

# 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

复合材料与结构性能分析的高效高精度数值方法、理论及其应用

## 二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

该项目聚焦复合材料与结构性能分析所依赖的带小参数微分/积分系统有效求解这一关键基础科学问题，从“数学理论-共性算法-软件平台-工程应用”四个维度开展了系统研究。重要科学发现点：1. 发展了高维材料数据的小波降维理论，提出了等效参数预测的小波-深度学习智能算法，摆脱了材料优化设计中等效参数计算对微分方程系统求解的依赖；2. 通过误差估计破析了经典均匀化方法和多尺度方法精度低的根源，发展了正交曲线坐标系下的多尺度分析理论，构建了复合材料结构热-力耦合问题的高阶多尺度方法；3. 建立了均质材料非局部积分模型解的适定性理论，揭示了非局部扩散模型、近场动力学模型与相应经典局部模型间的渐近收敛关系，提出了非局部模型的高效有限元方法和 POD 降阶配点法。

项目为复合材料与结构性能分析和优化设计建立了一套有数学理论保证的高效高精度计算体系及理论框架，成果发表在 SIAM、J. Comput. Phys.、Comput. Methods Appl. Mech. Eng.等计算数学、计算力学、计算材料学权威期刊，并成功应用于工程复合材料与结构性能的模拟和分析。研究成果得到三十多个国家著名学者团队的正面评价和引用，引用者包括院士、会士、国家人才等，并获得 2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果特等奖。

项目材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无异议，符合陕西省自然科学奖提名条件。

提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。

## 三、项目简介

该项目属于基础研究，是计算数学与计算力学、计算材料学交叉融合的前沿研究方向，涉及数学、力学和材料科学等学科，呈现出多学科相互渗透的特征。

复合材料与结构(Composite materials and structures: CMS)的物理、力学性能分析是航空、航天等领域的关键基础科学问题之一，随着高精尖技术发展的需要，对 CMS 服役性能的研究也从传统的单一尺度、单一物理场和局部微分模型发展到系统的多尺度、多物理场和非局部积分模型的研究，并伴随着复合材料结构件数量的增加相应的模型求解复杂度呈指数增长，如碳纤维复合材料制成的航天器结构件性能分析。经典数值方法及现有的工业软件对 CMS 精细模拟存在计算量巨大、效率低且精度差甚至失效的困境，从而对重大工程装备结构优化设

计、服役安全评估直接产生重大影响，因而迫切需要系统发展高效高精度的计算体系。《中国学科及前沿领域发展战略研究(2021-2035)》等均将对 CMS 的有效计算作为亟待解决的关键问题。

本成果是在国家自然科学基金重大研究计划、国家自然科学基金等基础研究计划的支持下完成的，申报团队经过十余年的系统性深入研究，建立了 CMS 性能分析（优化设计中的等效性能预测→服役分析中的多场耦合计算→安全评估中的损伤断裂模拟）的高效高精度计算体系及理论框架，取得的突破性进展和科学发现点如下：

**(1) 复合材料等效参数预测的数据降维理论和小波-深度学习智能算法。**复合材料及结构优化的基础是对复合材料等效参数进行高效高精度预测，复合材料几何结构和组分参数与等效参数之间是一个极其复杂的高维非线性映射关系，需要对定义于不同微/细观结构上的小参数偏微分方程系统进行反复求解。针对这一制约经典优化设计效率的瓶颈问题，基于小波方法建立了有效的数据降维理论，从数值模拟获取的海量高维材料数据中提取到关键特征参数，从而有效提高深度学习模型的训练效率。进一步建立了具有高精度、高效率预测能力和优异抗噪性能的小波-深度学习智能算法，构建了高精度的代理模型，摆脱了优化设计过程中对偏微分方程系统的反复求解，从而实现对颗粒增强、纤维增强复合材料及混凝土材料等效热、力学参数的高效预测，并有效缩短了新型复合材料研发周期。相关成果被欧洲科学院院士 T. Rabczuk 教授、国际计算力学学会主席 G. Yagawa 教授等权威学者正面评价和引用。

