

陕西省自然科学奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

| | |
|--------|--------------------------|
| 项目名称 | 3D 打印设计-优化-仿真的一体化建模与算法研究 |
| 主要完成人 | 李义宝，夏青，夏斌湖，郭士民 |
| 主要完成单位 | 西安交通大学、西京学院 |

二、提名意见（适用于部门、机构提名）

| | | | |
|--|--------|------|---|
| 提 名 者 | 陕西省教育厅 | 提名等级 | <input type="checkbox"/> 一等奖 <input checked="" type="checkbox"/> 二等奖及以上 |
| <p>提名意见：</p> <p>3D 打印技术已成为我国科技发展的重要战略。在 3D 打印中，普遍存在 CAD 制件设计、CAE（或者 CFD）制件力学模拟与优化相对独立、集成度低的问题。本成果以实现 CAD 设计-CAE/CFD 仿真-加工一体化的新型理论与技术为目标，深度研究作为构建多尺度模型的核心工具-相场模型的基础理论及多物理场的耦合机制，提出了面向 3D 打印的系列模型与基础算法，打破了 CAD/CAE/CAM 之间的建模壁垒，降低了 3D 打印工业软件在关键技术领域的“卡脖子”风险。</p> <p>本项目在执行过程中获得国家级项目 3 项、国家级青年人才计划 1 项、横向课题 5 项等资助。共发表 SCI 论文 46 篇，申请发明专利 11 项，其中授权专利 5 项。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二等及以上。</p> <p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。</p> | | | |

二、提名意见（适用于专家提名）

| | | | |
|--|--|------|--|
| 姓 名 | | | |
| 专家类型 | <input type="checkbox"/> 国家最高科学技术奖获得者 <input type="checkbox"/> 中国科学院院士 <input type="checkbox"/> 中国工程院院士 <input type="checkbox"/> 国家科学技术奖获奖项目第一完成人（需注明获奖等次） <input type="checkbox"/> 省最高科学技术奖获奖人（或 xxxx 年省科学技术最高成就奖、xxxx 年基础研究重大贡献奖获奖人） <input type="checkbox"/> Xxxx 年省科学技术奖第一完成人（需注明获奖等次） | 提名等级 | <input type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上 |
| 责任专家 | <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 | | |
| 提名意见： | | | |
| <p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。</p> | | | |

三、项目简介

(限 2 页)

目前,我国 3D 打印一批重点工艺装备和核心器件实现国产替代,批量化供应能力和成本竞争优势显著,但产业界普遍存在“设计出、加工不出,加工出、性能不稳”的现象。其根本原因是制件设计(CAD)、性能优化(CAD,CAE)、工艺仿真(CAE,CAM)等环节彼此割裂,且受限于国外软件的多重约束,很难进行产品质量根源溯源。针对特定加工部件的专用化 3D 打印软件匮乏,3D 打印核心基础算法的研发水平有待提升。因此,构建统一自主的三维几何建模、性能优化与工艺仿真的核心技术内核,研究 3D 打印 CAD/CAE/CAM 一体化基础模型和核心算法,形成面向 3D 打印的一体化研究范式,已成为行业发展的关键任务。这不仅有助于实现 3D 打印产品质量的可追溯性,还能有效降低对国外工业软件的依赖,减少“卡脖子”风险,从而推动我国 3D 打印制造业的高质量发展。

本项目以实现 CAD 设计-CAE/CFD 仿真-加工一体化的新型理论与技术为目标,深度研究作为构建多尺度模型的核心工具-相场模型的基础理论及多物理场的耦合机制,开展了系列基础研究,取得了重要的科学进展。共发表 SCI 论文 46 篇,申请发明专利 11 项,其中授权专利 5 项。依托大数据算法与分析技术国家工程实验室和国家增材制造创新中心,主持国家级项目 3 项,省部级及横向课题 6 项。研发的图形处理算法已嵌入国家增材制造创新中心自主研发的 3D 打印软件平台,被评价为算法效果显著。研发了 3D 打印隐性牙套工艺软件,已经落地应用。成果第一完成人于 2011 年获韩国 Hi-Seoul 科学研究奖,2014 年第八届韩国机械流体学术会议最佳论文报告奖,2019 年受邀参加第八届世界华人数学家大会并做 45 分钟邀请报告,2020 年入选国家级青年人才计划,2023 年获王宽诚育才奖,2024 年获陕西高等学校科学技术奖一等奖。

