

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

粘弹塑性问题中的高精度数值方法

二、提名者及提名意见

提名者：江松，中国科学院院士，北京应用物理与计算数学研究所研究员，学科专业：应用数学

提名意见：该项目围绕弹性、粘弹性和弹塑性问题中高维、强耦合、时变及非线性方程的精确求解开展系统研究。项目建立时变广义膜壳降维模型及高精度有限元、虚拟元方法，提出粘弹性问题的复变量和改进无单元 Galerkin 方法，并构造满足 Kronecker δ 性质的插值型无单元 Galerkin 方法，实现本质边界条件直接施加与材料非线性稳定迭代。相关工作形成了从数学建模、适定性分析、离散格式、稳定性与误差理论到数值验证的完整研究链条，具有明确原创性和科学价值。5 篇代表性论文发表于计算力学及相关领域重要期刊，在 Web of Science 核心合集中累计被引 234 次、他引 159 次，其中含 ESI 高被引论文和期刊封面论文，成果得到国内外同行引用和正面评价。项目材料齐全，知识产权及人员排序无争议，提名陕西省自然科学奖二等奖。

三、项目简介

主要研究内容

成果“粘弹塑性问题中的高精度数值方法”面向航空航天、土木建筑、材料加工等领域中复杂结构与材料精确模拟的需求，针对弹性、粘弹性和弹塑性模型所具有的高维、强耦合、时变及非线性特征，围绕模型构建、适定性分析、离散格式、稳定性与误差理论、算法验证及应用开展持续研究。项目依托 12 项国家自然科学基金，形成了有网格、无网格与曲面网格相结合的高精度数值方法体系。

科学发现点

科学发现一：提出弹性壳体模型的曲面高精度逼近方法。利用微分几何、渐近分析，将三维薄壳主导响应转化为曲面上的二维三分量演化问题，建立时变广义膜壳变分模型协调有限元-Newmark 全离散格式，给出解的存在唯一性、稳定性、收敛性和误差分析；进一步构造适用于任意多边形网格的协调虚拟元方法，在非突网格下保持稳定收敛，克服薄壳计算中的数值闭锁问题。

科学发现二：提出粘弹性问题的改进无网格 Galerkin 方法。针对粘弹性本构关系的时间依赖性及传统移动最小二乘近似易产生病态方程组的问题，利用复变量近似减少待定系数和所需节点数，采用加权正交函数系统改进基函数构造，建立二维、三维粘弹性问题的高精度离散与增量求解格式。在同等节点分布下，该方法提高了计算精度和稳定性；在达到相同精度时，可减少节点数和计算时间。相关研究还以移动网格、径向基函数和变分水平集方法拓展局部自适应及复杂边界形状优化。

科学发现三：提出弹塑性问题的插值型无单元 Galerkin 方法。通过插值移动

最小二乘近似构造满足 Kronecker δ 性质的形函数,使本质边界条件可直接施加于节点自由度,避免引入 Lagrange 乘子或罚函数。结合 Galerkin 弱形式、Mises 屈服准则、各向同性线性硬化模型和增量切线刚度矩阵,建立二维、三维弹塑性问题的增量迭代流程,实现屈服判别、本构更新、残余载荷修正及整体平衡的一致计算。算例表明,该方法在相同节点分布下具有更高精度,在相同精度下具有更高效率。

科学价值

项目项目围绕弹性壳体、粘弹性及弹塑性问题,建立高精度数值方法及相应的适定性、稳定性、收敛性与误差分析理论,深化了对复杂力学问题数值求解的理论认识;提出增强虚拟元、改进无单元及插值型无单元 Galerkin 方法,解决复杂曲面高精度逼近、近似方程组病态及本质边界条件施加等关键问题,提高了数值计算的精度、稳定性与效率。相关成果为薄壁结构静动力响应分析、粘弹性材料长期力学行为预测、金属成形与结构极限承载分析及流动形状优化提供了理论依据和计算方法。

