

# 目录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 纳米结构金属晶界力学行为与塑性变形机制研究           | 01 |
| 黄绮珊 / 浙江大学                      |    |
| 高性能纤维复合材料多尺度力学行为研究              | 04 |
| 雷旭东 / 中国科学院力学研究所                |    |
| 电子皮肤的三维柔性结构设计与感知原理研究            | 08 |
| 刘 志 / 清华大学                      |    |
| 铁电材料挠曲电效应的定量表征与力电耦合性质研究         | 11 |
| 伦应焯 / 北京理工大学                    |    |
| 含复杂拓扑的涡流构造与动力学                  | 14 |
| 沈炜煜 / 北京大学                      |    |
| 机器人手眼系统中的运动学标定                  | 17 |
| 王 笑 / 同济大学                      |    |
| 低维四方晶格材料结构力 - 电 - 磁耦合功能性的物理力学研究 | 20 |
| 轩啸宇 / 南京航空航天大学                  |    |
| 声振耦合超表面的波控机理与设计                 | 23 |
| 周红涛 / 天津大学                      |    |
| 热障涂层力热化耦合作用下的损伤与失效机制研究          | 27 |
| 周芊骞 / 北京大学                      |    |
| 基于声比拟理论的低马赫数流动噪声数值方法与模型研究       | 31 |
| 周志腾 / 中国科学院大学                   |    |

# 纳米结构金属晶界力学行为与塑性变形机制研究



黄绮珊

浙江大学  
qishan\_huang@zju.edu.cn

## 全文链接:

<https://dt.cstam.org.cn/html/zglixuexuehui/upload/zglixuexuehui/file/20250908/1757301167600502.pdf>

## 扫码阅读:



## 论文摘要 | Abstract

纳米结构金属中富含晶界，对材料微观结构演化与宏观力学性能调控具有重要意义。晶界的动力学行为受晶界宏观几何自由度、晶界微观缺陷、晶界所处多晶网络局部环境等多类内在和外在因素共同影响。厘清纳米结构金属晶界塑性变形的原子尺度机理，揭示材料微观结构演化规律，是当前纳米结构金属力学研究领域的核心问题之一，对发展纳米结构金属晶界调控方法和改善纳米结构金属力学性能具有重要的科学意义和应用价值。

本文针对纳米结构金属中晶界力学行为及其塑性变形机理，结合原子尺度模拟方法、原位纳米力学测试技术和力学建模方法，探究了面心立方（FCC）金属晶界中由晶界取向差及晶界面倾角等宏观几何自由度、晶界处台阶及位错等微观缺陷调控的晶界塑性变形机制，包括晶界迁移、晶界滑移、晶界诱导孪生和晶界位错发射等；研究了典型三晶交构型处多晶界协同塑性变形机制，揭示了多晶界节点在多晶网络塑性变形中的重要性。本文主要研究成果包括：

（1）揭示了晶界取向差依赖的晶界迁移和晶界滑移转变机制。

晶界取向差是影响晶界塑性变形的重要因素，通过分析不同 FCC 金属中 [100] 对称倾转晶界在剪切载荷作用下的变形行为，揭示了晶界取向差对其力学行为的影响机制。随晶界取向差增加，晶界塑性变形模式从  $\langle 100 \rangle$  剪切耦合迁移转变为滑移，继而转变为  $\langle 110 \rangle$  剪切耦合迁移。在不同 FCC 金属中，该变形机制转变的临界取向差阈值存在差异。通过理论建模，提出了可定量预示晶界迁移和滑移机制转变的能量模型，阐

明了晶界取向差对晶界迁移和滑移临界应力的影响。进一步探讨了模型尺寸、模拟温度和载荷形式等外加条件的影响。上述研究结果有助于晶界几何结构与晶界力学响应基本关系的构建。

(2) 阐明了晶界取向差和晶界面倾角对晶界孪生趋势的影响机理。

晶界力学行为一般由晶界取向差和晶界面倾角共同控制。通过研究 [110] 非对称大角倾转晶界在剪切加载过程中的分解过程, 揭示了晶界处孪晶的局部形核和长大机制。多个局部孪晶核相互连接, 可形成完整的纳米厚度孪晶, 并改变原晶界的几何结构, 提升晶界塑性变形能力。结合原子尺度模拟和原位电镜观测结果, 提出了一种基于晶界几何结构的孪生趋势模型, 引入孪生位错和滑移位错的竞争关系, 阐明了晶界取向差和晶界面倾角对晶界孪生趋势的影响。上述研究结果为构建非对称晶界几何结构与其力学行为的基本关系提供了新思路。

(3) 揭示了共格孪晶界上由台阶缺陷诱导的高阶孪生机制。

真实金属材料多晶结构中的晶界上一般包含大量原子尺度的台阶结构, 对晶界力学行为存在重要影响。通过建立含台阶缺陷孪晶模型, 研究了共格孪晶界上的本征台阶缺陷对其塑性变形行为的影响, 揭示了孪晶界台阶诱导的不全位错连续发射, 进而形成高阶孪晶的微观机制。原子尺度模拟和过渡态能垒计算结果表明, 随着孪晶台阶高度的增加, 台阶主导的塑性变形机制会发生转变, 即从台阶滑动主导孪晶界迁移, 转变为台阶处应力集中诱导位错发射和二次孪生。上述研究结果揭示了孪晶界本征缺陷在塑性变形过程中的重要作用, 提出了高阶孪晶结构形成和演化的新途径。

(4) 揭示了台阶和位错缺陷耦合作用的普通大角度晶界迁移机制。

普通大角度晶界一般包含晶界台阶和非本征位错等缺陷。通过研究大角度晶界上台阶和位错的力学行为, 揭示了晶界缺陷对晶界迁移过程的影响规律。首先, 不可动晶界上的台阶可通过分解、合并、倾转等变形模式动态转变为可动性强的台阶, 并沿晶界面运动, 引起不可动晶界的迁移。台阶结构的转变与晶界面倾角密切相关。其次, 晶界连续形核的非本征位错可通过滑移、攀移运动引起晶界的迁移, 进一步提升晶界的可动性。上述研究结果阐明了台阶和位错等晶界缺陷对晶界塑性变形能力有重要影响。

(5) 提出了典型晶界节点处的多晶界协同迁移模型。

多晶网络结构的动态演化不仅与各组成晶界的运动相关, 还取决于晶界节点(三晶交)的力学行为。采用原子尺度模拟方法, 研究了典型三晶交的塑性变形行为。在外加剪切应力作用下, 三晶交的迁移具有粘滞-滑动的特征。在粘滞过程中, 三晶交处逐渐积累位错, 补偿相邻晶界之间由于剪切耦合因子不同而引起的晶格失配。在滑动过程中, 三晶交处发射台阶引起两侧晶界迁移。基于位错累积协调三晶交处向错畸变的新机制, 提出了三晶交迁移的能量模型, 可预测三晶交的迁移能垒, 阐明晶界取向差对三晶交迁移行为的影响, 揭示了三晶交对晶界运动存在拖拽效应的物理根源。上述研究结果对厘清真实多晶网络中晶界的力学行为提供了新的见解。

本文研究了纳米结构金属中晶界宏观几何自由度、微观台阶和位错缺陷，以及多晶界节点等因素对晶界力学行为和塑性变形机制的影响，揭示了晶界取向差依赖的晶界迁移和晶界滑移转变机制，阐明了晶界取向差和晶界面倾角对晶界孪生趋势的影响机理，厘清了共格孪晶界上由台阶缺陷诱导的高阶孪生机制，揭示了台阶和位错缺陷耦合作用的普通大角度晶界迁移机制，提出了典型晶界节点处的多晶界协同迁移模型。本文的研究成果拓展了对晶界力学行为调控机理的认识，为借助于晶界工程改善纳米结构金属力学性能提供了理论指导。

### ● 关键词

纳米结构金属、晶界塑性、力学行为、微观塑性变形机制、原子尺度模拟、理论建模

## 作者简介 | Biography

黄绮珊，浙江大学航空航天学院浣江实验室博士后。2019 年 6 月于华中科技大学获得工学学士学位，2024 年 6 月于浙江大学获得工学博士学位，导师为周昊飞研究员。2024 年 7 月至今，在浙江大学航空航天学院浣江实验室从事博士后研究，导师为陈伟球教授。

黄绮珊主要从事纳米结构金属材料力学行为及微观变形机理的研究，主要研究方向包括晶界变形机理的原子尺度观测及多尺度模拟，晶界塑性理论等。目前在《Nature Communications》、《Science Advances》、《International Journal of Plasticity》、《科学通报》等国内外权威期刊上发表论文 10 余篇。入选中国博士后创新人才支持计划，主持中国博士后科学基金面上项目。

### ● 主要创新成果

(1) 关注晶界几何结构与其力学行为间的关系，研究了晶界取向差和晶界面倾角对晶界迁移、滑移、变形孪生及发射位错等塑性变形行为的影响。建立了计算晶界迁移和滑移的临界激活应力的能量模型；基于不同类型位错的激活应力计算，建立了可以定量预测了晶界处孪生趋势的理论模型。

(2) 关注含微观缺陷晶界的力学特性，探索了晶界处台阶与点缺陷等微观缺陷对晶界力学行为的影响。揭示了孪晶界上台阶缺陷激活的高阶孪生机制，以及晶界台阶在动态变形过程中的结构演化规律。

(3) 关注多晶界网络中的晶界力学行为。研究了晶界网络中简单三晶交的迁移机制及晶界节点处相邻晶界间的协调运动机制，揭示了晶界网络中晶界迁移行为与双晶中晶界迁移行为的差异根源。

## ● 代表性论文

- [1] Huang Q, Zhu Q, Chen Y, et al. Twinning-assisted dynamic adjustment of grain boundary mobility. *Nature Communications*, 2021, 12: 6695.
- [2] Huang Q, Zhao Q, Zhou H, Yang W. Misorientation-dependent transition between grain boundary migration and sliding in FCC metals. *International Journal of Plasticity*, 2022, 159: 103466.
- [3] Huang Q, Yang W, Zhou H. Migration of grain boundary triple junctions in nanocrystalline metals initiated by accumulated dislocations. *International Journal of Plasticity*, 2024, 173: 103872.
- [4] 黄绮珊, 王江伟, 周昊飞, 杨卫. 纳米结构金属晶界塑性机理的原子尺度模拟研究进展. *科学通报*, 2023, 68: 1182-1191.
- [5] Zhu Q, Huang Q, Tian Y, et al. Hierarchical twinning governed by defective twin boundary in metallic materials. *Science Advances*, 2022, 8: eabn8299.
- [6] Zhu Q, Huang Q, Cao G, et al. Metallic nanocrystals with low angle grain boundary for controllable plastic reversibility. *Nature communications*, 2020, 11: 3100.
- [7] Zhang Z, Huang Q, Zhou H. High-entropy alloy nanocrystals with low-angle grain boundary for superb plastic deformability and recoverability. *International Journal of Plasticity*, 2023, 167: 103679.
- [8] Zhu Q, Zhao Q, Huang Q, et al. Grain boundary plasticity initiated by excess volume. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, 121: e2400161121.