本项目以相场模型为模型框架,提出了面向 3D 打印的系列模型与基础算法,打破了 CAD/CAE/CAM 之间的建模壁垒,实现了 CAD/CAE/CAM 信息的数据传输,形成了首个基于体素的模型和算法库,降低了 3D 打印工业软件在关键技术领域的“卡脖子”风险,为行业发展提供了重要技术支撑。本项目的创新点如下:

创新点一: 在相场模型的框架下,以体素为基本单元,针对三维几何建模、性能优化及加工仿真等需求,构建了相应的能量泛函,从而实现了在统一框架下对复杂问题的

精确建模。通过变分原理，将能量泛函的最优解求解问题转化为控制方程（偏微分方程）的求解问题，建立了一系列基于点云数据的图形重构、基于 CT 图像的图形重构、图形去噪、图形分割、图形修补、多源图形融合等 8 种图形处理的基础数学模型和相应算法，为 CAD/CAE/CAM 一体化计算提供了可行框架。相关研究工作被他人人在 Pattern Recognit., Comput. Phys. Commun., Phys. Rev. Materials 等国际知名 SCI 期刊上多次引用。

创新点二：定义了适应复杂区域和复杂曲面的梯度、散度、拉普拉斯三个算子，能够自适应处理不同边界条件，使得数学分析和理论在复杂几何构型上得以实施，从而建立了相应的曲面数值理论。研究了适应复杂拓扑区域和复杂曲面的系列高精度算法，显著地提高了算法精度和效率。算法保持了连续空间与离散空间之间的算法一致性，降低了算法对网格质量的依赖性为 CAD 设计-CAE/CFD 模拟-制件生成一体化研究奠定了理论与算法基础。相关研究工作被他人人在 Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Comput. Phys. Commun., J. Comput. Phys. 等国际知名 SCI 期刊上多次引用。

创新点三：建立了系列发展了系列保能量、保持性的数值格式，并从理论上证明了算法的收敛阶和稳定，提出了相应的多重网格快速求解器和优化算法，开发了自适应空间和时间算法。算法底层框架自主可控，无需依赖商业软件，为高精尖加工制件的设计、优化和仿真提供了一种高效计算工具。相关研究工作被他人人在 Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Comput. Phys. Commun., J. Comput. Phys. 等国际知名 SCI 期刊上多次引用。

四、客观评价

创新点一的客观评价

本项目建立了一系列基于点云数据的图形重构、基于 CT 图像的图形重构、图形去噪、图形分割、图形修补、多源图形融合等 8 种图形处理的基础数学模型和相应算法。代表性论文[4]的相关研究内容被他人 在 Comput. Phys. Commun.、Pattern Recognit.、Comput. Methods Appl. Mech. Engrg 等多次引用。 代表性论文[5]的相关研究内容被他人 在 Comput. Phys. Commun.，Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.，Phys. Rev. Materials 等多次引用。

- 英国帝国理工大学的Dimitri D. Vvedensky教授（英国物理学会会士、美国物理学会会士）评价到：“这些表达式比三重周期极小曲面（TPMS）的**精确形式更易于展示和处理**，如通过Weierstrass representation [30] 或Allen-Cahn equation [31] 得到”。（These expressions are **much easier to display and manipulate** than the exact forms of TPMS, as obtained from the Weierstrass representation [30] or from the Allen-Cahn equation [31]）。此处[31]为我们的代表性论文[5]。
- 美国佐治亚理工大学Yan Wang教授指出：“它可作为一种**非常优秀**的初始几何结构，用于搜索具有恒定平均曲率的实际三重周期极小曲面”（It can serve as a **very good** initial geometry in order to search for the actual TPMS with a constant mean curvature [64, 65].）此处[65]为我们的代表性论文[5]。