同行引用及评价

项目组在计算力学领域发表 SCI 论文 120 余篇,其中 JCR 一区、二区论文 80 余篇,ESI 高被引论文 5 篇、封面论文 1 篇。5 篇代表性论文在 Web of Science 核心合集中累计被引 234 次,其中他引 159 次;单篇总被引最高 81 次、他引最高 67 次。研究成果被国内外同行在 Journal of Computational Physics、Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering、International Journal for Numerical Methods in Engineering 等期刊引用并给予正面评价。相关成果获陕西省青年科技奖 1 项、陕西高等学校科学技术奖一等奖 2 项、陕西省工业与应用数学青年优秀论文奖一等奖 1 项,累计培养硕士研究生 20 余名、博士研究生 9 名。5 篇代表性引文如下:

序号	引文名称/作者	引文刊名	引文发表时间 (年 月 日)
1	Topology optimization using the lattice Boltzmann method incorporating level set boundary expressions Yaji Kentaro; Yamada Takayuk; Yoshino Masato; Matsumoto Toshiro; Izui Kazuhir; Nishiwaki Shinji	Journal of Computational Physics 计算力学三大顶刊	2014.09.10
2	Postbuckling of carbon nanotube reinforced functionally graded plates with edges elastically restrained against translation and rotation under axial compression Zhang LW; Liew KM; Reddy JN	Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 计算力学三大顶刊	2016.01.01
3	Variational multiscale element free Galerkin (VMEFG) and local discontinuous Galerkin (LDG) methods for solving two-dimensional Brusselator reaction-diffusion system with and without cross-diffusion Dehghan, Mehdi; Abbaszadeh, Mostafa	Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 计算力学三大顶刊	2016.03.01

4	Modeling Size Effects in Elasticity With C1 Virtual Elements: A Two-Dimensional Formulation for Modified Couple Stress Theory Zhao Mingjun; Cen Song; Shang Yan; Li Chenfeng	International Journal for Numerical Methods in Engineering 计算力学三大顶刊	2026.01.08
5	The estimation of the electromagnetic coupling effect for the transverse isotropic laminated multi-ferroic rectangular plates Han weimin; Donghao	Composite Structures 中科院一区 Top	2022.01.14

四、客观评价

本项目围绕弹性、粘弹性以及弹塑性问题发表的成果被法国科学院 P.G.Ciarlet 院士、意大利科学院 Alfio Quarteroni 院士(ICM 1 小时大会报告人)、法国科学院 Roger Temam 院士、欧洲科学院院士 K. M. Liew、美国工程院 J. N. Reddy 院士、中国工程院崔俊芝院士、中国科学院过增元院士、周又和院士等引用和正面评价。

代表性客观评价 1：弹性力学问题的高精度数值方法

围绕弹性壳体数学模型、理论分析及高精度数值计算形成的系列成果，被法国科学院 P. G. Ciarlet 院士、意大利科学院 Alfio Quarteroni 院士、法国科学院 Roger Temam 院士、中国工程院崔俊芝院士等国内外著名学者引用和正面评价。

崔俊芝院士团队在复合材料结构相关研究中引用本项目成果，并将其作为板、壳等工程结构研究的重要相关工作（MMS, 2021, 26: 905-936）。具体如下

引文原文：“ *these composites are generally adopted to manufacture various beam, plate, shell, and other engineering structures [1, 2].*”

翻译：这类复合材料被广泛用于制造各种梁、板、壳及其他工程结构 [1, 2]。

Roger Temam 院士在连续体力学相关研究中引用本项目成果，将其列为静态连续体框架下相关问题的代表性研究(J Comput Appl Math, 2020, 372)

引文原文：“ *Similar problems have been considered in the continuum framework in the static case.*”

翻译：在静态情形下，已有研究在连续体框架下考察了类似问题。

代表性客观评价 2：粘弹性力学问题的高精度数值方法

围绕粘弹性力学问题的数学建模与高精度数值计算形成的系列成果受到国内外同行广泛关注。相关成果被欧洲科学院 K. M. Liew 院士、美国工程院 J. N. Reddy 院士以及中国科学院过增元院士等国际知名学者引用评价。

