

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

周期性结构波传播的“混合变量”辛方法

二、提名者及提名意见

提名者：

陕西省教育厅

提名意见：

该成果突破了传统的以位移连续传递关系为基础的波传播分析方法，建立了以“力-位移”连续传递关系为核心的波传播辛计算模型，准确地反映了周期性结构波传播物理特性。以此为基础，构建了准确、高效刻画波传播行为的连续分段子结构辛计算格式，探索了周期性负泊松比结构和手性立构性结构的波传播行为，以及周期性超大柔性空间结构的波传播辛分析方法。研究成果选题属学科前沿方向，研究起点高，理论创新性强，发表的论著引起了国内外学术界的高度关注和认可，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，对学科建设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

（不超过 2 页。应包含项目主要研究内容、科学发现点、科学价值、同行引用及评价等。）

该项目属弹性体振动力学、计算固体力学、应用数学等学科领域。

物理介质中的波动现象和传播行为是学术界长期关注的科学领域，尤其是周期性结构所展现出的禁带特性、波动的阻隔折射和反射、非互易特性，可为理解和调控波传播行为提供新途径。面向工程结构，周期性结构同样展现出了振动吸收隔离和导波等特性，可满足其特定服役需求。建立反映物理本质特征的分析模型和相应的算法，得到各种构型的结构中波传播行为和形成机理，是波传播研究的核心关键学术难题。

目前，国内外学术界在研究周期结构波传播问题时，主要是在拉格朗日体系下，以 1952 年诺贝尔奖获得者提出的布洛赫定理为理论基础。这一理论的核心原理是将连续系统的波传播问题分解为多个离散系统的位移传递关系。但在建模和计算过程中，可能造成计算模型复杂，计算效率低下和结果失真的问题。经过本项目 10 年的研究发现，力和位移的连续传递才是波动能够连续传递的本质原因，通过在哈密顿体系下建立广义位移和广义力的辛传递混合变量，能够更加深刻地描述和表征波传播的传递关系。因此，基于哈密顿动力学系统的辛方法是解

决上述难题的最有效途径之一。

然而，开展在周期结构波传播的辛方法研究，需解决一系列关键难题：（1）如何建立“力-位移”的对偶广义变量，在哈密顿系统中得到波传播的动力学模型；（2）如何构建基于对偶变量的辛数值计算格式，建立高精度、长时间稳定的波传播辛数值计算方法；（3）如何得到各种结构形式与波传播特性的关系，并深刻理解产生的机理。

该项目在国家自然科学基金和国家重点研发计划项目等基础研究计划的资助下，经过系统深入研究，取得了学术上的突破性进展，主要科学发现点为：

科学发现点一：突破了仅以位移为连续边界条件的局限性，建立了“力-位移”混合变量的波传播辛传递关系，实现了在辛空间中对周期结构波传播关系的数学表征。

通过构造“力-位移”对偶变量，采用勒让德变换实现在高维哈密顿动力学系统的保辛空间转换，得到了表征波传播行为的“力-位移”的辛传递矩阵，克服了布洛赫定理以位移连续为条件的波传播固有缺陷，发现了辛矩阵的传递关系是周期性结构波传播行为的本质关系，找到了模型与系统动力学行为的“天然”一致性。

科学发现点二：构建了基于混合变量的辛数值计算格式，提出了高精度、保结构以及长期稳定性的波传播辛数值方法，实现了哈密顿体系下波传播行为的分析计算。

建立基于对偶变量的周期性子结构动力学波传播模型和特征方程组，构造基于区段精细积分方法的计算分析框架，计算多段辛子空间下的对偶变量方程组，并结合 W-W 特征值算法，得到了系统的辛本征值和辛本征向量，形成了完整的周期结构波传播的辛计算方法。发现了辛精细积分中首次积分步和本征值判定是影响计算结果精度的关键核心原因。

科学发现点三：提出了负泊松比和手性立构性超结构，构建了结构波传播精确调控与设计方法，揭示了特殊几何构型对弹性波传播的定向调控与带隙生成机理。

本发现点以发现点一、二的理论分析和计算手段为基础，构建了负泊松比和手性立构性超结构波传播特性的辛分析方法，发现了负泊松比构型和变形方式是影响波传播特性的关键因素，证实了手性超材料中轴向运动与扭转运动的耦合方式，是其动力学性能（固有频率和能带结构）产生巨大差异的根本原因，得到了结构构型是影响波传播特性的最关键因素的结论。

在此基础上，围绕超大超柔周期性空间结构的波动问题，及其结构设计等工程应用的关键问题，利用周期性结构对称性、周期性、构件连续性与哈密顿系统对偶变量对称性的特点，构建了计算结构能带结构、传播速度和传播方向等重要物理特征的辛分析计算格式和表征方法，为超大尺度航天结构的波动力学行为和结构设计提供新的分析方法和支撑，推动了先进科学计算方法与前沿工程应用问题的结合和发展。