创新点二的客观评价

本项目系统研究了适应复杂拓扑区域和复杂曲面的系列高精度算法，证明了数值格式的稳定性和收敛性，为任意曲面流动计算开辟了新道路，为 CAD 设计-CAE/CFD 模拟-制件生成一体化研究奠定了理论与算法基础。代表性论文[1]获得广泛关注，相关研究内容被他人 在 Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.、J. Comput. Phys. 等多次引用。

- 德国凯泽斯劳滕大学 P. Suchde 教授评价到：“Another recent research work for finding the numerical solution on surfaces can be found in [58], in which an **efficient linear second-order unconditionally stable** direct discretization method is employed.”（近期另一项关于求解曲面上数值解的研究工作可参见文献 [58]，该文献中采用了一种高效的线性二阶无条件稳定直接离散化方法）。此处[58]为我们的代表性论文[1]。
- 美国休斯顿大学M. Olshanskii教授评价到：“**更通用曲面上**得到的结果已发表于文献 [24, 41]。”（results obtained by FEM on **more general surfaces** are

presented in [24, 41])。此处[41]为我们的代表性论文[1]。

- 受邀参加第八届世界华人数学家大会, 并做45 分钟关于复杂曲面的高精度算法的邀请报告; 基于报告主题和内容的新颖性, 获得组委会的肯定, 并受邀书写10 页以上的说明论文。

创新点三的客观评价

本项目建立了一系列系列保能量、保持性的数值格式, 提出了相应的多重网格快速求解器和优化算法, 并从理论上证明了算法的收敛阶和稳定, 开发了适用于大规模计算的自适应空间和时间算法, 给出了数值格式的无条件稳定性和收敛性分析, 为CAE/CFD 模拟研究提供了理论支撑和具体算法。两篇代表性论文[2, 3]获得广泛关注。代表性论文[2]的相关研究内容被他人`在 Adv. Phys., Comput. Methods Appl. Mech. Engrg 等多次引用`。代表性论文[3]的相关研究内容被他人`在 J. Comput. Appl. Math、SIAM J. Sci. Comput、Appl. Numer. Math 等多次引用`。

- 阿米尔卡比尔理工大学 M. Dehghan 教授(Google 学术引用 40194): “为逼近方程 (1.1) 和 (1.7) 的时间变量, 本文采用了**带自适应时间算法**的二阶半隐式后向差分格式 [57]” (The second-order semi-implicit backward differential formula with **an adaptive time algorithm** [57] is considered for approximating the temporal variable of Eqs. (1.1) and (1.7).) 此处[57]为我们的代表性论文[2]。引文基于我们的方法研究了研究结晶体生长机制。
- 美国南卡罗来纳大学L. Ju教授(美国工业与应用数学学会会士)在中评价: “在文献 [26] 中, Li et al. 进一步将该紧致差分格式应用于自适应加密框架”。(in [26] Li et al. further implemented this compact difference scheme in an adaptive refinement framework) 此处[26]为我们的代表性论文[3]。
- 美国普渡大学数学系教授、国际著名数值计算和分析专家, Fulbright 奖获得者 Jie Shen 教授在其研究成果中指出 “Li and Kim [8]提出了晶体模型的具有**四阶精度**的**紧致高效求解算法**”。(Li and Kim [8] studied an **efficient and stable compact fourth-order** finite difference scheme for the phase field crystal equation.) 此处[65]为我们的代表性论文[3]。

