

2026 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

相位耦合超表面电磁波传播主动调控研究

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省知识产权局

提名意见：

该成果围绕空天信息系统与智能电磁应用中复杂电磁环境下电磁波传播调控与信息承载的基本科学问题，针对传统超表面在开放系统能量交换、多维波前调控及动态重构能力方面的不足，本项目以相位耦合为主线，系统开展了电磁波传播调控的应用基础研究，构建了涵盖传播机理、波前调控方法及动态调控手段的研究体系。研究揭示了非厄米相变、相干对消及电磁波谱调控等关键物理机制，发展了多维波前调控方法，实现了电控与时空调制协同作用下的电磁波动态调控，为复杂电磁环境下信息调制与功能集成提供了新的技术途径。研究成果选题准确，研究起点高，理论上创新，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，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

随着空天信息系统、智能感知与高速通信技术的快速发展，对电磁波在复杂环境中的传播控制与信息承载能力提出了更高要求。作为调控电磁波相位信息的关键人工结构，超表面为实现电磁波精细操控提供了重要技术途径。然而，面向实际应用需求，现有超表面在电磁波调控方面仍存在若干核心挑战：其一，传统基于局域谐振的调控机制难以描述开放系统中复杂能量交换与传播行为；其二，电磁波多维度调控能力尚不完善，难以兼顾多偏振、多功能与高效率要求；其三，动态调控手段与结构集成能力仍然受限，难以支撑电磁波传播过程的可编程重构与系统级应用。上述问题制约了超表面在新一代电磁信息器件中的进一步发展。

围绕上述问题，本项目以相位耦合为主线，开展了电磁超表面电磁波传播调控的应用基础研究，**构建了从传播机理、波前调控方法到主动调控与系统实现的完整研究体系**。通过系统研究相位耦合对电磁波传播行为的调控机制，揭示非厄米相变、相干对消及电磁波谱调控等关键物理规律；在此基础上，发展多维波前调控方法并拓展至主动调控与辐射一体化，实现电磁波传播行为的精确调控与功能拓展。基于上述研究，取得的主要科学发现包括：

发现点 1：提出基于相位耦合的非厄米电磁调控机制，实现了超表面电磁波传播行为的相变调控。提出相位耦合机制调控电磁超表面电磁波的传播行为，构造了反 PT 对称系统并研究了其相变过程对电磁透射波谱的影响机制，结合主动电磁相位调节和相干对消实现了频率可调电磁完美吸收。针对开放谐振系统中耗散耦合难以有效调控的问题，提出通过调节谐振单元间传播相位构造复耦合的思路，实现了超表面中 PT 对称与反 PT 对称之间的可控转变，揭示了耦合相位、耗散调制与本征频率演化之间的内在关系，建立了相位耦合调控非厄米电磁传播行为的新机制，拓展了相位耦合在电磁透射谱整形及相干操控中的应用边界。

发现点 2：基于相位耦合的超表面电磁波波前调控研究。针对可见光至中红外超表面损耗高、偏振受限困难，以相位耦合为核心构建跨维度波前调控体系。在自由空间，针对传统 PB 相位仅能操控圆偏振光的局限，提出正交线偏振相位解耦方法，以各向异性硅纳米砖调控 x/y 尺寸建立相位映射，实现双偏振全相位解耦及偏振依赖光束偏折、相反拓扑荷与不同阶数轨道角动量涡旋光束生成；针对可见光损耗制约效率带宽的瓶颈，提出高纵横比 TiO_2 纳米鳍全介质方案，依托自旋相关 PB 相位梯度等效半波片，实现可见光宽带高效光子自旋霍尔效应及左右旋圆偏振光对称横向波前分裂。上述研究以相位耦合为主线贯通多维度波前调控，为集成光子器件提供系统设计方法与支撑。

发现点 3：相位耦合超表面电磁波传播的动态调控方法与多机制协同应用。相位耦合超表面电控电磁波传播调控与波前重构方法。针对传统超表面依赖固定结构参数实现电磁波调控、难以满足动态重构与高精度调控需求的问题，提出基于相位耦合的电控主动调制方法，构建了电磁波传播过程中的可编程波前重构体系。通过在超表面单元中引入电调谐机制，实现谐振特性与相位响应的动态切换，建立离散相位编码与电磁波波前调控之间的映射关系，使电磁波传播方向、相位

