

项目公示信息（自然科学奖）

一、项目名称：不可压缩 Navier-Stokes 及其耦合模型高效方法与应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：申请团队长期从事不可压缩流 Navier-Stokes 方程及其耦合问题数值方法研究。构造了不可压缩流局部高斯积分稳定化方法；发展了不可压缩流问题有限体积方法的理论，解决了有限体积方法优化阶系列数值理论结果；提出求解大规模不可压缩流耦合多区域多变量问题的变量裂解区域并行方法；从应用的角度，研究了复杂页岩油可计算模型，通过化学催化驱油数值模拟验证了超重油实验结果；构造浅油藏单井蒸汽吞吐（CSS）和蒸汽辅助重力驱油（SAGD）杂交方法，为相关的现场油藏开采提供了重要的参考。研究成果发表在计算数学或力学多种国际顶尖 SCI 期刊上。该课题在理论上具有创新价值和应用价值，为非线性科学的理论研究和流体力学在油藏模拟、流体计算以及工业部门的应用提供新的研究途径。

提名材料齐全、规范，经完成单位公示，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术奖提名条件。特提名为陕西省自然科学二等奖。

三、项目简介

本课题属于应用基础研究：数学学科中的计算数学及计算流体力学的交叉学科领域。

自然界的众多流体问题可以由 Navier-Stokes 方程及其耦合问题来描述。3 维 Navier-Stokes 方程的基础理论是千禧年疑难问题之一，相应的 3 维数值理论也不是 2 维问题的自然推广。由于人们对非线性现象本质的认识有限，在理论和实验失效的情况下，数值模拟便成为一种十分重要的研究手段。尽管计算技术的高速发展，科学计算的数值理论仍然存在着诸多问题，诸如流体问题数值方法的保物理性、大规模耦合问题解耦并行性能、油藏模型与现场开采之间的匹配性等。本项目历时十余年，围绕上述难题设计了相关高效数值方法，并建立了系列数值理论，主要发现点有：

发现点 1. 建立了不可压缩流 Navier-Stokes 方程高效有限体积方法的系列数值理论。提出了高效求解非稳态非线性 Navier-Stokes 方程稳定有限体积方法，证明了低阶问题有限体积方法与有限元方法之间的等价性，克服了 Petro-Galerkin 方法框架下三线性项的复杂性、不对称性以及有限体积与有限元试验函数之间仅有 $O(h)$ 阶误差精度所带来理论分析的难点，首次给出了关于保物理守恒非奇异解束等价性理论；利用精细非线性估计、新的对偶残差估计、Green 函数加权技巧、混合有限元和有限体积框架下 Stokes 投影，解决了关于速度 L_2 误差、速度梯度和压力去掉次优化因子的 L_∞ 优化阶理论结果；同时发现有限元方法与有限体积方法数值解存在超逼近现象。代表作被有限体积方法著名专家中山大学陈仲英教授和美国数学评论给予肯定。我们发表在国际计算数学三大顶级期刊 *Numerische Mathematik* 上的文章（代表作[2]）被审稿人评价“由于有限体积方法在工程实践中虽然常见且较之有限元简单，

但理论分析更加困难，因此这种延伸存在着技术上复杂性且非常有意义。”；国际数值传热顶级期刊 *International Journal of Heat and Mass Transfer* 的文章评价我们提出的方法“在现有的程序上只需要增加少量的计算就可以达到较好的效果。”《中国科学》（代表作[3]）的审稿意见认为：“Navier-Stokes 方程在有限体积方法非奇异解束理论、 L_∞ 优化阶分析这些方面的研究较少，具有重要的研究意义。”

