

2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

介质金属杂化超材料模态耦合及其性能调控研究

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

该成果围绕超材料在装备应用中异质结构及多物理场对其性能影响的基本科学问题，全面系统地研究了介质金属杂化基元电磁模态耦合行为，建立了外场、局域场叠加激励电磁耦合双阵子模型分析方法，揭示了杂化超材料多物理场激励下性能演化规律及调控机理。研究成果选题准确，研究起点高，理论上有所创新，发表的论文国内外引用率高，受到国内外学术界的高度认可，对相关研究有引领和示范作用，具有重要的学术价值和理论意义，对国家战略需求和经济社会发展具有重要的指导作用。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。特提名为陕西省自然科学奖一等奖。

三、项目简介

该项目属于材料学研究领域。

超材料是一种具有颠覆性电磁波操控特性的人工微结构材料，具有传统材料不具备超常媒质参数。超材料在通信、雷达装备中的应用对推动通信装备跨越式发展意义重大。超材料通过合理设计局域谐振的介质或金属微结构获得超常电磁特性。然而实际应用工况下装备内部异质结构多样、力/热环境复杂，与超材料的局域谐振模态耦合对其性能产生复杂非线性影响，使得高性能超材料应用面临装备兼容、环境适应性的巨大挑战。因而探究由复杂异质媒质构造的杂化超材料局域模态及其复杂耦合机制，揭示介质金属杂化超材料多种谐振模态及其复杂耦合对电磁性质的调控机理，发展对杂化超材料电磁模态及其耦合主动高效调控手段，建立介质金属杂化超材料模态及其复耦合调控的一体化设计方法对推动超材料在通信装备中的工程应用具有重要科学意义。

该项目在国家重点计划，国家自然科学基金项目持续资助下，围绕介质金属杂化超材料局域模态复杂耦合、多物理场作用对电磁性能非线性变化影响机制不清晰及如何对杂化超材料模态耦合进行主动调控等科学问题开展了系统深入研究，取得了具有重要科学意义和国际影响的创新性成果。重要的科学发现包括：

(1) 提出并阐明介质金属 LC/米氏谐振模态强度、相位复耦合调控机理，建立了介质金属杂化超材料模态复耦合电磁性质设计方法。提出低损耗高介电陶瓷颗粒基元电、磁米氏谐振耦合构筑类电磁感应透明效应调控电磁传播群延迟的方法，构建电、磁谐振模态耦合一体设计方法。提出并探究了金属基元、介质

基元超杂化超材料，实现了介质基元米氏磁谐振模态外部激励与金属基元 LC 谐振模态间接激励的双重激发。提出了外部入射、局域场双激发的振子耦合模型，揭示了基元模态耦合强度、耦合相位对杂化超材料整体电磁吸收、散射的调制机理。基于模态复耦合机理构建了金属介质杂化超材料电磁散射性质设计新方法，首次实现超材料基元磁谐振散射的“外部隐身”调控。

(2) 建立力、热物理场杂化超材料耦合模型，阐明多物理场对模态耦合影响机理，掌握多物理场作用下杂化超材料电磁性能非线性调制规律。提出介质颗粒导电薄膜复合杂化超材料电磁吸收体模型，建立了力学拉伸动态重构超材料基元空间耦合方法，发现了电场、磁场方向力学形变对局域电磁耦合的各向异性调控，阐明了杂化超材料受力形变对局域耦合强度、吸波频率的可逆调制规律，实现超材料基元耦合强度、电磁吸收性能的非线性精准调控。构建了介质金属复合材质基元超材料研究了热物理场对基元局域模态的显著调制行为，揭示了谐振行为的形成机制及其结构和热调控的机理，发现介质金属复合材质复介电响应随温度变化决定了其对超材料电磁性能的调控。