**(2) 复合材料结构热-力耦合问题的多尺度分析理论和高阶多尺度方法。**多尺度问题的数学模型是具有强间断性和高频振荡性系数的小参数微分系统，其解的高频振荡性使得数值求解所需计算资源消耗极大，并给数值方法的收敛性和稳定性带来严峻挑战。通过误差估计破析了经典均匀化方法和多尺度方法数值精度低的根源，提出基于“保持局部物理量平衡(Well-balanced)”机制的高精度高阶多尺度方法构造理论；针对大规模工程结构中的常用壳构件，基于所建立的智能算法和高阶多尺度方法构造理论，建立了正交曲线坐标体系下复合材料壳体结构热-力耦合问题的宏-细观关联的高阶多尺度计算模型及其多尺度分析理论，并发展了高效的多尺度算法，实现了富有壳结构件的大规模工程结构热-力耦合问题的有效模拟；进一步突破具有强间断源项细观尺度模型的多尺度分析难题，建立了具有空间三尺度构造的复合材料结构热-力耦合问题宏-细-微观关联的高阶三尺度计算模型及其高效三尺度算法，解决了连续介质力学框架下经典多尺度方法模拟空间三尺度问题计算量大甚至失效的计算难题。相关成果被中国工程院院士朱合华教授、中国科学院院士郭旭教授、欧洲科学院院士 J. Woody Ju 教授、英国皇家工程院院士 John P. Dear 等权威学者正面评价和引用。

**(3) 复合材料非局部积分模型的适定性理论和快速计算方法。**非局部模型通过将空间导数转化为非局部积分为复合材料的损伤断裂分析提供了全新途径，但其数值求解既受算子全局依赖性导致的高计算代价制约，又因解的有限正则性而

在数值方法的构造与分析上面临严峻挑战，从而严重制约其实际应用。在将复合材料等效为相应的均质材料后，建立了均质材料非局部积分模型解的适定性理论，并建立了均质材料非局部扩散模型、近场动力学模型关于水平参数的渐近收敛性理论，揭示了两类非局部模型与相应经典局部模型间的渐近收敛关系；其次建立了均质材料非局部扩散模型的高效有限元方法及其稳定性、收敛性理论，构建了非结构化网格上非局部积分算子刚度矩阵高效计算算法；进一步构建了两类非局部模型的高效 POD 降阶方法和配点法，克服了基于双层积分的数值方法在非局部模型模拟中的效率瓶颈。相关成果被美国工程院院士 George E. Karniadakis、保加利亚科学院通讯院士 S. Margenov、国际工业与应用数学学会会士 Michael Kwok-Po Ng 教授等权威学者的正面评价和引用。

研究成果发表在 SIAM J. Sci. Comput、J. Comput. Phys、Multiscale Model. Simul.、J. Sci. Comput.等计算数学领域权威期刊和 Comput. Methods Appl. Mech. Eng.、Comput. Mech.、Int. J. Solids Struct.、Compos. Struct.等计算力学、计算材料学领域权威期刊，共发表 SCI 学术论文 120 余篇。5 篇代表性论文均为中国科协期刊分级 T1 级期刊论文(Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 2 篇、J. Comput. Phys 3 篇)，最高单篇 SCI 他引 65 次。研究成果得到了三十多个国家著名学者团队的正面评价和广泛认可，引用者包括院士、学会主席/会士、国家级人才以及顶级期刊主编/编委等。项目成果成功应用于中冶赛迪工程技术股份有限公司新型钢铁材料、西安远方航空技术发展有限公司新型航空材料和西安鑫圭陶瓷复合材料有限公司碳纤维编织复合材料的性能分析和优化设计，相关成果获 2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果特等奖。