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 second-order accurate, unconditional ly energy stable numerical scheme for binary fluid flows on arbitrarily curved surfaces | Computer Methods in Applied Mechanics and Engineer | 夏青, 余倩, 李义宝 | 2021 年 384 卷 113987 页 | 2021-08-15 | 李义宝 | 夏青 | 夏青, 余倩, 李义宝 | 29 | Web of Science | 是 |
| 2 | A second order unconditional ly stable scheme for the modified phase field crystal model with elastic interaction and stochastic noise effect | Computer Methods in Applied Mechanics and Engineer | 夏斌湖, 梅长林, 余倩, 李义宝 | 2020 年 363 卷 112795 页 | 2020-04-16 | 李义宝 | 夏斌湖 | 夏斌湖, 梅长林, 余倩, 李义宝 | 22 | Web of Science | 是 |
| 3 | An efficient and stable compact fourth-order finite difference scheme for the phase field crystal equation | Computer Methods in Applied Mechanics and Engineer | 李义宝, 金俊值 | 2017 年 319 卷 194-216 页 | 2017-07-01 | 金俊值 | 李义宝 | 李义宝 | 54 | Web of Science | 是 |

| | | | | | | | | | | | |
|-------------|--|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------|-----|-----|---------------|----|----------------|---|
| 4 | An efficient volume repairing method by using a modified Allen-Cahn equation | Pattern Recognition | 李义宝, 兰守忍, 刘鑫, 卢秉恒, 王利升 | 2019 年 93 卷 124-133 页 | 2020-08-12 | 王利升 | 李义宝 | 兰守忍, 刘鑫, 卢秉恒, | 13 | Web of Science | 是 |
| 5 | Triply periodic minimal surface using a modified Allen-Cahn equation | Applied Mathematics and Computation | 李义宝, 郭士民 | 2017 年 295 卷 84-94 页 | 2017-02-15 | 郭士民 | 李义宝 | 李义宝, 郭士民 | 15 | Web of Science | 是 |
| 6 | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | |
| 合 计 | | | | | | | | | | | |
| 补充说明（视情填写）： | | | | | | | | | | | |

六、主要完成人情况表

| | | | |
|--|-----------------|-----|---|
| 姓 名 | 李义宝 | 排 名 | 1 |
| 行政职务 | 西安交通大学数学学院党委副书记 | | |
| 技术职称 | 教授 | | |
| 工作单位 | 西安交通大学 | | |
| 完成单位 | 西安交通大学 | | |
| 对本项目主要学术贡献： 本项目学术带头人，总的学术思想和理论体系的设计者。创新点 1、创新点 2、创新点 3 的提出和主要完成者。代表性论著[1, 2]的通讯作者，代表论著[3, 4, 5]的第一作者。系统研究了用于复杂拓扑区域和复杂曲面的高精度、高稳定的相场基础算法，显著地提高了精度和效率，为 3D 打印设计-优化-仿真的一体化建模与算法研究奠定基础。通过建立了一系列基于点云数据的图形重构、基于 CT 图像的图形重构、图形去噪、分割、修补、融合等 8 种图形处理的基础数学模型和算法。建立了系列保质量、保能量的多相流动和多物理场耦合的数学模型，提出了相应的多重网格快速求解器和优化算法, 开发适用于大规模计算的 GPU 和 CPU 并行自适应空间和时间算法，为 CAE/CFD 模拟研究提供了理论支撑和具体算法。 | | | |

| | | | |
|--|--------|-----|---|
| 姓 名 | 夏青 | 排 名 | 2 |
| 行政职务 | 无 | | |
| 技术职称 | 无 | | |
| 工作单位 | 西安交通大学 | | |
| 完成单位 | 西安交通大学 | | |
| 对本项目主要学术贡献： 本项目的完成人。代表论著[1]的第一作者，创新点 2 的提出和主要完成者。基于相场模型框架，发展了适应复杂区域和复杂曲面的梯度、散度、拉普拉斯三个算子，并进行了严格的数学理论证明，为 3D 打印中多物理场耦合计算提供高精度解决方案，助力国产 3D 打印软件开发。 | | | |

