

2026 年度陕西省自然科学奖公示信息

项目名称		目标特性多频谱建模理论与方法		
提名者		中共陕西省委军民融合发展委员会办公室		
提名意见				
我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，并按照要求对该项目的基本情况进行了公示，公示期间无异议。 该项目以“辐射—散射—吸收”这一电磁波与物质相互作用的完整物理过程为主线，围绕目标特性多频谱建模的共性基础科学问题，取得系列原创性突破。揭示了探测链路多要素对红外辐射信号的衰减与增强耦合机理，构建了涵盖目标、背景、大气、环境、干扰及传感器响应的红外辐射传输理论模型；发现了目标表面粗糙度及材质参数对激光散射空间分布与偏振退化的影响规律，发展了复杂形态粒子群激光散射的解析与数值混合建模方法；阐明了电大目标表面感应电流与雷达回波的内在关联及散射与吸收场的互易性约束关系，提出了多尺度网格剖分与电磁特征协同表征方法；探明了电磁波在介质结构中的传输损耗与色散机制，建立了宽带吸收与低频响应的协同调控理论。研究成果选题前沿、理论创新显著，发表论著获国内外学术界广泛引用与积极评价，对目标特性与电磁计算领域的发展具有重要推动作用，兼具深远的学术价值和显著的学科发展推动作用。 根据《陕西省科学技术厅 关于开展 2026 年度陕西省科学技术提名工作的通知》，参照自然科学奖评定条件和评定标准，提名该项目为陕西省自然科学奖 二 等奖。				
主要完成人情况				
排名	姓名	技术职称	工作单位	完成单位
1	陈世国	研究员	西安电子科技大学	西安电子科技大学
2	崔志伟	教 授	西安电子科技大学	西安电子科技大学
3	何欣波	副研究员	西安电子科技大学	西安电子科技大学
4	刘骄龙	副教授	西安电子科技大学	西北工业大学
5	田春娜	教 授	西安电子科技大学	西安电子科技大学
6	魏 兵	教 授	西安电子科技大学	西安电子科技大学
主要完成单位				
排名	单位名称			
1	西安电子科技大学			
2	西北工业大学			

代表性论文（专著）目录							
序号	论文（专著） 名称/刊名/作者	年卷页码 （xx 年 xx 卷 xx 页）	发表（出 版）时间 （年月 日）	通讯作 者（含 共同）	第一作者 （含共 同）	作者	论文署名单 位
1	M2FNet mask-guided multi-level fusion for RGBT pedestrian detection/IEEE Transactions on Multimedia/Xiangyang Li, Shiguo Chen, Chunna Tian, Heng Zhou, Zhenxi Zhang	2024, 26: 8678- 8690	2024 年 3 月 25 日	Shiguo Chen	Xiangyang Li	Xiangyang Li, Shiguo Chen, Chunna Tian, Heng Zhou, Zhenxi Zhang	西安电子科 技大学
2	A review of the numerical investigation on the scattering of Gaussian beam by complex particles/ Physics Reports/ Zhiwei Cui, Yiping Han	2014, 538: 39-75	2014 年 5 月 10 日	Yiping Han	Zhiwei Cui	Zhiwei Cui, Yiping Han	西安电子科 技大学
3	A subgridding unconditionally stable FETD method based on local eigenvalue solution/IEEE Transactions on Antennas and Propagation/Kaihang Fan , Bing Wei , Xinbo He	2021, 69: 4695- 4705	2021 年 8 月 4 日	Bing Wei	Kaihang Fan	Kaihang Fan , Bing Wei , Xinbo He	西安电子科 技大学
4	An explicit newmark-FDTD algorithm with a subgridding technique/IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters/Xinbo He, Bing Wei, Kaihang Fan	2020, 19:2383- 2387	2020 年 10 月 26 日	Bing Wei	Xinbo He	Xinbo He, Bing Wei, Kaihang Fan	西安电子科 技大学