该研究成果培养博士研究生 25 名，硕士研究生 30 名，获中国科协青年人才托举工程博士生专项计划、陕西省优秀博士论文、研究生国家奖学金等 10 余项，成就了陕西高校优秀青年人才支持计划、陕西省科协/西安市科协青年人才托举计划、香江学者计划共 4 人次，形成了一支在国内外有重要影响力的科学计算及交叉应用研究团队，支持了教育部空天领域复杂性科学重点实验室和西安市科学计算与应用统计重点实验室成功申报，推进了依托单位数学和力学学科的发展和建设。成果第一完成人现担任陕西省数学会副理事长、西安市科学计算与应用统计重点实验室主任、国际期刊《Int. J Numer. Anal. Model.》执行主编。成果第二完成人现担任中国数学会奇异摄动专委会委员、国际期刊《Comput. Mater. Continua》等青年编委。成果第三完成人现担任中国力学学会监事长、国际期刊《Acta Mech. Sin.》主编、《Flow》副主编。成果第四完成人现为西北工业大学准聘教授，入选西北工业大学翱翔海外学者。

## 四、客观评价

### (一) 对科学发现点 1 客观评价，涉及代表性论文 1

- (1) 美国航空航天学会和机械工程师学会会士、航空航天领域顶级期刊《AIAA Journal》副主编、美国普渡大学 W.B.Yu 教授在国际复合材料顶级期刊《Composites Part B: Engineering》上撰写的综述文章(2021, 224: 109152) 中

积极评价“论文[166-169]基于卷积神经网络的多尺度建模方法提供了材料与结构端对端的损伤预测方法,并在复合材料动态评估中具有潜在的应用价值(which can potentially enable in-process assessment of composites)。”(代表性引文 1),该引文中文献[168]为【代表性论文 1】。

- (2) 西南交通大学力学与航空航天学院院长、洪堡学者李翔宇教授在计算力学顶级期刊《Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering》上撰写的论文(2022, 394: 114891)中积极评价称“论文[9]通过对大规模结构化数据进行训练预测了复合材料的等效热传导系数。”(代表性引文 2),该引文中文献[9]【代表性论文 1】。
- (3) 国际计算力学委员会主席、日本最高学术荣誉“天皇”奖获得者、东京大学 G. Yagawa 教授在其专著《Computational mechanics with deep learning: An Introduction》对我们的波-深度学习混合智能计算方法进行了引用。(代表性引文 3),该专著第三章文献[41]为【代表性论文 1】。
- (4) 欧洲科学与艺术学院院士、欧洲科学院院士、德国包豪斯-魏玛大学 Timon Rabczuk 教授在材料科学著名期刊《International Journal of Mechanics and Materials in Design》上撰写的综述文章(2024, 20(3): 591-662)中高度评价“董等(2023)建立的小波-学习方法给混凝土材料的力学性质预测提供了前所未有的见解(integrated wavelet-learning have provided unprecedented insights)。”
- (5) 美国宇航局空间技术研究所的联合主任、国际计算力学协会、美国计算力学学会会士、美国约翰霍普金斯大学 S. Ghosh 教授在论文(Scientific Reports, 2025, 15(1): 6631)中正面评价“作者提出的小波-深度学习方法是研究涉及损伤场的起始和传播问题的候选方法(candidate ML methods for this task)”。

## (二) 对科学发现点 2 客观评价,涉及代表性论文 2 和 3

- (1) 欧洲计算固体与结构力学委员会主席、O.C. Zienkiewicz 奖获得者、国际计算力学领域顶级期刊《Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering》主编之一 M. Papadrakakis 教授在论文(Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 373: 113541)中正面评价称“论文[48]研究了复合材料壳体结构的热-力耦合问题。”(代表性引文 4),引文中文献[48]为【代表性论文 2】。
- (2) 国际著名计算力学专家、英国皇家航空学会会士、著名期刊《International Journal for Numerical Methods in Engineering》编委、帝国理工学院航空结构系主席 M.H. Ferri Aliabadi 教授在论文(Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2023, 416: 116369)中正面评价称“论文[25]研究了复合材料板结构的热-力耦合问题的多尺度均匀化方法。”引文中文献[25]为【代表性论文 2】。
- (3) 中国工程院院士朱合华教授和欧洲科学院院士 J. Woody Ju 教授在材料科学领域著名期刊《Materials & Design》撰写的论文(2023, 236: 112503)中高度评价“论文[29]中建立了一种统计高阶三尺度强度计算模型,对于提高混凝土

