

1. LBM在湍流模拟中的应用

近年研究表明，**LBM在湍流模拟**中结合LES、RANS等技术取得显著进展。一类方法是混合RANS/LES-LBM框架，如Xue等人开发了**RANS-LES界面合成湍流激发器（STG-LBM）**，实现了从RANS场向LBM-LES的无缝过渡，结果与周期性LES-LBM和DNS吻合良好^{1 2}。另一类方法是对近壁湍流进行数据驱动建模：Xue等（2024）提出基于物理约束的神经网络模型，显著提高LBM对高Re近壁区湍流摩擦预测的精度（ Re_τ 可达1e6），同时减少数据需求三个数量级³。在亚格/LES子网格建模方面，Zhang等（2025）构建了**NM-VSS SGS模型**，利用非平衡矩（NM）和体应变-应变拓展（VSS）联合建模，对管道湍流模拟提高了准确性，并在近壁区表现出比Smagorinsky模型更好的耗散特征^{4 5}。此外，多GPU并行LBM使大规模湍流模拟成为可能：Kummerländer等（2025）在OpenLB库中实现了大规模城市流场LES仿真，在开放域使用LBM比传统有限体积法快约32倍⁶。Wang等（2024）则在GPU上实现了LBM-LES，用单卡（Nvidia V100）在含2.5千万格点的域上达到近实时（1小时流动模拟用时0.78小时）⁷。上述工作展示了LBM结合LES、RANS及GPU并行的多种策略，为湍流计算提供了新方案。

代表性研究 (时间)	核心内容
Xue等 (2022) ^{1 2}	提出RANS-LES接口合成湍流激发器（STG-LBM），实现LBM与RANS/LBM-LES混合模拟。
Xue等 (2024) ³	基于物理信息神经网络的近壁湍流模型，提高LBM近壁摩擦Re预测精度。
Zhang等 (2025) ^{4 5}	构建NM-VSS子网格模型，结合非平衡矩和VSS模型提升管道湍流LES的准确性。
Wang等 (2024) ⁷	GPU并行LBM-LES：25M格点场上V100 GPU实现近实时湍流模拟，速度比CPU快百倍以上。
Kummerländer等 (2025) ⁶	OpenLB多GPU实现城市风洞LES，LBM比OpenFOAM快约32倍（不含多GPU情况下）。

2. LBM在两相流模拟中的方法

近年来LBM在两相流界面处理方面涌现多种策略。**VOF方法**方面，Bagheri等（2023）在PALABOS框架中开发了三维**LBM-VOF自由面模型**，成功模拟了高密度比（水/空气）射流断裂过程，对比实验结果并有效抑制了伪涡流⁸。**颜色函数/色散梯度方法（CGM）**方面，Zahid和Cunningham（2023）综述了CGM在多孔介质中两相流模拟的各种改进算法⁹，阐明CGM能够独立调节界面厚度和流体参数，适用于复杂微结构流动。**界面捕捉**方面，Liang等（2023）基于**修正Allen-Cahn方程**提出了一种保守的界面捕捉LBM，通过特殊强制项恢复目标方程，提高了界面运动的数值精度，尤其适用于细薄界面^{10 11}。Fu等（2024）提出了**基于Level-Set方程的LBM（LS-LBM）**，通过在LB方程中加入重初始化项避免求解额外PDE，实现了GPU并行的界面捕捉，适应大密度比和高Re^{12 13}。在CG领域，Wei和Desbrun（2023）结合相场LBM，对**多相流与固体耦合**进行了改进，优化动量交换和界面力算法，大幅减少了粒子穿越假象，实现更稳定的流固耦合仿真¹⁴。这些工作展示了VOF、色函数、相场、Level-Set等多种方法在LBM两相流中的应用和优势。

代表性研究 (时间)	核心内容
Wei & Desbrun (2023) ¹⁴	LBM相场模型中的流固耦合改进，优化动量交换和界面力处理，提高多相流与固体的耦合稳定性。
Fu等 (2024) ^{12 13}	提出LS-LBM方法：将Level-Set界面追踪耦合到LBM，减少相场LBM界面误差并实现GPU加速。
Liang等 (2023) ^{10 11}	基于修正Allen-Cahn方程的LBM界面捕捉，提高了界面形变模拟精度（保守相场方法）。
Bagheri等 (2023) ⁸	三维LBM-VOF自由面模型（PALABOS实现），成功模拟高密度比液体射流断裂，验证多流态过渡。
Zahid & Cunningham (2023) ⁹	色散梯度法（色函数LBM）综述，分析其在多相流（多孔介质）模拟中的应用和优势。

3. LBM在计算机图形学中的应用

在计算机图形领域，**LBM优势在于其天然并行和网格简洁性**，可用于高效流体/烟雾等可视化模拟。近年来，多项图形学论文结合GPU对LBM进行了优化。例如，Li和Desbrun（2023）在TOG上提出了一种基于LBM的双相流固交互模拟方法，通过改进相场LBM的流固耦合，大幅降低粒子穿越假象，可用于真实感的水空气交互动画¹⁴。Lyu等（2023）提出了GPU加速的虚拟风洞**流场求解器**，通过改进碰撞算子、边界处理和自动多重网格策略，在单/多GPU上实现 $Re \sim 10^7$ 湍流流场的实时模拟，其LBM模型在精度达到工业标准的同时效率显著超越传统CFD¹⁵。此外，Wang等（2024）报告GPU并行LBM-LES在森林护林带流场模拟中取得约百倍于CPU的加速（单卡V100下达标实时）⁷。更大尺度方面，Kummerländer等（2025）展示了OpenLB在HPC中运行的效果：LBM在多GPU环境下可处理数十亿格点，且在对比中比传统有限体积法（OpenFOAM）快约32倍⁶。这些成果表明，LBM通过GPU并行和算法优化，可为图形学提供高效的流体仿真手段，并便于与可视化管线和图形引擎集成。