发现点 2. 提出求解大规模不可压缩流耦合多区域多变量问题的变量裂解区域并行方法。变量裂解方法可将经典不可压缩 Navier-Stokes 方程及其耦合问题化为在各自区域求解各自问题，进一步将不可压缩流问题化为无不可压缩流约束的线性问题、泊松问题和椭圆问题。基于多重网格思想，利用有限元自然属性衍生单位分解函数及其区域分解框架，将大规模问题分解成一系列子区域上的细网格线性问题，通过单位分解函数将局部解合成全局连续解，得到了易于在超级计算机实现的均衡分配计算量、高效求解大规模问题的局部并行有限元算法。克服了基于不可压缩流耦合问题算法构造中并行限制、求解大规模和存储优化的难题。美国数学评论 (Math. Reviews) 评价我们的工作：“这种方法降低自由度规模具有非常好的计算效果，无条件稳定性和长时间稳定性在实践应用当中非常重要，也是该方法的亮点。”发表在力学国际顶级期刊 *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 上的文章认为我们的代表作[4]是求解稳态不可压缩 Navier-Stokes 方程的经典方法之一。发表在计算数学国际顶尖期刊 *Journal of Scientific Computing* 的论文认为我们的代表作[4]是针对计算流体动力学问题提出了一些基于两个网格的新的单位划分方法。国际一流 SCI 期刊 *Advances in Computational Mathematics* 发表的论文中提出我们的工作是一种将计算域分解为子域，以及如何构造全局连续解的新的局部并行有限元算法。美国数学评论 (Math. Reviews) 评价我们的工作[4]：“算法易于并行求解，提高效率。”

发现点 3. 针对混合有限元具有优异的物理守恒性和高精度的通量计算，研究了复杂的全混合不可压缩流-双孔 Darcy 页岩油可计算模型，基于模块化思想，利用迭代或时间推进解耦技巧，显式处理交界面信息，将多区域多物理场耦合系统分解为不同区域上经典混合子问题，建立可移植的计算模块，提升了求解复杂耦合问题的效率；进一步，利用某地区高粘度稠油的数据，通过化学催化驱油数值模拟验证了超重油实验结果；构造浅油藏单井蒸汽吞吐 (CSS) 和蒸汽辅助重力驱油 (SAGD) 杂交方法，为相关的现场开采提供了重要的参考。世界名校曼彻斯特大学和新南威尔士大学的 Ying Da Wang, Arash Rabbani 及其合作者在多孔介质中多相流动与传输领域的顶级期刊 *Advances in Water Resources* 上发表的文章中引用我们的代表作[5]，认为代表作[5]中的方法是基于 NSE 的有限元方法可以提供高精度的直接流模拟过程的经典著作之一。韩国 Jiyeon Choi 教授及他的合作者在工程学期刊 *Energy Exploration & Exploitation* 上发表论文评价：指出我们的代表作[6]提出的混合 CSS-SAGD 过程，有效的提升热采期间的热效率。代表作[6]被油气田勘探国际会议“油气田勘探与开发国际会议”引用；加拿大卡尔加里大学油藏专家中海油北美产业研究主席 Brij B. Maini 教授指导毕业论文评价：代表作[6]是针对溶剂强化 SAGD 剩余油饱和度研究为数不多的几项研究。

本项目的相关研究结果在计算数学或流体计算主流期刊上发表 SCI 论文 90 余篇，6 篇代表作主要发表在国际计算数学顶级权威 SCI 期刊 *Numerische Mathematik*, *Journal of Scientific Computing*, 计算力学顶尖期刊 *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 和《中国科学-数学》约稿，相关结果获得国内外知名学者的高度评价。此课题获得教育部新世纪优秀人才、国家自然科学基金、陕西省特支计划区域发展人才和陕西科技新星等系列项目支持，获得国务院政府特殊津贴、全国优秀教师、教育部新世纪优秀人才支持计划、陕西青年科技新星和陕西省青年科技奖等荣誉。

