

密 级： 公开

加密论文编号：

论文题目：原子级纳观影像质量提升与分割算法研究

学 号： M202320826

研 究 生： 张一凡

专 业 名 称： 计算机技术

2026 年 1 月 1 日



原子级纳观影像质量提升与分割算法研究

**Research on Quality Enhancement and  
Segmentation Algorithms for Atomic-scale  
Nanoscale Images**

研究生：张一凡

指导教师：XX

北京科技大学 智能科学与技术学院

北京 100083，中国

Doctor Degree Candidate: Zhang Yifan

Supervisor: XX

School of Intelligent Science and Technology

University of Science and Technology Beijing

30 Xueyuan Road, Haidian District

Beijing 100083, P.R.CHINA



中图分类号:

学校代码:

10008

U D C:

密 级:

公开

## 北京科技大学博士学位论文

论文题目: 原子级纳观影像质量提升与分割算法研究

研究生: 张一凡

指 导 教 师: 单位: 职称:

指 导 小 组 成 员: 单位: 职称:

单位: 职称:

论文提交日期: 2026 年 1 月 1 日

学位授予单位: 北 京 科 技 大 学



## 摘 要

论文中文摘要字数约为 300~600 字，如遇特殊需要字数可以略多，限一页。

论文摘要是论文内容不加注释和评论的简短陈述，一般以第三人称语气写成。摘要的编写应遵循下列原则：

1) 摘要应具有独立性和自含性，即不阅读论文的全文，就能获得必要的信息。摘要是学位论文的缩影，是学位论文的主要内容、见解、结论简短明了的缩写。

2) 摘要应是一篇完整的短文，可以独立使用，可以引用。

3) 摘要的内容应包含与论文等量的主要信息，供读者确定有无必要阅读全文，也可供文摘汇编等二次文献采用。

4) 摘要一般应说明研究工作的目的意义、研究方法、研究结果、主要结论及意义、创造性成果和新见解，而重点是结论和创新点。

5) 要用文字表达，不要附图和照片，除了实在无变通办法可用以外，摘要中不用图、表、化学结构式、非公知公用的符号和术语，不要使用表格、公式、上下标以及其他特殊符号，要突出重点，阐述清楚，少用数据表。论文摘要用语力求简洁、准确。原则上 300~600 字。

**关键词：**摘要；论文；要求；字数；格式（关键词个数为 3~5 个，正式写作请删除此括号）





# **Research on Quality Enhancement and Segmentation Algorithms for Atomic-scale Nanoscale Images**

## **ABSTRACT**

In environmental economics, environmental resources including environmental quality are categorized as amenity resources. Due to its importance to human welfare, the amenity resources theoretical study and valuation is an ongoing issue at the academic frontier in the environmental economics area.

注：论文的英文摘要应有英文题目和关键词，内容与中文摘要相同，用另页置于中文摘要之后；外文摘要实词在 300 个左右。

**Key Words:** Key word 1; Key word 2; Key word 3; ...



## 序 (可选)

序并非必要。论文的序，一般是作者或他人对本篇基本特征的简介，如说明研究工作缘起、背景、主旨、目的、意义、编写体例，以及资助、支持、协作经过等；也可以评述和对相关问题研究阐述。这些内容也可以在主体部分引言中说明。



## 目 录

摘要 .....	I
ABSTRACT .....	III
序 (可选) .....	V
插图和附表清单 (如有) .....	IX
符号清单 (如有) .....	XI
1 引言 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.1.1 研究背景 .....	1
1.1.2 研究意义 .....	1
1.2 研究内容 .....	1
1.3 研究创新点 .....	1
1.4 论文组织结构 .....	1
2 文献综述 .....	3
2.1 图像质量提升算法概述 .....	3
2.1.1 传统方法 .....	3
2.1.2 深度学习方法 .....	3
2.2 研究内容 .....	3
2.3 研究创新点 .....	3
2.4 论文组织结构 .....	3
3 基于结构保持的非配对 HRTEM 图像质量提升方法 .....	5
3.1 非配对 HRTEM 图像质量提升 (实验图像) .....	6
3.2 基于结构保持的改进循环式生成网络 .....	6
3.2.1 空间频域联合特征提取的生成网络设计 .....	6
3.2.2 基于自注意力机制的全局原子结构一致性建模 .....	6
3.2.3 基于特征函数与频域一致性的结构保持约束设计 .....	6
3.3 算法性能验证与实验结果分析 .....	6
3.3.1 实验数据 (数据集介绍) .....	6
3.3.2 实验设置与评价指标 .....	6
3.3.3 实验结果与分析 (定性、定量) .....	6
3.4 本章小结 .....	6
4 文献综述 .....	7
4.1 图像质量提升算法概述 .....	7
4.1.1 传统方法 .....	7