该项目共发表论文 135 篇，包括力学学科及工程科学领域著名刊物 Journal

of Sound and Vibration, Mechanical Systems and Signal Processing, International Journal of Engineering Science, Composites Part B-Engineering, Composite Structures. SCI 收录 83 篇, 其中 5 篇代表性论文 SCI 他引 396 次。项目成果得到了美国国家工程院院士、2019 年铁木辛柯奖获得者 Reddy 教授, 世界理论与应用力学大会 (ICTAM2020) 主席, 欧洲力学学会会士 Corigliano 教授等全球 200 余位学者的广泛关注和积极评价。研究成果被评价为“学术界的重要贡献 (numerous subsequent contributions)”、“重要应用前景 (potential in gradient design and digital coding)”。

通过该项目的研究, 在哈密顿系统建立了周期性结构波传播辛方法, 构建了高性能、高精度计算方法, 发现了结构几何构型对结构波动特性的影响机理, 解决了超大尺度空间结构波传播调控难题。该项目的成果作为重要方向和支撑, 申请获批“复杂系统动力学与控制”工信部重点实验室, 形成了一支在国际上有重要影响的研究团队。

四、客观评价

(限 2 页。应围绕科学发现点的原创性、公认度和科学价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价内容要有客观依据, 主要包括国内外同行在重要学术刊物 (专著) 和重要国际学术会议等公开发表的学术性评价意见, 国内外重要科技奖励等, 可在附件中提供证明材料。非公开资料 (如私人信函等) 不能作为评价依据。)

研究成果得到了来自美国、欧盟等 40 余个国家和地区的 200 余位学者的广泛关注和积极评价。主要客观评价归纳为如下:

(1) 美国工程院院士、德克萨斯农工大学 Reddy 教授等在 Composite Structures (2018, 199:10-23) 上评价到我们的波传播辛分析方法为研究周期结构中的静变形、屈曲及波传播行为提供了有效途径, 并验证了辛方法在超大尺度结构力学分析中的可行性。

(2) 力学领域著名国际期刊 International Journal of Mechanical Sciences 编委, 土耳其阿克德尼兹大学 Civalek 教授, 在论文 International Journal of Engineering Science (2018, 130: 33-50) 中评价到我们通过非局部应变梯度理论为纳米杆的轴向振动研究提供了思路, 并有效论证了基于哈密顿原理的辛方法在多尺度结构中具有广泛的应用前景。

(3) 复合材料领域著名国际期刊 Composites Part B 编辑, 意大利萨勒诺大学 Feo 教授, 在论文 Composite Structures (2018, 200:239-245) 中评价到与传统方法相比, 基于哈密顿原理的辛方法在结构力学分析是对学术界的重要贡献, 采用辛方法来研究大尺度结构中波动力学行为是学术界的重要贡献。

(4) 国际著名期刊 Composite Structures 主编, 葡萄牙波尔图大学 Ferreira 教授, 在论文 Composite Structures (2021, 273: 114292) 评价到我们采用改进的连续

介质力学理论——非局部应变梯度弹性理论，来探究纳米梁的力学行为是可行的。

(5) 中国科学院外籍院士、国际防护结构学会主席郝洪教授在 *Engineering Structures* (2023,281:115751)中评价到我们提出的凹角蜂窝结构，通过理论与数值方法获得了比传统蜂窝更高的压缩强度以及更优的吸能特性。

(6) 澳大利亚技术科学与工程院院士、墨尔本大学 Tuan Ngo 教授在 *Thin-Walled Structures*(2023,182:110209)中指出我们提出了一种求解凹角蜂窝结构在高速冲击下抗冲击强度的解析模型，与其数值模拟结果吻合较好。

(7) 欧洲科学院院士、法国国家科学研究中心(CNRS)-洛林大学 Institut Jean Lamour 实验室主任 Badreddine Assouar 教授，在 *Communications Physics*(2024, 7(1): 272)中引用了我们的工作，并评价到我们所提出的“考虑手性和策略性的晶格设计，通过产生轴向和扭转耦合，可以实现低频带隙，并且可以实现控制和隔离振动的弹性波逻辑门的设计”。

(8) 国家杰出青年基金获得者彭志科教授在 *Science China Technological Sciences* (2023, 66: 869-880)中正面评价了我们关于带隙控制与振动隔离的研究，称该研究在梯度设计和数字编码领域具有很大的应用价值。

