

陕西省自然科学奖公示信息

(2026年度)

一、项目基本情况

项目名称	挠曲电智能材料与器件的力学设计理论及研制
主要完成人	申胜平，梁旭，邓锋，文馨，尚红星，邓谦
主要完成单位	西安交通大学

二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	中共陕西省委军民融合发展委员会办公室	提名等级	☒ 一等奖 ☐ 二等奖及以上
提名意见： 该项目属于电介质固体力学的基础和应用基础研究，在国家自然科学基金委杰出青年基金、国家重点研发计划等项目资助下，建立了挠曲电驻极体理论与分析方法，将弹性材料的本征挠曲电系数提升了两个量级，拓展了力电耦合材料的设计与应用边界；提出通过褶皱变形在非极性材料中引入特殊极化拓扑结构的力学调控方法，实现了基于挠曲电效应的结构智能化设计，为设计高灵敏度力电耦合器件奠定了结构基础；建立了力电耦合换能器设计新方法，研制出挠曲电曲率传感器和水听器，突破了传统器件无法直接测量曲率和压电水听器低频灵敏度难以提升的瓶颈。该项目理论、计算与实验并重，从材料构筑、结构设计到器件创制，全方位揭示了挠曲电效应对智能材料与器件设计的变革，提出了挠曲电驻极体的新概念和挠曲电效应调制极化结构的新方法，破解了高阶物理量无法直接测量的长期难题，推动了挠曲电效应从微弱发展成解决痛点的必需手段，为智能材料与器件发展拓展了新的科学途径。 我单位认真审阅了该项目推荐书及附件材料，确认全部材料真实有效。鉴于该项目创新性研究成果突出，提名该项目为陕西省科学技术（自然科学）奖一等奖。 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。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。			

三、项目简介

该项目属于电介质固体力学的基础和应用基础学科领域。

智能材料与器件是连接物理世界与数字世界的核心桥梁，是数智时代的战略基石。力电耦合效应是其感知物理世界构建数字世界的科学基础与关键技术支撑，挠曲电效应是实现力电耦合的普适途径。数智时代对力电耦合智能材料与器件的感知能力提出了泛在、多维、高阶等全新要求，如对变形的方向、分布及模式进行全域精密实时测量感知，并实现物理信息在结构中的可控传递。项目组利用挠曲电效应突破传统力电耦合材料（如压电材料）体系限制，在任意介电材料中构筑强力电耦合效应，在非极性材料中调制极化拓扑结构，开辟了结构智能化的全新途径，为泛在感知提供了材料与结构基础；建立了智能器件设计新方法，破解了曲率和声压梯度等高阶物理量难以直接测量的长期难题。主要科学发现如下：

（1）建立了挠曲电驻极体理论与分析方法，拓展了智能材料设计与应用边界。

柔性机器人、可穿戴电子及人机交互界面等领域要求材料兼具柔性和对外部刺激（力场、电场）快速响应的能力，自然界中满足此类要求的材料极其稀缺。挠曲电效应有望突破这一瓶颈，但宏观材料中挠曲电效应普遍微弱，严重制约了其实际应用，亟需在宏观材料中增强挠曲电效应。该项目提出利用应变梯度打破电极化宏观对称状态的理论与方法，研制出挠曲电驻极体，**将其本征挠曲电系数提升 100 倍**，实现宏观尺度挠曲电效应的增强，解决了挠曲电系数小而难以应用的难题，美国物理学会物理评论中心和英国物理学会 Physics World 先后专题报道评价为“**具有超越挠曲电领域的影响力**”、“**能开创新一代柔性传感、驱动和俘能器**”；被美国工程院院士 LQ Chen 等评价为“**开启了挠曲电驻极体的概念**”。挠曲电效应是一种高阶效应，应变梯度使其难以求解。为此发展了混合有限元方法，揭示了挠曲电驻极体的机理，为挠曲电效应问题提供通用求解手段，克服了传统有限元法不能精确求解挠曲电问题的瓶颈，被美国青年科学家与工程师总统奖、冯·米塞斯奖获得者、斯坦福大学 C Linder 教授等称为“**更合适的选择**”和“**杰出的方法**”。