4.2 论文组织结构 .....	7
5 高分辨 TEM 图像自动表征系统 .....	9
5.1 需求分析与系统功能设计 .....	9
5.1.1 自动化原子位置识别与处理模块 .....	9
5.1.2 原子细粒度信息动态提取模块 .....	9
5.2 总体架构设计 .....	9
5.3 详细设计与实现 .....	9
5.3.1 系统技术选型 .....	9
5.3.2 自动化原子位置识别与处理模块实现 .....	9
5.3.3 原子细粒度信息动态提取模块实现 .....	9
5.4 本章小结 .....	9
参考文献 .....	11
附录 A 单位 .....	25
致谢 .....	27
作者简历及在学研究成果 .....	29
独创性说明 .....	31
关于论文使用授权的说明 .....	33
学位论文数据集 .....	35

## 插图和附表清单（如有）

插图或附表清单并非必要。论文中如图表较多，可以有此页。图的清单应有图号、图题和页码。表的清单应有表号、表题和页码。

根据所列内容，可将本页标题分别更改为“插图清单”、“附表清单”。





## 符号清单（如有）

此页并非必要。符号、标志、缩略词、首字母缩写、计量单位、名词、术语等的注释说明汇集表，如需汇集，可集中置于此页。

根据所列内容，将本页标题分别更改为“符号清单”、“标志清单”、“缩写清单”、“计量单位清单”、“术语表”等。



## 1 引言

### 1.1 研究背景及意义

#### 1.1.1 研究背景

#### 1.1.2 研究意义

### 1.2 研究内容

### 1.3 研究创新点

### 1.4 论文组织结构



## 2 文献综述

### 2.1 图像质量提升算法概述

#### 2.1.1 传统方法

#### 2.1.2 深度学习方法

### 2.2 研究内容

### 2.3 研究创新点

### 2.4 论文组织结构



### 3 基于结构保持的非配对 HRTEM 图像质量提升方法

高质量的 HRTEM 图像对于在原子尺度上建立材料结构与性能之间的关系至关重要。然而，在实际实验中，为了捕获动态过程的高时间分辨率图像，往往需要在低剂量成像条件下进行采集，这不可避免地导致 HRTEM 图像质量严重退化，表现为原子排列模糊、结构信息不完整等问题，从而极大地限制了后续的精确定构分析能力。

传统的图像处理方法，如维纳滤波、双边滤波和 BM3D 等，虽然能够在一定程度上抑制随机噪声，但这些方法依赖于固定的假设和有限的局部统计特性，难以鲁棒地处理复杂背景和严重的图像退化问题。近年来，基于深度学习的方法在 TEM 图像去噪和增强领域展现出了显著的优势。然而，现有大多数方法仍然依赖于配对的训练样本或合成数据进行监督学习，忽视了真实高质量实验图像中丰富而真实的纹理特征，且在严重退化的成像条件下表现不佳。

为了解决上述问题，本章提出了一种基于结构保持的非配对 HRTEM 图像质量提升方法 HRTEM-GAN。该方法采用循环一致性生成对抗网络 (CycleGAN) 框架，在非配对训练条件下运行，通过图像块级别的分布建模实现高质量域和低质量域之间的双向映射。与传统的全图翻译方法不同，本方法采用图像块级建模策略，缩小了生成的有效感受野范围，使网络能够聚焦于细粒度的原子结构特征，从而缓解了全图生成中常见的原子恢复不完整问题。为了更好地建模长程原子关联，本章在生成器的瓶颈层引入了视觉 Transformer (ViT) 模块，使其能够捕获超越局部卷积邻域的全局依赖关系。此外，本章明确引入了频域建模和约束机制，通过专用的频域分支和频域感知损失函数来利用 HRTEM 图像固有的频谱特性，在增强图像质量的同时保持原子尺度的结构保真度。

