云母作为一个通用平台的巨大潜力，为柔性 FeFET 在下一代低功耗、耐高温柔性电子产品中的应用提供了新的选择。

该研究成果中提出了一种 p-GaN 欧姆复合漏极反向阻断高电子迁移率柔性晶体管（RB-HEMT）结构。与传统的 p-GaN HEMT 相比，RB-HEMT 的正向和反向阻断电压分别为 1116 V 和 1056 V，在高温下仍保持良好的反向阻断能力。所提出的 p-GaN 欧姆复合漏极结构能够显著提高反向阻断能力并改善柔性功率器件的输出性能。

该研究成果中实现了柔性材料的有效储能和高自由度电能变换。 $\text{Ru-RuO}_2$  复合材料可用作有效的柔性、可充电锌-空电池阴极催化剂。形成  $\text{Ru-RuO}_2$  异质结可有效提高金属  $\text{Ru}$  的表面电荷密度，使  $d$  态更接近费米能级，从而提高其固有电催化活性。异质结对开发高效率电催化剂具有重要的意义，进而用于各种新能源技术。采用石墨烯材料很大程度上提高了电能变换器的功率密度，减小了电能变换机构的体积和重量，可以实现可赋形供电，提高了供电的自由度。

该研究成果中实现了智能可穿戴电子设备的稳健电能变换。构建了能量平衡瞬态模型和非线性自适应变频单周期控制系统模型，对智能可穿戴电子设备电能变换器的电压和电流质量、开关损耗、暂态响应特性等方面开展了深入研究，取得了对外界干扰快速抑制的效果。该项目的研究成果已应用于智能可穿戴电子设备并取得了稳健的输出电压和输出功率控制效果。

本研究工作依托 1 项国家自然科学基金项目和 1 项省级自然科学基金计划项目，获得国家发明专利授权 5 件，核心的 4 篇代表作包括 *Nano Energy* (影响因子: 17.6)、*IEEE Transactions on Power Electronics* (影响因子: 7.20)、*Applied Physics Letters* (影响因子: 4.0)、*IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems* (影响因子: 5.30) 等电气工程和材料科学与工程类知名期刊。出版论著《供电技术(第五版)》一部，被选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。2022 年获得陕西省优秀教材特等奖。

他引论文包括电气工程、材料科学与工程、控制科学与工程领域

权威期刊 ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS、CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL、ADVANCED MATERIALS、ACS NANO、IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS、IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS 等，项目研究成果得到了国内外专家学者的一致认可。

## 五、 应用情况：

柔性电子（Flexible Electronics）是将有机或无机材料电子器件制作在柔性或可延性基板上的新兴电子技术。与传统电子相比，柔性电子具有更大的灵活性，在弯曲、折叠、拉伸、扭曲、压缩甚至变形成任意形状的形态下，依然可以保持高效的光电性能、可靠性和集成度。由此制成的柔性电子器件具备柔软、轻薄、便携、可大面积应用的特性，极大扩展了电子器件的适用范围和适用环境。

柔性电子技术可以和人工智能、泛物联网、健康科学和数据科学等关键核心科技深入交叉融合，进而引领健康医疗、信息科技、航空航天、先进能源等领域的创新变革，带动相关产业实现全新跨越式发展。可以说，柔性电子技术是一场全新的电子技术革命，是我国自主创新引领未来产业发展的重要战略机遇。主要应用于：（1）柔性电子显示屏和柔性储能；（2）柔性医疗电子；（3）柔性印刷电路板；（4）竞技体育。

基于本项目研究成果，开发了可穿戴电子设备柔性供电设备，通过医疗电子设备公司的检验与初步应用，达到设计供电参数需求。在本项目研究开发初期，西安理工大学与中科院深圳先进技术研究院、

西湖大学、西安交通大学、重庆医科大学等单位合作开展了智能可穿戴电子设备柔性供电中试样机的推广应用，先后在领充新能源科技有限公司、西安蓝海潜龙智能科技有限公司等单位试用。获得了陕西省秦创原春种基金创新链前端环节科技成果支持转化，促进先进供电关键技术开发并推动产品上市。入驻陕西省秦创原创业湾，实现了项目落地。本项目研究成果在智能可穿戴电子设备、柔性显示屏、智能机器人等领域的柔性电能供给方面获得了市场的认可以及客户的应用。