（2）发现了挠曲电效应调制极化拓扑结构的机制，开辟了结构智能化新途径。

柔性机器人、可穿戴电子及人机交互等领域对变形的多维感知，目前主要依靠外置传感器进行离散测量与信号重构，不仅存在结构刚度不匹配的问题，还难以实现对复杂变形的全场、实时表征。极化拓扑结构可精确表征变形的方向、分布及模式，并实现物理信息可控传递。然而，当前构筑极化拓扑结构主要集中在铁电体系，使得材料选择严重受限，且难以满足宽温域稳定性需求。该项目发现应变梯度在空间的连续变化会产生显著极化响应，从“应变梯度空间分布”角度揭示挠曲电效应的调控机制，即通过构造具有特定波数特征的应变梯度场，实现对极化分布的精细调控。提出了通

过褶皱变形在非极性材料中诱导极化拓扑结构的力学调控方法，揭示了极性结构的演化规律，突破了极化拓扑结构对铁电体系的依赖，开辟了基于挠曲电效应的结构智能化新途径，为超高灵敏传感和柔性电子器件研制奠定基础。被中国科学院院士南策文等评价为“为调控极性开辟了新的自由度”，被欧洲科学院院士 KM Liew 等评价为“成为超高灵敏传感和柔性电子器件的理想选择”。该发现点论文入选 ESI 高被引论文。

(3) 提出了挠曲电智能器件设计方法，破解了高阶物理量无法直接测量的难题。弯曲是可穿戴电子、柔性机器人以及人机交互界面等领域关键结构部件的主要变形模式，直接准确感知弯曲变形是精确捕捉变形和动作的关键技术路径。直接准确测量声压（压力）梯度则是精确确定激励方向和重构激励场的关键。但常用的压电效应中电荷与应变成正比，难以直接测量弯曲或压力梯度。直接准确测量弯曲变形和压力梯度是该领域的长期核心难题之一。该项目建立了电介质微梁的机电耦合理论模型，揭示了挠曲电效应对换能效率、输出电压和功率的影响规律，发现其能显著提高器件的机电耦合性能和响应。建立了挠曲电结构中输出电信号-曲率-外载荷之间线性正比关系，基于此提出挠曲电智能器件的设计新方法，研制出挠曲电曲率传感器和矢量水听器，破解了曲率和声压梯度等高阶物理量无法直接测量的长期难题。挠曲电水听器经国防科技工业水声一级计量站校核标定，**低频声压灵敏度超过国际最先进水平 10 分贝**，并进行了海试，**突破了压电水听器无法直接定向、低频灵敏度难以提高的瓶颈**。获 IOP 2020 年中国学者高被引论文奖。

该系列研究促进了力学、物理、材料等学科的交叉融合，系统揭示了挠曲电效应对智能材料与器件设计的变革，推动了挠曲电效应从微弱发展为解决痛点的必需手段，拓展了挠曲电智能材料与器件的力学设计新途径，为数智时代科技发展提供科学基础与关键技术支撑。项目 5 篇代表性论文发表在物理学旗舰期刊 Phys. Rev. Lett. (2 篇)，应用力学旗舰期刊 ASME J. Appl. Mech., Smart Mater. Struct., 和 Int. J. Appl. Mech. 等刊物上，被 35 个国家和地区同行在 Nat. Nanotechnol.、Prog. Mater. Sci.、PNAS、Phys. Rev. Lett. 等刊物他引 414 次。中国科学院院士郭万林教授在为代表性论著 6 撰写的序言中指出“该书是我国第一部关于挠曲电效应的专著...为新器件设计以及可靠性分析提供了理论基础和新思路”。代表作 3 入选 ESI 高被引论文，代表 5 获 IOP 2020 年中国学者高引论文奖，项目培养的学生中有 3 人获陕西省优秀博士学位论文。项目第一完成人获 ICCES Distinguished Fellow，担任 ASME J. Appl. Mech.、Acta. Mech. Sin. 副主编及多个期刊的编委，连续入选爱思唯尔中国高被引作者。应邀在多个期刊发表综述和展望论文，并发起每年一届的挠曲电理论与应用国际会议。

