

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

先进复合材料结构多模式损伤物理本征与健康状态识别

二、提名者及提名意见

提名者：王诗斌（西安交通大学，教授，机械工程）、连培园（西安电子科技大学，副教授，机械工程）

提名意见：

聚焦我国高端装备在轨运行保障技术和前沿科学问题，围绕复合材料结构服役环境和外部载荷的复杂性、损伤模式的多样性和耦合性、损伤特征信号的微弱性，开展多模式损伤物理本征与健康状态识别研究。提出服役环境下多物理场耦合模型，揭示不同物理场耦合环境下复合材料细观损伤萌生、累积演化及失效机理；提出考虑服役环境的宏细观三尺度分析方法，阐明复合材料结构由细观多模式损伤发展到宏观断裂的失效机制；提出非凸正则化稀疏特征精准提取方法，提升了复合材料结构早期微弱低速冲击定位精度。研究成果可为我国高端装备关键复合材料核心部件的健康状态识别、安全服役、备份组件启动、未来的在线维修提供科学依据，最大限度的延长服役寿命。

提名该项目申报 2026 年度陕西省自然科学二等奖。

三、项目简介

该项目属于机械状态监测与诊断科学技术领域，为保障我国高端装备先进复合材料结构安全服役提供基础理论和方法支撑。

复合材料已成为航空、航天、能源等领域的关键结构材料，其服役寿命与可靠性直接关乎国家重大任务成败。高端装备服役环境恶劣，如风电叶片承受大幅温差引发的力-热耦合，星载可展开结构在轨面临高真空、强辐射、大高低温差（ $-120^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ ）及微重力等极端条件，与振动、冲击载荷协同作用易致损伤甚至失效。此类损伤呈现显著的多模式性、多尺度性及强耦合性。同时，监测数据常伴强噪声、低信噪比，且损伤样本稀缺，传统信号处理方法难以有效提取微弱特征，致使状态判别与寿命预测缺乏可靠依据。

传统研究方法多限于地面静载或单一场合，缺乏多物理场耦合条件下复合材料结构从细观初始缺陷到宏观结构失效的全链条跨尺度规律的认识；损伤特征与响应信号之间的映射关系尚不明晰，难以支撑在轨维修决策与备份启动阈值的科学设定。针对上述挑战，本项目引入组分材料和界面参数的随机不确定性，建立考虑初始孔隙的多物理场耦合细观力学分析模型，揭示服役环境、初始细观多模式损伤萌生、演化及失效机理；发展融合多场耦合效应的宏-细观多尺度建模方法，突破传统单一尺度下宏观或细观力学方法难以揭示复合材料由细观损伤发展到宏观断裂的失效机理的技术瓶颈；提出基于广义极大较小凹罚函数的非凸正则

化稀疏降噪方法，面向小样本强噪声工况实现多模式损伤识别、冲击定位及剩余承载能力预测。研究成果将为我国高端装备复合材料结构健康评估、安全服役策略制定及未来在轨维修提供科学依据，有效延长在轨寿命，降低任务风险。

该项目在国家自然科学基金的支持下，围绕风电叶片、星载可展开复合材料结构在轨运行保障技术和前沿科学问题开展研究，取得了具有重要科学意义和国际影响力的创新性成果：

1) 多物理场耦合建模

构造了二维、三维参数化单元，针对连续纤维增强复合材料及短纤维/颗粒增强复合材料提出了参数化力-热、力-电耦合有限体积直接平均细观力学方法（Finite-Volume Direct Averaging Micromechanics, FVDAM），研究了连续纤维增强复合材料、颗粒增强电复合材料的均匀化等效性能和局部场分布，探索了不同载荷条件对基体与颗粒过渡界面上局部力学响应分布的影响；聚焦空间服役环境的复杂性，构建力-电、力-磁-热、力-热-电-磁多场耦合非线性本构模型模型，揭示预应力、温度、孔隙及界面缺陷对磁电耦合系数、等效刚度与导热性能的劣化规律，实现了微尺度场集中与宏观功能退化的跨尺度关联。