结构的计算效率具有重要的价值(which has significant benefits)。”(代表性引文 5), 引文中文献[29]为【代表性论文 3】。

- (4) 美国土木工程师学会计算力学委员会主席、著名期刊《International Journal for Multiscale Computational Engineering》副主编 A. Masud 教授在论文(International Journal for Multiscale Computational Engineering, 2023, 21(6): 1-34)中积极评价“董等人(2019)发现了经典的两尺度方法不能用于求解三尺度热-力耦合问题的机制, 然后建立了复合材料结构动态热-力耦合问题的高阶三尺度计算方法。”(代表性引文 6), 引文中文献[25]为【代表性论文 3】。

### (三) 对科学发现点 3 客观评价, 涉及代表性论文 4 和 5

- (1) 国际著名计算数学专家、冯康科学计算奖获得者、国际工业与应用数学学会会士、香港浸会大学 Michael Kwok-Po Ng 教授在计算数学著名期刊《Journal of Scientific Computing》上撰写的论文(2018, 75: 1102-1127)中积极评价称“论文[23]在求解空间 Riesz 分数阶扩散方程的有限差分方法上取得了重要的进展(there has been some significant progress)。”(代表性引文 7), 引文中文献[23]为【代表性论文 4】。
- (2) 著名计算数学专家、美国田纳西大学凤小兵教授计算数学顶级期刊《Journal of Computational Physics》上撰写的论文(2021, 428: 110081)中正面评价称“论文[14]发展了分数阶 FHN 模型的有限元方法, 后续的工作又研究了非规则区域上非线性反应-扩散方程的有限元方法。”文献[14]为【代表性论文 4】。
- (3) 著名计算数学专家、澳门大学数学系主任孙海卫教授在论文(Journal of Applied Mathematics and Computing, 2020, 62(1-2): 449-472)正面评价称“论文[57]已经研究了非线性分数阶偏微分方程的数值方法。”文献[57]为【代表性论文 4】。
- (4) 著名分数阶偏微分方程计算专家、国际期刊《Chaos》、《Fractional Calculus and Applied Analysis》等编委、上海大学李常品教授在论文(Mathematical Methods in the Applied Sciences, 2024, 47(1): 58-80)正面评价称“论文[9]建立了非规则区域上三维时-空分数阶 Bloch-Torrey 方程的非结构化网格有限差分-有限元耦合方法。”文献[9]为【代表性论文 5】。
- (5) 美国工程院院士、G. I. Taylor 奖章获得者、布朗大学 George E. Karniadakis 教授在计算力学顶级期刊《Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering》上撰写的论文(2024, 429: 117189)中正面引用我们设计的数值算例作为标准算例。(代表性引文 8), 引文中文献[35]为【代表性论文 5】。

### (四) 对本项目的整体评价

中国科学院院士、欧洲科学院院士、发展中国家科学院院士, 现任中国数学会副理事长、广州南方学院院长汤涛教授高度评价“形成了复合材料及结构性能分析的高效高精度计算体系及理论框架, 突破了传统数值方法分析复合材料及结构使役性能的低效率、低精度瓶颈, 研究成果具有重要科学意义和工程应用价值”。