四、客观评价

该项目 6 篇代表作发表在 PRL 等权威期刊上，出版了首部挠曲电效应的中文专著，被 35 个国家和地区同行在 Nat. Nanotechnol.、Prog. Mater. Sci.、PNAS、PRL 等刊物他引 414 次。项目培养的学生中有 3 人获陕西省优秀博士学位论文，代表作 3 入选 ESI 高被引论文，代表作 5 获 IOP2020 中国学者高被引论文奖。应邀在多个期刊发表综述或展望论文，第一完成人获 ICCES Distinguished Fellow。

1. 发现点 1“开启了挠曲电驻极体概念”，“具有超越挠曲电研究领域的影响力”

代表作 1 被 Phys. Rev. Lett. 选为“Featured in Physics”，被美国物理学会 APS 物理评论中心专题报道，认为该发现点为增强聚合物材料的挠曲电效应提供了全新有效的设计思路，为宏观尺度应用挠曲电效应提供了可能性，**具有超越挠曲电研究领域的影响力，将激起相关研究。**

英国物理学会 IOP 的 Physics World 以“新‘挠曲电驻极体’材料弯曲能产生高电压”为题作为研究亮点对代表作 1 进行了专题报道，指出代表作 1 研制的挠曲电驻极体**能开创新一代柔性传感、驱动和俘能器。**

美国工程院院士、欧洲科学院院士 LQ Chen 教授等在综述 (Appl. Phys. Rev 8: 041327, 2021) 指出：“...弯曲时挠曲电性显著增强且可调，**开启了挠曲电驻极体的概念（代表作 1）**” (opening the concept of flexoelectrets)。

美国工程院院士、ASME J. Appl. Mech. 主编 P Sharma 教授等在论文 (PNAS, 118: 21, 2021) 中指出代表作 1 在微米尺度实现了强挠曲电效应。

中国科学院院士、南京航空航天大学郭万林教授在论文 (Extr. Mech. Lett. 2022, 52: 101669) 中采用代表作 1 解释二硫化钼挠曲电系数的厚度依赖性。

国际计算力学学会会士，西班牙加泰罗尼亚理工大学 I Arias 教授等在论文 (J. Mech. Phys. Solids 157: 104643, 2021) 指出：“(代表作 1) 在柔性材料引入电荷使毫米级厚样品中能够产生相当大的双向类挠曲电响应”。

美国工程院院士、无网格方法先驱之一 SN Atluri 教授在系列论文中引用代表作 2 作为数值求解挠曲电问题的代表，在论文 (J. Mech. Mater. Struct. 16: 197-223, 2021) 中 2 处引用代表作 2 的结果来验证其所发展挠曲电效应无网格方法。

欧洲科学院院士、德国魏玛-包豪斯大学 T Rabczuk 等在系列论文肯定代表作 2 发展了挠曲电混合有限元法，在综述 (Energies 13: 1326, 2020) 中 10 次引用代表作 2，指出其提出了系列混合单元，并把这些单元列在表 3 中作为典型算法。

美国青年科学家与工程师总统奖 (PECASE)、冯·米塞斯奖获得者、斯坦福大学 C Linder 教授等在系列论文引用代表作 2，并作为其研究基础；在论文 (J. Appl. Mech. 91, 011007, 2024) 指出混合有限元方法是模拟挠曲电效应**更合适的选择。**

欧洲科学院院士、斯洛伐克科学院院士 J Sladek 教授等在系列论文引用代表作 2，在论文 (Compos. Struct. 204: 105-113, 2018) 中指出：“...这是一个困难的任务。最近，(代表作 2) 开发了一种混合有限元法...”。

德国波鸿鲁尔大学 S Kozinov 教授等在系列论文引用代表作 2，并作为其研究基础和结果的验证标准；在论文 (Comput. Mech. 73, 203-1217, 2024) 指出“(代表作 2

等)混合有限元方法是被采用和测试过的求解挠曲电效应的杰出方法”。

2. 发现点 2 被称为“极具前景的途径”、“在探索极性拓扑结构方面潜力巨大”

