

三、学术创新贡献

3.1 总体情况（候选人学术能力、学术创新、学术贡献等，以近五年为主，不超过二页。）

在多相流的基础研究中，**动边界不可压流体的理论建模和数值计算**是军事国防、海洋环境、工业工程等诸多重要领域中的核心难点和研究前沿。申请人长期以来的研究紧紧围绕着动边界不可压流体展开，在界面追踪以及高阶有限体积方法等关键问题上取得了一系列具有创新性的成果，代表性工作有以下三点。

1. 建立了一个界面追踪及其数值方法的理论分析框架，填补了这个领域的一项空白。在动边界问题中被广泛应用的 VOF (volume of fluids) 方法和 FT (front tracking) 方法从上世纪提出以来一直缺乏严格的理论分析；申请人和同事设计了一个数学模型来严格描述动边界流体的几何位置和拓扑结构，发展了一整套界面追踪的理论分析框架，证明了 VOF 方法和 FT 方法的二阶精度，阐明了一些方法降阶的根本原因，并为高阶方法的发展指出了一个新的方向。这些成果发表在《SIAM Review》^[4]、《Math. Comput.》^[12]、《SIAM J. Numer. Anal.》^[10]上。
2. 提出了四阶及以上精度的界面追踪和曲率估计算法，大大提高了现有方法的精度和效率。LS (level set) 方法和 VOF 方法将动边界流体中遇到的几何和拓扑问题转化为数值偏微分问题予以回避，这个思路的局限性是难以保持流相的几何和拓扑特性，并且计算精度最高只有二阶。而申请人运用几何和拓扑的手段来解决几何和拓扑的问题，在第 1 项工作的基础上发展了一系列四阶精度的界面追踪方法和曲率估算方法，把现有方法的精度和效率提高了多个数量级；同时，我们的方法能够很好地保持流相的几何和拓扑特性，并能以 $O(1)$ 的最优复杂度返回流相的整体拓扑信息如贝蒂数等。这些成果发表在《Math. Comput.》^[12]、《SIAM J. Numer. Anal.》^[3,6]、《SIAM J. Sci. Comput.》^[7,9]、《J. Comput. Phys.》^[13]上。
3. 发展了一系列时空一致四阶精度的并行自适应有限体积法。申请人和同事针对平流方程、泊松方程、对流扩散方程、INS (incompressible Navier-Stokes) 方程发展了一系列四阶精度的并行自适应有限体积方法。其中，申请人独立提出的时空一致四阶精度的广义投影方法突破了自 1969 年以来投影方法最高只能达到二阶精度的局限性。对于高雷诺数不可压流体来说，申请人的四阶投影方法在精度和效率上远远优于美国科学院院士 Phillip Colella 提出的经典二阶投影方法。这些成果发表在《J. Sci. Comput.》^[5]、《SIAM J. Sci. Comput.》^[8,11]、《Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.》^[1,2]上。

在“学术贡献一、二、三”中将更加详细地阐述这些代表性工作的创新点和科学价值。

目前申请人正式发表 SCI 论文 21 篇，其中包括《SIAM Review》1 篇（独立作者），《Math. Comput.》1 篇，《SIAM J. Numer. Anal.》3 篇（分别为 33、31、29 页），《SIAM J. Sci. Comput.》4 篇（分别为 28、34、32、23 页），《J. Sci. Comput.》1 篇（47 页），《J. Comput. Phys.》4 篇，《Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.》2 篇。在申请人的这 21 篇文章中，通讯作者有 19 篇，第一作者也有 19 篇。2015 年至今申请人正式发表论文 9 篇，其中通讯作者 9 篇，第一作者 8 篇，单独作者 4 篇。

申请人组织国际会议两次，国内会议一次：

- 2018 年作为主申请人，联合界面问题的知名学者 Zhilin Li (North Carolina State University) 以及 John Stockie (Simon Fraser University) 向国际著名数学研究机构 BIRS (Banff International Research Station) 申请举办为期六天、题为《Structured Mesh Methods for Moving Interface and Free Boundary Problems and Applications》的 42 人研讨会获得批准，这是 BIRS 在同期 227 个申请中批准的少数几个之一。
- 在 2019 年 ICIAM 大会上，联合 Zhilin Li 教授以及郑伟英研究员（中科院计算数学所）组织了题为《numerical methods for interfacial dynamics》的小型研讨会。
- 在 2020 年 CSIAM 大会上，联合郑伟英研究员组织了题为《界面问题的理论分析、数值方法及实际应用》的小型研讨会。

2020 年，申请人收到 The 9th International Symposium on Environmental Hydraulics 组委会的邀请，担任其国际科学委员会成员 (member of the International Scientific Committee)。

申请人在 2019 年做大会特邀报告两次:

- 第十二届全国计算数学会会有上千名国内外计算数学领域的研究者参会, 而申请人是 8 位大会特邀报告人中的一位。
- 第十九届全国流体力学数值方法研讨会有数百名国内外计算流体力学的专家参加, 而申请人是 9 位大会特邀报告人中的一位。