# 高性能纤维复合材料多尺度力学行为研究



## 雷旭东

中国科学院力学研究所  
leixudong@imech.ac.cn

### 全文链接:

<https://dt.cstam.org.cn/html/zglixuexuehui/upload/zglixuexuehui/file/20250908/1757299457655501.pdf>

### 扫码阅读:



## 论文摘要 | Abstract

纤维增强复合材料 (Fiber-reinforced composites, FRC) 因具有极高的比强度和比模量在近几十年来备受关注, 被广泛应用于各个领域。结合其舒适性、可设计的优势, 更是在冲击防护领域得到了快速地发展。纤维复合材料防护装备的纤维体积分数一般在 80% 以上。因此, 对纤维材料的深入研究是防护装备设计和制造的基础, 具有重要意义。本文主要围绕高性能纤维单丝材料、纤维 / 树脂界面和 FRC 在高应变率加载下的力学响应以及多尺度表征进行了相关研究。建立了针对微米直径纤维单丝冲击加载实验技术, 为微尺度纤维单丝及界面动态力学性能表征提供了有效的实验手段, 系统揭示了弹道侵彻条件下纤维单丝及基体的耗能机制; 发展了曲面纤维增强复合材料抗侵彻性能分析方法, 获得了防护性能的主控参数及其影响规律, 为曲面防弹复合材料设计与制备提供了基本依据; 初步建立了基于机器学习的高性能纤维增强复合材料侵彻高效计算模型, 为防弹复合材料性能预测和高效设计提供了新的途径。主要研究内容包括:

1. 针对纤维单丝的动态拉伸性能, 改进了微型霍普金森杆实验装置, 使用高灵敏度的压电式力传感器代替透射杆, 并在入射杆端部增加吸收长杆, 使其可以对微米直径纤维单丝的动态力学性能进行高效、准确地测量, 并结合扫描电子显微镜观察到的形貌特征, 解释了拉伸强度的应变率敏感性及其机制。

2. 针对纤维单丝受高速横向冲击载荷下的动力学行为, 从纤维单丝吸能的角度出发, 对物理过程进行了理论推导, 获得了横向冲击吸能与纤维单丝横波波速间的定量关系, 提出了纤维材料弹道防护性能的评价指标。在此基础上, 改进了激光驱动微颗粒冲击实验装置, 建立了激光

驱动微锥形变形体对微米直径纤维单丝高速横向冲击实验方法，通过测量图像中锥形变形体速度和横波波速来评估纤维单丝在高速横向冲击下的耗能行为。

3. 使用多胺改性的方法对纤维表面进行处理，得到了改性对于纤维表面的元素及化学键的影响规律。进一步使用改进的微型霍普金森拉杆对界面的动态力学性能进行了测试，得到了界面剪切强度和刚度等参数。在此基础上，建立了细观代表性体积单元，研究了改性方法、纤维含量和树脂不均匀性对于宏观单层板性能的影响。

4. 使用量纲分析给出了 FRC 抗侵彻性能的主控因素，并建立了复合材料侵彻宏观计算模型，探究了无量纲曲率半径和无量纲面密度对弹道极限速度的影响规律，给出了经验计算公式。并在此基础上研究了复合材料铺层角度对于抗侵彻性能的影响规律。

5. 使用机器学习方法研究了复合材料微结构与复合材料抗侵彻性能之间的关联。通过数值模拟建立了机器学习模型数据库，获得了降阶后的数据库主要特征，分析了不同算法及不同参数对于预测模型的影响，明确了预测纤维增强复合材料防护性能的有效预测模型和参数。

## 关键词

纤维单丝、高速横向冲击、纤维改性、动态力学性能、机器学习方法

## 作者简介 | Biography

雷旭东，男，1995 年生，中国科学院力学研究所博士后。2018 年在中国矿业大学（北京）获学士学位，2023 年在中国科学院力学研究所获博士学位，2023 年在中国科学院力学研究所从事博士后研究至今。

雷旭东博士主要从事高性能纤维增强复合材料的冲击防护性能研究，主要研究方向包括微米尺度高性能纤维的冲击动力学行为、防护材料结构设计等。相关成果以第一 / 共同第一作者发表在《Science》《Nature Communications》等国际重要期刊上，得到了《中国科学报》《麻省理工科技评论》等主流科技媒体的广泛关注和报道，并入选中国科学院力学研究所 2024 年度亮点工作。曾获“中国科学院力学研究所郭永怀奖”、“第十四届全国爆炸力学学术会议优秀博士生论坛论文奖”、“中国科学院力学研究所研究生学术论坛一等奖”、“中国科学院力学研究所优秀特别研究助理 A 类资助”等奖励。主持中国博士后科学基金面上资助、国家资助博士后研究人员计划等多项课题。

## 主要创新成果

论文围绕高性能纤维及其复合材料的多尺度冲击动力学行为与耗能机制。建立了针对微米直径纤维单丝冲击加载实验技术，系统揭示了弹道侵彻条件下纤维单丝及基体的耗能机制，为微尺度纤维单丝及界面动态力学性能表征提供了有效的实验手段；发展了曲面纤维增强复合材料抗侵彻性能分析方法，获得了防护性能

的主控无量纲参数及其影响规律，为曲面防弹复合材料设计与制备提供了理论依据；建立了基于机器学习的纤维增强复合材料侵彻高效计算方法，为防弹复合材料性能快速预测和高效设计提供了新的途径。

### 代表性论文

[1] Zhang X , Lei X, Jia X, et al. Carbon nanotube fibers with dynamic strength up to 14 GPa. *Science*, 2024, 384(6702) :1318-1323.

[2] Luo J, Wen Y, Jia X, Lei X, et al. Fabricating strong and tough aramid fibers by small addition of carbon nanotubes. *Nature Communications*, 2023,14(1) :3019.

[3] Lei X, Xiao K, Wu X, Huang C. Dynamic mechanical properties of several high-performance single fibers. *Materials*, 2021,14(13):3574. ( 封面文章 )

[4] Huang J, Guo Y, Lei X, et al. Fabricating ultrastrong carbon nanotube fibers via a microwave welding interface. *ACS Nano*, 2024,18(22):14377-14387.

[5] Xiao K, Lei X, Chen Y, et al. Extraordinary impact resistance of carbon nanotube film with crosslinks under micro-ballistic impact. *Carbon*, 2021,175:478-489. ( 封面文章 )

[6] Yan D, Luo J, Wang S, et al. Carbon nanotube-directed 7 GPa heterocyclic aramid fiber and its application in artificial muscles. *Advanced Materials*, 2024,36(22) .

[7] Luo J, Wen Y, Li T, et al. High interfacial shear strength and high tensile strength in heterocyclic aramid fibers with improved interchain interaction. *Advanced Functional Materials*, 2024,34(7).

[8] Zhu M, Xiao K, Zhang W, et al. Fabricating bio-inspired high impact resistance carbon nanotube network films for multi-protection under an extreme environment. *Nano Research*, 2024,17(9):7793-7802.

# 电子皮肤的三维柔性结构设计及感知原理研究



## 刘 志

清华大学  
zhi.liu@nuaa.edu.cn

全文链接:  
<https://dt.cstam.org.cn/html/zglxuexuehui/upload/zglxuexuehui/file/20250908/1757299457306431.pdf>

扫码阅读:



## 论文摘要 | Abstract

人类完成日常生活中的各种复杂任务，比如物体识别、灵巧操作、环境交互等，高度依赖于皮肤的触觉感知能力。电子皮肤可以重现人类皮肤的很多功能，为智能假肢和仿人型机器人等设备提供关键的触觉反馈，具有重要的科学意义和应用价值。当前，虽然国内外有不少电子皮肤方面的研究工作报道，但在电子皮肤的多功能解耦传感、物理性质定量感知和大剪切变形传感等方面仍然面临诸多挑战。针对这些挑战，本文基于三维柔性结构设计和感知原理研究，设计并制备了两种新型的电子皮肤系统，主要研究内容和结论包括：

(1) 设计并制备了一款高度仿生的电子皮肤器件。基于对人类皮肤微观结构的仿生研究，提出了一种结构功能一体化的仿生电子皮肤设计方法，其核心是通过三维微结构设计对皮肤中各皮层的力学特征和感受器的传感特征进行模仿，来重现皮肤的功能。进一步通过力学理论分析和有限元仿真，对仿生电子皮肤的布局架构和各类参数进行了定量设计和优化。建立了制备仿生电子皮肤的标准化工艺流程，对包含三维传感阵列和多层异质封装的电子皮肤进行了可靠的制备。性能测试结果表明，所研制的电子皮肤器件具备与皮肤较为接近的力学性质和传感能力，并具有解耦传感压力、摩擦力和应变的能力。