5	Enhancing the Low/Middle-Frequency Electromagnetic Wave Absorption of Metal Sulfides through F-Regulation Engineering/Advanced Functional Materials/Jiaolong Liu, Limin Zhang, Hongjing Wu	2021, 31: 210501	2021 年 8 月 6 日	Limin Zhang, Hongjing Wu	Jiaolong Liu	Limin Zhang, Hongjing Wu	西北工业大学
6	电磁波理论/科学出版社/葛德彪, 魏兵	2011 年	2011 年 8 月 1 日	魏兵	葛德彪	葛德彪, 魏兵	西安电子科技大学
7	电磁波时域不连续伽略金方法/科学出版社/葛德彪, 魏兵	2019 年	2019 年 6 月 1 日	魏兵	葛德彪	葛德彪, 魏兵	西安电子科技大学
8	计算光学—微粒对高斯光束散射的理论与方法/西安电子科技大学出版社/崔志伟, 韩一平, 汪加洁, 张华永	2017 年	2017 年 6 月 1 日	崔志伟	崔志伟	崔志伟, 韩一平, 汪加洁, 张华永	西安电子科技大学

客观评价

1. 英国萨里大学 Josef Kittler 院士与江南大学徐天阳教授团队在信息融合杂志 Information Fusion 中正面评价了本项目研究成果（代表作 1），对本项目提出的 RGB-T 融合方法给予了肯定，指出能够通过利用可见模式和热模式之间的互补特性，保持稳健且高质量的预测效果（部分英文：RGB-T fusion approaches can maintain robust and high-quality preceptions by leveraging the complementary characteristics of visible and thermal modalities）

2. 西安电子科技大学的焦李成院士（Life Fellow, IEEE）团队在 IEEE 多媒体汇刊 IEEE Transactions on Multimedia 中正面评价了本项目研究成果（代表作 1），肯定了行人等目标识别技术推动了目标检测领域的发展。（部分英文：pedestrian detection, and human-object interaction. It is undeniable that convolutional neural networks have profoundly facilitated the progress of object detection in the past decade.）

3. 美国德克萨斯大学圣安东尼奥分校终身教授 Victor Sheng 与齐鲁工业大学李海燕团队在 IEEE 多媒体汇刊 IEEE Transactions on Multimedia 中高度肯定了本项目提出的与可见光图像相比，热红外图像侧重采集目标的温度信息等理论（代表作 1），并在此基础上继续开展他们的工作（部分英文：Compared to visible light images, thermal infrared images focus on capturing target temperature information and are relatively insensitive to illumination, yet they also suffer from thermal crossover phenomena）

4. 美国 NASA 空间研究所、OSA Fellow、JQSRT 杂志原主编 Mishchenko 教授等人在物理学权威综述期刊 *Physics Reports* 中正面引用了本项目研究成果（代表作 2）。对本项目提出的用于研究随机离散粒子散射问题的混合有限元-边界积分-特征基函数方法进行了肯定。（部分英文：More recently, other numerical solvers of the MMEs have been used, such as the PSTDM and its variations, the DDA, the FDTD, and the hybrid finite element- boundary integral-characteristic basis function method.）。

5. IEEE Fellow、宾夕法尼亚州立大学 Douglas H. Werner 教授在本领域高水平期刊 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 对本项目（代表作 3）中提出的 FETD 算法中的叠层基函数进行了正面引用，并在此基础上开展后期工作。（部分英文：In the traditional FETD method, the nodes, edges, and surfaces are shared at the element boundaries, and the hierarchical basis functions are continuous on the interface of the elements. Therefore, the integration of the basis functions involves the overlapping area across the elements, which will produce nonzero entries in the off-diagonal block area of the global mass matrix）

6. IEEE 高级会员、新加坡南洋理工大学 Eng Leong Tan 教授在本领域期刊 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 中正面评价了本项目提出的无条件稳定亚网格 FDTD 算法（代表作 4），对该方法突破传统 CFL 条件限制、实现全域统一大步长稳定计算、兼顾多尺度电磁问题计算效率与精度的技术优势给予了肯定。（部分英文：A possible choice is to use the unconditionally stable (US) FDTD methods based on the orthogonal expansions in time schemes, where the larger size of time step could be used to perform the marching-on-in-time scheme.）