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	A wavelet-based learning approach assisted multiscale analysis for estimating the effective thermal conductivities of particulate composites	Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	Hao Dong, Yufeng Nie, Junzhi Cui, Wenbo Kou, Minqiang Zou, Junyan Han, Xiaofei Guan, Zihao Yang	2021 年 374 卷 113591 页	2021 年 2 月 1 日	Hao Dong, Xiaofei Guan	Hao Dong	董灏, 聂玉峰, 崔俊芝, 寇雯博, 邹岷强, 韩均言, 关晓飞, 杨自豪	6	Web of Science	是
2	Multi-scale computational method for dynamic thermo-mechanical performance of heterogeneous shell structures with orthogonal periodic configurations	Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	Hao Dong, Xiaojing Zheng, Junzhi Cui, Yufeng Nie, Zhiqiang Yang, Qiang Ma	2019 年 354 卷 143-180 页	2019 年 9 月 1 日	Hao Dong, Zhiqiang Yan	Hao Dong	董灏, 郑晓静, 崔俊芝, 聂玉峰, 杨志强, 马强	9	Web of Science	是

3	Stochastic higher-order three-scale strength prediction model for composite structures with micromechanical analysis	Journal of Computational Physics	Hao Dong, Zihao Yang, Xiaofei Guan, Junzhi Cui	2022 年 465 卷 111352 页	2022 年 9 月 15 日	Xiaofei Guan	Hao Dong	董灏, 杨自豪, 关晓飞, 崔俊芝	6	Web of Science	是
4	Finite element method for nonlinear Riesz space fractional diffusion equations on irregular domains	Journal of Computational Physics	Zongze Yang, Zhanbin Yuan, Yufeng Nie, Jungang Wang, Xiaogang Zhu, Fawang Liu	2017 年 330 卷 863-883 页	2017 年 2 月 1 日	Yufeng Nie	Zongze Yang	杨宗泽, 袁占斌, 聂玉峰, 王俊刚, 朱晓刚	65	Web of Science	是
5	An unstructured mesh finite difference/finite element method for the three-dimensional time-space fractional Bloch-Torrey equations on irregular domains	Journal of Computational Physics	Zongze Yang, Fawang Liu, Yufeng Nie, Ian Turner	2020 年 408 卷 109284 页	2020 年 5 月 1 日	Fawang Liu	Zongze Yang	杨宗泽, 聂玉峰	13	Web of Science	是

6											
7											
8											
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
聂玉峰	1	院长	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 做出了创造性贡献，是代表性论文[1-2]和[4-5]的主要作者，具体贡献如下：（1）引入小波变换方法对背景网格上提取的复合材料海量材料数据进行多层小波分解预处理（天然过滤噪声）；（2）提出了保持局部应力和热通量平衡的高精度高阶多尺度方法的构造理论；（3）系统建立了非局部积分模型关于水平参数的收敛性理论，得到了非局部积分和局部微分模型两者的渐近收敛关系；（4）建立了复合材料非局部扩散模型和近场动力学模型的高效 POD 降阶方法和配点法，解决了传统数值方法模拟非局部积分模型效率低下的瓶颈难题。
董灏	2	无	教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学	项目参与人。对发现点 1、2 做出了创造性贡献，是代表性论文[1-3]的主要作者，具体贡献如下：（1）引入小波变换方法对背景网格上提取的复合材料海量材料数据进行多层小波分解预处理（天然过滤噪声），建立了小波-深度

						学习智能算法；(2)提出了保持局部应力和热通量平衡的高精度高阶多尺度方法的构造理论，建立了复合材料壳体结构宏-细观关联的高阶多尺度计算模型及收敛性理论，并发展了高效的多尺度算法；(3)建立了宏-细-微观关联的高阶三尺度计算模型及高效的数值算法，具有计算复杂度不随复合材料结构内部微-细观单胞增加而增加的显著优势。
郑晓静	3	无	教授	西安电子科技大学	西安电子科技大学	项目参与人。对发现点 2 做出了创造性贡献，是代表性论文[2]的主要作者，具体贡献如下：(1)提出了保持局部应力和热通量平衡的高精度高阶多尺度方法的构造理论，建立了复合材料壳体结构宏-细观关联的高阶多尺度计算模型及收敛性理论，并发展了高效的多尺度算法；(2)建立了宏-细-微观关联的高阶三尺度计算模型及高效的数值算法，具有计算复杂度不随复合材料结构内部微-细观单胞增加而增加的显著优势。
杨宗泽	4	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	项目参与人。对发现点 3 做出了创造性贡献，是代表性论文[4-5]的主要作者，具体贡献如下：(1)建立了均质材料非局部扩散模型的高效有限元方法