前沿及波束形态具备实时可编程调控能力。在此基础上，发展空间编码与时空调制协同作用的电磁调控方法，揭示离散相位分布对连续波前重构的逼近规律以及周期性时间调制引起的频谱演化与谐波相位调控机制，实现低比特离散相位向高精度等效连续相位调控的拓展，显著提升波束扫描精度与辐射性能。最终形成了从空间相位编码到时空调制的多维相位耦合电磁调制方法体系，实现电磁波波前、频谱与传播行为的可编程调控。

本项目成果发表于相关领域高水平期刊，**5 篇代表性论文他引总计 238 次，单篇最高他引 78 次**。成果被国内外权威高校及科研机构广泛引用，表明本项目在相位耦合超表面电磁波传播调控研究得到同行认可，在电磁波传播新机理、波前调控新方法与主动调控新应用方面具备重要学术价值与发展潜力。

本项目取得的创新性成果得到国内外同行的广泛关注与正面评价。相关研究已被包括美国密歇根大学、美国杜克大学、英国剑桥大学、英国帝国理工大学及澳大利亚莫纳什大学等国外研究机构，以及清华大学、复旦大学、南京大学和香港大学相关研究团队等国内权威单位在内的多家科研机构引用。代表性引用有：①剑桥大学 Matthew Colbrook 教授等人在论文[Phys. Rev. Lett. 135, 170202 (2025)]中将我们超表面相位耦合构造 PT 对称/反 PT 对称的工作作为超表面非厄米实验的代表性工作进行了正面引用，指出.....非厄米量子系统研究极大拓展量子力学，其实验研究已跨多个领域包括电磁、声学、电子、力学系统、超表面设计、BIC 和量子散射.....②中国科学院院士祝世宁教授团队在 [Nat. Commun. 15(1), 7744 (2024)] 中正面引用了我们关于偏振复用超表面中正交线偏振光相位响应调控的研究成果。文中指出，利用本成果实现的对正交线偏振光的独立相位调控，可有效解决室内光通信中的全覆盖难题，并通过偏振滤波显著降低信号串扰。该评价证实了本研究工作提出的高效率偏振复用平台在下一代大容量集成光通信系统中的应用价值。③美国密歇根大学 IEEE 会士、Optica 会士 SPIE 会士 L. Jay Guo 教授在其论文[Light: Adv. Manuf. 5, 36 (2024)]中引用了我们的研究工作。文中指出，通过在超表面中进行策略性设计并结合集成控制器件，可将超表面进一步拓展为可编程超表面，从而具备对电磁波进行动态调控的潜力。该引用从技术路径层面将我们的研究纳入可编程超表面与动态电磁调控体系之中，体现了其在该方向的重要参考价值。

国内外权威学者的引用与评价表明，本项目针对相位耦合超表面电磁波传播调控开展系统研究，在非厄米电磁调控机理、多维波前调控方法、动态调控机制方面取得原创性基础成果。该研究既丰富了电磁波-人工微结构相互作用理论，也为电磁波传播精细调控提供新途径，对新型电磁器件、新一代信息通信与空天电磁技术具有重要科学意义和应用潜力。项目成果基于相位耦合设计与时空调制波前重构，解决了星载多天线电磁兼容、散射干扰及波束动态重构难题；成果用于卫星平台散射抑制与星载天线波束自适应调控，实现散射对消和波束灵活重构，可替代传统方案，降低载荷重量与调试成本，同时为空间光通信、红外感知器件提供关键技术储备。

四、客观评价

发现点 1 的客观评价:

- ① 爱尔兰皇家科学院院士、美国光学学会/IOP 会士、APL Quantum 主编、英国帝国理工大学 Leverhulme 首席教授 Ortwin Hess 团队在论文[ACS Photonics 12, 2337 (2025)]中将我们超表面相位耦合构造 PT 对称/反 PT 对称的工作作为复厄米耦合构造任意子 PT 对称系统实验的代表性工作进行了正面引用, 指出.....一般的任意子 PT (Anyonic PT) 对称可以通过光之间的复厄米耦合构造, 进而获得一种任意子奇异点。
- ② 韩国首尔大学 Sang-Koog Kim 教授团队在其 PRL 论文[Phys. Rev. Lett. 135, 116905 (2025)]中将我们超表面相位耦合构造 PT 对称/反 PT 对称的工作作为超表面反 PT 对称实验实现的代表性工作进行了正面引用, 并强调了我们在 PT 对称奇异点方面的意义, 指出.....不同平台中的多种实验实现说明了反 PT 对称在奇异点、热管理、增强传感和 BIC 中的重要性。
- ③ 剑桥大学 Matthew Colbrook 教授等人在论文[Phys. Rev. Lett. 135, 170202 (2025)]中将我们超表面相位耦合构造 PT 对称/反 PT 对称的工作作为超表面非厄米实验的代表性工作进行了正面引用, 指出.....非厄米量子系统研究极大拓展量子力学, 其实验研究已跨多个领域包括电磁、声学、电子、力学系统、超表面设计、BIC 和量子散射.....
- ④ 复旦大学 Jiping Huang 教授在顶刊综述中[Chem. Rev. 125, 8655 (2025)]中将我们超表面相位耦合构造 PT 对称/反 PT 对称的工作作为光学向代表性工作进行了正面引用, 指出.....PT 对称和奇异点已在各种平台中得到实现, 包括光学、声学、电路和量子系统。