四、客观评价

发现点 1 代表作发表在计算数学国际顶尖权威杂志 *Numerische Mathematik* 和《中国科学-数学》。有限体积著名专家中山大学陈仲英教授和他的合作者发表的非协调有限体积方法（见他引代表作论文[1]）中以我们的代表作[2]作为有限体积方法求解流体计算中比较经典的代表作之一。（Preserving certain local conservation laws and flexible algorithm constructions are the most attractive advantages of the FVM. Due to its strengths, the FVM has been widely used in numerical solutions of PDEs, especially in computational fluid dynamics, computational mechanics and hyperbolic problems.）完成人关于不可压缩流有限体积方法非奇异解束问题结果发表在国际一流 SCI 杂志 *Numerische Mathematik* 上评审专家认为：“Nevertheless, the association is not a complete solution of the analytical problems in the extension. The extension is technically intricate and worthwhile since FVMs are quite common in engineering practice, simpler to implement than FEMs and more difficult to analyze.”（由于有限体积方法在工程实践中虽然常见且较之有限元简单，但理论分析更加困难，因此这种延伸存在着技术上复杂性且非常有意义）。美国数学会《数学评论》（*Math. Reviews*）：“The major difficulties are related to the fact that the discretization of the nonlinear term does not have anti-symmetric property of its counterpart, and to the treatment of the time evolution time.” 国际一流 SCI 期刊 *Advances in Computational Mathematics* 发表的论文中（见他引代表作论文[2]）引用了我们的代表作[2]，评价：我们的基于有限体积方法的文章在科学和工程计算中得到了很好的应用。《中国科学》的审稿意见认为：“有限元和有限体积方法的极大模估计，理论丰富、具有难度和复杂度，同时也有很好的理论价值。Navier-Stokes 方程在有限体积方法非奇异解束理论、 L_∞ 优化阶分析这些方面的研究较少，具有重要的研究意义。

发现点 2 中提出的算法可解决不可压缩流 Navier-Stokes 方程相关的耦合问题复杂性与不可压缩性对并行限制、求解的规模和存储优化之间矛盾，进一步提升求解多物理耦合流动问题的效率。美国数学会《数学评论》（*Math. Reviews*）评价我们的工作：“These methods reduce degrees of freedom and thus have good computational performance. The unconditional stability and long time stability are other highlights of the methods which are important for practical applications.”（这种方法降低自由度规模具有非常好的计算效果，无条件稳定性和长时间稳定性在实践应用当中非常重要，也是该方法的亮点。）发表在力学国际顶级期刊 *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 上的文章（见他引代表作[3]）认为我们的代表作[4]是求解稳态不可压缩 Navier-Stokes 方程的经典方法之一。发表在计算数学国际顶尖期刊 *Journal of Scientific Computing* 的论文（见他引代表作[4]）认为我们的代表作[4]是针对计算流体力学问题提出了一些基于两个网格的新的单位划分方法。国际一流 SCI 期刊 *Advances in Computational Mathematics* 发表的论文中（见他引代表作论文[5]）提出我们的工作是一种将计算域分解为子域，以及如何构造全局连续解的新的局部并行有限元算法。美国数学会《数学评论》（*Math. Reviews*）评价我们的工作[4]：“As the fine grid problems are linear and decoupled, they can easily be solved in parallel, increasing the performance of the method with little loss of accuracy compared to the standard FEM approach.”（算法易于并行求解，提高效率。）

发现点 3 的相关结果被包括国内外专家学者引用，并给于正面评价。世界名校新南威尔士大学和英国曼彻斯特大学的 Ying Da Wang, Arash Rabbani 及其合作者在多孔介质中多相流动与传输领域的顶级期刊 *Advances in Water Resources* 上发表的文章（见他引代表性论文[6]）中引用我们的代表作[5]，评价：我们的方法被认为是直接求解 NSE 的流体模拟高效方法之一。（Direct flow simulation by solving the Navier-Stokes equation (NSE) explicitly offers the