7. 新西兰化学学院院士、新西兰化学界最高奖 Maurice Wilkins Center Prize for Chemical Science 奖获得者、新西兰奥克兰大学 Geoffrey Waterhouse 教授发表在 *Synthetic Met.*, 2022, 287: 117052 的研究论文中引用了该项目团队提出的关于微观电磁损耗物理机制的观点（代表作 5），“异质界面处的强电子相互作用，以及导致不均匀空间电荷分布的界面电子结构重构，起到增强界面极化的作用。”（Strong electron interactions at the heterogeneous interfaces, together with interfacial electronic structure reconfiguration leading to an uneven spatial charge distribution, act to enhance interface polarization.）。

8. 中国科学院院士、北京科技大学张跃教授在 *Mat. Sci. Eng. R.*, 2024, 159: 100795 的论文中指出该项目团队的工作可以揭示微观因素和宏观性能之间的联系，“F 离子可以调节缺陷水平和电导率。相应地，适当的电磁参数和微波衰减能力也会得到改善...Wu 等人提出了一种新的 F 离子调节策略，以实现增强型微波吸收器...这为解决低频电磁干扰问题提供了可行的启示。（代表作 5）”（Wu et al. proposed a new F- regulation strategy to achieve enhanced microwave absorber. ...which provides a viable inspiration for settling the low-frequency electromagnetic interference）。

9. 中国工程院院士、哈尔滨工业大学原校长、哈尔滨工业大学周玉教授在其发表于 *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34: 2316338 上的研究论文中肯定了该项目团队在电磁波微观空位表征方面

的工作，“... XPS 结果中的 S 2p 谱经过去卷积，由低配位 S 导出的 S 2p_{1/2} 峰通常与 S 空位相关。（代表作 5）”（... The S 2p spectra in the XPS results are deconvolved, and the S 2p_{1/2} peaks derived from the low coordination S are generally associated with S vacancies.）。

10. 中国工程院院士、哈尔滨工业大学赫晓东教授在其发表于 Adv. Sci., 2025, 12: e05551 上的研究论文引用该项目团队关于电磁损耗机制的观点，“... R 值减小，A 值增大，表明更多的电磁波进入水凝胶并消散。”（... the R value decreases and the A value increases, indicating more EM waves enter the hydrogel and are dissipated）。

项目简介

目标特性的精确表征是目标探测、识别与隐身设计的共性基础，其理论建模的精度与完备性，从根本上制约着精确制导、预警探测及空天遥感等应用系统的设计研发及其在复杂环境下的效能发挥。面对日趋复杂的应用场景，单一频谱的独立建模已难以满足对目标多频谱特性时空一致表征的需求，亟需在保留各频谱独立物理机制的基础上，构建面向统一系统集成架构的共享目标模型、背景模型及时空信息的目标特性多频谱建模理论与方法体系。然而，目标多频谱特性涉及红外辐射传输、光散射、电磁散射与电磁吸收等多种物理机理，各频谱特性既遵循各自独立的物理规律，又通过目标材质、结构形态与背景环境产生内在的物理关联，其耦合关系复杂，数学描述形式迥异，致使该理论与方法体系的构建面临根本性难题。围绕这一关键科学问题，项目组历经十余年系统研究，以“辐射—散射—吸收”这一电磁波与物质相互作用的完整物理链路为主线，从目标红外辐射特性耦合求解模型与红外场景生成方法、目标与大气路径激光散射退偏机制、电大尺寸目标电磁散射高效数值求解，以及宽带吸收与低频响应的协同调控四个层面展开深入研究，揭示了红外链路中多要素衰减增强的耦合规律、激光在大气粒子群中的散射退偏机理，发现了感应电流与雷达回波的关联机制及介质衬层中的损耗色散规律，建立了覆盖红外、激光与电磁频段的目标特性多频谱建模理论与方法体系，为复杂环境下目标探测识别与隐身设计提供了基础理论支撑。