(2) 构建了可实时定量测量物体模量、曲率等参数的仿生电子皮肤系统。发展了与仿生电子皮肤器件匹配的信号采集电路，形成了一套完整的功能系统，实现了在复杂加载条件下对压力、摩擦力和应变信息的可视化解耦时空映射。进一步引入机器学习算法，构建采集信号与被测

量之间的神经网络模型，收集数据并对其进行训练，在国际上率先实现了对模量和曲率的同时定量测量，该系统还兼具压力的空间超分辨率感知能力。

(3) 研制了一款基于新型剪切变形传感机理的电子皮肤。研究了力学引导组装形成的三维结构在基底剪切作用下的变形机理，设计了一种基于交叉直条带结构对的新型剪切变形传感单元，可将剪切变形转化为面外高度差变化，并通过电路设计实现其定量测量。在此基础上，研制了一款可解耦传感大剪切变形的电子皮肤，展示了其在人机交互界面、运动健康监测等领域的应用前景。

### ● 关键词

电子皮肤、三维柔性结构、仿生设计、复杂感知能力、大剪切变形

## 作者简介 | Biography

刘志，男，1995 年生，南京航空航天大学副研究员。2018 年于北京航空航天大学获得学士学位，2023 年于清华大学获得博士学位。

主要从事仿生电子皮肤器件与系统研究，致力于通过力学理论和多学科交叉方法拓宽电子皮肤的触觉感知能力边界，研究成果以共同第一作者发表于《Science》《Materials Today》《ACS Nano》等期刊，被选为《Science》杂志官网及当期目录页焦点图片、ESI 高被引论文、热点论文等，受到国家自然科学基金委、新华社、人民日报等数十家权威媒体报道，并被 PNAS、Device 等权威期刊专题报道。获选国家“博新计划”、江苏省“卓博计划”（A 档）、中国力学学会优秀博士学位论文汇编等，主持国家自然科学基金青年项目（C 类）、江苏省自然科学基金青年项目（C 类）等。

### ● 主要创新成果

#### (1) 研制仿人类皮肤三维架构的电子皮肤

基于对人类皮肤微观结构的仿生研究，提出了一种结构功能一体化的仿生电子皮肤设计方法，研制出一种仿生三维架构电子皮肤，其力与应变传感器的三维布局效仿了人类皮肤中梅克尔细胞和鲁菲尼小体的空间分布形式，同时其多层异质封装的力学特性与皮肤各皮层对应，使其能从物理层面解耦地测量压力、摩擦力和应变。

#### (2) 构建可测量物体物理性质的触觉感知系统

通过开发与仿生电子皮肤器件匹配的信号采集电路和深度学习算法，构建了一套完整的智能触觉感知系统，实现了在复杂加载条件下对压力、摩擦力和应变的解耦时空映射和对压力的空间超分辨率感知，并在国际上率先实现了只需通过单次触摸便可同时定量测量物体模量和局部主曲率等物理性质。

### （3）研制可解耦传感大剪切变形的电子皮肤

厘清了力学引导组装形成的三维结构在基底剪切作用下的变形机理，设计了一种基于交叉直条带结构对的新型剪切变形传感单元，将大剪切变形转化为可电学定量测量的面外高度差变化，并基于此研制出一种可解耦传感大剪切变形的电子皮肤，解决了人机交互、运动健康监测等领域大剪切变形传感的难题。

#### ● 代表性论文

[1] Liu Z, Hu X, Bo R, et al. A three-dimensionally architected electronic skin mimicking human mechanosensation. *Science*, 2024, 384: 987-994. (Highlighted on the ToC of *Science Magazine* and homepage of *Science* website)

[2] Li K, Liu Z, Hu X, et al. Morphable 3D architectures enabled by shear-guided approach. *Materials Today*, 2025, 86:28-41.

[3] Hu X, Liu Z, Zhang Y. Three-dimensionally architected tactile electronic skins. *ACS Nano*, 2025, 19(15):14523-14539.

[4] Zheng M, Chen Y, Liu Z, et al. Kirigami-inspired multiscale patterning of metallic structures via predefined nanotrench templates. *Microsystems & Nanoengineering*, 2019, 5(1):54.

# 铁电材料挠曲电效应的定量表征与力电耦合性质研究



## 伦应焯

北京理工大学  
lunyingzhao@bit.edu.cn

### 全文链接:

<https://dt.cstam.org.cn/html/zglixuexuehui/upload/zglixuexuehui/file/20250908/1757299458524215.pdf>

### 扫码阅读:



## 论文摘要 | Abstract

挠曲电效应是电介质材料中广泛存在的一种高阶力电耦合效应，它描述了应变梯度与电极化强度间的耦合关系。由于挠曲电效应具有随结构尺寸降低而显著增强的独特性质，基于其设计的微纳功能器件在航空航天、生物医学、智能制造和信息通讯等领域具有良好的应用前景。具有高介电性的铁电材料是挠曲电研究的重要体系，铁电、压电与应变梯度的相互作用能够诱导丰富的新颖物理、力学性质。表征铁电材料中的挠曲电效应并揭示其诱导的新奇力电耦合性质，对推动挠曲电效应实际应用发展具有重要意义。本文结合实验表征、理论建模和数值模拟方法，围绕铁电材料中挠曲电效应的系数表征、实验调控、基础理论以及技术应用等方面开展以下研究工作：

(1) 针对铁电材料挠曲电系数表征中难以分离压电效应贡献的关键难题，围绕铁电纳米柱的压缩力学行为建立了考虑压电和挠曲电效应的理论模型，推导了压缩柔度解析解。利用变截面和等截面纳米柱的压缩柔度差异，提出了一种有效消除压电效应贡献的本征挠曲电系数力学表征方法。系统研究了压电和挠曲电效应对压缩力学性质的竞争性影响以及纳米柱的尺寸优化设计规律，发现挠曲电能够增强压缩柔度而压电则相反，且降低纳米柱高度或者增大倾角和高宽比，能够增强挠曲电效应的影响，提高系数测量的准确性。

(2) 针对柔性氧化物薄膜缺乏超高应变梯度实验调控手段及其在强挠曲电作用下的力电耦合性质尚不清楚的关键问题，利用柔性薄膜的褶皱弯曲变形，实现了微纳尺度下超高应变梯度 ( $> 10^7 \text{ m}^{-1}$ ) 的大面积调控。结合扫描透射电子显微镜表征了弯曲薄膜在超高应变梯度下的晶

格畸变和电极化强度等力电耦合性质，揭示了强挠曲电效应诱导的极化显著增强行为。在铁电薄膜中发现了挠曲电诱导的反常弯胀弯缩力学性质，薄膜厚度随应变梯度增大而发生显著的膨胀或收缩变形。

(3) 针对铁电材料在应变梯度作用下呈现反常非对称力学性质的理论机制尚不清楚关键问题，围绕柔性铁电薄膜的非对称弯曲力学行为，建立了考虑压电和挠曲电效应相互作用的严格理论模型，推导了完备的电焓能量密度表达式和应变 / 应变梯度解。基于该理论模型，揭示了应变梯度诱导的挠曲电场与逆压电效应的相互作用是反常弯胀弯缩性质的原因，进一步发现铁电薄膜具有非对称的抗弯刚度性质。在此基础上，提出了挠曲形变效应新概念，系统解释了铁电材料中多种非对称力学性质的内在机理，并预测了铁电纳米线的非对称扭转力学性质。

(4) 针对传统铁电畴力学调控方式难以大面积翻转厚膜电畴的技术难题，开发了一种基于悬浮薄膜的铁电畴针尖力调控新技术。利用悬浮薄膜在针尖力作用下的大范围弯曲变形显著增强了薄膜中的横向挠曲电场，进而在铁电薄膜中以单点针尖力大面积翻转了远超针尖 - 薄膜接触区域的铁电畴。铁电畴力学调控的膜厚适用上限显著提升至数百纳米，且厚膜畴翻转所需针尖力降低至数微牛。结合理论模型和相场模拟，进一步揭示了畴翻转阈值力与薄膜厚度间的三次方关系，证实了横向挠曲电效应的关键作用。

## ● 关键词

挠曲电效应、应变梯度、铁电材料、电极化、力电耦合、力学调控

## 作者简介 | Biography

伦应焯，北京理工大学特立博士后。2017 年于暨南大学力学系获得工学学士学位，2023 年于北京理工大学力学系获得工学博士学位。曾获得北京市优秀博士毕业生、北京理工大学优秀博士学位论文、优秀博士后等荣誉。

主要从事先进材料多场耦合力学及挠曲电效应研究工作，在挠曲电理论和功能物性调控方面取得多项成果，以第一 / 通讯作者在《J. Mech. Phys. Solids》《Nat. Commun.》《Adv. Mater.》《Int. J. Mech. Solids》《Int. J. Solids Struct》等学术期刊发表 SCI 论文 16 篇，授权国家发明专利 2 项，研究成果得到同行学者的积极评价。主持国家自然科学基金青年项目和北京市自然科学基金青年项目各 1 项，参与国家重点研发计划、国自然面上等科研项目。

## ● 主要创新成果

(1) 挠曲电高阶力电耦合理论及新奇力学性质

小尺度下大应变梯度诱导的挠曲电效应使微结构呈现出丰富新奇的力学性质。通过变分原理建立了挠曲

电高阶力电耦合理论,发现了一种由“应变-极化”和“应变梯度-极化”两对耦合序参量相互作用所诱导的新力学机制:挠曲形变效应,普适地解释了铁电材料中不寻常的“非对称”弯曲、扭转、裂纹扩展等力学性质的形变机理;建立了柔性薄膜的弯曲、屈曲、自卷曲等微结构的挠曲电理论模型,发现了小尺度下的力学形变具有显著的尺寸依赖性,揭示了挠曲电效应在微结构力电耦合形变中的关键作用。

## (2) 挠曲电效应驱动的力场调控铁电极化性质

应变梯度工程是利用力场诱导的挠曲电调控功能物性的新兴策略,它能够诱导诸如莫尔极化涡旋、力致极化翻转等新颖功能。发展了柔性薄膜失稳屈曲力学手段,灵活调控了相比宏观尺度高七个数量级的应变梯度,诱导了强挠曲电将铁电薄膜的自发极化显著提高了数倍,且在本征非铁电薄膜中诱导了媲美常规铁电体的电极化。发展了悬浮薄膜纳米压痕力学手段以增强纳米针尖诱发的横向挠曲电场,实现了比针尖尺寸大 2500 余倍的大面积铁电畴无损翻转,针尖力降低了 1 个数量级且能耗降低了 3 个数量级,避免了电学翻转带来的电致表面损伤和疲劳老化等问题。

## ● 代表性论文

[1] Lun YZ, Hong JW, Fang DN. Asymmetric mechanical properties in ferroelectrics driven by flexo-deformation effect. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2022, 164: 104891.