创新点 2 的客观评价

- ① 中国科学院院士祝世宁教授团队在 [Nat. Commun. 15(1), 7744 (2024)] 中正面引用了我们关于偏振复用超表面的研究成果。文中指出, 利用本成果实现的对正交线偏振光的独立相位调控, 可有效解决室内光通信中的全覆盖难题, 并通过偏振滤波显著降低信号串扰。该评价证实了本研究工作提出的高效偏振复用平台在下一代大容量集成光通信系统中的应用价值。
- ② 香港大学美国光学学会会士、美国物理学会会士张霜教授在其综述论文 [Photonix 5, 30 (2024)] 中正面引用了我们的研究成果。文中在探讨如何克服传统金属纳米结构效率低、带宽窄的局限性时指出, 采用我们提出的无损电介质纳米结构可以显著提高光学相位调制的效率。 该评价将我们的研究作为解决等离激元超表面内禀损耗问题的典型方案, 肯定了本研究工作在实现高效光波调控及推动高性能全介质光子器件发展方面的核心学术贡献。
- ③ 澳大利亚莫纳什大学美国光学学会会士、沃尔夫森研究功勋奖获得者 Stefan A. Maier 教授在其综述论文 [Nanophotonics 12(24), 4415-4440 (2023)] 中正面引用了我们关于可见光波段硅基超表面的研究成果。文中将本研究成果作为可见光至近红外波段超构表面器件的典型材料平台进行了引用, 指出本成果所

采用的材料在厚度和尺寸控制上展现出更高的灵活性与可控性。该评价肯定了本研究成果在高性能全介质材料选型上的科学性，并强调了其在实现复杂纳米光子功能及大规模制备方面的技术优势。

- ④美国杜克大学 IEEE 会士、国际光学工程学会会士、美国光学学会会士、美国物理学会会士 Natalia Litchinitser 教授团队在其论文 [**Laser Photonics Rev.** 17(8), 2200472 (2023)] 中正面引用了我们的研究成果。文中将我们的研究成果列为利用高折射率材料探索亚波长元原子辐射与非辐射态的代表性工作。该评价指出，此类研究显著推动了全介质材料中米氏共振底层物理机制的发展，为实现结构光操纵以及增强光与物质非线性相互作用提供了重要支撑。
- ⑤复旦大学美国光学学会会士、美国物理学会会士周磊教授团队在其论文 [**Adv. Sci.** 10, 2205499 (2023)] 中正面引用了我们的研究成果。文中在论述如何利用超表面突破天然材料对电磁波调控的局限性时，将本研究成果作为实现多通道可见光调控的代表性工作。该评价肯定了本工作通过各向异性纳米砖设计实现对正交线偏振光独立操控的能力，并指出此类高效、集成的超表面方案在提升光通信容量及生物化学传感性能方面具有重要的应用前景。