1.主要研究内容

(1)目标红外辐射特性建模理论与方法。阐明探测链路中红外信号的衰减与增强物理机制，建立涵盖目标、背景、大气、环境、干扰及传感器响应在内的红外辐射耦合求解模型；并在此基础上，将物理定律嵌入神经网络可微仿真层，建立基于辐射传输物理约束的红外场景智能生成方法，通过构建的红外检测框架，实现任务场景驱动的红红外建模与智能生成数据有效性的验证。

(2)目标激光散射特性建模理论与方法。针对目标激光散射与大气传输路径中的偏振退化问题，建立不同材料与粗糙度表面的激光散射解析模型，实现面元散射空间分布与偏振信息解析表达的定量表征；系统揭示目标激光散射、大气微粒衰减退偏及背景耦合等多元散射机制，构建其数学表征与耦合模型；发展复杂粒子群激光散射的解析与数值混合建模方法，实现大气微粒对激光传输散射衰减与相位变化的定量描述。

(3)目标电磁散射特性建模理论与方法。针对电大尺寸复杂目标的电磁散射问题，建立多尺度网格剖分与电磁建模方法，揭示目标表面感应电流分布与雷达回波之间的内在关联，进而实现精细结构特征与整体电磁散射特征的统一表征；建立散射场与吸收损耗场之间的互易性约束关系；发展时域与频域相结合的高效数值算法，建立大尺度目标电磁散射特性的高效高精度数值求解方法。

(4)目标电磁吸收特性建模理论与方法。面向多频谱探测的宽频段覆盖特性，构建电磁波在介质衬层与谐振结构中的传输损耗模型，揭示介电/磁导率色散规律及阻抗匹配机制；明晰结构参数与吸收性能的定量映射关系，实现吸收峰频段与吸收率的准确表征；进而探明微观缺陷与宏观吸波性能之间的跨尺度作用机制，突破传统材料在宽带吸收与低频响应上的协同调控瓶颈，为宽频隐身设计提供新路径。

2.科学发现点

(1)揭示了探测链路中目标、背景、环境、大气、干扰及传感器等多要素对红外辐射信号的衰减与增强作用机理，建立了涵盖六要素的红外辐射耦合求解理论模型；探索了物理机理嵌入神经网络构建红外场景智能生成模型的技术途径，搭建了红外目标检测的闭环迭代框架，为红外建模与智能生成数据有效性验证提供了方法支撑。

(2)揭示了目标表面粗糙度及材质参数对激光散射空间分布与偏振退化的影响机理，建立了适配不同材料的表面散射解析模型，明确了目标散射、背景耦合与大气传输衰减的多元散射机制及其耦合关系，发展了复杂形态粒子群激光散射的解析与数值混合建模方法，实现了非球形、非均质粒子群散射衰减与相位变化的快速精准预测。

(3)发现了电大尺寸目标表面感应电流分布与雷达回波之间的内在关联规律，确立了散射场能量与介质损耗功率之间的平衡约束关系；提出了多尺度网格剖分与电磁特征协同表征方法，发展了亚网格稳定时域有限元法及改进显式差分算法，从理论层面揭示了散射与损耗两类物理过程在数值离散框架下的耦合一致性。

(4)揭示了电磁波在介质衬层与谐振结构中的传输损耗机理及介电/磁导率色散规律，建立了结构参数与吸收性能的定量映射关系；首创了氟离子原位引入调控电磁参数的新策略，揭示了氟离子对材料形貌、组分、界面及导电性的协同优化机制，解决了传统材料难以兼顾宽带吸收与低频响应的难题。

3.科学价值

该项目以“辐射-散射-吸收”电磁波与物质相互作用的完整物理链条为主线，揭示了探测链路多要素对红外辐射信号的衰减与增强耦合规律，建立了涵盖目标、背景、大气、环境、干扰及传感器响应的红外辐射传输理论模型；发现了目标表面粗糙度及材质参数对激光散射空间分布与偏振退化的影响规律，突破了传统米氏理论的均质球形假设；揭示了电大目标表面感应电流与雷达回波的内在关联及散射与吸收场的互易性约束关系，发展了多尺度网格剖分与亚网格稳定时域有限元法；揭示了电磁波在介质结构中的传输损耗与色散规律，建立了兼顾宽带吸收与低频响应的协同调控理论。研究成果已服务于中航西安飞机工业集团等单位，支撑建设了陕西省超大规模电磁计算重点实验室、陕西省复杂环境电磁频谱感知与多传感器信息融合校企联合研究中心，提升了陕西省在目标特性与电磁计算领域的平台实力与学术影响力。