[2] Lun YZ, Wang XY, Hong JW, et al. Ultralow tip-force driven sizable-area domain manipulation through transverse flexoelectricity. *Advanced Materials*, 2023, 35(36): 2302320.

[3] Cai SH, Lun YZ, Ji DX, et al. Giant polarization and abnormal flexural deformation in bent freestanding perovskite oxides. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5116.

[4] Lun YZ, Xv SQ, Hong JW, et al. Flexoelectricity in self-rolling freestanding heterogeneous films. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, 271-272: 112223.

[5] Lun YZ, Zhou H, Yao D, et al. Screening piezoelectricity in determination of flexoelectric coefficient at nanoscale. *Mechanics of Materials*, 2022, 150: 103591.

[6] Han L, Yang XR, Lun YZ, et al. Tuning piezoelectricity via thermal annealing at a freestanding ferroelectric membrane. *Nano Letters*, 2023, 23(7): 2808 – 2815.

[7] Lun YZ, Liu JY, Wei B, et al. Elastic properties of photovoltaic Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> single crystal. *Experimental Mechanics*, 2022, 62: 117-123.

[8] Wang TJ, Lun YZ, Yang YD, et al. Evaluating non-intrinsic contribution in flexoelectric measurements. *Smart Materials and Structures*, 2024, 33: 095009.

# 含复杂拓扑的涡流构造与动力学



沈炜

北京大学  
shenw@mps.mpg.de

全文链接:  
<https://dt.cstam.org.cn/html/zglxuexuehui/upload/zglxuexuehui/file/20250908/1757299462688501.pdf>

扫码阅读:



## 论文摘要 | Abstract

物质的复杂拓扑纠缠代表了物理系统中普遍存在的一种混沌形式。作为最复杂的流动状态，湍流以复杂拓扑结构的涡旋为特征。这些涡旋的结构类似于流体的骨架和肌腱，不断地积累和耗散能量。然而，要解释湍流的统计特性是如何从这些含复杂拓扑的基本涡结构产生的仍然是一项艰巨的挑战。纠缠涡管的螺旋度可以在拓扑上分解为中心线的卷曲和环绕以及内部的拧转。作为理想流体（欧拉）演化下的一个不变量，螺旋度在粘性流动中的动力学对理解复杂涡旋演化有重要价值，但却难以准确量化和捕捉。本文提出了对含复杂拓扑的涡流的系统构造与量化方法，并分析了从基础纽结涡管到复杂缠结涡旋的动力学。

本文拓展了螺旋度拓扑分解框架，建立了不同涡面上涡线局部拧转率与螺旋度的关系，使完整量化具有复杂内部拓扑的涡管的螺旋度分量成为可能。通过提出的以任意曲线为涡中心线、可调节精细尺度结构（包括涡核尺度、内部拧转、截面形状等）构造复杂拓扑涡流的构造方法，本文分别构造并研究了涡纽结和链环、含差异内部拧转的涡环、拓扑涡流缠结的湍流：

首先，本文研究了环面纽结和链环涡管的拓扑转变和螺旋度转换。本文发现，在涡纽结和链环的演化过程中，存在三种拓扑转变路径（即融合、重联和湍流转捩），它们取决于环面纵横比与卷绕数。对于较小的纵横比，初始的纽结或链环涡管很快融合成一个涡环，从而实现了从卷曲和环绕分量到拧转分量的完全螺旋度转换。对于较大的纵横比，涡纽结或链环通过第一次涡重联解开为上下两个卷绕涡圈，伴随着螺旋度的波动，包括卷曲和环绕数的损失，以及拧转的产生。然后，相对不稳

定的下涡圈可以经历第二次重联，分裂成多个小涡圈，螺旋度也有类似的波动。对于中等的纵横比，卷绕涡圈的不完全重联以及强烈的涡相互作用触发了湍流转换。

其次，本文探索了涡管内部差异扭转的动力学。本文基于新的螺旋度分解框架，表征了涡线的盘绕和涡管的内部结构——这对层流 - 湍流转换，以及涡的不稳定性，重联和破碎都至关重要。通过具有一对相反手性扭转波的涡环的数值模拟，本文追踪和测量涡面的演化与涡线的局部扭转率。两个扭转波沿着环向彼此传播，然后碰撞，导致局部扭转率迅速上升。局部涡面被挤压成一个类似于偶极子的圆盘状结构，其上盘绕强烈扭曲的涡线，从而导致涡的猝发。随着初始扭转率的增大，涡盘边缘的涡重联会掐断偶极涡环，并抑制后续的猝发。本文推导出了一个类 Burgers 方程模型来量化这个过程，该模型预测的猝发时间与直接数值模拟很好地吻合。

最后，本文利用量子涡缠结作为骨架，生成并分析由复杂拓扑涡旋缠结而成的经典湍流场。首先基于涡丝法，模拟超流体氦的各向同性量子湍流。然后以超流体涡丝为涡中心线，即涡的骨架，构造具有可调精细尺度结构的粘性涡流。量子骨架和可调涡管厚度的结合，使得合成的湍流满足关键的流动统计规律，包括能谱的 $-5/3$  标度律和三阶结构函数的负偏态。编织湍流的尺度分布与惯性区内的正能流阐明了经典的能量级串理论；其速度梯度张量也为极端事件的力学机制提供了有价值的见解。通过操纵基本结构，本文定制具有期望统计特征的湍流，如雷诺数、手性和螺旋度、标度律等。这种由下而上的“编织”湍流的方法为分析湍流基本结构和开发基于结构的湍流模型提供了系统方法。

## 关键词

拓扑流体动力学、涡动力学、螺旋度、湍流

## 作者简介 | Biography

沈炜煜，德国马克斯·普朗克太阳系研究所博士后，洪堡学者。2019 年 6 月于华中科技大学获得工学学士学位；2024 年 7 月毕业于北京大学并获得理学博士学位。2024 年 9 月起在德国马克斯·普朗克太阳系研究所开展博士后研究工作。

沈炜煜主要从事涡动力学，拓扑流体动力学，磁流体动力学的研究，研究工作关注涡旋和磁场的拓扑与几何，探索湍流的结构形成与非线性演化机制。其研究成果发表在《Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.》和《J. Fluid Mech.》等国际重要学术期刊上。博士学位论文获评北京大学优秀博士学位论文，并入选中国力学学会优秀博士学位论文汇编。入选德国洪堡学者，获欧洲力学学会 Visions of Fluid Dynamics Prize。

## ● 主要创新成果

### (1) 发现涡纽结和链环演化的拓扑转变路径

系统揭示了涡纽结与链环在粘性演化中可能发生的三种拓扑转变路径，即融合、重联和转捩。通过螺旋度分量追踪，论文进一步阐明拓扑事件中不同来源的螺旋度（如拧转、环绕与链接）如何发生转换与守恒，从而厘清了涡旋拓扑演化与动力学行为的内在耦合关系。

### (2) 提出拧转螺旋度的局部拓扑分解方法

提出了基于涡面分布的局部拧转分解方法，建立了涡线局部拧转率与整体螺旋度的严格对应关系，使得在具有复杂内部结构的涡管中可以准确诊断不同区域对总螺旋度的贡献。基于该方法，论文发现具有反手性拧转波的涡环可触发局部猝发现象，并提出类 Burgers 模型刻画猝发的非线性演化。

### (3) 构造富含复杂拓扑涡旋的可调湍流场

建立了基于纠缠涡管的湍流构造方法，既能控制涡旋的中心线拓扑，又可精细调节其几何特征，从而系统研究湍流统计量与涡结构间的关系。该方法生成的“编织湍流”场成功再现经典湍流的主要统计规律，并揭示了涡旋基元调控对湍流级串和极端事件的影响，展示了从涡结构出发设计和分析湍流的新路径。

## ● 代表性论文

[1] Shen W, Yao J, Yang Y. Designing turbulence with entangled vortices. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(35): e2405351121.

[2] Shen W, Yao J, Hussain F, Yang Y. Role of internal structures within a vortex in helicity dynamics. *Journal of Fluid Mechanics*, 2023, 970: A26.

[3] Shen W, Yao J, Hussain F, Yang Y. Topological transition and helicity conversion of vortex knots and links. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, 943: A41.

[4] Shen W, Ostilla-Mónico R, Zhu X. Vortex-magnetic competition and regime transitions in antiparallel flux tubes. *Journal of Fluid Mechanics*, 2025, in press.

[5] Shen W, Ge Y, Han Z, Zhao Y, Yang Y. Constructing wall turbulence using hierarchical hairpin vortices. *arXiv preprint*, 2025: arXiv:2504.06761.

[6] Yao J, Shen W, Yang Y, Hussain F. Helicity dynamics of viscous vortex links. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, 944: A41.

[7] Meng Z, Shen W, Yang Y. Evolution of dissipative fluid flows with imposed helicity conservation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2023, 954: A36.

[8] Han Z, Shen W, Yang Y. Fast synthesis of turbulence with multi-scale coherent vortices. *arXiv preprint*, 2025: arXiv:2506.01022.