发现点 3 客观评价

- ①IEEE 会士 Chi Hou Chan 教授团队在 [**IEEE Open J. Antennas Propag.** 6(4), 1156 (2025)] 的研究工作中大幅引用并评价了我们的相关成果，指出在面向时序调制透射阵的设计中，高速电压切换对系统复杂度提出了严苛要求，而我们提出的仅依赖正电压实现 1-bit 相位调控的方案，有效改变了传统设计中对正负电压驱动的依赖，降低了系统复杂度与实现成本，为时变编码超表面与高速调控器件的工程实现提供了重要技术路径。
- ②美国密歇根大学 IEEE 会士、Optica 会士 SPIE 会士 L. Jay Guo 教授在其论文 [**Light: Adv. Manuf.** 5, 36 (2024)] 中引用了我们的研究工作。文中指出，通过在超表面中进行策略性设计并结合集成控制器件，可将超表面进一步拓展为可编程超表面，从而具备对电磁波进行动态调控的潜力。该引用从技术路径层面将我们的研究纳入可编程超表面与动态电磁调控体系之中，体现了其在该方向的重要参考价值。
- ③中国工程院院士、清华大学尤政教授在其论文 [**Research** 6, 0274(2023)] 中引用了我们的相关研究工作。文中指出，在微波频段中，通过引入有源电子器件可调控超表面阵列的相位响应，从而实现电磁波的动态波束调控。该引用将我们的工作作为有源超表面动态调控的重要技术参考，体现了其在该方向的代表性意义。
- ④IEEE 会士 Ronan Sauleau 教授与中国科学院院士、IEEE 会士洪伟教授在其论文 [**IEEE Trans. Antennas Propag.** 74(1), 507–521 (2026)] 中，在 Ka 波段反射阵天线的对比分析中引用了我们的相关研究工作，并将其纳入毫米波反射阵天线典型方案进行性能比较分析。该引用表明，我们的研究在该领域具有代表性，并被用于支撑相关技术性能评估。

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	Experimental Demonstration of Controllable PT and Anti-PT Coupling in a Non-Hermitian Metamaterial	Physical Review Letters	Chang Li, Ruisheng Yang, Xinchao Huang, Quanhong Fu, Yuancheng Fan, Fuli Zhang	2024 年 132 卷 156601 页	2024 年 04 月 08 日	Chang Li, Yuancheng Fan, Fuli Zhang	Chang Li, Ruisheng Yang	李畅, 杨蕤生, 黄新朝, 付全红, 樊元成, 张富利	33	SCI	是

2	Time-Modulated Transmissive Programmable Metasurface for Low Sidelobe Beam Scanning	Research	Xudong Bai, Fuli Zhang, Li Sun, Anjie Cao, Jin Zhang, Chong He, Longhai Liu, Jianquan Yao, Weiren Zhu	2022 年 2022 卷 9825903 页	2022 年 07 月 09 日	Fuli Zhang, Chong He, Weiren Zhu	Xudong Bai	白旭东, 张富利, 孙莉, 曹岸杰, 张金, 贺冲, 刘龙海, 姚建铨, 朱卫仁	33	SCI	是
3	Polarization-Multiplexed Silicon Metasurfaces for Multi-Channel Visible Light Modulation	Advanced Functional Materials	Wei Zhu, Yuancheng Fan, Ruisheng Yang, Guangzhou Geng, Quanhong Fu, Changzhi Gu, Junjie Li, Fuli Zhang	2022 年 32 卷 2200013 页	2022 年 02 月 25 日	Yuancheng Fan, Junjie Li, Fuli Zhang	Wei Zhu	朱维, 樊元成, 杨蕤生, 耿广州, 付全红, 顾长志, 李俊杰, 张富利	64	SCI	是

4	Dynamic millimeter-wave OAM beam generation through programmable metasurface	Nanophotonics	Xudong Bai, Fuli Zhang, Li Sun, Anjie Cao, Chong He, Jin Zhang, Weiren Zhu	2022 年 11 卷 1389-1399 页	2022 年 02 月 17 日	Fuli Zhang, Weiren Zhu	Xudong Bai	白旭东, 张富利, 孙莉, 曹岸杰, 贺冲, 张金, 朱卫仁	78	SCI	是
5	Titanium dioxide metasurface manipulating high-efficiency and broadband photonic spin Hall effect in visible regime	Nanophotonics	Wei Zhu, Ruisheng Yang, Guangzhou Geng, Yuancheng Fan, Xuyue Guo, Peng Li, Quanhong Fu, Fuli Zhang, Changzhi Gu, Junjie Li	2020 年 9 卷 4327-4335 页	2020 年 08 月 06 日	Fuli Zhang, Changzhi Gu, Junjie Li	Wei Zhu, Ruisheng Yang, Guangzhou Geng	朱维, 杨蕤生, 耿广州, 樊元成, 郭旭岳, 李鹏, 付全红, 张富利, 顾长志, 李俊杰	30	SCI	是
合 计									238	SCI	是