中国科学院院士南策文,美国工程院院士 LQ Chen 等多篇论文中大篇幅引用代表作 3,在论文 (Acta Mater. 288: 120805, 2025) 指出:“弯曲薄膜为调控极性开辟了新的自由度...还可借助挠曲电效应产生诸如斯格明子和麦韧等独特极化拓扑结构”。在综述 (Prog. Mater. Sci. 153: 101489, 2025) 指出代表作 3 提出了挠曲电效应调控极化拓扑结构的力学方法。

中国科学院院士常凯等在论文 (Nano Lett. 25: 17988-17996, 2025) 4 次引用代表作 3,指出:“斯格明子织构的调控与构筑是基础研究关键所在。挠曲电效应为构建极性斯格明子图案提供了极具前景的途径”,“(代表作 3 等)与我们实验结果高度吻合,凸显挠曲电效应调控在极性斯格明子涌现中起关键作用”。

亚洲铁电协会主席、香港理工大学 JY Dai 教授等在系列论文中引用代表作 3,并在论文 (Adv. Funct. Mater. 35: 2416311, 2025) 中指出:“...表明这种无需外加电场的力学方法在探索极性拓扑结构方面的巨大潜力”“...结构波纹和褶皱对其局域力学与力电能量分布以及极化有序性具有显著影响”。

欧洲科学院院士、香港城市大学 KM Liew 教授等在论文 (ACS Appl. Mater. Interfaces 17: 17622-17635, 2025) 引用代表作 3 指出:“...观察到薄膜中四种褶皱图案间的相变...成为超高灵敏传感和柔性电子器件的理想选择”。

中国科学院院士郭万林教授在代表作 6 的序言中指出“该书是我国第一部关于挠曲电效应的专著,丰富和发展了智能材料和结构力学的基本理论,为挠曲电材料与结构的性能表征,新器件设计以及可靠性分析提供了理论基础和新思路”。

3. 发现点 3 建立了挠曲电器件设计新方法,破解高阶物理量无法直接测量难题

中国科学院院士郑泉水教授等在综述论文 (Sci. China-Phys. Mech. Astron. 61: 074601, 2018) 中把代表作 4 列为微梁中考虑挠曲电效应的代表之一。

ASME Koiter 获得者、应变梯度弹性理论奠基人之一 EC Aifantis 教授等在论文 (J. Mech. Behav. Mater. 24: 121-127, 2015) 中将代表作 5 作为微梁研究进展之一,指出:“(代表作 4)分析了介电梁尺寸相关行为并讨论了电场-应变梯度耦合”。

欧洲科学院院士 CZ Zhang、J Sladek 教授等在 10 余篇论文中引用代表作 4,基于代表作 4 开展研究,在论文 (Int. J. Solids Struct. 113: 1-9, 2017) 中 3 次引用代表作 4,并以其结论作为佐证。

美国工程院院士、欧洲科学院院士、宾州州立大学 LQ Chen 教授等在综述文章 (Prog. Mater. Sci. 106: 100570, 2019) 中引用代表作 1 和 5,其中 2 次引用代表作 5,指出其研究了挠曲电效应对介电梁的传感特性的影响。

美国路易斯安娜理工大学 H Salehi 教授等在论文 (Appl. Mater. Today 37, 102092, 2024) 中指出代表作 5 为挠曲电器件的设计提供了极具价值的信息。