代表性研究 (时间)	核心内容
Wei & Desbrun (2023) ¹⁴	TOG论文：基于相场LBM的双相流体-固体交互仿真，改进界面处理，提升CG中多相流稳定性。
Lyu等 (2023) ¹⁵	GPU并行LBM虚拟风洞：改进碰撞模型、自适应网格，实现在GPU上高Re湍流的实时模拟。
Wang等 (2024) ⁷	GPU LBM-LES：25M网格森林流场模拟，单卡V100达标实时，效率比CPU快百倍。
Kummerländer等 (2025) ⁶	OpenLB多GPU大规模模拟：LBM在HPC上可处理百亿格点，比传统CFD快 ≈ 32 倍。

4. 其他相关方向简述

除了上述应用，LBM在**热-流耦合**、**生物流体**和**微观流体**等领域也在不断发展。在**热流**方面，常用双分布函数方法将能量方程与LBM耦合，适用于自然对流、混合对流等问题（如Li等¹⁶所示）。在**微流控与生物医学**中，LBM因其对复杂边界的适应性和并行性被广泛采用。例如，Xu等（2021年）综述了LBM在微流道中对流体输运、颗粒调控和药物传输等方面的应用¹⁷；Liu等（2023）提出了孔隙尺度的LBM-反应耦合模拟，将并行

LBM流动求解器与地球化学反应模型（PHREEQC）集成，实现了流体流动与化学反应的联合模拟¹⁸。总体而言，这些工作表明LBM在跨学科流动问题（如多物理场耦合、生物流体和多孔介质流动）上具有潜力，但具体策略多依赖于问题需求与计算资源。

以上总结了近三年LBM在湍流、两相流、图形学以及其他领域的主要进展，为进一步研究提供参考。

参考文献：上述内容引用自相关高影响力期刊论文^{3 1 4 7 6 14 15 8 10 12 9 17 18}等。

^{1 2} [2205.02774] Synthetic turbulence generator for lattice Boltzmann method at the interface between RANS and LES

<https://arxiv.org/abs/2205.02774>

³ Physics informed data-driven near-wall modelling for lattice Boltzmann simulation of high Reynolds number turbulent flows | Communications Physics

https://www.nature.com/articles/s42005-024-01832-1?error=cookies_not_supported&code=62b1a02d-8ac9-4f52-b63d-6bdca3588d6f

^{4 5} Lattice Boltzmann-based subgrid-scale modeling of fully developed turbulent pipe flow | Request PDF

https://www.researchgate.net/publication/394501726_Lattice_Boltzmann-based_subgrid-scale_modeling_of_fully_developed_turbulent_pipe_flow

⁶ Large-Scale Simulations of Turbulent Flows using Lattice Boltzmann Methods on Heterogeneous High Performance Computers

<https://arxiv.org/html/2506.21804v1>

⁷ A GPU-Implemented Lattice Boltzmann Model for Large Eddy Simulation of Turbulent Flows in and around Forest Shelterbelts

<https://www.mdpi.com/2073-4433/15/6/735>

⁸ An improved three-dimensional lattice Boltzmann-volume of fluid (LB-VOF) method for simulation of laminar liquid jet breakup with high density ratio | Request PDF

https://www.researchgate.net/publication/371619947_An_improved_three-dimensional_lattice_Boltzmann-volume_of_fluid_LB-VOF_method_for_simulation_of_laminar_liquid_jet_breakup_with_high_density_ratio

⁹ Review of the Color Gradient Lattice Boltzmann Method for Simulating Multi-Phase Flow in Porous Media: Viscosity, Gradient Calculation, and Fluid Acceleration

<https://www.mdpi.com/2311-5521/10/5/128>

^{10 11} Lattice Boltzmann method for interface capturing | Phys. Rev. E

<https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.107.025302>

^{12 13} Level-set lattice Boltzmann method for interface-resolved simulations of immiscible two-phase flow | Phys. Rev. E

<https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.110.045309>

¹⁴ Fluid-Solid Coupling in Kinetic Two-Phase Flow Simulation

<https://www.geometry.caltech.edu/pubs/LD23.pdf>

¹⁵ www.siggraph.org

<https://www.siggraph.org/wp-content/uploads/2024/02/ACM-Transactions-on-Graphics-Volume-42-Issue-4.html>

¹⁶ Coupling lattice Boltzmann model for simulation of thermal flows on standard lattices | Phys. Rev. E

<https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.85.016710>

- 17 (PDF) Recent Advances of Lattice Boltzmann Method in Microfluidic numerical Simulation

[https://www.researchgate.net/publication/](https://www.researchgate.net/publication/354453485_Recent_Advances_of_Lattice_Boltzmann_Method_in_Microfluidic_numerical_Simulation)

354453485_Recent_Advances_of_Lattice_Boltzmann_Method_in_Microfluidic_numerical_Simulation

- 18 Coupled Lattice Boltzmann Modeling Framework for Pore-Scale Fluid Flow and Reactive Transport - PMC

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10116521/>