主要知识产权和标准规范等目录：（限 10 条，所列专利证书颁发日期、标准规范发布日期、论文发表日期应在 2024 年 12 月 31 日之前。）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	国家发明专利	基于开关电容变换器 LED 照明驱动系统的变频恒流控制方法	中国	ZL201810258820.9	2020-07-28	3907637	西安理工大学	杨磊；于文倩；杨曦；张嘉翔；同向前
2	国家发明专利	电场耦合式无线电能传输系统的周期性往复流动方法	中国	ZL202010738628.7	2022-06-03	5204318	西安理工大学	杨磊；马力；简家乐；王哲；张元启
3	国家发明专利	高储能密度、高储能效率的 AFE 电容器的制备、反铁电薄膜层及制备、柔性 AFE 电容器	中国	ZL202011241618.9	2022-10-21	5527406	中国科学院深圳先进技术研究院	钟高阔；李江宇；陈骞鑫；任传来；张园
4	国家发明专利	可同时提高储能密度与储能效率的层状复合弛豫铁电材料及其制备方法	中国	ZL202110736742.0	2023-06-20	6072896	中国科学院深圳先进技术研究院	钟高阔；陈骞鑫；李江宇；黄明强；任传来；安峰；张园
5	国家发明专利	具有超晶格结构和超高储能效率的多组分弛豫铁电薄膜材料及其制备方法	中国	ZL202110739598.6	2023-03-31	5836455	中国科学院深圳先进技术研究院	陈骞鑫；钟高阔；李江宇；钟向丽；黄明强；王金斌；任传来

6	期刊论文	Epitaxial array of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanodots for high rate high capacity conversion type lithium ion batteries electrode with long cycling life	中国	2020, 74, 1048-1076	2020-05-04	Nano Energy	中国科学院深圳先进技术研究院	Gaokuo Zhong; Ke Qu; Chuanlai Ren; Yong Su; Bi Fu; Mengfei Zi; Liyufen Dai; Qun Xiao; Jun Xu; Xiangli Zhong; Feng An; Mao Ye; Shanming Ke; Shuhong Xie; Jinbin Wang; Peng Gao; Jiangyu Li
7	期刊论文	Dynamic Capacitor Ampere-Second Balance Transient Calculation Modeling Method for Switched-Capacitor Converters	中国	2018, 33(10):8916-8926	2018-10-01	IEEE Transactions on Power Electronics	西安理工大学	Lei Yang; Bin Wu; Xiangqian Tong; Keyue Ma Smedley; Guann-Pyng Li
8	期刊论文	Flexible electronic synapse enabled by ferroelectric field effect transistor for robust neuromorphic computing	中国	2020, 117, 092903	2020-09-02	Applied Physics Letters	中国科学院深圳先进技术研究院	Gaokuo Zhong; Mengfei Zi; Chuanlai Ren; Qun Xiao; Mingkai Tang; Liyu Wei; Feng An; Shuhong Xie; Jinbin Wang; Xiangli Zhong; Mingqiang Huang; Jiangyu Li

9	期刊论文	Single Wire Capacitive Wireless Power Transfer System for Wearable Biomedical Sensors Based on Flexible Graphene Film Material	中国	2022, 16(6):1337-1347	2022-12-01	IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems	西安理工大学	Lei Yang; Baoxiang Feng; Yuanqi Zhang; Xiaojie Li; Liqiang Zhang; Xinze Chen; Jiarui Nie; Haibing Wen; Jiaqiang Tian; Jiale Jian; Jingjing Huang; Darui Zhu; Aimin Zhang; Xiangqian Tong; Liaoyong Wen
10	论著	《供电技术》	中国	第五版, ISBN: 978-7-111-58025-6	2017-10-01	机械工业出版社	西安理工大学	同向前; 余健明; 苏文成
<p>承诺: 上述知识产权无争议且为本项目独有, 未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年其他省部级(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权利人(专利发明人)的同意, 有关知情证明材料均存档备查。</p>								

## 六、 主要完成人情况:

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	杨磊	副教授	院长助理	西安理工大学	西安理工大学	担任该研究成果的第一完成人和总负责人, 负责总的学术思想和理论体系构建。重点研究了