highest level of accuracy with the finest degree of detail, projecting directly into the domain. This can be performed by Finite Method solutions of the NSE (White et al., 2006; Sun et al., 2010; Sandino et al., 2014; Song et al., 2004; Raeini et al., 2015; Geiger et al., 2004; Mahbub et al., 2020)。Kashiwabara T 教授和他的合作者在国际数学期刊上发表的关于具有弯曲界面的 Stokes–Darcy 系统的惩罚和 Nitsche's 方法分析中评价: 以我们系列论著中等区域分解方法研究了具有迭代的域分解方法, 对工业应用的发展具有重要意义。(The domain decomposition methods with iteration are investigated by [11,12,22,24,33,40,45,50]. The curved interface appears in various important industrial applications, for instance, the oil/gas reservoir [40,1] The conforming elements satisfying the velocity-pressure inf-sup condition on each subdomain are also studied in [40,53,54])。加拿大卡尔加里大学油藏专家中海油北美产业研究主席 Brij B. Maini 教授指导毕业论文(见他引代表作论文[7])中评价: 指出我们代表作[6]是针对溶剂强化 SAGD 剩余油饱和度研究为数不多的几项研究之一。(To the best of author's knowledge, there is no systematic laboratory study of residual oil saturation in solvent enhanced SAGD reported in the literature, even though several studies have touched on this topic [Ayodele and Nasr, 2006; Ayodele et al., 2010; Li et al., 2011; Mohebati et al., 2012; Ibatullin and Zolotukhin, 2009; Mohebati et al., 2009; Li and Mamora, 2010].) 韩国江源大学 Jiyeon Choi 及他的合作者在工程学期刊 Energy Exploration & Exploitation 上发表论文(见他引代表作论文[8])中评价: 我们的代表作[7]构造了一种杂交的 SAGD 方法。(This combined process can be divided by different CSS start-up times, and the operating cycles of the steam injection, soaking, and production, which are known as hybrid SAGD (Cos, kuner, 2009; Ghanbari et al., 2012; Li et al., 2011; Xu et al., 2014))。

五、代表性论文专著目录（限 8 条）（不超过 8 篇，其中代表作论文不超过 5 篇）

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 (某年某月某日)	通讯作者 (含共同)	第一作者 (含共同)	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	不可压缩流 Navier-Stokes 方程数值方法	科学出版社	李剑		2019 年 6 月 1 日	李剑	李剑	李剑			是
2	Optimal L^2 , H^1 and L^∞ Analysis of Finite Volume Methods for the Stationary Navier-Stokes Equations with Large Data	Numerische Mathematik	Jian Li, Zhangxin Chen	2014 年 126 卷 75-101 页	2014 年 01 月 01 日	Jian Li	Jian Li	李剑	22	SCIE	是
3	三维定常 Navier-Stokes 方程有限元/有限体积方法非奇异解束 L^∞ 优化阶分析研究	中国科学-数学	李剑, 陈掌星	2015 年 45 卷 1281-1298 页	2015 年 04 月 01 日	李剑	李剑	李剑	0	CSCD	是

4	Local and parallel finite element algorithm based on the partition of unity for incompressible	Journal of Scientific Computing	Haibiao Zheng, Jiaping Yu, Feng Shi	2015年65卷 512-532页	2015年 11月01日	Haibiao Zheng	Haibiao Zheng	郑海标, 于佳平, 史峰	33	SCIE	是
5	Mixed stabilized finite element method for the stationary Stokes-dual-permeability fluid flow model	Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	Md. Abdullah Al Mahbub, Feng Shi, Nasrin Jahan Nasu, Yongshuai Wang, Haibiao Zheng	2020年358卷 112616页	2020年 01月01日	Haibiao Zheng	Md. Abdullah Al Mahbub	史峰, 王勇帅, 郑海标	10	SCIE	是
6	Design and Numerical Study of a New Hybrid CSS-SAGD Process Using Horizontal Wells for Recovering	Petroleum Science and Technology	J. Li, X. Zhao & Z. Chen	2011年29卷 2578-2591页	2011年 10月25日	J. Li	J. Li,	李剑, 赵昕	2	SCIE	是