(3) 揭示多种杂化超材料体系中谐振模态主动调控机理，建立介质金属杂化超材料模态及其复耦合主动调控的一体化设计方法。构筑磁谐振金属基元与向列型液晶构筑杂化超材料体系，通过外加电场对液晶分子空间有序排布的精准调制进而调节杂化超材料谐振模态，阐明了液晶分子无序排布对基元共振模态的影响机理，建立了液晶分子取向与局域电磁场空间分布的一致性对基元谐振模态的调控方法。揭示了铁电材料介电温调特性对构筑超材料基元模态色散及其耦合阵列各向异性的调控机理，建立杂化超材料模态及其耦合主动调控的一体化设计方法，实现了工作频率可智能调控的“变色龙”隐身衣。构筑了近零介电超材料与电导可调的薄膜复合杂化模型，通过稳态相位近似阐明了杂化超材料结构的散射相位特性及其对电磁波束古斯-汉欣空间位移调制机理，建立了电磁波束几何位移频率色散、极化敏感特性的电调制方法，发现了杂化超材料电磁波束散射空间位移类“彩虹”效应。

该项目 5 篇代表性论文发表于材料领域顶刊 **Advanced Materials**、**Physical Review X** 等上，代表性论文被 **Science** 子刊、**Physical Review Letters** 等权威期刊他引 360 次，单篇最高他引 125 次。基于理论成果发展的相关技术和方法获授权专利 10 项，部分成果荣获 2023 年度陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖。

该项目取得的创新性成果得到了英国剑桥大学、美国宾州州立大学、法国国家研究院、新加坡南洋理工大学、英国爱丁堡大学和国内清华大学、北京大学和中国科学院等全球 27 个国家、109 个科研院所知名学者的正面引用评价。代表性引用有：①中国科学院院士崔铁军教授在其综述论文中引用该项目成果，使用大段文字（含插图）高度评价代表性论文[1]，指出“张富利等人展示了使用外部隐身来抑制介电物体磁共振的方法。证实了可以通过超材料设计来控制介电谐振器的散射，抑制了磁共振，提供了可行的外部隐身斗篷策略”。②

中国工程院院士邓龙江教授将代表性论文[1]作为超材料隐身的典型工作进行正面引用，同时以代表性论文[3]形变模式下吸波超材料工作为参考，设计了一种具有拉伸补偿功能的可拉伸吸收体。③英国皇家学会沃尔夫森奖者 Emma Pickwell-MacPherson 教授将代表性论文[5]作为重要文献引用，指出“樊等人从理论上提出了古斯-汉欣位移可以利用石墨烯超材料进行电可调，可用于操纵太赫兹波的横向位移”。④英国皇家化学学会会士、国家级高层次人才王志明教授充分肯定了该项目代表性论文[3]在机械可调完美吸收器方面的研究成果，指出“MMPA 的工作频率会随着平行应力的增加而蓝移”。⑤知名材料专家 Khawer Javaid Manzoor 教授用大量文字高度评价代表性论文[5]，指出“这是首次使用石墨烯复合近零折射率超材料实现古斯-汉欣位移异向调控”。此外，该项目研究成果还受到了美国光学学会会士 Ekmel Ozbay 教授，新加坡工程院院士陈晓东教授，美国光学学会会士、新加坡南洋理工大学 Ranjan Singh 教授，美国光学学会会士、美国国家发明家科学院院士 Douglas H. Werner 教授，澳大利亚工程院院士 Nicolas Voelcker 教授，中国科学院院士姚建铨教授等团队的正面引用和高度评价。

基于理论成果发展的介质金属杂化超材料电磁性能一体设计技术及复杂电磁模态耦合调控技术已在星载相控阵天线和 5G/4G 多频多制式基站天线去耦合领域得到应用，包括航天科技集团八院 509 研究所、陕西荣泰联信新材料有限公司、广东富宇鸿通讯有限公司等单位。有效解决了天基系统载荷轻量化、卫星通信自适应抗干扰等关键问题，在相同性能条件下总重量比传统有源相控阵天线降低超过 80%，总成本降低超过 70%，为发展新一代轻量化保密通信载荷奠定了扎实基础。采用超材料有效解决了 4G 无源天线与 5G 有源天线结构集成下的空间解耦合，为 4G 多频多端口天线与 5G Massive MIMO 天线一体化产品的开发和应用奠定了坚实的基础。