| | | | |
|------|-----|-----|---|
| 姓 名 | 夏斌湖 | 排 名 | 3 |
| 行政职务 | 无 | | |

| | |
|---|------|
| 技术职称 | 副教授 |
| 工作单位 | 西京学院 |
| 完成单位 | 西京学院 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>本项目的完成人。代表论著[2]的第一作者，创新点3的提出和主要完成者。在相场模型框架下申请人建立健全了保质量保能量的多物理场耦合的晶体生长模型，提出了无条件能量稳定高精度的多重网格快速求解器和优化算法，并开发了适用于大规模并行计算的自适应空间和时间算法，为CAE/CFD的模拟提供了理论支撑和高效算法。</p> | |

| | | | |
|---|----------------|-----|---|
| 姓 名 | 郭士民 | 排 名 | 4 |
| 行政职务 | 西安交通大学数学学院院长助理 | | |
| 技术职称 | 教授 | | |
| 工作单位 | 西安交通大学 | | |
| 完成单位 | 西安交通大学 | | |
| 对本项目主要学术贡献： 本项目的完成人。代表论著[5]的通讯作者，创新点 1 的主要完成者。基于相场模型框架，从理论上提出了一种新的梯度材料制备方案，并针对该结构进行了相应的力学性能分析和测试，并针对多尺度拓扑优化算法进行了深入研究。基于点云数据开发了无条件能量稳定的高阶曲面计算的基础数学模型和相应算法，助力国产 3D 打印软件开发。 | | | |

七、主要完成单位情况表

| | |
|--|--------|
| 单位名称 | 西安交通大学 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>本单位是该项目的总体学术思想和理论体系的设计单位，所有发现点的提出和主要完成单位，所有代表性论文的第一署名单位。</p> | |

| | |
|---|------|
| 单位名称 | 西京学院 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>本单位是该项目的理论体系主要参与设计单位，为本项目的顺利实时提供科研平台支撑。</p> | |

完成人合作关系说明

本成果聚焦 CAD-CAE-CFD-制造一体化，深入研究相场模型基础理论与多物理场耦合，提出面向 3D 打印的模型与算法，打破 CAD/CAE/CAM 建模壁垒，降低工业软件“卡脖子”风险。本成果由李义宝、夏青、夏斌湖、郭士民共同合作完成，针对三个创新点合作关系说明如下：

创新点 1 基于相场模型和体素单元，构建统一能量泛函，通过变分法转化为偏微分方程，实现了点云与 CT 图像的重构、去噪、分割等 8 类图形处理，为 CAD/CAE/CAM 一体化提供数学框架。该创新点主要由李义宝和郭士民共同完成。

创新点 2 定义了适用于复杂几何的梯度、散度和拉普拉斯算子，建立了曲面数值理论，发展了高精度、低网格依赖的算法，提升了计算精度与效率，为 CAD-CAE/CFD-制造一体化提供了理论与算法支持。该创新点主要由李义宝和夏青共同完成。

创新点 3 发展了保能量、保特性的高精度数值格式，理论证明其收敛性与稳定性，构建了多重网格求解器和优化算法，开发自适应计算框架，实现自主可控，为高端加工件的设计与仿真提供了高效、不依赖商业软件的计算工具。该创新点主要由李义宝和夏斌湖共同完成。

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 | 证明材料 |
|--------|------|----------|-----------------|--|------|
| 1 | 论文合著 | 夏青 2 | 2019.01-2021.12 | A second-order accurate, unconditionally energy stable numerical scheme for binary fluid flows on arbitrarily curved surfaces | 论文证明 |
| 2 | 论文合著 | 夏斌湖 3 | 2016.01-2021.12 | A second order unconditionally stable scheme for the modified phase field crystal model with elastic interaction and stochastic noise effect | 论文证明 |
| 3 | 论文合著 | 郭士民 4 | 2016.01-2021.12 | Triply periodic minimal surface using a modified Allen-Cahn equation | 论文证明 |
| 4 | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| (不限条目) | | | | | |