						及其稳定性和收敛性理论;(2)发展了非结构化网格上非局部积分算子刚度矩阵有效计算算法。
	5					
	6					

## 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	本单位对发现点 1、2、3 做出了创造性贡献，是代表性论文[1-2]和[4-5]的主要作者，具体贡献如下： （1）引入小波变换方法对背景网格上提取的复合材料海量材料数据进行多层小波分解预处理（天然过滤噪声），获得复合材料的关键特征参数；（2）提出了保持局部应力和热通量平衡的高精度高阶多尺度方法的构造理论，解决了复合材料结构跨尺度热-力耦合计算传统均匀化方法和低阶多尺度方法无法精确捕捉复合材料结构的局部振荡行为、数值精度低下难题；（3）系统建立了非局部积分模型关于水平参数的收敛性理论，得到了非局部积分模型和局部微分模型两者的渐近收敛关系；（4）建立了复合材料非局部扩散模型和近场动力学模型的高效 POD 降阶方法和配点法，解决了传统数值方法模拟非局部积分模型效率低下的瓶颈难题。
西安电子科技大学	2	本单位对发现点 1、2 做出了创造性贡献，是代表性论文[1-3]的主要作者，具体贡献如下：（1）引入小波变换方法对背景网格上提取的复合材料海量材料数据进行多层小波分解预处理（天然过滤噪声），建立了小波-深度学习智能算法；（2）提出了保持局部应力和热通量平衡的高精度高阶多尺度方法的构造理论，建立了复合材料壳体结构宏-细观关联的高阶多尺度计算模型及收敛性理论，并发展了高效的多尺度算法；（3）建立了宏-细-微观关联的高阶三尺度计算模型及高效的数值算法，具有计算复杂度不随复合材料结构内部微-细观单元增加而增加的显著优势。
	3	

## 八、完成人合作关系说明

成果完成人分别来自西北工业大学、西安电子科技大学，有机合作、相互支撑、有力地保障了项目整体的高效推进和高质量完成。主要完成单位和完成人合作具体关系如下：

序号	合作方式	合作关系人及排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	论文合著	董灏(1/8), 聂玉峰(2/8)	2021	A wavelet-based learning approach	代表性论文 1

				assisted multiscale analysis for estimating the effective thermal conductivities of particulate composites	
2	论文合著	董灏(1/6), 郑晓静 (2/6), 聂玉 峰(4/6)	2019	Multi-scale computational method for dynamic thermo-mechanical performance of heterogeneous shell structures with orthogonal periodic configurations	代表性论文 2
3	论文合著	杨宗泽 (1/6), 聂玉 峰(3/6)	2017	Finite element method for nonlinear Riesz space fractional diffusion equations on irregular domains	代表性论文 4
4	论文合著	杨宗泽 (1/4), 聂玉 峰(3/4)	2020	An unstructured mesh finite difference/finite element method for the three-dimensional time-space	代表性论文 5

				equations on irregular domains	
5	共同立项	聂玉峰 (1/10), 董灏 (8/10)	2015	共同申请立项 国家自然科学基金面上项目: 随机复合材料 热力双向耦合 模型的高效数 值方法研究 11471262	国自然 结题证 明 1
6	共同立项	聂玉峰 (1/10), 杨宗 泽(8/10)	2020	共同申请立项 国家自然科学基金面上项目: 含损伤的态基 近场动力学模 型的适定性理 论及其离散化 方法研究 11971386	国自然 结题证 明 2