四、客观评价

该项目取得的创新性成果被国际同行评审认可，在材料领域国际主流学术期刊上发表论文 50 篇，授权专利 10 项。5 篇代表性论文发表于材料领域顶刊 Advanced Materials、Physical Review X 和材料物理国际主流期刊 Applied Physics Letters 等上，代表性论文被 Advanced Materials、Physical Review Letters 等权威期刊他引 360 次，单篇最高他引 125 次。该项目取得的创新性成果得到了英国剑桥大学、美国宾州州立大学、法国国家研究院、新加坡南洋理工大学、英国爱丁堡大学和国内清华大学、北京大學和中国科学院等全球 27 个国家、109 个科研院所知名学者的正面引用评价。

1.关于发现点一：①中国科学院院士、超材料领域权威专家崔铁军教授在其综述论文[J. Phys. D:Appl. Phys. 30, 303002(2022)]中，使用大段文字（含插图）正面引用并高度评价代表性论文[1]，认为该工作“提出了一种使用外部隐身来抑制介电物体磁共振的方法。证实了可以通过超材料设计来控制介电谐振器的散射，抑制磁共振，提供了可行的外部隐身斗篷策略（...Zhang et al experimentally

demonstrated a method to restrain magnetic resonance of a dielectric object using **exterior cloaking...offering feasible functions of outside cloak and reinforced absorption...**)”。②中国工程院院士、超材料领域权威专家邓龙江教授及新加坡工程院院士仇成伟教授分别在代表性引文 2[Nat. Commun. 13, 1719(2022)]和代表性引文 6[Phys. Rev. B 107, L241403(2023)]中将代表性论文[1]作为超材料隐身的代表性工作进行引用“(...facilitating the realization of left-handed materials, invisible cloaking...)、(...motivated by applications in high-precision sensing, photovoltaic/photothermic devices, superresolution imaging, cloaking...)”。③知名材料专家、西班牙巴伦西亚大学 Carlos J. Zapata-Rodríguez 教授在[Opt. Express 29, 10192(2021)]中对代表性论文[1]进行了详尽阐述和专业分析,认为该工作“证明了杂化超材料中磁模和电偶极模的耦合系数的模量和相位可以被有效控制,并于电磁波调控 (...composite metamaterial can be **efficiently manipulated** for practical applications on **radiation control...**)”。

2.关于发现点二: ①英国皇家化学学会会士、国家级高层次人才王志明教授在代表性引文 7[Adv. Opt. Mater. 7, 1800995(2019)]中充分肯定了该工作在机械可调完美吸收器方面的研究成果,认为“完美吸波器的工作频率会随着平行应力的增加而蓝移 (...the operation frequency of MMPA blueshifts with increasing strain parallel...)”。②美国青年科学家总统奖获得者、加州大学伯克利分校 Grace X. Gu 教授在代表性引文 3[Sci. Adv. 11, eads3499(2025)]中认为该工作是“机械拉伸可调超材料的典型应用 (...tuning mechanisms such as mechanical strain...)”。③中国科学院院士崔铁军教授在引文[Appl. Phys. Lett. 110, 121901(2017)]中肯定了该工作的研究成果,认为代表性论文[3]提出的“机械拉伸可调超材料具有**成本低、可靠性高和易于使用的优势** (...**low cost, high reliability and being readily available...is a good choice** to realize switchable metamaterials...)”。④中国工程院院士邓龙江教授在[IEEE TAP 67, 291(2019)]中引用该工作成果,认为代表性论文[3]“**阐明了形变对吸波器性能的影响** (... **clarify the influence of deformation on absorbers' performance...**)”。