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

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，对发现点 1、2、3 做出创新性贡献，具体包括：提出基于相位耦合的非厄米电磁调控机制，实现了超表面电磁波传播行为的相变调控与频率可调相干完美吸收。提出基于相位耦合的多维波前调控方法，研究了偏振解耦与相位梯度对电磁波传播行为的调控机制，实现了多偏振复用、宽带高效波前调控。提出基于相位耦合的主动调控方法，构建了电磁波传播过程中的可编程波前重构体系，研究了空间编码与时空调制对电磁波传播与频谱特性的协同调控规律，实现了高精度波束扫描、多模态波前调控及电磁波调制与辐射的一体化调控。
樊元成	2	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对发现点 1、2、3 做出创新性贡献，具体包括：发现通过改变耦合相位，可使系统从 PT 对称转变为反 PT 对称，验证了反 PT 对称性；提出相位耦合多维波前调控方法，揭示偏振解耦与相位梯度机制，实现了线偏振复用波前操控与宽带高效光子自旋霍尔效应。

白旭东	3	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对发现点 3 做出创新性贡献，具体包括：完成相位耦合数字超表面电磁调控主要的理论分析、实验设计、数据处理等。提出基于相位耦合的电控主动调制方法，构建了电磁波传播过程中的可编程波前重构体系。通过在超表面单元中引入电调谐机制，实现谐振特性与相位响应的动态切换。发展空间编码与时空调制协同作用的电磁调控方法，实现低比特离散相位向高精度等效连续相位调控的拓展，显著提升波束扫描精度与辐射性能。
李畅	4	无	助理研究员	华南师范大学	西北工业大学	对创新点 1 做出主要贡献，具体包括：提出相位调控超表面非厄米宇称时间对称性转换的理论方案，设计了谐振单元时延耦合调制相位的实验方案，分析超表面透射谱对应体系本征能谱，最终实验验证相位调制的宇称时间对称性与反对称性的可控转换。
朱维	5	无	副教授	武汉纺织大学	西北工业大学	对发现点 2 做出了创新性贡献，具体包括：提出了基于硅纳米砖各向异性结构的偏振复用超表面，实现了对可见光传播方向、波前相位及轨道角动量的多通道精准调控；提出了基于高

						纵横比 TiO_2 纳米鳍的全介质超表面方案，实现高效偏振转换与自旋依赖波前操控。
付全红	6	无	讲师	西北工业大学	西北工业大学	对发现点 1、2 做出创新性贡献，具体包括：发现当耦合效率为纯虚数且耦合相位延迟为 $\pi/2$ 时即可实现反 PT 对称；研究了正交线偏振相位解耦硅基超表面设计方法，建立单元尺寸与相位的映射关系；基于 PB 几何相位，设计空间旋转纳米单元，构建自旋依赖的相位梯度。

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	西北工业大学作为本项目的主要完成单位之一，为项目的顺利开展与高质量完成提供了全面的支撑与保障。学校为项目组创造了良好的科研工作环境，在硬件条件方面，提供了充足的实验场地、稳定的水电供应以及完备的仪器设备支持；在软件资源方面，保障了专业书籍、电子数据库及文献检索系统的便捷访问。同时，学校科研管理部门与财务部门在日常管理与服务中给予了高效配合与专业协助，有力保障了项目各阶段的规范运行与顺利推进。
华南师范大学	2	华南师范大学作为本项目主要完成单位之一，为成果的持续深化与完成提供了坚实保障。学校提供了良好的科研环境，硬件方面配备必要的计算资源与网络条件，软件方面保障学术数据库与图书资料的访问；科研管理及财务部门给予了高效配合与专业协助，有力推动了项目的规范实施。
武汉纺织大学	3	武汉纺织大学作为本项目的主要完成单位之一，为微纳结构制备提供了重要的技术支撑与工艺保障。在制备层面，承担了复杂微纳结构的设计优化与精密加工，保障了器件的高效响应与调控性能；在测试层面，提供了专业化的光电场表征系统与性能评估环境。同时，学校科研平台与工艺团队在样品加工与参数调试中给予了紧密配合与精准协助，有力保障了项目关键工艺的突破与核心指标的达成。

八、完成人合作关系说明

完成人张富利、樊元成、白旭东、付全红为西北工业大学教师，完成人李畅为华南师范大学教师，完成人朱维为武汉纺织大学教师。该项目在张富利教授领衔下组建了西北工业大学、华南师范大学和武汉纺织大学联合团队，长期通力合作，开展了相位耦合超表面电磁波传播主动调控基础研究工作，共同承担了 863 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。