2) 宏-细观多尺度建模方法及失效机理分析

在细观尺度下，提出了三维高精度有限体积细观均化模型通过 CT 技术表征短纤维增强复合材料的细观结构，量化细观短纤维的空间取向和细观长度等几何特征。根据短纤维的分布规律，建立简化的椭球夹杂力学模型，基于短纤维的空间取向和长度确定细观力学模型中椭球夹杂相的三轴比例关系，评估短纤维增强复合材料的各项异性力学性能；提出了参数化建模及二步法求解策略，探索孔隙缺陷对复合材料各向异性力学性能的影响；深入研究制造与服役不确定性下的随机性建模方法并进行力学性能分析。结合蒙特卡洛与高精度边界元方法，显式刻画纤维随机排布与界面缺陷几何形态的联合随机效应，揭示高纤维体积分数下界面缺陷引起的性能离散性呈非线性放大趋势，确立缺陷面积与长度比是关键可靠性敏感参数，推动研究范式从“确定性设计”向“概率性评估”跃迁；提出了复杂曲面复合材料结构三尺度协同建模求解技术，突破了传统的单一尺度下宏观或细观力学方法难以揭示材料由细观损伤到宏观断裂的失效机理，揭示了复合材料结构由细观损伤（纤维断裂、基体开裂、界面脱粘等）发展到宏观断裂的失效机理；同时，基于连续损伤力学和扩展有限元，提出了复合材料疲劳寿命预测方法，并精确预测疲劳裂纹扩展模式，揭示了疲劳裂纹扩展机制和疲劳失效机理。研究成果可应用于复杂曲面复合材料结构的损伤/寿命评估。

3) 冲击损伤感知与剩余强度分析

探索了复合材料层合板响应信号冲击特征与冲击点之间的影响机理，提出复合材料层合板响应信号整合方案；设计了广义极大较小凹非凸稀疏罚函数，提出了非凸正则化稀疏特征增强表示方法，推导了模型保凸数学约束，开发了基于前向后向分裂算法的模型快速优化求解算法，实现了复合材料层合板低速冲击响应信号降噪与早期微弱瞬态特征增强，克服传统稀疏表示方法的幅值低估问题，高

精度提取微弱冲击特征；针对小样本、强噪声、低资源约束等在线监测难题，创新提出 TQWT-GMC-IVYA 自适应降噪方法以及损伤定位方法，在光纤传感实验中实现毫米级冲击定位精度，显著优于传统无损检测方法，有效解决了“是否被撞、撞在何处”的感知难题；构建多模式损伤耦合建模与剩余强度智能预测体系。融合 3D Hashin 准则与内聚力模型，建立高保真三维渐进损伤多尺度模型，并结合 SEM 微观观测验证损伤演化路径；进一步提出“物理仿真-深度学习”混合预测框架，利用高置信度混合数据集训练神经网络，结合随机森林方法和概率模型，实现复合材料结构高精度剩余拉伸强度和刚度预测。

近五年来项目团队共发表 SCI 论文 50 余篇，涵盖复合材料细观建模、多场耦合分析、非线性力学特性、智能监测与损伤识别等核心研究方向。5 篇代表性论文 google 学术引用共计近 300 次，发表期刊包括《Composite Structures》、《Composites Science and Technology》、《Composites Part B-Engineering》、《Journal of Sound and Vibration》、《International Journal of Fatigue》等领域权威期刊。被包括中国、美国、比利时、意大利、新加坡、加拿大在内的多国知名学者高度评价；撰写专著一部，题目为《复合材料力学与损伤》，拟定于 2026 年 12 月正式出版；依托项目培养研究生 7 人，其中 3 人顺利完成硕士学业，4 人顺利完成博士学业，指导研究生获国家奖学金 3 次，为相关研究领域储备了专业人才。担任国际知名期刊 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 编委，第一完成人作为大会共同执行主席，于 2024 年 6 月 14-16 日在西安成功举办“极端环境下复合材料结构力学学术会议”，会议吸引引来自全国 50 余所高校、20 余家科研机构 and 企业的 200 余人投稿及 400 余人参会。

四、客观评价

针对重要科学发现 1 的客观评价：

(1) 意大利材料和微系统研究中心主任 Firas Awaja 教授在著名材料综述期刊《Progress in Materials Science》上详细引用并论述关于热残余应力与失效强度关系的研究工作，并评价“热残余应力对失效强度的影响与纤维偏轴角度紧密相关”。

(2) 通用单胞理论创始人、美国 NASA 著名研究员 Jacob Aboudi 评价“所开展的有关细观建模方法研究方面的工作可有效解决复合材料损伤评估与细观应力场求解问题”。