本章的主要内容安排如下：首先介绍非配对 HRTEM 图像质量提升的问题背景和挑战；随后详细阐述基于结构保持的改进循环式生成网络的设计，包括空间频域联合特征提取的生成网络设计、基于自注意力机制的全局原子结构一致性建模，以及基于特征函数与频域一致性的结构保持约束设计；最后通过在真实实验数据集上的广泛定性和定量评估，验证所提方法的有效性，并与现有代表性方法进行对比分析，证明本方法在图像恢复质量和下游原子

柱识别性能上均取得了显著提升。

### **3.1 非配对 HRTEM 图像质量提升（实验图像）**

### **3.2 基于结构保持的改进循环式生成网络**

#### **3.2.1 空间频域联合特征提取的生成网络设计**

#### **3.2.2 基于自注意力机制的全局原子结构一致性建模**

#### **3.2.3 基于特征函数与频域一致性的结构保持约束设计**

### **3.3 算法性能验证与实验结果分析**

#### **3.3.1 实验数据（数据集介绍）**

#### **3.3.2 实验设置与评价指标**

#### **3.3.3 实验结果与分析（定性、定量）**

### **3.4 本章小结**



## 4 文献综述

### 4.1 图像质量提升算法概述

#### 4.1.1 传统方法

### 4.2 论文组织结构



## 5 高分辨 TEM 图像自动表征系统

### 5.1 需求分析与系统功能设计

#### 5.1.1 自动化原子位置识别与处理模块

#### 5.1.2 原子细粒度信息动态提取模块

### 5.2 总体架构设计

### 5.3 详细设计与实现

#### 5.3.1 系统技术选型

#### 5.3.2 自动化原子位置识别与处理模块实现

多原子定位：

多原子关系建模：

关键参量计算：

#### 5.3.3 原子细粒度信息动态提取模块实现

多原子运动追踪：

多原子行为识别：

运动特征提取：

### 5.4 本章小结



## 参考文献



## 参考文献

- [1] Wang X, Xu Y, Liu S, et al. Physics-based fluid simulation in computer graphics: Survey, research trends, and challenges[J]. Computational Visual Media, 2024: 1-56.
- [2] Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977, 181(3): 375-389.
- [3] Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics[J]. Reports on Progress in Physics, 2005, 68(8): 1703.
- [4] Koschier D, Bender J, Solenthaler B, et al. A survey on SPH methods in computer graphics[C]//Computer graphics forum: 2022: 737-760.
- [5] Ma Y, Xiao X, Li W, et al. Hybrid LBM-FVM solver for two-phase flow simulation[J]. Journal of Computational Physics, 2024, 506: 112920.
- [6] Liu C, Hu C. An adaptive multi-moment FVM approach for incompressible flows[J]. Journal of Computational Physics, 2018, 359: 239-262.
- [7] Becker M, Teschner M. Weakly compressible SPH for free surface flows[C]//Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation: 2007: 209-217.
- [8] Solenthaler B, Pajarola R. Predictive-corrective incompressible SPH[C]//ACM SIGGRAPH 2009 papers: 2009: 1-6.
- [9] Bender J, Koschier D. Divergence-free smoothed particle hydrodynamics[C]//Proceedings of the 14th ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on computer animation: 2015: 147-155.
- [10] Takahashi T, Batty C. A multilevel active-set preconditioner for box-constrained pressure poisson solvers[J]. Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2023, 6(3): 1-22.

- [11] Hirasawa N, Kanai T, Ando R. A flux-interpolated advection scheme for fluid simulation[J]. *The Visual Computer*, 2021, 37(9-11): 2607-2618.
- [12] Akinci N, Akinci G, Teschner M. Versatile surface tension and adhesion for SPH fluids[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2013, 32(6): 1-8.
- [13] Jeske SR, Westhofen L, Loschner F, et al. Implicit Surface Tension for SPH Fluid Simulation[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2023, 43(1): 1-14.
- [14] Feng F, Liu J, Xiong S, et al. Impulse fluid simulation[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2022.
- [15] Schechter H, Bridson R. Ghost SPH for animating water[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2012, 31(4): 1-8.
- [16] Brookshaw L. A method of calculating radiative heat diffusion in particle simulations[J]. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 1985, 6(2): 207-210.
- [17] Takahashi T, Dobashi Y, Fujishiro I, et al. Implicit formulation for SPH-based viscous fluids[C]//*Computer Graphics Forum*: 2015: 493-502.
- [18] Peer A, Ihmsen M, Cornelis J, et al. An implicit viscosity formulation for SPH fluids[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2015, 34(4): 1-10.
- [19] Weiler M, Koschier D, Brand M, et al. A physically consistent implicit viscosity solver for SPH fluids[C]//*Computer Graphics Forum*: 2018: 145-155.
- [20] Goldade R, Wang Y, Aanjaneya M, et al. An adaptive variational finite difference framework for efficient symmetric octree viscosity[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2019, 38(4): 1-14.
- [21] Shao H, Huang L, Michels DL. A fast unsmoothed aggregation algebraic multigrid framework for the large-scale simulation of incompressible flow[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2022, 41(4): 1-18.
- [22] Bender J, Koschier D. Divergence-free SPH for incompressible and viscous fluids[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2016, 23(3): 1193-1206.