# 机器人手眼系统中的运动学标定



王 笑

同济大学

22310360@tongji.edu.cn

## 全文链接：

<https://dt.cstam.org.cn/html/zglxuexuehui/upload/zglxuexuehui/file/20250908/1757299459178736.pdf>

## 扫码阅读：



## 论文摘要 | Abstract

随着科学技术的快速发展，机器人视觉系统已经越来越广泛地应用于许多领域。由视觉传感器（摄像头、超声探头、内窥镜摄像头等）和机器人构成的机器人视觉系统称为手眼系统，通常包含 Eye-in-hand 系统和 Eye-to-hand 系统。手眼系统中存在两个典型的固定变换：（1）Eye-in-hand 系统中机器人末端坐标系—视觉传感器坐标系变换，即手眼关系；（2）Eye-to-hand 系统中机器人基座坐标系—世界坐标系变换，即机器人方位。有时手眼系统中需要同时确定两种固定变换。机器人手眼系统通过视觉传感器获取图像信息，然后将图像信息反馈给控制系统来执行相关任务，视觉传感器系统与机器人系统的融合程度直接决定了任务的完成度。因此，使用手眼系统执行任务时，首先要确定机器人系统与视觉传感器系统之间的运动学关系，即手眼系统标定。

通过建模、实验和参数辨识确定机器人基座坐标系—世界坐标系变换和机器人末端坐标系—视觉传感器坐标系变换的过程，分别称为机器人方位标定和手眼标定。本文针对 6 自由度串联机器人，围绕建模和参数辨识研究了以下三个关键科学问题：（1）针对机器人方位标定建立符合李群共轭运算的模型；（2）分离模型中的坐标不变量；（3）基于旋量理论的参数辨识。针对这三个关键科学问题，本文的主要研究内容如下：

（1）建立了针对机器人方位标定的数学模型。根据机器人的 DH 模型和 POE 模型的等价性，推导了齐次矩阵表示的机器人方位标定模型。随后，基于手眼系统的运动学回路给出了对偶方程对应的物理意义解释。进一步，根据李群  $SE(3)$  和  $Ad(SE(3))$  的关系，将齐次矩阵表示的对偶方程转换为有限位移旋量矩阵表示的对偶方程。完善了模型表示，为进一步参数辨识提供了不同的计算模型。

(2) 引入旋转张量和运动张量分离对偶方程中的坐标不变量。针对齐次矩阵表示的对偶方程, 引入旋转张量, 揭示旋转方程的二阶张量分量坐标变换的本质。进一步, 根据旋转矩阵的 Rodrigues 公式, 将二阶张量分量的坐标变换表示为一阶张量分量的坐标变换, 并推导旋转的解析解。针对有限位移旋量矩阵表示的对偶方程, 引入运动张量, 根据有限位移旋量矩阵的 Rodrigues 公式, 将对偶方程表示为等价的一阶张量分量坐标变换。明确了实现参数辨识的理论模型, 进一步推导了对偶方程的旋转解析解和平移解析解。

(3) 依据是否解耦刚体运动的旋转和平移, 基于旋量理论展开分步法和整体法的辨识, 并提出了分类标准。解耦齐次矩阵的旋转和平移, 针对非线性的旋转方程, 提出了三种辨识方法, 分别代表了旋转运动的不同表示和计算方法。通过多种仿真和实验测试, 验证了旋转的表示并不影响辨识结果。根据螺旋运动针对旋转与平移的描述, 将有限位移旋量矩阵解耦为旋转部分和平移部分, 结合张量积、四元数共轭和对偶代数展开参数辨识。扩展了对偶代数在机器人运动学的应用, 完善了参数辨识体系, 系统地分析了影响辨识结果的因素, 比较了本文提出的辨识方法, 评估了每个方法的适用条件。相对于已有的研究, 在理论上分析了影响辨识结果的因素, 具有普遍适用性, 为工程应用提供了指导。

## 关键词

运动学标定、对偶方程、运动张量、矩阵李群、参数辨识

## 作者简介 | Biography

王笑, 同济大学航空航天与力学学院博士后。2022 年毕业于同济大学, 获工学博士学位, 博士论文入选 2023 年同济大学优秀博士学位论文和 2024 年度中国力学学会优秀博士学位论文汇编。

近年来主要研究方向为机器人手眼系统参数辨识, 研究成果以第一作者在《Mech. Mach. Theory》等权威期刊发表 SCI 论文 10 篇。主持国家自然科学基金青年项目 1 项, 参与国家自然科学基金重点项目等。

## 主要创新成果

(1) 提出了旋量 - 李群 - 李代数的参数化运动学建模方法, 实现了运动模型的张量降阶, 突破了单位四元数群作为  $SE(3)$  群双覆盖引起的奇异问题, 实现了运动方程的无奇异表征;

(2) 提出了基于旋量几何的运动方程解耦方法, 构建了基于四元数、点集匹配、张量积的辨识方法框架, 形成了手眼系统几何参数辨识的旋量代数理论;

(3) 提出了参数辨识方法体系的分类标准, 明确了实验的误差传递路径, 分析了影响辨识精度的因素, 拓宽了旋量理论和李群理论在机器人运动学中的应用范围。

### ● 代表性论文

- [1] Wang X, Sun HX, Liu CL, Song HW. Dual quaternion operations for rigid body motion and their application to the hand-eye calibration. *Mechanism and Machine Theory*, 2024, 193:105566.
- [2] Wang X, Liu CL, Sun HX, Song HW. A two-step solution for robot-world calibration made intelligible by implementing Chasles' motion decomposition in  $Ad(SE(3))$ . *Mechanism and Machine Theory*, 2024, 191:105522.
- [3] Wang X, Huang JS, Song HW. Robot-world and hand-eye calibration based on quaternion: A new method and an extension of classic methods, with their comparisons. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, 179: 105127.
- [4] Wang X, Song HW. One-Step Solving the Robot-world and Hand-Eye Calibration Based on the Principle of Transference. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2025,17(3): 031014.
- [5] Wang X, Zhou KY, Yang JN, Song HW. Robot-world and hand-eye calibration based on motion tensor with applications in uncalibrated robot. *Measurement*, 2022, 204:112076.
- [6] Wang X, Huang JS, Song HW Simultaneous robot-world and hand-eye calibration based on a pair of dual equations. *Measurement*, 2021, 181:109623.
- [7] Wang X, Song HW. One-step solving the hand-eye calibration by dual kronecker product. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2024, 16(10): 101008.
- [8] Wang X, Song HW. Optimal robot-world and hand-eye calibration with rotation and translation coupling. *Robotica*, 2022, 40(9): 2953-2968.

# 低维四方晶格材料结构力 - 电 - 磁耦合功能性的物理力学研究



**轩啸宇**

南京航空航天大学  
xuanyuanxy@nuaa.edu.cn

## 全文链接:

<https://dt.cstam.org.cn/html/zglxuexuehui/upload/zglxuexuehui/file/20250908/1757299461564530.pdf>

## 扫码阅读:



## 论文摘要 | Abstract

随着信息化社会的发展, 每天产生海量数据, 这对逻辑电路的性能提出了越来越高的要求。低维铁性材料具有至少两个可相互转化的等价态, 可代表 0 和 1 两种信息状态, 是制造下一代高性能逻辑器件的理想材料。本文基于第一性原理, 预测了一百多种稳定的过渡金属 (M) 和非金属 (X) 化合物 MX 单层, 并在其中发现 50 多种磁性化合物和 60 多种铁弹化合物; 针对其中长方形晶格结构的铁弹化合物, 本文从原子成键角度分析了它们正方形晶格相失稳的原因, 并建立了物理可解释的描述符。在这一百多种化合物中, 还有铁弹与反铁磁共存的单层 FeAs, 铁弹与铁磁共存的单层 CrN 和 VP 等多铁材料和具有室温量子反常霍尔效应的单层 TiTe。此外, 本文还在传统的 Si 表面发现了铁磁与铁电耦合的多铁性行为。本文的主要发现概述如下:

1、揭示了二维四方晶格材料的铁弹变形机制, 并建立了高准确度的描述符。以铁基超导材料的核心组元 FeAs 结构为框架, 通过第一性原理结合高通量计算筛选出 166 种 MX 稳定单层材料, 其中含有 65 种铁弹材料。基于第一布里渊区  $\Gamma$  点处的原子轨道成键分析, 发现当 Md-Xp 轨道和 Md-Md 轨道耦合强度均较弱时, 正方形晶格结构失稳相变为具有铁弹性的长方形晶格结构。通过构建价电子描述因子并采用机器学习方法, 建立了可用于判定二维 MX 单层铁弹性的描述符, 该描述符对 166 种二维 MX 单层的判定准确率达到 89%, 为以后探索二维铁弹性提供了有效工具。

2、预测了若干具有铁弹与磁性耦合的二维弹磁材料。在 65 种二维铁弹材料 MX 中发现了 11 种铁弹与磁性耦合的多铁材料和 6 种铁弹与磁性无耦合的多铁材料。预测了铁弹与反铁磁无耦合的单层 FeAs 多铁材料,

并发现其可通过氟化转变为铁弹铁磁耦合的多铁性材料。发现了铁弹 - 铁磁无耦合的单层 CrN 和铁弹与铁磁耦合的单层 VP 两种多铁性材料。有趣的是, 单层 VP 还是具有狄拉克锥的自旋半金属, 并可在应变调控下转变为量子反常霍尔绝缘体。该结果为设计基于铁弹 - 铁磁多铁材料的非易失存储芯片提供了候选材料。

3、预测了二维 TiTe 具有层数可叠加的室温量子反常霍尔效应。基于第一性原理计算, 发现 TiTe 从单层至体块均具有自旋半金属性, 其居里温度随着层数增加而增加。单层 TiTe 的居里温度可达 650 K, 体块时增加至 760 K, 远高于室温。单层时拓扑能隙高达 261 meV, 至三层逐渐降至 142 meV, 仍远高于室温等效能量。这些特点表明, 二维 TiTe 不仅有望在室温下实现量子反常霍尔效应, 而且可以通过少数层堆垛获得等效高陈数的量子反常霍尔绝缘体。该结果为合理的实验探索和检测新颖的拓扑量子物理提供了深刻见解, 并可能促进量子反常霍尔绝缘体在室温甚至更高温度下的实际使用。