六、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
李剑	1	院长	教授	陕西科技大学	陕西科技大学	<p>作为代表性论著[1,2,3,6]的通讯作者及第一作者,对本项目的发现点1和3有重大贡献:建立了不可压缩流 Navier-Stokes 方程高效有限体积方法的系列数值理论,并且从应用的角度,鉴于混合有限元具有优异的物理守恒性和高精度的通量计算,研究了复杂的全混合不可压缩流-双孔 Darcy 页岩油可计算模型,构造浅油藏单井蒸汽吞吐(CSS)和蒸汽辅助重力驱油(SAGD)杂交方法,为相关的现场开采提供了重要的参考。</p>
郑海标	2	无	副教授	华东师范大学	华东师范大学	<p>基于多重网格思想,利用有限元自然属性衍生单位分解函数及其区域分解框架,将大规模问题分解成一系列子区域上的细网格线性问题,通过单位分解函数将局部解合成全局连续解,得到了易于在超级计算机实现的均衡分配计算量、高效求解大规模问题的局部并行有限元算法。</p> <p>鉴于混合有限元具有优异的物理守恒性和高精度的通量计算,研究了复杂的全混合不可压缩流-双孔 Darcy 页岩油可计算模型,基于模块化思想,利用迭代或时间推进解耦技巧,显式处理交界面信息,将多区域多物理场耦合系统分解为不同区域上经典混合子问题,形成可移植的计算模块,提升了求解复杂耦合问题的效率。</p>
赵昕	3	无	副教授	宝鸡文	宝鸡文	<p>作为代表性论著[6]的作者,对本项目的发现</p>

				理学院	理学院	点 3 有重大贡献：合作构造浅油藏单井蒸汽吞吐（CSS）和蒸汽辅助重力驱油（SAGD）杂交方法。
--	--	--	--	-----	-----	--

七、主要完成单位情况

陕西科技大学是本项目的主要完成单位，本项目组成员所在的相关学院—数学与数据科学学院及科技处等单位在科研工作安排、研究条件、技术支持和人员配备等方面给予了大力的支持，确保了项目的提前完成并在理论上和实际应用等方面均取得了显著的成绩，其主要贡献如下：1、负责项目的管理和监督等工作；2、开放与项目实验研究开展相关的实验设备及设施；3、人力、物力、财力等方面的支持；4、对关键问题的研发及解决提供协助。

华东师范大学是本项目的主要完成单位，本项目组成员所在的相关学院—数学科学学院及科技处等单位在科研工作安排、研究条件、技术支持和人员配备等方面给予了大力的支持，确保了项目的提前完成并在理论上和实际应用等方面均取得了显著的成绩，其主要贡献如下：1、负责项目的管理和监督等工作；2、开放与项目实验研究开展相关的实验设备及设施；3、人力、物力、财力等方面的支持；4、对关键问题的研发及解决提供协助。

宝鸡文理学院是本项目的主要完成单位，本项目组成员所在的相关学院—经济管理学院及科技处等单位在科研工作安排、研究条件、技术支持和人员配备等方面给予了大力的支持，确保了项目的提前完成并在理论上和实际应用等方面均取得了显著的成绩，其主要贡献如下：1、负责项目的管理和监督等工作；2、开放与项目实验研究开展相关的实验设备及设施；3、人力、物力、财力等方面的支持；4、对关键问题的研发及解决提供协助。

八、完成人合作关系说明

“不可压缩 Navier-Stokes 及其耦合模型高效方法与应用”是由李剑教授与华东师范大学郑海标副教授、宝鸡文理学院赵昕副教授合作完成。李剑教授与郑海标副教授主要合作完成与本项目发现点 2 与 3 相关的系列论文，与赵昕副教授合作完成发现点 3 的相关论文。本项目李剑教授为第一完成人，郑海标副教授为第二完成人，赵昕副教授为第三完成人。由陕西科技大学作为申报单位，华东师范大学与宝鸡文理学院作为共同完成单位进行申报。特此说明。