3.关于发现点三: ①新加坡工程院院士仇成伟教授在代表性引文 1[Adv. Mater. 30, 1804019(2018)]中引用代表性论文[2],认为该工作“**成功演示了隐身斗篷现象**(...**invisibility cloaks, have been successfully demonstrated...**)”。受此启发,英国皇家学会院士 John B. Pendry 教授在代表性引文 4[Phys. Rev. Lett. 123, 067701(2019)]中实现了不弱化材料参数的广角隐身斗篷“(... invisibility cloak ... achieved before due to the singular constitutive parameters required...)”。②中国工程院院士邓龙江教授在[Photonics Res. 11, 1613(2023)]中认为代表性论文[2]“展示了隐身斗篷奇异的物理现象和应用 (...demonstrating fascinating physical phenomena and applications, such as supercoupling, leaky-wave antennas, cloaking...)”。③中国科学院院士姚建铨教授在代表性引文 8[Nanoscale 8, 15273(2016)]、[Opt. Express 27, 19520 (2019)]、[J. Mod. Opt. 63, 200(2016)]和[IEEE

PTL 27, 1321(2015)]中均引用代表性论文[4], 认为该工作“使用超材料实现了类量子效应 (...studies have proved that the group index extracted around the **EIT or PIT window is extremely high...**)”。④国家级高层次人才、北京大学胡小永教授在引文[Light: Sci. Appl. 4, e302(2015)]中认为代表性论文[4]“使用超材料增强了慢光效应, 成功调控了光子寿命 (...the photon lifetime increase corresponds to the strengthened slow-light effect...)”。⑤美国光学学会会士、新加坡南洋理工大学 Ranjan Singh 教授在代表性引文 5[Adv. Mater. 33, 2006926(2021)]中引用代表性论文[5], 认为该工作“成功在光学系统中加入石墨烯调整相移和古斯-汉欣位移 (...graphene-based optical systems have been theoretically, and numerically demonstrated the **tuning of G-H shifts...**)”。⑥英国皇家学会沃尔夫森奖者 Emma Pickwell-MacPherson 教授在引文[Adv. Opt. Mater. 5, 1600697(2017)]中对代表性论文[5]研究成果给予高度评价, 认为该工作“从理论上提出了古斯-汉欣位移可以利用石墨烯超材料进行电调控 (...Fan et al. showed **theoretically** how a **Goos-Hänchen shift** can be **electrically tunable** with graphene...)”。⑦知名材料专家 Khawer Javaid Manzoor 教授在[Eur. Phys. J. D 76, 239(2022)]高度评价代表性论文[5], 认为“这是首次使用石墨烯超材料实现古斯-汉欣位移异向调控 (...Fan and co-workers were the **first** to use epsilon-near-zero metamaterial covered with monolayer graphene and obtain **electrically tunable GHS...**)”。

该项目研究成果已应用于航天科技集团八院 509 研究所、陕西荣泰联信新材料有限公司、广东富宇鸿通讯有限公司等单位, 成功解决相控阵等装备基于模态杂化超材料设计的轻量化、高频天线辐射性能提升及狭窄空间内有源天线电磁耦合等难题, 得到应用单位好评。其主要评价有: 其研究成果应用于本单位负责的“卫星抗干扰通信相控阵天线技术”有效解决了天基系统载荷轻量化、卫星通信自适应抗干扰等关键问题; 项目“通过引入新型电磁功能超材料方案, 合理设计介质陶瓷微结构, 充分利用微波陶瓷基介质基板和超表面微结构各自的优点, 实现了高频微波陶瓷基覆铜板天线性能的显著提升”; 合作开展了“用于 5G/4G 多频多制式基站天线去耦合的超材料技术研究”, 采用超材料有效解决了 4G 无源天线与 5G 有源天线结构集成下的空间解耦合、基于去耦合谐振器的无源天线与 5G 有源天线的选频滤波多频多制式天线结构一体化等关键问题。