4、发现空穴掺杂的 Si(001) 表面具有基于铁磁和反铁电耦合的多铁性。通过第一性原理计算, 发现 Si(001) 表面的反铁电  $p(2 \times 2)$  重构可通过空穴掺杂诱导出磁性, 该表面磁性可通过施加应变进一步增强。反铁电  $p(2 \times 2)$  重构可通过施加电场和掺杂空穴翻转为铁电  $p(2 \times 1)$  重构。与  $p(2 \times 2)$  重构不同,  $p(2 \times 1)$  重构在空穴掺杂下不具有磁性, 这使得空穴掺杂的 Si(001) 表面可通过电场控制磁性的有无。该结果为基于传统半导体设计非易失存储芯片提供了新思路。

## 关键词

二维材料、铁磁、铁弹、铁电、多铁、电子性质、第一性原理、自旋半金属、量子反常霍尔效应

## 作者简介 | Biography

轩啸宇, 南京航空航天大学博士后。2016 年于南京航空航天大学获得学士学位, 2023 年于南京航空航天大学获得博士学位, 导师为张助华教授。2023 年 6 月至至今, 南京航空航天大学航空学院博士后, 合作导师为张助华教授和郭万林教授。

主要从事低维材料的纳尺度物理力学研究, 研究工作通过密度泛函理论计算与理论分析, 揭示低维材料力 - 电 - 磁及其耦合性质的微观机制。在《Phys Rev Lett》《Sci Bull》《Nano Lett》《Nanoscale Horiz》《nanoscale》等期刊上发表 SCI 论文 10 余篇, 发明专利 1 项, 并主持国家自然科学基金青年项目。

## 主要创新成果

基于第一布里渊区  $\Gamma$  点处的原子轨道成键分析, 提出基于 d-p 轨道杂化度  $\eta$  与 d-d 轨道耦合强度的铁弹性双参数判据。基于 d 带中心理论与元素得失电子规律, 引入元素行为的价电子描述因子, 采用机器学习方法, 构建了一个以元素本征性质为参数的一维物理可解释铁弹性描述符。

预测了二维四方晶格材料中的强力磁耦合材料 VP 与层数可叠加的室温量子反常霍尔绝缘体 TiTe。

发现 Si(001) 表面通过空穴掺杂可实现本征铁磁与铁电的多铁性耦合。这是首次在传统半导体材料中实现非金属铁磁铁电多铁耦合。

### ● 代表性论文

[1] Xuan XY, Guo WL, Zhang ZZ. Ferroelasticity in two-dimensional tetragonal materials. *Physical Review Letters*, 2022, 129 (4):047602.

[2] Xuan XY, Zhang ZZ, Chen CF, Guo WL. Robust quantum anomalous hall states in monolayer and few-layer TiTe. *Nano Letters*, 2022, 22(13): 5379-5384.

[3] Xuan XY, Yang TF, Zhou J, Zhang ZZ, Guo WL. A multiferroic iron arsenide monolayer. *Nanoscale Advances*, 2022, 4 (5):1324-1329.

[4] Xuan XY, Wu MH, Zhang ZZ, Guo WL. A multiferroic vanadium phosphide monolayer with ferromagnetic half-metallicity and topological Dirac states. *Nanoscale Horizons*, 2022, 7 (2):192-197.

[5] Xuan XY, Guo WL, Zhang ZZ. Surface multiferroics in silicon enabled by hole-carrier doping. *Science Bulletin*, 2019, 64 (5):331~336.

[6] 一种二维黑磷晶体制备方法。ZL201810177983.4

[7] Xuan XY, Zhang ZZ, Guo WL. Doping-stabilized two-dimensional black phosphorus. *Nanoscale*, 2018, 10 (17):7898-7904.

[8] Xu Y, Xuan XY, Yang TF, et al. Quasi-freestanding bilayer borophene on Ag (111). *Nano letters*, 2022, 22 (8):3488-3494.

# 声振耦合超表面的波控机理与设计



周红涛

天津大学

zhouhongtao@tju.edu.cn

## 全文链接：

<https://dt.cstam.org.cn/html/zglix-uexuehui/upload/zglixuexuehui/file/20250908/1757299464988914.pdf>

## 扫码阅读：



## 论文摘要 | Abstract

声波的可控传播在航空航天、医疗检测、地质勘探、海洋科技等许多民用与工程领域均发挥着积极而重要作用。声学超表面作为一种人工结构，可通过亚波长尺度内微结构和宏观序构设计实现对波幅值、相位、极化等参量的任意控制。因其超薄轻便特性和灵活调控能力，近年来已成为声场定制化控制的重要手段。然而，当涉及声振耦合效应显著的水声环境时，运用已有的设计理论和方法很难实现水下声场的精准调控。因此，本文面向水声调控与海空声通信等工程应用，从理论分析、数值仿真、优化设计和实验测试等多个方面系统地研究了声振耦合超表面的波控机理与设计方法。主要工作和创新点总结如下：

(1) 提出了弱声振耦合效应下超宽带曲面声学超表面的设计理论和方法。研究表明，对于气固声振耦合超表面，固体弹性变形对空气声场影响较小，固体可视为刚体；为拓宽超表面工作频带，提出了主动调和被动宽频两种超表面设计原理；基于拓展的曲面宽带广义斯涅尔定律，采用旋转通道可调单元和变截面宽带响应单元局部设计的超表面，分别实现了相对带宽超过 88.8% 的超宽带可调隐身和 93.3% 的超宽带被动隐身，为宽带声学器件设计与应用提供了新的解决途径。

(2) 提出了强声振耦合效应下高效水声超表面的局部和非局部设计理论和方法。研究发现，对于液固声振耦合超表面，声振耦合效应会诱发固体单元间强烈的非局部相互作用，导致基于广义斯涅尔定律的局部设计策略失效。据此，提出了非局部与局部化两种超表面设计方法来实现水下声场的精准调控。其中基于格栅衍射理论的非局部设计策略，通过逆向设计多个单元组成的周期性超胞，实现了高效的声束定向偏转；而

基于表面阻抗理论的局部化设计策略，则通过抑制单个单元表面的振动传输来减弱非局部相互作用，实现了行波转倏逝波、近场超分辨聚焦等复杂水下声场的精准操控。两种方式设计的超表面厚度可分别缩减到波长的  $1/60$  和  $1/40$ ，为超薄高效水声覆盖层的设计提供了理论指导。

(3) 提出了利用声振耦合效应构建水下非厄米散射奇异点的波控机理。对于空间非穿透的水声超表面，水与固体间强烈的声振耦合可诱发辐射损耗，从而在不引入固有损耗或增益的条件下产生非厄米特性。基于非局部设计的非厄米声振耦合超表面可构造反射型和透射型两类散射奇异点。在奇异点处，散射矩阵特征值简并，声振耦合超表面呈现完全回射和负折射的极端不对称散射模式。机理分析表明，流固界面处的声振耦合效应与单元间的非局部相互作用可导致极端不对称的阻抗分布。所提出的非厄米声振耦合超表面体系为探索独特的非厄米物理和水声应用提供了新的思路。

(4) 提出了利用声振耦合效应实现跨水空阻抗匹配的波控机理与复合超表面波场调控策略。为实现跨水空声波完全传输和定制化调控，建立了复合超表面阻抗匹配模型，并基于拓扑优化方法对复合超表面进行逆向解耦设计。受益于水固空之间的声振耦合效应，单相固体结构可产生特定振动模式来严格满足阻抗匹配的要求。实验上观测到了相比于水空界面平均  $25.9\text{ dB}$  (约 20 倍) 的幅值增强。进一步结合声聚焦功能超表面，在预设焦点处测试到约  $42\text{ dB}$  (近 125 倍) 的幅值增强。所实现的跨水空传输增强还表现出一定宽频广角特性。同时设计的复合超表面还可实现对涡旋声束等复杂声场的定制操控。所提出的设计理论和方法有助于声振耦合超表面在海空声学通信等跨介质场景中的应用。

(5) 提出并实验验证了耦合免疫声学莫尔超表面实现面外声束动态操控的波控机理，突破了近场层间耦合对莫尔效应的限制。通过在层间诱发纯实数的面外波数，可维持空间远距离分离莫尔超表面之间切向波矢的强相干性，从而实现与层间距离解耦的莫尔声学效应。利用理论、数值和实验方法，验证了双层莫尔声学超表面的耦合免疫特性，观测到了扭转角控制的全空间范围内动态波束扫描特性。这种耦合免疫的莫尔效应可以进一步扩展到多层莫尔声学系统和涡旋声束操控，从而产生更丰富的莫尔声束扫描轨迹和多通道的声涡旋透射。所提出的耦合免疫声学莫尔超表面为远程动态检测和多路复用的声学通信等工程应用提供了新的设计平台。

综上所述，本文通过理论分析、数值仿真、优化设计和实验测试等方法提出并验证了声振耦合超表面的波控机理与设计方法，实现了超宽带声学隐身、水声精准调控、非对称散射、跨水空传输增强与定制波场操控以及动态莫尔声束成形等一系列声学功能。本文研究成果有望为新型波动器件的设计提供理论和实验指导，并有望推动超表面在水声隐身与海空声通信等工程领域的实际应用。

## ● 关键词

声场调控、声振耦合超表面、非局部相互作用、阻抗理论、逆向设计

## 作者简介 | Biography

周红涛, 天津大学机械工程学院力学系博士后。2019年6月毕业于华中农业大学工学院, 获工学学士学位; 2024年6月毕业于天津大学力学系, 获固体力学专业博士学位, 导师为汪越胜教授、王艳锋教授; 2022年9月赴新加坡国立大学电气与计算机工程系博士联合培养一年, 合作导师为仇成伟教授。博士学位论文入选2024年度中国力学学会优秀博士学位论文汇编, 2024年6月起在天津大学开展博士后研究。