						柔性电能变换器建模理论、控制策略，推导了基于非线性变频单周期控制等先进控制理论，开发了柔性电能变换与供电技术。
2	钟高阔	副研究员		中国科学院深圳先进技术研究院	中国科学院深圳先进技术研究院	担任该研究成果的第二完成人，负责柔性供电材料的开发与设计。重点研究了柔性电子器件的材料制作和集成方法。
3	同向前	教授	学科带头人	西安理工大学	西安理工大学	负责总体指导工作。重点研究了柔性电能变换器电路与控制策略与电能质量。
4	赵航	工程师	市场营销部副主任	国网陕西省电力有限公司咸阳供电公司	国网陕西省电力有限公司咸阳供电公司	负责柔性电能变换器的实验测试以及市场推广工作，并在项目的实施应用中做出了突出贡献。
5	赵焱澎	讲师	储能科学与工程研究所长	西安理工大学	西安理工大学	负责基于异质机构的高性能反向阻断柔性宽禁带功率器件设计方法的研究工作，开展了柔性功率器件建模方法以及老化机理的研究工作。
6	文海兵	讲师		西安理工大学	西安理工大学	负责电能变换以及无线供电系统硬件设计工作，开展了柔性供电技术在智能可穿戴设备上的实验验证工作。
7	孙运杰	高级工程师	技术总监	领充新能源科技有限公司	领充新能源科技有限公司	负责柔性电能变换器性能特性测试和市场推广工作，并在项目的实施应用中做出了重要贡



						献。
--	--	--	--	--	--	----

## 七、 主要完成单位及创新推广贡献：

排 名	完成单位	创新推广贡献
1	西安理工大学	西安理工大学是《柔性器件及供电技术与应用》项目的依托单位和主要完成单位，是第一完成人、第三完成人、第五完成人和第六完成人所在单位，负责该项目的总体计划与实施。主要承担了该研究成果的规划、实施、项目转化和推广等全程各个环节的工作。学术贡献在于提出了柔性电能变换器拓扑和控制技术，解决了柔性电能变换器市场化应用的难题，彻底降低了智能可穿戴电子设备的供电成本，为该项目的完成奠定了理论基础，提供了技术支撑。
2	中国科学院深圳先进技术研究院	中国科学院深圳先进技术研究院是《柔性器件及供电技术与应用》项目的依托单位和主要完成单位，是第二完成人所在单位，负责该项目的总体计划与实施。主要承担了该研究成果的柔性导电材料、柔性功率器件的设计研究工作。学术贡献在于提出了柔性功率器件的设计与制备方法，为该项目的完成奠定了理论和实践基础，提供了技术支撑。
3	国网陕西省电力有限公司 咸阳供电公司	国网陕西省电力有限公司咸阳供电公司是《柔性器件及供电技术与应用》项目的依托单位和主要完成单位，是第四完成人所在单位，负责该项目的实验验证以及总体检测工作。
4	领充新能源科技有限公司	领充新能源科技有限公司是《柔性器件及供电技术与应用》项目的依托单位和主要完成单位，是第七完成人所在单位，负责该项目的市场运营工作。

## 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	合作起始时间	合作完成时间	合作成果名称
1	共同发表文章	杨磊/1, 钟高阔/2	2019.01	2023.04	文章标题 : Significantly enhanced energy storage density and efficiency in flexible Bi <sub>3.15</sub> Nd <sub>0.85</sub> Ti <sub>3</sub> O <sub>12</sub> thin film via periodic dielectric layers , 见附件 F3-6-1
2	共同立项	杨磊/1, 同向前/3, 赵航/4, 赵垚澎/5, 文海兵/6	2019.01	2023.03	项目名称: 无线电能传输系统兼容供电及能效提升关键技术研究, 见附件 F3-6-2
3	共同发表文章	杨磊/1, 同向前/3, 赵垚澎/5, 文海兵/6	2019.12	2022.7	文章题目 : Review of Topologies, Application Areas, Modeling, and Control Methods for Switched Capacitor Circuits, 见附件 F3-6-3
4	共同发表文章	杨磊/1, 赵航/4	2018.7	2023.6	文章题目: 磁耦合谐振式无线电能传输系统变电容调谐控制方法研究, 见附件 F3-6-4
5	共同申请专利	杨磊/1, 赵航/4	2018.7	2023.6	专利名称: 基于磁耦合谐振式无线电能和信号分时传输方法, 见附件

					F3-6-5
6	共 同 立项	杨磊/1，孙运杰/7	2019.12	2023.12	项目名称: 面向新型电力系统的低压台区柔性装置、及控制系统关键技术开发及设备研制项目, 见附件 F3-6-6

**注意:** 专家提名项目还应公示提名专家的姓名、工作单位、职称和学科专业。