- [23] Liu S, He X, Wang W, et al. Adapted SIMPLE Algorithm for Incompressible SPH Fluids With a Broad Range Viscosity[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021, 28(9): 3168-3179.
- [24] Panuelos J, Goldade R, Grinspun E, et al. PolyStokes: A polynomial model reduction method for viscous fluid simulation[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2023, 42(4): 1-13.
- [25] Green S. Particle simulation using cuda[J]. NVIDIA whitepaper, 2010, 6: 121-128.
- [26] Bridson R. Fast Poisson disk sampling in arbitrary dimensions.[J]. SIGGRAPH sketches, 2007, 10(1): 1.
- [27] Cross M M. Rheology of non-Newtonian fluids: a new flow equation for pseudoplastic systems[J]. Journal of Colloid Science, 1965.
- [28] Carreau P J. Rheological equations from molecular network theories[J]. Transactions of the Society of Rheology, 1972, 16(1): 99-127.
- [29] Andrade LFDS, Sandim M, Petronetto F, et al. SPH fluids for viscous jet buckling[C]//2014 27th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images: 2014: 65-72.
- [30] Ozgen O, Kallmann M, Brown E. An SPH model to simulate the dynamic behavior of shear thickening fluids[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2019, 30(5): e1870.
- [31] Zhu B, Lee M, Quigley E, et al. Codimensional non-Newtonian fluids[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2015, 34(4): 1-9.
- [32] Su H, Xue T, Han C, et al. A unified second-order accurate in time MPM formulation for simulating viscoelastic liquids with phase change[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2021, 40(4): 1-18.
- [33] Li C, Gao Y, He J, et al. A Unified Particle-Based Solver for Non-Newtonian Behaviors Simulation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2023.

- [34] Oldroyd JG. On the formulation of rheological equations of state[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1950, 200(1063): 523-541.
- [35] Balci N, Thomases B, Renardy M, et al. Symmetric factorization of the conformation tensor in viscoelastic fluid models[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2011, 166(11): 546-553.
- [36] Bejan A. The constructal law of organization in nature: tree-shaped flows and body size[J]. Journal of Experimental Biology, 2005, 208(9): 1677-1686.
- [37] Fattal R, Kupferman R. Time-dependent simulation of viscoelastic flows at high Weissenberg number using the log-conformation representation[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2005, 126(1): 23-37.
- [38] Coronado OM, Arora D, Behr M, et al. A simple method for simulating general viscoelastic fluid flows with an alternate log-conformation formulation[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2007, 147(3): 189-199.
- [39] Afonso A, Oliveira PJ, Pinho F, et al. The log-conformation tensor approach in the finite-volume method framework[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2009, 157(1-2): 55-65.
- [40] Moreno L, Codina R, Baiges J, et al. Logarithmic conformation reformulation in viscoelastic flow problems approximated by a VMS-type stabilized finite element formulation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 354: 706-731.
- [41] Barreiro H, Garca-Fernandez I, Alduan I, et al. Conformation constraints for efficient viscoelastic fluid simulation[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2017, 36(6): 1-11.
- [42] Alduan I, Tena A, Otaduy MA. Dyverso: A versatile multi-phase position-based fluids solution for VFX[C]//Computer Graphics Forum: 2017: 32-44.
- [43] Solenthaler B, Pajarola R. Density contrast SPH interfaces[J]. 2008.