周红涛主要从事声振耦合超表面的波控机理与设计方法研究, 研究成果已发表在《Nature Communications》《Advanced Materials》《Journal of Sound and Vibration》《Advanced Science》《Smart Materials and Structures》《Mechanical Systems and Signal Processing》等期刊上, 并入选期刊封面论文等; 曾主持天津市研究生科研创新项目1项, 入选2024年度国家资助博士后研究人员计划(B档), 现主持中国博士后科学基金特别资助、面上项目各1项, 参与国家自然科学基金创新研究群体项目、重大项目课题等, 授权国家发明专利4项; 获天津大学优秀毕业生、博士研究生国家奖学金、全国超材料大会优秀学术新人奖等。

### 主要创新成果

#### (1) 水声超表面的非局部作用机理与高效调控策略

揭示了声振耦合效应诱导的水声超表面固体单元间的非局部相互作用机理, 分别基于格栅衍射理论和表面阻抗理论, 提出了水声超表面的非局部设计和弱耦合局部化设计方法, 实现了大角度异常波束偏转、行波转换透波、近场超分辨聚焦等水下声场的高效调控。

#### (2) 非厄米声振耦合超表面与水下非对称散射

建立了利用声振耦合效应构建水下非厄米散射奇异点的波控方法。揭示了声波和弹性波动态耦合引起的辐射损耗机制; 在不引入固有损耗或增益的条件下, 实验验证了水下非厄米散射奇异点处极端不对称传输特性。

#### (3) 跨介质超表面的阻抗匹配机制及波前定制方法

阐明了利用声振耦合效应诱导单相固体振动实现水空声阻抗匹配的力学机制, 提出了声传输增强与波前定制调控的复合超表面解耦设计方法; 构建了耦合免疫声学莫尔超表面, 实现了全空间波束定向和多通道声涡旋透射的动态调控, 为跨介质超表面在海空声通信中的工程应用提供了技术支撑。

### 代表性论文

[1] Zhou HT, Li CY, Zhu JH, et al. Dynamic acoustic beamshaping with coupling-immune Moiré metasurfaces. *Advanced Materials*, 2024, 36: 2313004.

- [2] Zhou HT, Zhang SC, Zhu T, et al. Hybrid metasurfaces for perfect transmission and customized manipulation of sound across water-air interface. *Advanced Science*, 2023, 10: 2207181.
- [3] Zhou HT, Jiang M, Zhu JH, et al. Underwater scattering exceptional point by metasurface with fluid-solid interaction. *Advanced Functional Materials*, 2024, 2404282.
- [4] Zhou HT, Fu WX, Wang YF, Wang YS. Loosely coupled reflective impedance metasurfaces: Precise manipulation of waterborne sound by topology optimization. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 177: 109228.
- [5] Zhou HT, Fu WX, Wang YF, Wang YS. High-efficiency ultrathin nonlocal waterborne acoustic metasurface. *Physical Review Applied*, 2021, 15: 044046.
- [6] Zhou HT, Fu WX, Wang YF, et al. Ultra-broadband passive acoustic metasurface for wide-angle carpet cloaking. *Materials & Design*, 2021, 199: 109414.
- [7] Zhou HT, Fan SW, Li XS, et al. Tunable arc-shaped acoustic metasurface carpet cloak. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29: 065016.
- [8] Zhang SC, Zhou HT, Gong XT, et al. Discrete metasurface for extreme sound transmission through water-air interface. *Journal of Sound and Vibration*, 2024, 575: 118269.

# 热障涂层力热化耦合作用下的损伤与失效机制研究



周芊骞

北京大学  
qqzhou@xidian.edu.cn

● 全文链接：

<https://dt.cstam.org.cn/html/zglxuexuehui/upload/zglxuexuehui/file/20250908/1757299464990326.pdf>

● 扫码阅读：



## 论文摘要 | Abstract

热障涂层技术是现代航空发动机领域的关键技术之一，其主要功能是在极端的高温环境下提供卓越的热防护、抗氧化、抗腐蚀以及抗粒子冲击能力。该技术广泛应用于航空发动机的热端部件，对提升航空发动机的整体性能起着至关重要的作用。然而，在航空发动机极端的力热化耦服役环境中，热障涂层容易因涂层与基底之间的界面氧化、CMAS(钙镁铝硅氧化物)腐蚀以及外部粒子的冲击等原因导致涂层失效和剥落。这种涂层剥落现象将使高温合金叶片直接暴露于高温燃气中，对航空发动机的安全运行构成严重威胁。因此，热障涂层的失效和剥落问题成为限制其安全应用的最大挑战之一。

目前，热障涂层的损伤与失效机制尚未完全明了，这在很大程度上归因于三个主要因素的相互作用。首先，热障涂层体系的裂纹在界面和在材料中的扩展相互作用，由于热障涂层的多层结构复杂性，裂纹往往同时在这些区域扩展，导致其失效机制复杂。其次，微结构演化和裂纹扩展之间的相互作用也是一个关键因素，热障涂层在力热化耦合的服役环境中微结构的演变是失效的直接诱因，微结构的演化促进了裂纹的扩展，而裂纹的扩展又进一步加剧了微结构的演变。最后，微结构之间的相互作用同样重要，特别是当某些微结构的尺寸接近晶粒尺寸时，微结构引起的非局部效应显著影响了热障涂层的局部力学行为，从而对其整体的耐久性产生了显著影响。因此，深入研究这些相互作用对于揭示热障涂层的损伤与失效机理至关重要。本文对这三个相互作用进行了研究，主要研究工作及相关结论概述如下：

(1) 提出了界面相场断裂模型。该模型是在传统内聚力相场断裂模型的基础上进行了扩展,使其能够有效地模拟和处理界面裂纹的扩展问题。该模型能够适应多种内聚力软化关系,同时展现出对引入的扩散界面宽度这一数值参数不敏感。通过给出扩散界面的一般性界面断裂能等效方法,利用使等效的界面断裂参数逼近实际界面断裂参数的准则,得出了最佳的等效方法。通过与断裂力学理论和实验数据对比,验证了该模型能很好的还原界面断裂行为并且能出色处理裂纹在界面和材料中扩展的相互作用。

(2) 建立了热障涂层界面氧化的力热化耦合损伤与失效模型。该模型基于热力学原理,融合了处理材料裂纹扩展的相场断裂模型和处理界面裂纹扩展考虑相场损伤软化的内聚力模型,以处理裂纹在材料内部和界面上的相互作用,从而构建了各个物理场的控制方程。该模型成功地预测了陶瓷层(TC)/热生长氧化物层(TGO)界面波谷处以及TGO/粘结层(BC)界面波峰处的裂纹形成。此外,模型还揭示了TGO/BC界面波峰处的裂纹随着TGO的生长转变为TGO内部的裂纹,并最终导致TGO波峰处形成等距裂纹的现象。

(3) 发展了热障涂层CMAS腐蚀的力热化耦合损伤与失效模型。该模型在热力学原理基础上,结合了之前提出的界面相场断裂模型,从而导出了相应的物理场控制方程。模型与实验结果的对比分析揭示了CMAS引发的TC晶粒溶解和腐蚀导致的体积膨胀是TC剥落的主要机制。在TC与BC的界面处,CMAS与TGO的反应导致了界面的退化,从而促进了界面的分离,而分离产生的界面裂纹为CMAS的扩散提供了通道,加速了热障涂层的失效过程。此外还发现裂纹的发展与CMAS覆盖的面积密切相关:当CMAS覆盖面积较小时,裂纹主要在TC/BC界面和TC内部扩展,它们相连引起被CMAS覆盖的TC局部的剥落;而当CMAS覆盖面积较大时,裂纹仅在TC/BC界面处扩展,导致整个TC层的剥落。

(4) 构建了基于应变梯度高阶粘塑性的热障涂层界面氧化模型。该模型基于热力学定律,考虑了应变梯度高阶粘塑性的储能和耗散,得到对应的各个物理场的控制方程,研究了热障涂层界面氧化过程中微结构相互作用对粘塑性的影响。模型结果显示,纳入应变梯度高阶效应的模型所预测的应力演化与实验数据高度一致,而忽略应变梯度效应的模型则与实验结果不一致。进一步的分析揭示了一个新现象:随着蠕变速率系数的增加,TGO及其邻近区域的蠕变行为从主要由蠕变速率系数控制转变为受微结构决定的应变梯度长度参数的控制。

## 关键词

热障涂层、力热化耦合、微裂纹扩展、微结构演化、应变梯度粘塑性

## 作者简介 | Biography

周芊菁, 1997 年出生, 2024 年 6 月获北京大学固体力学专业理学博士学位, 师从魏悦广教授, 同年 7 月加入西安电子科技大学, 任准聘副教授、硕士生导师。致力于薄膜涂层体系界面剥落的相场断裂模型、宏观力热化耦合理论及跨尺度力热化耦合弹塑性本构理论与数值计算方法的研究, 并将理论和方法应用于航空

发动机热障涂层失效机制研究，揭示了氧化、腐蚀诱导涂层剥落中不可忽略的力热化耦合与尺度效应。成果在《International Journal of Solids and Structures》《Engineering Fracture Mechanics》《Corrosion Science》《Science China Technological Sciences》等力学与材料领域国际权威期刊发表 SCI 论文 11 篇，第一作者 7 篇，主持国家自然科学基金项目（C 类）、中国博士后科学基金面上项目，获中国力学学会 2024 年度优秀博士学位论文、2024 年北京大学优秀博士学位论文等荣誉。

### ● 主要创新成果

建立了涂层体系裂纹萌生与扩展的相场断裂模型，实现了界面与材料中裂纹穿透、偏转、分叉等模式的统一描述。针对传统相场模型难以表征界面裂纹的问题，引入扩散界面实现相场模型中的界面描述，提出了一般性界面断裂能的等效方法，并基于等效参数逼近实际界面断裂参数的准则，确定了最优等效方案。该模型对引入数值参数不敏感，能够统一刻画界面与材料在不同软化关系下的裂纹萌生与扩展行为，精确捕捉界面与材料间的裂纹相互作用，并实现穿透、偏转和分叉等复杂裂纹演化模式的模拟。