所研制的矢量水听器经国防科技工业水声一级计量站校准标定,声压灵敏度达 163 分贝,比国际最先进产品 B&K 8105 提升 10 分贝。

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	通讯 作者	第一 作者	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	Flexoelectret: An Electret with a Tunable Flexoelectric-like Response	Physical Review Letters	Xin Wen, Dongfan Li, Kai Tan, Qian Deng, Shengping Shen	2019, 122:148001	2019-04-12	Qian Deng, Shengping Shen	Xin Wen, Dongfan Li	文馨, 李东藩, 谭楷, 邓谦, 申胜平	102	Scopus	是
2	Mixed Finite Elements for Flexoelectric Solids	Journal of Applied Mechanics	Feng Deng, Qian Deng, Wenshan Yu, Shengping Shen	2017, 84:081004	2017-06-14	Qian Deng, Shengping Shen	Feng Deng	邓锋, 邓谦, 郁文山, 申胜平	113	Scopus	是
3	Mechanical Control of Polar Patterns in Wrinkled Thin Films via Flexoelectricity	Physical Review Letters	Hongxing Sheng, Huiting Dong, Yihan Wu, Feng Deng, Xu Liang, Shuling Hu, Shengping Shen	2024, 132:116201	2024-03-14	Xu Liang, Shengping Shen	Hongxing Sheng	尚红星, 董惠婷, 吴宜涵, 邓锋, 梁旭, 胡淑玲, 申胜平	46		是

4	Size-dependent piezoelectricity and elasticity due to the electric field-strain gradient coupling and strain gradient elasticity	International Journal of Applied Mechanics	Xu Liang, Shengping Shen	2013, 5(2): 1350-1355	2013-04-30	Shengping Shen	Xu, Liang	梁旭, 申胜平	87	Scopus	是
5	Nanoscale mechanical energy harvesting using piezoelectricity and flexoelectricity	Smart Materials and Structures	Xu, Liang, Shuling Hu, Shengping Shen	2017, 26:035050	2017-02-21	Shengping Shen	Xu, Liang	梁旭, 胡淑玲, 申胜平	66	Scopus	是
6	挠曲电理论及应用	科学出版社	申胜平, 梁旭, 邓谦	2022	2022-10-01		申胜平	申胜平, 梁旭, 邓谦	0		是
合 计										414	/
补充说明（视情填写）： 代表性论著 6 为专著，无通讯作者，无数据库检索他引。											

六、主要完成人情况表

姓 名	申胜平	排 名	1
行政职务	航天航空学院院长		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 代表性论著 1-6 主要学术思想的提出者，对科学发现点 1、2 和 3 均具有创造性贡献。建立了挠曲电驻极体理论与分析方法，拓展力电耦合材料设计与应用边界；发现了挠曲电效应调控极化拓扑结构的机制，开辟了结构智能化新途径；提出了挠曲电智能器件设计方法，破解了高阶物理量难以直接测量的难题。			

姓 名	梁旭	排 名	2
行政职务	科研院基地与成果评价处副处长		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献：代表性论著 3、4、5 的共同通讯作者或第一作者，代表性论著 6 的共同作者，对科学发现点 2 和 3 做出了创造性贡献，提出了利用褶皱变形调控挠曲电极化的研究方案，并揭示了挠曲电效应对换能效率、输出电压和功率的影响规律，发现其能显著提高器件的力电耦合性能和响应。			

姓 名	邓锋	排 名	3
行政职务	无		

技术职称	助理教授
工作单位	西安交通大学
完成单位	西安交通大学
对本项目主要学术贡献： 代表性论著 2 的第一作者，代表性论著 3 的共同作者，对发现点 1 和 2 做出了创造性贡献，建立了考虑挠曲电效应和应变梯度效应的混合变分原理，揭示了挠曲电驻极体的机理，为复杂挠曲电效应问题的求解提供了通用数值方法。	

姓 名	文馨	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	助理教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 代表性论文 1 的第一作者，对发现点 1 做出了创造性贡献。设计和制备了挠曲电驻极体并表征了其力电性能，实验和数值验证了挠曲电驻极体可大幅提升介电弹性体的挠曲电效应，克服了弹性体挠曲电系数小而难以实际应用的难题。			

姓 名	尚红星	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	助理教授		
工作单位	杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）		
完成单位	西安交通大学		

对本项目主要学术贡献：

代表性论文 3 的主要贡献者和第一作者，对发现点 2 做出了创造性贡献。建立了挠曲电纳米薄膜的力电耦合理论，实验证实了在非极性薄膜中基于挠曲电效应调控极化拓扑结构的力学方法，突破了极化拓扑结构对极性材料体系的依赖。