- [44] Zhang DZ, Zou Q, VanderHeyden WB, et al. Material point method applied to multiphase flows[J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(6): 3159-3173.
- [45] Yan X, Li CF, Chen XS, et al. MPM simulation of interacting fluids and solids[C]//*Computer Graphics Forum*: 2018: 183-193.
- [46] Da F, Batty C, Grinspun E. Multimaterial mesh-based surface tracking.[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2014, 33(4): 112-1.
- [47] Misztal MK, Erleben K, Bargteil A, et al. Multiphase flow of immiscible fluids on unstructured moving meshes[J]. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 2013, 20(1): 4-16.
- [48] Li X, He X, Liu X, et al. Multiphase interface tracking with fast semi-Lagrangian contouring[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2015, 22(8): 1973-1986.
- [49] Yang M, Ye J, Ding F, et al. A semi-explicit surface tracking mechanism for multi-phase immiscible liquids[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 25(10): 2873-2885.
- [50] Manninen M, Taivassalo V, Kallio S. On the mixture model for multiphase flow[R]. *VTT Publications*, 1996(288): 3-67.
- [51] Ren B, Li C, Yan X, et al. Multiple-fluid SPH simulation using a mixture model[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2014, 33(5): 1-11.
- [52] Yan X, Jiang YT, Li CF, et al. Multiphase SPH simulation for interactive fluids and solids[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2016, 35(4): 1-11.
- [53] Ren B, Xu B, Li C. Unified particle system for multiple-fluid flow and porous material[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2021, 40(4): 1-14.
- [54] Jiang Y, Li C, Deng S, et al. A Divergence-free Mixture Model for Multiphase Fluids[C]//*Computer Graphics Forum*: 2020: 69-77.
- [55] Jiang Y, Lan Y. A Dynamic Mixture Model for Non-equilibrium Multiphase Fluids[C]//*Computer Graphics Forum*: 2021: 85-95.

- [56] Xu Y, Wang X, Wang J, et al. An Implicitly Stable Mixture Model for Dynamic Multi-fluid Simulations[C]//SIGGRAPH Asia 2023 Conference Papers: 2023: 1-11.
- [57] Hong JM, Kim CH. Animation of bubbles in liquid[C]//Computer Graphics Forum: 2003: 253-262.
- [58] Ihmsen M, Bader J, Akinci G, et al. Animation of air bubbles with SPH[C]//International Conference on Computer Graphics Theory and Applications: 2011: 225-234.
- [59] Takahashi T, Fujii H, Kunimatsu A, et al. Realistic animation of fluid with splash and foam[C]//Computer Graphics Forum: 2003: 391-400.
- [60] Muller M, Keiser R, Nealen A, et al. Point based animation of elastic, plastic and melting objects[C]//Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation: 2004: 141-151.
- [61] Chang Y, Bao K, Liu Y, et al. A particle-based method for viscoelastic fluids animation[C]//Proceedings of the 16th ACM symposium on virtual reality software and technology: 2009: 111-117.
- [62] Fujisawa M, Miura KT. Animation of ice melting phenomenon based on thermodynamics with thermal radiation[C]//Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia: 2007: 249-256.
- [63] Kim T, Lin MC. Visual simulation of ice crystal growth[C]//Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation: 2003: 86-97.
- [64] Kim T, Henson M, Lin MC. A hybrid algorithm for modeling ice formation[C]//Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation: 2004: 305-314.
- [65] Kim T, Adalsteinsson D, Lin MC. Modeling ice dynamics as a thin-film stefan problem[C]//Symposium on Computer Animation: Proceedings of the

- 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation: Vienna, Austria: 2006: 167-176.
- [66] Mihalef V, Metaxas D, Sussman M. Simulation of two-phase flow with sub-scale droplet and bubble effects[C]//Computer Graphics Forum: 2009: 229-238.
- [67] Ren B, Jiang Y, Li C, et al. A simple approach for bubble modelling from multiphase fluid simulation[J]. Computational Visual Media, 2015, 1: 171-181.
- [68] Stomakhin A, Schroeder C, Jiang C, et al. Augmented MPM for phase-change and varied materials[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2014, 33(4): 1-11.
- [69] Tu Z, Li C, Zhao Z, et al. A Unified MPM Framework Supporting Phase-field Models and Elastic-viscoplastic Phase Transition[J]. ACM Transactions on Graphics, 2024, 43(2): 1-19.
- [70] Yang T, Chang J, Ren B, et al. Fast multiple-fluid simulation using Helmholtz free energy[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2015, 34(6): 1-11.
- [71] Yan H, Ren B. High Density Ratio Multi-Fluid Simulation with Peridynamics[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2023, 42(6): 1-14.
- [72] Li W, Wu K, Desbrun M. Kinetic simulation of turbulent multifluid flows[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2024, 43(4): 1-17.
- [73] Li W, Ma Y, Liu X, et al. Efficient kinetic simulation of two-phase flows[J]. ACM Transactions on Graphics, 2022, 41(4): 114.
- [74] Ishii M. Two-fluid model for two-phase flow[J]. Multiphase science and technology, 1990, 5(1-4).
- [75] Larionov E, Batty C, Bridson R. Variational stokes: A unified pressure-viscosity solver for accurate viscous liquids[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2017, 36(4): 1-11.