近 5 年来申请人做大会邀请报告 7 次:

- 2015 年在 SIAM Conference on Computational Science and Engineering 上, 日本 Tokyo Institute of Technology 教授 Feng Xiao (《J. Comput. Phys.》现任三个 executive editors 之一) 等三位知名界面问题专家邀请申请人在题为《Numerical methods for multimaterial flows with deforming boundaries》的小型研讨会上做邀请报告。
- 2018 年申请人受邀在中科院计算所周爱辉研究员筹办的 The Second Conference on Scientific and Engineering Computing for Young Chinese Scientists 做邀请报告。
- 2019 年申请人受邀在中科院袁亚湘院士筹办的 The Third Conference on Scientific and Engineering Computing for Young Chinese Scientists 做邀请报告。
- 2019 年由华东师范大学羊丹平教授和西安交通大学李开泰教授共同发起的《基于物质运动认知之上的数学科学论坛》邀请了包括申请人在内的 20 位国内外计算数学的学者做大会邀请报告, 和申请人同时作大会邀请报告的还有北京大学的李若教授、南京大学的武海军教授、同济大学的许学军教授等。
- 2019 年第八届世界华人数学家 (ICCM) 大会由丘成桐先生担任主席, 申请人应邀做了 45 分钟报告。
- 2019 年申请人应 International Symposium on High-Fidelity Computational Methods & Applications 组委会的邀请, 在题为《Theoretical and computational advances in high-fidelity computational methods》的小型研讨会上做了 keynote 报告。
- 2020 年 9 月申请人应国家天元数学西北中心负责人邀请, 在他们举办的《多尺度模型的高精度数值方法与应用》国际研讨会上做邀请报告, 和申请人同时作大会邀请报告的还有北京大学汤华中教授、中国科学院明平兵研究员、北京大学胡骏教授、厦门大学邱建贤教授等。

近 5 年来, 有 11 个期刊邀请申请人对界面追踪和多相流计算方面的稿件进行评审, 包括《SIAM J. Sci. Comput.》、《SIAM J. App. Dyn. Syst.》、《J. Comput. Phys.》、《Computers & Fluids》、《Int. J. Numer. Meth. Fluids》、《J. Comput. App. Math.》、《Appl. Numer. Math.》等计算数学领域知名期刊。

参考文献

- [1] Q. Zhang. High-order, multidimensional, and conservative coarse-fine interpolation for adaptive mesh refinement. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 200:3159–68, 2011.
- [2] Q. Zhang. Highly accurate Lagrangian flux calculation via algebraic quadratures on spline-approximated donating regions. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 264:191–204, 2013.
- [3] Q. Zhang. On a family of unsplit advection algorithms for volume-of-fluid methods. *SIAM J. Numer. Anal.*, 51(5):2822–2850, 2013.
- [4] Q. Zhang. On donating regions: Lagrangian flux through a fixed curve. *SIAM Review*, 55(3):443–461, 2013.
- [5] Q. Zhang. GePUP: Generic projection and unconstrained PPE for fourth-order solutions of the incompressible Navier-Stokes equations with no-slip boundary conditions. *J. Sci. Comput.*, 67:1134–1180, 2016.
- [6] Q. Zhang. HFES: a height function method with explicit input and signed output for high-order estimations of curvature and unit vectors of planar curves. *SIAM J. Numer. Anal.*, 55:1024–1056, 2017.
- [7] Q. Zhang. Fourth- and higher-order interface tracking via mapping and adjusting regular semianalytic sets represented by cubic splines. *SIAM J. Sci. Comput.*, 40:A3755–A3788, 2018.
- [8] Q. Zhang and L. Ding. Lagrangian flux calculation through a fixed planar curve for scalar conservation laws. *SIAM J. Sci. Comput.*, 41:A3596–A3623, 2019.
- [9] Q. Zhang and A. Fogelson. Fourth-order interface tracking in two dimensions via an improved polygonal area mapping method. *SIAM J. Sci. Comput.*, 36:A2369–A2400, 2014.
- [10] Q. Zhang and A. Fogelson. MARS: An analytic framework of interface tracking via mapping and adjusting regular semi-algebraic sets. *SIAM J. Numer. Anal.*, 54:530–560, 2016.
- [11] Q. Zhang, H. Johansen, and P. Colella. A fourth-order accurate finite-volume method with structured adaptive mesh refinement for solving the advection-diffusion equation. *SIAM J. Sci. Comput.*, 34(2):B179–B201, 2012.
- [12] Q. Zhang and Z. Li. Boolean algebra of two-dimensional continua with arbitrarily complex topology. *Math. Comput.*, 89:2333–2364, 2020.
- [13] Q. Zhang and P. L.-F. Liu. A new interface tracking method: The polygonal area mapping method. *J. Comput. Phys.*, 227:4063–88, 2008.