J. N. Reddy 院士在无网格数值方法研究中引用本项目相关成果（CMAME, 2016,298:1-28. 计算力学三大顶刊）。

引文原文： *Numerous element/mesh-free methods have been developed based on different shape functions, such as the element-free Galerkin method, the improved element-free Galerkin method [35], smooth particle hydrodynamics methods, the element-free kp-Ritz method, the DSC-Ritz method, the radial basis function method and the local Kriging meshless method.*

翻译：基于不同形函数，研究者已经发展了多种无单元/无网格方法，包括无单元 Galerkin 方法、改进无单元 Galerkin 方法[35]、光滑粒子流体动力学方法、无单元 kp-Ritz 方法、DSC-Ritz 方法、径向基函数方法以及局部 Kriging 无网格方法。

代表性客观评价 3：弹塑性力学问题的高精度数值方法

项目围绕弹塑性力学问题的高精度数值计算，发展了具有插值特性的无单元 Galerkin 方法，相关成果受到国际计算力学同行的广泛关注。欧洲科学院 K. M. Liew 院士、美国工程院 Satya N. Atluri 院士以及中国科学院周又和院士等著名专家引用评价。

Liew 院士团队在功能梯度碳纳米管增强复合板屈曲分析等系列研究中多次引用相关方法（CMAME. 2016, 300:593 – 610）。

引文原文：*“The main aim of [26] is to employ the shape functions of the interpolating moving least squares (IMLS) approximation to obtain new shape functions.”*

翻译：文献[26]的主要目标是采用插值型移动最小二乘近似的形函数来构造新的形函数。

Atluri 院士团队在无网格计算方法研究中引用本项目相关成果，并将项目发展的*改进无单元 Galerkin 方法（IEFG）等共同列入基于弱形式构造的代表性无网格方法体系（Eng. Anal. Bound. Ele. 2021,125:23-32）。

引文原文：*“Those meshfree methods which are constructed as weak form like for example [3-12]: ... element free Galerkin (EFG) and its modifications like for example improved element free Galerkin (IEFG), complex variable element free Galerkin (CVEFG) and improved complex variable element free Galerkin (ICVEFG).”*

翻译：基于弱形式构造的无网格方法包括[3 – 12]: ...单元 Galerkin 方法(EFG)，以及由其发展形成的改进无单元 Galerkin 方法（IEFG）、复变量无单元 Galerkin 方法（CVEFG）和改进复变量无单元 Galerkin 方法（ICVEFG）等。

五、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	The time-dependent generalized membrane shell model and its numerical computation	Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 计算力学三大顶刊	Shen Xiaoqin Jia Junjun Zhu Shengfeng Li Haoming Wang Tiantian Cao Xiaoshan	2019,344: 54-70.	2019.02.05	Shen Xiaoqin	Shen Xiaoqin	沈晓芹 贾俊俊 朱升峰 李昊明 王田天 曹小杉	5	Web of Science	是
2	A novel interpolating element-free Galerkin (IEFG) method for two-dimensional elastoplasticity	Applied Mathematical Modelling 中科院一区 Top	Cheng Yumin Bai Funong Peng Miaojuan	2014, 38:5187-5197	2014.12.17	Cheng Yumin	Cheng Yumin	程玉民 白福浓 彭妙娟	67	Web of Science	是
3	Analyzing three-dimensional viscoelasticity problems via the improved element-free Galerkin (IEFG) method	Engineering Analysis with Boundary Elements 高被引论文	Peng Miaojuan Li Rongxing Cheng Yumin	2014,40: 104-113	2014.03.26	Cheng Yumin	Peng Miaojuan	彭妙娟 李荣鑫 程玉民	44	Web of Science	是