- [76] Xing J, Ruan L, Wang B, et al. Position-based surface tension flow[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2022, 41(6): 1-12.
- [77] Macklin M, Muller M. Position based fluids[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2013, 32(4): 1-12.
- [78] Macklin M, Muller M, Chentanez N. XPBD: position-based simulation of compliant constrained dynamics[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Motion in Games: 2016: 49-54.
- [79] Hochstetter H, Kolb A. Evaporation and condensation of SPH-based fluids[C]//Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation: 2017: 1-9.
- [80] Fei Y, Batty C, Grinspun E, et al. A multi-scale model for coupling strands with shear-dependent liquid[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2019, 38(6): 1-20.
- [81] Li W, Desbrun M. Fluid-Solid Coupling in Kinetic Two-Phase Flow Simulation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2023, 42(4): 1-14.
- [82] Bird RB, Armstrong RC, Hassager O. Dynamics of polymeric liquids. Vol. 1: Fluid mechanics[J]. 1987.
- [83] John T, Poole R, Kowalski A, et al. A comparison between the FENE-P and sPTT constitutive models in large-amplitude oscillatory shear[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2024, 979: A10.
- [84] Renardy M, Thomases B. A mathematician' s perspective on the Oldroyd B model: progress and future challenges[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2021, 293: 104573.
- [85] Zhang Y, Long S, Xu Y, et al. Multiphase Viscoelastic Non-Newtonian Fluid Simulation[C]//Computer Graphics Forum: 2024: e15180.
- [86] Wyart M, Cates ME. Discontinuous shear thickening without inertia in dense non-Brownian suspensions[J]. Physical review letters, 2014, 112(9): 098302.

- [87] Royer JR, Blair DL, Hudson SD. Rheological signature of frictional interactions in shear thickening suspensions[J]. *Physical review letters*, 2016, 116(18): 188301.
- [88] Hermes M, Guy BM, Poon WC, et al. Unsteady flow and particle migration in dense, non-Brownian suspensions[J]. *Journal of Rheology*, 2016, 60(5): 905-916.
- [89] Shen L, Zhang Y, Frey S, et al. A unified viscoelastic solver for multiphase fluid simulation based on a mixture model[Z]. Unpublished manuscript.
- [90] Vaishya R, Chauhan M, Vaish A. Bone cement[J]. *Journal of clinical orthopaedics and trauma*, 2013, 4(4): 157-163.
- [91] Saha S, Pal S. Mechanical properties of bone cement: a review[J]. *Journal of biomedical materials research*, 1984, 18(4): 435-462.
- [92] Charnley J. Anchorage of the femoral head prosthesis to the shaft of the femur[J]. *The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*, 1960, 42(1): 28-30.
- [93] Truumees E, Hilibrand A, Vaccaro AR. Percutaneous vertebral augmentation[J]. *The Spine Journal*, 2004, 4(2): 218-229.
- [94] Ebeling PR, Akesson K, Bauer DC, et al. The efficacy and safety of vertebral augmentation: a second ASBMR task force report[J]. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2019, 34(1): 3-21.
- [95] Breusch S, Malchau H, Clarius M, et al. Pulmonary embolism in cemented total hip arthroplasty[J]. *The Well-Cemented Total Hip Arthroplasty: Theory and Practice*, 2005, 320-331.
- [96] Moussazadeh N, Rubin DG, McLaughlin L, et al. Short-segment percutaneous pedicle screw fixation with cement augmentation for tumor-induced spinal instability[J]. *The Spine Journal*, 2015, 15(7): 1609-1617.
- [97] Wilson AD, Kent B. The glass-ionomer cement, a new translucent dental filling material[J]. *Journal of Applied Chemistry and Biotechnology*, 1971, 21(11): 313-313.