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）

（按照表格所示栏目填写支撑本项目重要科学发现的代表性论文专著详细情况，不超过 8 篇，按重要程度排序。所列论文专著应公开发表 2 年以上即 2023 年 8 月 1 日以前公开发表。所列代表作及论文应以省内单位或个人为主要完成单位，署名第一单位（标号为 1 的单位）应为国内单位。

“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”、“第一作者（含共同第一作者）”和“国内作者”，均应基于论文的全部作者进行填写，不得只填写本项目完成人或少填漏填。

其中，“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”和“第一作者（含共同第一作者）”的姓名表述应与论文原文的署名保持一致，“国内作者”填写作者的中文姓名。

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。）

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	Phase-modulated scattering manipulation for exterior cloaking in metal–dielectric hybrid metamaterials	Advanced Materials	Zhang Fuli, Li Chang, Fan Yuancheng, Yang Ruisheng, Shen Nian-Hai, Fu Quanhong, Zhang Weihong, Zhao Qian, Zhou Ji, Koschny Thomas, Soukoulis Costas M.	2019 年 31 卷 1903206 页	2019-08-05	Zhang Fuli, Fan Yuancheng	Zhang Fuli	张富利, 李畅, 樊元成, 杨蕤生, 付全红, 张卫红, 赵乾, 周济	30	SCI	是
2	Temperature-Controlled Chameleonlike Cloak	Physical Review X	Peng Ruiguang, Xiao Zongqi, Zhao Qian, Zhang Fuli, Meng Yonggang, Li Bo, Zhou Ji, Fan Yuancheng, Zhang Peng, Shen Nian-Hai, Koschny Thomas, Soukoulis Costas M	2017 年 7 卷 011033 页	2017-03-21	Zhao Qian	Peng Ruiguang	彭瑞光, 肖宗祺, 赵乾, 张富利, 孟永钢, 周济, 樊元成	23	SCI	是

3	Mechanically stretchable and tunable metamaterial absorber	Applied Physics Letters	Zhang Fuli, Feng Shuqi, Qiu Kepeng, Liu Zijun, Fan Yuancheng, Zhang Weihong, Zhao Qian, Zhou Ji	2015 年 106 卷 091907 页	2015-03-06	Zhang Fuli, Zhang Weihong	Zhang Fuli	张富利, 冯树琦, 邱克鹏, 刘子君, 樊元成, 张卫红, 赵乾, 周济	102	SCI	是
4	Polarization and incidence insensitive dielectric electromagnetically induced transparency metamaterial	Optics Express	Zhang Fuli, Zhao Qian, Zhou Ji, and Wang Shengxiang	2013 年 21 卷 19675-19680 页	2013-08-14	Zhang Fuli	Zhang Fuli	张富利, 赵乾, 周济, 汪胜祥	80	SCI	是
5	Electrically tunable Goos-Hänchen effect with graphene in the terahertz regime	Advanced Optical Materials	Fan Yuancheng, Shen Nian-Hai, Zhang Fuli, Wei Zeyong, Li Hongqiang, Zhao Qian, Fu Quanhong, Zhang Peng, Koschny Thomas, Soukoulis Costas M	2016 年 4 卷 1824-1828 页	2016-07-14	Fan Yuancheng	Fan Yuancheng	樊元成, 张富利, 魏泽勇, 李宏强, 赵乾, 付全红	125	SCI	是

合 计	36 0		
-----	---------	--	--

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

（所列完成人应为在陕个人，或与在陕个人合作的我国其他地域的个人（**第一完成人必须为全职在陕的个人**），且是“代表性论文专著”主要学术思想的提出者，并在“代表性论文专著”中有署名。应按表格要求逐项填写。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。同一人同一年度只能作为一个提名项目的完成人参加陕西省科技奖的评审。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。