4.同行引用及评价

项目组在该领域发表 SCI 检索论文 58 篇，出版专著 6 部。5 篇代表性论文发表在 Physics Reports（影响因子 27.5）、Advanced Functional Materials（影响因子 19.9）、IEEE TMM、IEEE TAP、IEEE AWPL 等本领域高水平期刊上，总影响因子 66，5 篇代表论文他引 262 次；3 部代表性专著知网他引 365 次。研究成果得到了国内外同行的广泛关注和积极评价：英国 Josef Kittler 院士评价相关成果“为目标特征分析提供了重要理论工具”；NASA 科学家、美国光学学会会士 Mishchenko 教授在 Physics Reports 中引用了项目组关于光散射理论的工作；IEEE 会士 Douglas H. Werner 教授在国际期刊撰文评价了项目组在电磁计算方法方面的创新成果；中国科学院张跃院士、中国工程院周玉和赫晓东院士等对该项目的研究成果也给予了充分肯定。项目成果获陕西高等学校科学技术奖一等奖 3 项，依托项目培养的博士研究生中 1 人获陕西省优秀博士学位论文。

完成人合作关系说明

陈世国作为本项目第一完成人，与崔志伟、何欣波、刘骁龙、田春娜、魏兵等诸位完成人长期共事于西安电子科技大学，围绕多频谱目标特性一体化建模理论与方法开展了十余年的持续合作。我们之间既有同一研究团队的深度协作，也有跨方向的学术联动，形成了紧密而稳定的合作关系。

陈世国与崔志伟、魏兵、何欣波、刘骁龙同在西安电子科技大学物理学院工作，自项目启动之初便共同参与多频谱目标特性一体化建模的研究工作。崔志伟负责激光散射特性建模方向，魏兵负责电磁散射辐射建模方向，刘骁龙负责电磁吸收特性调制方向，本人侧重红外辐射特性建模，我们在多频谱目标特性一体化建模理论框架的构建过程中保持了密切的学术交流，多次就多物理场耦合建模的关键科学问题进行深入研讨，共同推动了项目整体理论体系的完善。

崔志伟与魏兵同在西安电子科技大学物理学院从事散射建模相关研究，两人在激光散射与电磁散射方向各有专长，长期保持学术交流，共同支撑了多频谱散射建模理论体系的建立。何欣波在电磁散射高效算法方向的研究工作得到了魏兵的悉心指导，二人系师生关系，合作发表了关于亚网格 FETD 和显式 Newmark-FDTD 的代表性论文，相关成果显著提升了电磁散射计算的效率和精度。刘骁龙在复杂目标电磁吸收特性调制方向的研究工作得到了魏兵的悉心指导，合作发表了多篇关于电磁吸收特性调制理论的高档次论文。魏兵还参与了电磁波时域不连续伽略金方法专著的撰写工作，为该方向的学术交流与方法推广作出了贡献。

陈世国与田春娜的合作始于 2020 年，双方在物理内嵌的红外场景图像智能生成模型、多模态融合检测领域开展了深入合作，共同指导研究生完成相关研究工作，合作发表了代表性论文（IEEE TMM）。该成果将多频谱特性建模与智能检测方法有机结合，为项目增添了新的技术维度。

在多年合作过程中，项目完成人累计合作发表论文 50 余篇，合作出版专著 6 部，共同承担国家自然科学基金项目 4 项、国家重大工程项目 1 项，联合培养博士研究生 10 余名、硕士研究生 30 余名。形成了方向互补、协同攻关的良好合作格局，为本项目的顺利完成奠定了坚实基础。