- [98] Nicholson J, Hawkins S, Wasson E. A study of the structure of zinc polycarboxylate dental cements[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 1993, 4: 32-35.
- [99] Sidhu SK, Nicholson JW. A review of glass-ionomer cements for clinical dentistry[J]. *Journal of functional biomaterials*, 2016, 7(3): 16.
- [100] Ambard AJ, Mueninghoff L. Calcium phosphate cement: review of mechanical and biological properties[J]. *Journal of Prosthodontics*, 2006, 15(5): 321-328.
- [101] Newman TS, Yi H. A survey of the marching cubes algorithm[J]. *Computers & Graphics*, 2006, 30(5): 854-879.
- [102] No YJ, Roohani-Esfahani SI, Zreiqat H. Nanomaterials: the next step in injectable bone cements[J]. *Nanomedicine*, 2014, 9(11): 1745-1764.
- [103] Samad HA, Jaafar M, Othman R, et al. New bioactive glass-ceramic: synthesis and application in PMMA bone cement composites[J]. *Bio-medical materials and engineering*, 2011, 21(4): 247-258.
- [104] Jeong J, Kim JH, Shim JH, et al. Bioactive calcium phosphate materials and applications in bone regeneration[J]. *Biomaterials research*, 2019, 23(1): 4.
- [105] Tan B, Tang Q, Zhong Y, et al. Biomaterial-based strategies for maxillofacial tumour therapy and bone defect regeneration[J]. *International journal of oral science*, 2021, 13(1): 9.
- [106] Li J, Yang Y, Sun Z, et al. Integrated evaluation of biomechanical and biological properties of the biomimetic structural bone scaffold: Biomechanics, simulation analysis, and osteogenesis[J]. *Materials Today Bio*, 2024, 24: 100934.
- [107] Shen L, Zhang Y, Wang X, et al. Visual simulation of bone cement blending and dynamic flow[C]//2024 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM): 2024: to appear.



- [108] Zhang Y, Shen L, Wang X, Frey S, Telea AC, Kosinka J. Bone Cement Flow Simulation: A Two-Phase Non-Newtonian Fluid Approach for Surgical Optimization[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, under review.



## 附录 A 单位

以下内容可放在附录之内：

- (1) 正文内过于冗长的公式推导；
- (2) 方便他人阅读所需的辅助性数学工具或表格；
- (3) 重复性数据和图表；
- (4) 论文使用的主要符号的意义和单位；
- (5) 程序说明和程序全文；
- (6) 企业应用证明；
- (7) 项目鉴定报告；
- (8) 获奖成果证书；
- (9) 设计图纸；
- (10) 程序源代码；
- (11) 论文发表；
- (12) 作者简介。

这部分内容可省略。如果省略，删掉此页。

书写格式说明：

标题“附录 A 附录内容名称”样式为字体：黑体，英文用 Times New Roman 字体，居中，加粗，字号：小三，2.41 倍行距，段前 17 磅，段后为 16.5 磅。

附录正文样式为字体宋体小四，英文用 Times New Roman 字体小四，两端对齐书写，段落首行左缩进 2 个字符。1.3 倍行距（段落中有数学表达式时，可根据表达需要设置该段的行距），段前 0.1 行，段后 0.1 行，1.3 倍行距。

示例

表 A-1: 表 A.1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克 (公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安 (培)	A
热力学温度	开 (尔文)	K
发光强度	坎 (德拉)	cd

表 A-2: 表 A.2 国家规定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	1 min=60 s
	[小] 时	h	1 h=60 min=3600 s
	天 (日)	d	1 d=24 h=86400 s
平面角	[角] 秒	"	$1'' = (\pi/648000) \text{ rad}$
	[角] 分	'	$1' = 1^\circ/60 = (\pi/10800) \text{ rad}$
	度	°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
	度	°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
旋转速度	转每分	r/min	1 r/min=(1/60) r/s
长度	海里	n mile	1 n mile=1852 m
速度	节	kn	1 kn=1 n mile/h=(1852/3600) m/s (只用于航行)

## 致 谢

致谢是作者对该论文的形成作出过贡献的组织或个人予以声明的文字记载，语言要客观、准确、简短。

字数一般不超过 500 字，最多不超过一页。论文作者可以在致谢页对下列方面致谢：

国家科学基金、资助研究工作的奖学金基金，合同单位、资助或支持的企业、组织或个人；

协助完成研究工作和提供便利条件的组织或个人；

在研究工作中提出建议和提供帮助的人；

给予转载和引用权的资料、图片、文献、研究思想和设想的所有者；

其它应感谢的组织或个人。



## 作者简历及在学研究成果

### 一、主要教育经历/工作经历（从大学起，到博士入学止）

起止年月	学习或工作单位	备注
XXX 年 XX 月至 XXXX 年 XX 月	在 XXXX 学校 XXXX 专业攻读学士学位	
XXX 年 XX 月至 XXXX 年 XX 月	在 XXXX 单位从事 XXXX 岗位的工作	
XXX 年 XX 月至 XXXX 年 XX 月	在 XXXX 学校 XXXX 专业攻读博士学位	