(3) 伊朗沙希德·贝赫什提大学 Mahmoodi 教授引用了关于弱界面粘结会降低复合材料横向强度这一重要结论，并评价“在热残余应力、弱界面方面的研究具有重要意义，开展了热残余应力下弱界面粘结复合材料力学行为研究的开创性工作”。

(4) 美国弗吉尼亚理工学院暨州立大学 Romesh C. Batra 院士引用了关于细观结构参数与复合材料宏观力学行为紧密相关的结论，并指出“复合材料力学行为可以通过选取恰当的代表体积单元而有效获取”。

(5) 同济大学国家级人才黄争鸣教授评价“开展复合材料结构分析的有效

方法是建立多尺度模型，进一步突出了开展多尺度方法研究的重要意义”。

(6) 澳大利亚阿德莱德大学 Giang D. Nguyen 教授评价“在通用单胞方法中的非完美界面研究方面开展了开创性工作”。

针对重要科学发现 2 的客观评价：

(1) 德国莱布尼茨材料技术研究所主任 Jérémy Epp 教授评价“提出的方法修正了临界距离理论，可以精确控制疲劳寿命预测结果”。

(2) 国家脉冲强磁场科学中心主任、华中科技大学国家级人才李亮教授评价“提出的动态寿命预测方法相较传统方法具有优势，大幅度预测精度提升了预测精度”。

(3) 新加坡南洋理工大学机械与航空航天工程学院 R. M. Lin 教授评价“提出的二代小波有限元方法可有效识别管道裂纹”。

(4) 西班牙卡斯蒂利亚拉曼恰大学 Fausto Pedro García Márquez 教授多次引用，并评价“原创新工作是将小波方法进一步拓展到管道裂纹的辨识”。

(5) 日本名古屋大学 Toshiro Matsumoto 教授，温州大学向家伟教授多次引用并高度评价“提出的小波有限元方法可降低网格单元数量，有效识别结构表面裂纹”。

(6) 韩国南首尔大学 Jong-Won Lee 博士多次引用，并评价“提出的二代小波有限元方法和应力强度因子计算方法可实现管道裂纹位置及深度的定量诊断”。

针对重要科学发现 3 的客观评价：

(1) 中国科学院院士、美国工程院院士、西南交通大学首席教授翟婉明评价“与上述时频分析方法不同，信号分解方法基于预设的模式模型，将非平稳信号分解为一系列具有明确物理意义的子信号模式”。

(2) 中国科学院院士、东北大学教授闻邦椿将 GMC 罚函数评价为“强大的稀疏先验”。

(3) 意大利数学联盟理事会成员、博洛尼亚大学学者 Serena Morigi 多次引用，并评价“提出的新方法结合了形态成分分析(MCA)和小波变换，并采用广义极小极大凹惩罚项，以改善 L1 范数正则化 MCA 在信号分解中的表现”。

(4) 美国佐治亚理工大学 Sung-Ha Kang 教授评价“通过变分优化并遵循凸-非凸策略，学术界已成功提出了一类广泛的非凸罚函数，将其用于稀疏优化，可显著提升信号去噪与分解的性能”。

(7) 美国机械工程师学会会士及美国宇航学会通讯会士、ASME Journal of Vibration and Acoustics 副主编及 Clean Energy 副主编，厦门大学特聘教授罗华耿评价“将 GMC 用作惩罚函数，并分别基于短时傅里叶变换(STFT)和离散余弦变换(DCT)构造了稀疏字典，以从振动信号中分离瞬态分量和谐波分量”。