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）

（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	Tacticity-based one-dimensional chiral equilateral lattice for tailored wave propagation and design of elastic wave logic gate	Journal of Sound and Vibration	Pengcheng Zhao, Kai Zhang, Fang Hong, Deng, Zichen	2022 年 521 卷 116671 页	2022 年 3 月 17 日	Kai Zhang	Pengcheng Zhao	赵鹏程, 张凯, 洪放, 邓子辰	23	Web of Science 核心合集	是
2	Dynamic crushing strength analysis of auxetic honeycombs	Acta Mechanica Solida Sinica	XiuHui Hou, ZiChen Deng, Kai Zhang	2016 年 29 卷 490-501 页	2016 年 10 月 1 日	ZiChen Deng	XiuHui Hou	侯秀慧, 邓子辰, 张凯	104	Web of Science 核心合集	是
3	On vibrations of nonlocal rods: Boundary conditions, exact solutions and their asymptotics	International Journal of Engineering Science	Xiao-Jian Xu, Mu-Lian Zheng, Xuan-Cang Wang	2017 年 119 卷 217-231 页	2017 年 6 月 22 日	Mu-Lian Zheng	Xiao-Jian Xu	徐晓建, 郑木莲, 王选仓	77	Web of Science 核心合集	是
4	Bending and buckling of nonlocal strain gradient elastic beams	Composite Structures	Xiao-Jian Xu, Xuan-Cang Wang, Mu-Lian Zheng, Zheng Ma	2017 年 160 卷 366-377 页	2017 年 1 月 15 日	Mu-Lian Zheng	Xiao-Jian Xu	徐晓建, 王选仓, 郑木莲, 马征	140	Web of Science 核心合集	是

5	3D chiral mechanical metamaterial for tailored band gap and manipulation of vibration isolation	Mechanical Systems and Signal Processing	Pengcheng Zhao, Kai Zhang, Liyuan Qi, Zichen Deng	2022 年 180 卷, 109430 页	2022 年 11 月 15 日	Kai Zhang	Pengcheng Zhao	赵鹏程, 张凯, 齐力源, 邓子辰	52	Web of Science 核心合集	是
合 计									396		

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
邓子辰	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现点 1、2、3 做出了创新性贡献，具体包括：构建了辛数值算法连续分段子结构计算格式，发现了周期结构波传播行为的规律，并应用于周期性负泊松比结构波传播以及周期性超大柔性空间结构的波传播的分析中。
张凯	2	副院长	教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现点 1、2、3 做出了创新性贡献，具体包括：发现了辛数值算法连续分段子结构计算格式与周期结构波传播行为的对应规律，并应用于周期性超大柔性空间结构的波传播的分析中，通过对结构波传播的特性进行有效地主动被动调控，实现了超大、超柔周期性结构波传播的调控。
侯秀慧	3	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现点 1、2、3 做出了创新性贡献，具体包括：构建了辛数值算法连续分段子结构计算格式与周期结构波传播行为的对应规律，并应用周期性负泊松比结构波传播的分析中，揭示了负泊松比力学特性对周期结构波动特征的影响机制，

						发现了负泊松比超材料力学行为与辛几何结构的对应规律，最终形成了周期性负泊松比结构波动问题的辛几何理论框架。
徐晓建	4	无	副教授	长安大学	长安大学	对科学发现点 1，2 做出了创新性贡献，具体包括：构建了辛数值算法连续分段子结构计算格式与周期结构波传播行为的对应规律，形成了完整的针对周期结构波传播的辛计算方法。
赵鹏程	5	无	工程师	中国航空工业集团公司西安飞机设计研究所	西北工业大学	对科学发现点 3 做出了创新性贡献，具体包括：构建了手性立构性超结构波传播特性的辛分析方法，证实了手性超材料中轴向运动与扭转运动的耦合方式，是其固有频率和能带结构产生巨大差异的根本原因。

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	在国家自然科学基金等基础研究项目的资助下，经过十多年的系统深入研究，取得了学术上的突破性进展，推动了先进数值计算方法与前沿科学问题的结合和发展。 主要贡献为： 1. 构建了基于“力-位移”对偶变量的波传播连续关系； 2. 构建了基于对偶变量的辛数值计算格式； 3. 揭示了结构形式对波传播特性的作用机理
长安大学	2	主要完成单位对发现点 1、2 做出了创新性贡献，主要内容包括：利用了辛方法与周期性结构之间数学形式上的对应关系，发现了周期性结构的力学行为。

八、完成人合作关系说明

（应以第一完成人角度，介绍项目完成人之间的合作经历或合作关系，不局限于第一完成人与其他完成人的合作，也可以包括其他完成人之间的合作。）

本项目主要完成人经过十多年的系统深入研究，取得了学术上的突破性进展，推动了先进数值计算方法与前沿科学问题的结合和发展，并在此基础上获得了陕西高等学校科学技术一等奖。具体情况如下：

第二完成人张凯，师从第一完成人邓子辰攻读博士学位，工作后继续与邓子辰开展合作研究，对发现点 1、2、3 做出了创新性贡献，合著完成代表性论文 1、5。

第三完成人侯秀慧，师从第一完成人邓子辰攻读博士学位，工作后继续与邓子辰开展合作研究，对发现点 1、2、3 做出了创新性贡献，合著完成代表性论文 2。

第四完成人徐晓建，师从第一完成人邓子辰攻读博士学位，工作后继续与邓子辰开展合作研究，对发现点 1、2 做出了创新性贡献。

第五完成人赵鹏程，师从第二完成人张凯攻读博士学位，在第一完成人邓子辰和第二完成人张凯的共同指导下开展科研工作，对发现点 3 做出了创新性贡献，合著完成代表性论文 1、5。

第一完成人邓子辰、第二完成人张凯、第三完成人侯秀慧和第四完成人徐晓建，共同获得陕西高等学校科学技术奖。