姓 名	邓谦	排 名	6
行政职务	工程力学系副主任		
技术职称	教授		
工作单位	华中科技大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 代表作 1、2 的主要贡献者和通讯作者，代表作 6 的共同作者，对发现点 1 和 2 做出了创造性贡献。提出了挠曲电效应混合有限元方法数值验证的方案，建立了挠曲电驻极体的大变形力电耦合理论模型，为设计和制备挠曲电效应驻极体提供了理论基础。			

七、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
对本项目主要学术贡献： 本项目所有代表作主要学术思想的提出单位和完成单位，对所有发现点 1、2 和 3 做出了创造性贡献。主要发现点如下： 1) 建立了挠曲电驻极体理论与分析方法，将弹性材料的本征挠曲电系数提升了两个量级，拓展了力电耦合材料设计与应用边界；2) 提出通过褶皱变形在非极性材料中引入具有特殊极化拓扑结构的力学调控方法，实现了基于挠曲电效应的结构智能化设计，为设计高灵敏度力电耦合器件奠定了结构基础；3) 建立了力电耦合换能器设计新方法，研制出挠曲电曲率传感器和水听器，研制的器件经国防科技工业水声一级计量站校准标定，性能优于国际先进产品，突破了传统器件无法直接测量曲率和压电水听器低频灵敏度难以提升的瓶颈。作为本项目的组织单位和完成单位，本项目自 2010 年以来承担国家自然科学基金杰出青年基金项目、优秀青年基金项目、面上项目和国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项、相关成果发表在物理学旗舰刊物 <i>Phys. Rev. Lett.</i> 和应用力学旗舰刊物 <i>ASME J. Appl. Mech.</i>, <i>Smart Mater. Struct.</i>, <i>Int. J. Appl. Mech.</i> 等上，并出版挠曲电领域首部中文专著。	

完成人合作关系说明

本项目由西安交通大学独立完成。

第一完成人西安交通大学申胜平教授从 2010 年起一直从事电磁固体力学研究，形成了相关研究团队，提出了本项目的主要学术思想，是代表性论著 1-5 的通讯作者（共同通讯作者），代表性论著 6 的第一作者。完成人的合作关系如下：

第二完成人梁旭是代表性论著 4 和 5 的第一作者，代表性论著 3 的共同通讯作者，代表性论著 6 的合作者，在第一完成人的指导下形成了代表性论著 4 和 5，与第一完成人共同指导第三完成人和五完成人形成代表性论著 3。

第三完成人邓锋是代表性论著 2 的第一作者，代表性论著 3 的合作者，在第一完成人和第六完成人的共同指导下共同形成了代表性论著 2，在第一和第二完成人共同指导下与第五完成人合作形成了代表性论著 3。

第四完成人文馨是代表性论著 1 的共同第一作者，在第一完成人和第五完成人的指导下形成了代表性论著 1。

第五完成人尚红星是代表性论著 3 的第一作者，在第一和第二完成人共同指导下与第三完成人合作形成了代表性论著 3。

第六完成人邓谦是代表性论著 1 和 2 的共同通讯作者，代表性论著 6 的合作者，与第一完成人共同指导第四完成人形成了代表性论著 1，共同指导第三完成人形成了代表性论著 2。

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	申胜平/1, 文馨/4, 邓谦/6	2019-04-12	Flexoelectret: An Electret with a Tunable Flexoelectriclike Response	代表作 1
2	论文	申胜平/1, 邓锋/3, 邓谦/6	2017-06-14	Mixed Finite Elements for Flexoelectric Solids	代表作 2
3	论文	申胜平/1, 梁旭/2, 邓锋/3, 尚红星/5	2024-03-14	Mechanical Control of Polar Patterns in WrinkledThin Films via Flexoelectricity	代表作 3
4	论文	申胜平/1, 梁旭/2	2013-04-30	Size-dependent piezoelectricity and elasticity due to the electric field-strain gradient coupling and strain gradient elasticity	代表作 4
5	论文	申胜平/1, 梁旭/2	2017-02-21	Nanoscale mechanical energy harvesting using piezoelectricity and flexoelectricity	代表作 5
6	专著	申胜平/1, 梁旭/2, 邓谦/6	2022-10-01	挠曲电理论及应用	代表作 6