### 二、在学期间从事的科研工作

（1）高性能低功耗深度神经网络处理器芯片设计（USTB06500093），主要参与人员，2017.11-2022.11。

（2）...

### 三、在学期间所获的科研奖励

（1）博士研究生国家奖学金

### 四、在学期间发表的论文

- [1] Liu M K, LIU C X, ZHANG S T, et al. Research on Industry Development Path Planning of Resource-Rich Regions in China from the Perspective of “Resources, Assets, Capital” [J]. Sustainability, 2021, 13(7): 3988-3988.
- [2] Liu M K, LIU C X, PEI X D, et al. Sustainable Risk Assessment of Resource Industry at Provincial Level in China [J]. Sustainability, 2021, 13(8): 4191-4191.
- [3] 刘明凯, 张寿庭, 刘昌新, 等. 基于“三资”视角的矿山企业绿色可持续发展路径研究 [J]. 中国矿业, 2020, 29(07): 35-43.

- [4] 刘明凯, 张红艳, 王新宇. 广西有色金属产业链关联测度与发展路径规划研究 [J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(12): 65-74.
- [5] 虎海峰, 刘明凯, 樊杰. 黄河流域经济-社会-生态耦合协调效应评价及预测 [J]. 中国管理科学. 待刊出.

**盲审说明（正式写作请删除此说明）：**

盲审论文需要隐藏掉所有会影响盲审结果的论文作者及其导师的信息，以便论文评阅人能够公正的进行评阅。

当学校要求提供盲审论文时，请按如下方法制作。

1) 对于论文中下列学生和导师信息。请将学生姓名、学生学号、导师姓名，依次全部替换为[本论文作者]、[论文作者学号]、[本论文导师]。论文中上述信息均需要替换，包括作者研究成果等部分的有关信息。

2) 在研究成果中，论文作者发表的文章列表中应隐去所有作者的名字，只标明论文期刊名，级别，发表年份。

3) 盲审论文，请不要填写致谢，致谢页除标题、页眉、页码外请保持空白。

4) 其他会影响盲审结果的信息，请采用类似方式处理。

5) 提交的盲审论文应为正式论文，除了上述替换后的信息外，应为可以评阅的正式论文。

6) 论文封面，请填写专业名称、论文题目等，将学号和姓名项目保持空白不填。制作盲审论文时，论文书脊、封二、题名页请删除。

替换前后将文档分别保存，以便盲审论文与其他论文分开管理。

**盲审样例（正式写作请删除此样例）：**

五、在学期间发表的论文：

[1] **第一作者**. 中国矿业. 中文核心期刊.2020.

[2] **第二作者（导师一作）**. 中国矿业. 中文核心期刊.2020.



## 独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

作者签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_ 年\_\_\_\_\_ 月\_\_\_\_\_ 日

备注：提交时须有作者亲笔签名！



## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京科技大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵循此规定）

签名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_



## 学位论文数据集

关键词 *	密级 *	中图分类号 *	UDC	论文资助
学位授予单位名称 *		学位授予单位代 码 *	学位类别 *	学位级别 *
北京科技大学		10008		
论文题名 *		并列题名		论文语种 *
作者姓名 *			学号 *	
培养单位名称 *		培养单位代码 *	培养单位地址	邮编
北京科技大学		10008	北京市海淀区学 院路 30 号	100083
学科专业 *		研究方向 *	学制 *	学位授予年 *
论文提交日期 *				
导师姓名 *			职称 *	
评阅人	答辩委员会主席	答辩委员会成员		
	*			
电子版论文提交格式文本 ( ) 图像 ( ) 视频 ( ) 音频 ( ) 多媒体 ( ) 其他 ( ) 推荐格式: application/msword; application/pdf				
电子论文出版 (发布) 者		电子论文出版 (发布) 地		权限声明
论文总页数 *				
共 33 项, 其中带 * 为必填数据, 为 22 项。				