建立了考虑损伤与反应耗散的力热化耦合本构与断裂模型，揭示了热障涂层界面氧化、CMAS 腐蚀不可忽略的力热化耦合效应。针对热障涂层等热防护材料的力热化耦合失效难题，引入应变 - 应力、温度 - 熵、浓度 - 化学势即描述力、热、化各场的对偶量，将氧化、腐蚀、损伤等统一描述为内变量，结合热力学第一和第二定律分析局部能量的力、热、化各场贡献及损伤、反应的能量耗散，构建了同时考虑生长及耗散的力热化耦合本构与断裂模型，有效刻画了热障涂层界面氧化生长及波峰、波谷、氧化层、界面等裂纹模式，准确描述了热障涂层 CMAS 溶胀大变形、局部屈曲、大面积剥落的现象，揭示了氧化与 CMAS 腐蚀不可忽略的力热化耦合效应。

建立了考虑应变梯度效应的跨尺度力热化耦合粘塑性本构模型，揭示了热障涂层界面氧化过程中的微结构影响与调控新机制。在弹性应变 - 应力、温度 - 熵、浓度 - 化学势对偶量的基础上，进一步引入塑性应变 - 微应力和塑性应变梯度 - 高阶应力对偶量，建立晶粒与薄层结构相互作用的塑性硬化能及耗散关系，构建了考虑精细微结构效应的跨尺度力热化耦合粘塑性本构模型，刻画了热障涂层界面氧化生长过程中的塑性硬化与耗散效应，发现并揭示了热障涂层界面氧化应力演化的微结构影响与调控新机制。

### ● 代表性论文

[1] Zhou QQ, Yang L, Luo C, et al. Thermal barrier coatings failure mechanism during the interfacial oxidation process under the interaction between interface by cohesive zone model and brittle fracture by phase-field. International Journal of Solids and Structures, 2021, 214: 18-34.

[2] Zhou QQ, Wei YG, Zhou YC, Yang L. An interface-width-insensitive cohesive phase-field model for fracture evolution in heterogeneous materials. International Journal of Solids and Structures, 2022, 256: 111980.

- [3] Zhou QQ, Wei YG, Xu GN, et al. Microstructure and microcrack evolution mechanism of thermal barrier coatings under CMAS infiltration and corrosion: Experimental and numerical modeling. *Corrosion Science*, 2024, 229: 111890.
- [4] Zhou QQ, Yang L, Nie M, et al. A chemo-thermo-mechanically constitutive theory of high-temperature interfacial oxidation in alloys under deformation. *Science China Technological Sciences*, 2023, 66(4): 1018-1037.
- [5] Zhou QQ, Wei YG, Zhou YC, Yang L. A thermodynamically consistent phase-field regularized cohesive fracture model with strain gradient elasticity and surface stresses. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 273: 108760.
- [6] Zhou QQ, Wei YG, Zhou YC, Yang L. Phase field modeling of ferroelastic variant switching in yttria-stabilized  $t'$  zirconia with strain gradient elasticity and interface tension. *Science China Technological Sciences*, 2024, 67(5): 1443-1457.
- [7] Li JB, Zhou QQ, Yang L, et al. Ferroelastic deformation mechanism and mechanical properties of [001]-oriented YSZ film by indentation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 889: 161557.
- [8] Liu ZY, Yang L, Zhou QQ, et al. Modeling stress evolution in porous ceramics subjected to molten silicate infiltration and corrosion. *Corrosion Science*, 2021, 191: 109698.

# 基于声比拟理论的低马赫数流动噪声数值方法与模型研究



## 周志腾

中国科学院大学  
zhouzhiteng@imech.  
ac.cn

### 全文链接：

<https://dt.cstam.org.cn/html/zglix-uexuehui/upload/zglixuexuehui/file/20250908/1757299464624969.pdf>

### 扫码阅读：



## 论文摘要 | Abstract

我国海军由“近海防御”到“近海防御与远海防卫相结合”战略转型后，需要提高水下航行体航速。然而，提高水下航行体航速引起水动力噪声的大幅增加，是海军战略转型装备建设亟需解决的问题。水动力噪声的计算模型与声源变化机理是其中的关键基础科学问题。针对这一问题，本文揭示了声比拟方法的积分面截断以及声源输入的误差对声压的影响机理，由此提出了四极子源与单极子源的修正模型，构造了高效的频域远场噪声求解方法，克服了传统频域方法因计算量巨大难以应用于运动物体辐射噪声或者运动观测点接收噪声的困难。在此基础上，本文基于壁面模化大涡模拟研究了水下航行器标模的远场辐射噪声特性和机理。主要工作包括：

1. 提出了一个不依赖于泰勒冻结流假设的四极子声源模型。该模型在频域声比拟理论的框架下构建了格林函数的一种原函数，并给出了其各阶导数的远场近似解，避免了前人模型中利用冻结流假设进行时间和空间导数转换的过程。这一工作厘清了冻结流动假设在四极子声源模型中的角色：冻结流动假设不是构造四极子声源模型的必要条件，但引入冻结流动假设可以简化计算。该模型解决了传统的级数形式模型在计算上游观测点噪声时出现的发散问题，有效抑制了流场结构截断导致的虚假噪声。

2. 提出了一种满足质量守恒的远场噪声计算方法，抑制了水下航行体极低马赫数下质量守恒误差对声压计算的影响。本文对声比拟理论中厚度源项进行多极子展开，发现展开式的首阶项与穿过积分面的质量通量成正比，而二阶项与动量脉动相关。在极低马赫数下，即使微弱的虚

假质量通量也会导致严重的单极子项计算误差。由此，提出了一种不依赖于质量通量的单极子积分，有效地抑制了远场噪声对积分面位置的依赖性。

3. 提出了运动声源和运动观测点的频域 Ffowcs Williams 与 Hawkings(FWH) 积分高效计算方法。该方法将格林函数时频域分解，并借助非均匀快速傅里叶变换，规避了频域 FWH 积分中需要逐个时刻或逐个频率进行的快速傅里叶变换。在典型的多离散频率分析问题中，相比于传统频域方法，所提方法可将计算效率提高一个量级。

4. 发现了全附体水下航行器标模绕流的远场辐射声压指向性特征，并揭示了指向性形成机制。本文结合壁面模化大涡模拟与所发展的水动力噪声方法计算了标模的远场辐射声压，发现横截面上的辐射声压的指向性偏移特征，并揭示了引起这种指向性偏移的升力偶极子和侧向力偶极子的相消干涉和相长干涉机制。

### ● 关键词

流动噪声、FWH 声比拟方法、计算误差、计算效率、水下航行器

## 作者简介 | Biography

周志腾，中国科学院力学研究所特别研究助理。主要从事流动噪声研究，聚焦于流动噪声计算的准确性、计算效率以及水下航行体的辐射噪声特征。相关成果发表于《AIAA Journal》《Journal of Theoretical and Computational Acoustics》等流体力学与声学期刊，获中国科学院院长特别奖，中国科学院力学研究所郭永怀奖学金，部分工作入选中国科协优秀科技论文遴选计划。

### ● 主要创新成果

提出了一个不依赖于泰勒冻结流假设的四极子声源模型，有效抑制了流场结构截断引起的虚假噪声，克服了传统四极子修正方法在部分马赫数下发散的问题，被 PR Spalart(湍流 SA 模型的创始人，美国工程院院士)引用为具有更高精度的三篇文献之一。

提出了适用于运动声源与运动观测点的 FWH 方程高效频域解。实现了 FWH 积分的快速计算，克服了传统频域方法无法处理运动声源与运动观测点的问题。将频域方法在运动声源多频噪声预测下的计算速度提升一个量级。

实现了非平衡层模型在全附体潜航器标模辐射噪声预测中的应用。发现了潜艇横截面辐射噪声的指向性偏移特征并揭示了其相消 / 相长干涉机理，有效支撑国家某重大专项的水动力噪声预报。

### ● 代表性论文

[1] Zhou Z, Wang H, Wang S, et al. Lighthill stress flux model for Ffowcs Williams-Hawkings integrals in frequency domain. *AIAA Journal*, 2021, 59(11): 4809-4814.

[2] Zhou Z, Zang Z, Liu Y, et al. Robust equivalent source method based on filtered pressure for aerodynamic sound prediction. *AIAA Journal*. 2025.

[3] Zhou Z, Wang H, Zang Z, et al. A frequency-domain formulation for predicting multi-frequency noise generated by flows with periodically moving boundaries. *Journal of Theoretical and Computational Acoustics*, 2023, 31(01): 2350001.

[4] Zhou Z, Yi L, Zang Z, et al. A frequency-domain formulation for predicting multi-frequency noise generated by flows with periodically moving boundaries. *Journal of Theoretical and Computational Acoustics*, 2025.

[5] Zhou Z, Liu Y, Wang S. Frequency-domain quadrupole correction for the permeable-surface Ffowcs Williams and Hawkings integration. *Physics of Fluids*, 2024, 36(7).

[6] Zhou ZT, Xu ZY, Wang SZ, He GW. Wall-modeled large-eddy simulation of noise generated by turbulence around an appended axisymmetric body of revolution. *Journal of Hydrodynamics*, 2022, 34(4): 533-554.

[7] Zang Z, Zhou Z, Liu Y, Wang S. Tilting of vortex rings in the oblique collision reduces the longitudinal quadrupole and octupole modes of aerodynamic sound. *Journal of Fluid Mechanics*, 2025, 1015, A1. (共一)

[8] Liu Y, Zhou Z, Zhu L, Wang S. Numerical investigation of flows around an axisymmetric body of revolution by using Reynolds-stress model based hybrid Reynolds-averaged Navier-Stokes/large eddy simulation. *Physics of Fluids*, 2021, 33(8). (共一)