工作单位：根据人事关系填写完成人现工作的单位，已退休的填写退休前的工作单位。

完成单位：填写完成人参与本项目主要研究工作时所在单位，应为国内法人单位。如涉及多个单位，应根据贡献大小填写一个单位。完成单位与奖励证书关联，请根据实际情况审慎填写。

对本项目贡献：不超过 300 字。应具体写明完成人对本项目做出的实质性贡献，并注明代表性论文专著编号。

填报时括号部分内容删除。）

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
张富利	1	西北工业大学党委常委、副校长	教授	西北工业大学	西北工业大学	项目负责人，全面负责理论研究工作。提出了高介电结构米氏谐振与金属结构局域模态耦合调控电磁波行为的新机制（发现点 1），提出了机械可调杂化超材料新思路（发现点 2），揭示了介质与导电柔性薄膜杂化超材吸收调控机制（发现点 3）。是代表性论文 1、3、4 的第一作者和通讯作者，代表性论文 2、5 的作者。
樊元成	2	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	提出了近零超材料介质与可调媒质耦合调控手段，发现了超材料中电磁波束散射位移的电调控规律（发现点 2）；发展了非线性反馈电磁模态分析

						方法，揭示了非线性多物理场模态耦合调控电磁行为机制（发现点3）。是代表性论文1、5的通讯作者，代表性论文2、3的作者。
赵乾	3	高端装备界面科学与技术国家重点实验室主任助理，中国材料研究学会超材料分会常务理事	教授	清华大学	清华大学	揭示了介质超材料块体在非均匀电磁波激励磁共振模式，阐明了介质超材料和金属超材料耦合强度对电磁吸收的影响机制（发现点1）；发现了杂化超材料构型对电磁特性的影响规律，阐述了群延迟形成机理及调控方法（发现点3）。是代表性论文2通讯作者，代表性论文1、3、4、5的作者。
周济	4	新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室学术委员会主任、国务院学位委员会材料学科评议组召集人、中国材料研	教授	清华大学	清华大学	负责该项目整体方案设计和关键物理机制阐释。揭示了介质金属杂化超材料耦合产生类电磁感应透明形成机理（发现点1）；提出了介质超材料与导电橡胶薄膜杂化电磁吸收体设计方法（发现点2）；研究了基于高品质钛酸钙的介质超材料，阐明了米氏谐振电磁共振调控机理（发现点3）。是代表性论文1、2、3、4的作者。

		究学会超材料分会理事长				
邱克鹏	5	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	设计了机械可拉伸模型及实验方案，提出了基于介电可调的磁谐振模式频率调控方法（发现点 2）。是代表性论文 3 的作者。
付全红	6	无	讲师	西北工业大学	西北工业大学	对介质立方体隐身进行了全波模拟，完成了介质金属杂化超材料电磁性能测试方案设计（发现点 1）。是代表性论文 1、5 的作者。

七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	西北工业大学为该项目组提供了良好的工作环境，从管理和服务上保证了项目的顺利完成。对该项目的贡献包括：提供了仪器设备、场地、水电等硬件条件；提供了书籍、电子数据库、文献检索等条件；学校的科研管理部门、财务部门为项目的日常管理和服务提供了重要帮助。
清华大学	2	清华大学为该项目组营造了优越的工作环境，确保了项目从管理到服务的顺畅运作。其贡献涵盖了硬件设施如仪器设备、场地、水电及知识资源如书籍、电子数据库和文献检索服务。

八、完成人合作关系说明

完成人张富利、樊元成、邱克鹏、付全红为西北工业大学教师，完成人周济、赵乾为清华大学教师。该项目在周济院士领衔下组建了西北工业大学和清华大学联合团队，团队长期通力合作，开展了高性能电磁波调控介质金属杂化超材料基础研究工作，共同承担了国家重点计划、国家自然科学基金等多项国家级课题，合作发表多篇论文，申请多项发明专利。