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
4	An enriched virtual element method for 2D-3C generalized membrane shell model on surface 封面论文	International Journal for Numerical Methods in Engineering 计算力学三大顶刊	Yang Qian Shen Xiaoqin Zhao Jikun Cheng Yumin	2024, 125(8): e7432	2024. 02.02	Shen Xiaoqin ; Cheng Yumin	Yang Qian	杨 乾 沈晓芹 赵纪坤 程玉民	5	Web of Science	是
5	Optimal shape control of fluid flow using variational level set method	Physics Letters A	Duan Xianbao Ma Yichen Zhang Rui	2008, 372: 1374-1379	2008. 02.25	Duan Xianba o	Duan Xianbao	段献葆 马逸尘 张 睿	38	Web of Science	是
6	无网格方法（上）	科学出版社	程玉民	2015 年, 493 页; ISBN 978-7-03-04 3020-5	2015. 02	程玉民	程玉民	程玉民	—	中国国 家图书 馆	是
7	无网格方法（下）	科学出版社	程玉民	2016 年, 460 页; ISBN 978-7-03-04 6173-5	2016. 01	程玉民	程玉民	程玉民	—	中国国 家图书 馆	是
合 计									159		

六、主要完成人情况

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
沈晓芹	1	院长	教授	西安理工大学	西安理工大学	项目总体负责人，提出总学术思想并负责理论体系设计；建立弹性壳模型及其高精度离散、稳定性和收敛性理论，参与曲面虚拟元方法研究。支撑代表性论文 1、4。
程玉民	2	无	教授	上海大学	上海大学	提出并发展弹塑性问题插值型无单元 Galerkin 方法，参与粘弹性改进无单元方法和壳体虚拟元研究，完善无网格方法体系。支撑代表性论文 2、3、4 和专著 6、7。
段献葆	3	副院长	教授	西安理工大学	西安交通大学	负责高精度算法优化与流动形状控制研究，提出基于变分水平集方法的流动形状优化算法。支撑代表性论文 5。
彭妙娟	4	无	教授	上海大学	上海大学	负责粘弹性力学问题高精度数值方法研究，建立三维粘弹性问题改进无单元 Galerkin 方法，并参与插值型无单元方法研究。支撑代表性论文 2、3。
杨乾	5	无	讲师	西安理工大学	西安理工大学	负责弹性壳体问题高精度数值方法研究，构造曲面 2D-3C 广义膜壳模型协调加富虚拟元方法并完成理论分析和数值验证。支撑代表性论文 4。

七、主要完成单位情况

完成单位	排名	对本项目主要贡献
西安理工大学	1	为本项目的第一完成单位，为项目的开展和完成提供研究科研平台。
西安交通大学	2	为本项目的第二完成单位，为代表性论著 5 的第一署名单位和通讯单位。
上海大学	3	为本项目的第三完成单位，为代表性论著 2 和 3 的第一署名单位和通讯单位。

八、完成人合作关系说明

第一完成人沈晓芹与其他完成人围绕复杂力学问题高精度数值方法形成长期稳定合作。沈晓芹、杨乾、程玉民于 2024 年合作发表代表性论文 4，共同完成曲面 2D-3C 广义膜壳模型协调加富虚拟元方法研究；程玉民、彭妙娟于 2014 年围绕插值型及改进无单元 Galerkin 方法合作完成代表性论文 2、3。沈晓芹、段献葆共同参与“工程中的数学模型与数值计算”成果，并于 2020 年共同获得陕西高等学校科学技术奖一等奖；二人还于 2013 年依托国家自然科学基金项目 11101330 开展合作。沈晓芹、杨乾于 2019 年依托国家自然科学基金项目 11971379 开展合作，并在后续壳体虚拟元研究中形成代表性论文 4。上述合作涵盖论文合著、共同立项和共同获奖，支撑了项目三项科学发现的形成与完善。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果名称
1	论文合著	沈晓芹/1、程玉民/2、杨乾/5、	2024	代表性论文 4
2	论文合著	程玉民/2、彭妙娟/4	2014	代表性论文 2、3
3	共同获奖	沈晓芹/1、段献葆/3	2020	共同获陕西高等学校科学技术一等奖（“工程中的数学模型与数值计算”）
4	共同立项	沈晓芹/1、段献葆/3	2013	国家自然科学基金（11101330）
5	共同立项	沈晓芹/1、杨乾/5	2019	国家自然科学基金（11971379）