(8) 中国仪器仪表学会会士、电子科技大学国家级领军人才程玉华教授评价“这为在稀疏表示框架下实现瞬态信号与噪声的物理可分性提供了理论支撑”。

(9) 吴文俊应用数学奖获得者、国家自然科学基金重大项目首席科学家、西安交通大学知名教授高静怀评价“在多变量情形下，GMC 函数是一种阈值函

数，其中较大值比小值受到更重的惩罚”。

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	Failure analysis of fiber-reinforced composites subjected to coupled thermo-mechanical loading	Composites Structures	Ye Junjie, Wang Yiwei, Li Ziwei, Saafi Mohamed, Jia, Fei, Huang	2020, 235: 11176	2020 年 3 月 1 日	Ye Jia nq ia	Ye Ju nji e	叶俊杰, 王玮玮, 贾斐	41	Web of Science	是
2	Initial and final failure strength analysis of composites based on a micromechanical method	Composites Structures	Ye Junjie, Qiu Yuanying, Chen Xuefeng, Ma Juan	2015, 125: 328– 335	2015 年 2 月 13 日	Ye Ju nji e	Ye Ju nji e	叶俊杰, 仇原鹰, 陈雪峰, 马娟	13	Web of Science	是
3	An analytical model for nonlinear magnetoelectric effect in laminated composites	Composites Structures	Shi Yang, Li Ni, Wang Yongkun, Ye Junjie	2021, 263(2):11 3652	2021 年 5 月 1 日	Ye Ju nji e	Shi Yang	师阳, 李妮, 王永坤, 叶俊杰	34	Web of Science	是

4	Sparsity-enhanced signal decomposition via generalized minimax-concave penalty for gearbox fault diagnosis	Journal of Sound and Vibration	Gai Gaigai, Selesnick, Ivan W. Wang Shibin, Dai Weiwei, Zhu Zhongkui	2021, 432, (213-234)	2018年10月13日	Wan g Sh ibi n	Ca i Ga iga i	蔡改改, 王诗斌, 朱忠奎	56	Web of Science	是
5	A dynamic cold expansion method to improve fatigue performance of holed structures based on electromagnetic load	International Journal of Fatigue	Zheng Guo, Cao Zengqiang, Zuo Yangjie	2021, 148: 106253	2021年3月24日	Ca o Ze ng qi an g	Zh en g Gu o	郑国, 曹增强, 左杨杰	32	Web of Science	是
合 计											

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
叶俊杰	1	无	教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学	总体负责项目方案设计、关键技术攻关等工作, 提出了复合材料多场耦合下宏-细观多尺度建模方法及界面损伤机理分析方法。对项目的重要科学发现 1~3 部分做出了创造性贡献。
蔡改改	2	无	副教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学	力-电耦合本构模型的提出者之一, 提出了非凸正则化稀疏特征精准

						提取技术，提升复合材料冲击损伤感知精度，构建了复合材料剩余强度/刚度评估模型。对重要科学发现 1 做出了创造性贡献，是重要科学发现 3 的主要贡献者。
郑国	3	无	助理研究员	西安电子科技大学	西安电子科技大学	负责疲劳损伤及裂纹扩展建模，提出了基于连续损伤力学和扩展有限元的疲劳裂纹扩展分析方法及疲劳寿命预测方法。对项目的重要科学发现 1~2 做出了创造性贡献。
师阳	4	无	副教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学	在项目中突破了磁致伸缩材料非线性本构求解难题，提出非线性等效参数法，结合 AC-DC 联合模拟与迭代算法，建立磁电复合材料多场耦合理论框架。通过实现力、电、磁双向耦合仿真，实现了磁电器件动态性能分析与优化设计。对项目的重要科学发现 1 做出了创造性贡献。

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）
西安电子科技大学	1	西安电子科技大学为该项目第一完成单位，对本项目的主要学术贡献包括：（1）探索了多物理场耦合作用下制造成型过程中的初始损伤扩展，发现了导致损伤末端的最大应力和电场强度均呈现先增大后减小的趋势，并且在损伤中心区域出现明显的损伤端部应力集中现象及材料性能退化；（2）揭示了纤维增强复合材料的局部断裂形貌与组分材料的细观结构内在关联，明确了纤维质量含量的增加将加剧断裂表面的不规则性，随着纤维体积含量的增加，局部基体失效机制由韧性断裂转变为脆性断裂，纤维需在一定的质量含量以上，方可实现纤维增对基体材料的增韧效果；（3）针对小样本、强噪声、低资源在线监测难题，提出 TQWT-GMC-IVYA 自适应降噪与损伤定位方法，使光纤传感实验达毫米级精度，显著优于传统方法，有效解决冲击感知难题。

八、完成人合作关系说明

项目期间，所有项目完成人之间均进行了深度合作。第一完成人叶俊杰与第二完成人蔡改改围绕复合材料多物理场耦合作用下的损伤分析、复合材料层合板低速损伤定位等课题开展合作研究，共同发表多篇高水平学术论文；第一完成人叶俊杰与第三完成人郑国在复合材料疲劳损伤和寿命预测方面开展合作研究，共同发表了多篇高水平学术论文；第一完成人叶俊杰与第四完成人师阳围绕复合材料多尺度损伤方面开展了深度合作，共同发表多篇高水平学术论文。