



中国地质大学
China University of Geosciences

艰苦朴素 求真务实

地质大学

高性能计算 (HPC) 支持下的 油气藏模拟器

LI

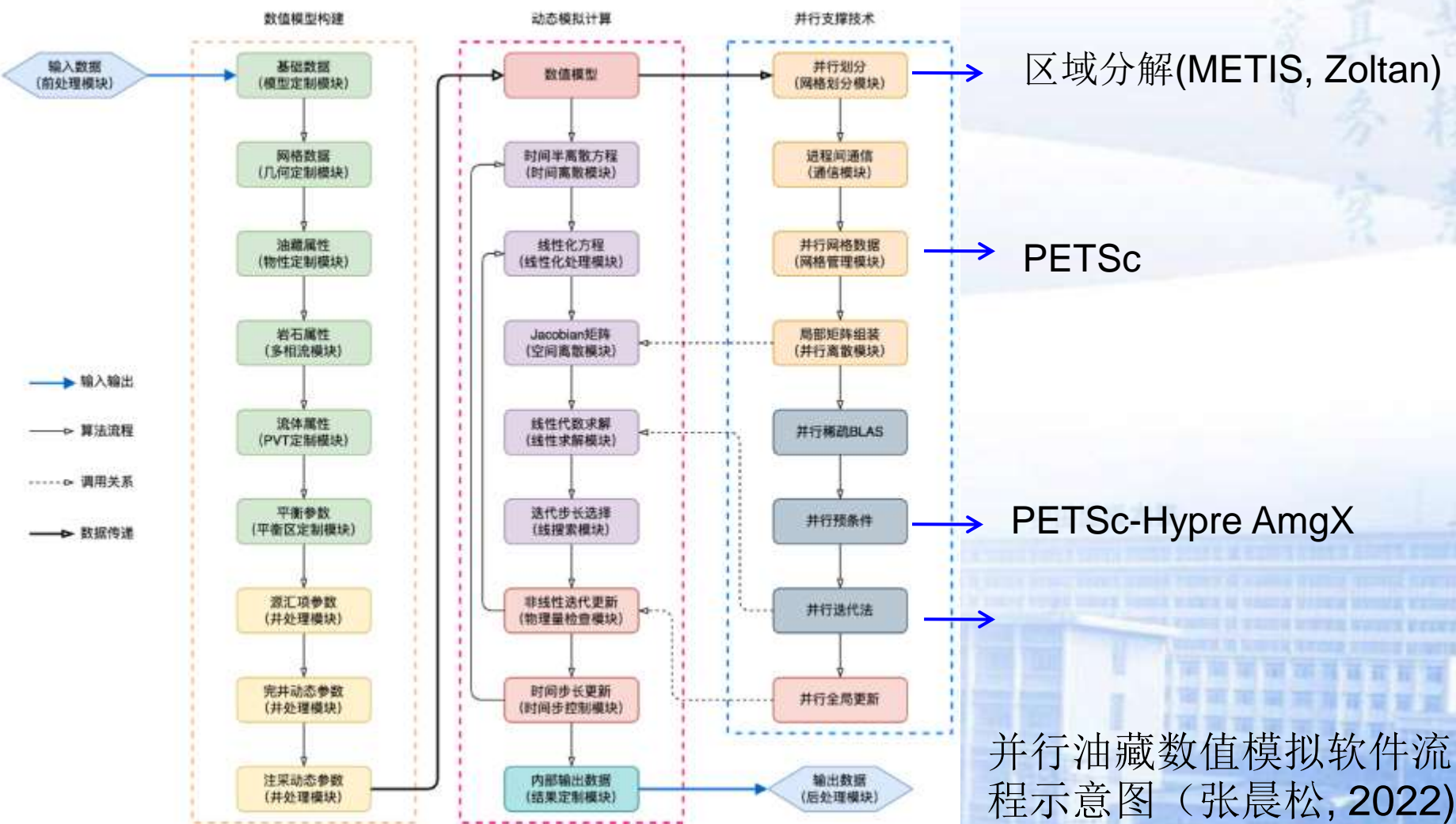


内容提纲

- 1、并行油藏数值模拟流程
- 2、国外的并行化油气藏模拟器研究（重点介绍了GPRS软件）
- 3、国内的并行化油气藏模拟器研究
- 4、总结



1、并行油藏数值模拟流程





1、并行油藏数值模拟流程

并行油藏数值模拟



国内外油气藏模拟器的整体介绍及主流模拟软件的比较可参考檀朝东（中国石油大学（北京））的PPT（百度文库）介绍，国外的油气藏模拟器有SLB-ECLIPSE, CMG, VIP, GPRS (AD-GPRS)等，国内的油气藏模拟器就是PRIS。

油藏数值模拟的主要部分（包括主模拟器机器辅助模块）（张晨松, 2022）



1、并行油藏数值模拟流程

精细油藏模拟对于研究剩余油分布，促进我国相当部分已进入高含水后期老油田的高产、稳产具有重要意义。它的计算规模实际需要达到百万、千万量级，历史拟合时间一般超过**20**年。为了解决这样一个具有重大现实意义的问题，国际上一致认为，油藏数值模拟系统应当拥有高性能计算机和高效的数值模拟应用软件（曹建文，**2006**）。油气藏模拟技术的发展得益于过去**50**年内油藏模拟的革新，主要由**两大因素推进**：算力爆发和新的先进的模拟技术的发展（面向对象编程语言**FORTRAN90/C++**）。

下面通过文献调研并行化的油气藏模拟器的国内外研究状况，作为研究指导。



2、国外的并行化油气藏模拟器研究

- 以1997年推出的Falcon为标志，美国几大石油公司先后形成了商业化的油藏数值模拟并行软件。
- 深受用户欢迎并在市场上取得成功的软件如Landmark公司的Parallel VIP，Schlumberger-GeoQuest公司的ECLIPSE等。90年代，许多石油公司和研究机构也形成了自己的并行软件。
- 1997年，Landmark公司宣布推出油藏模拟软件VIP的并行版随后几年，GeoQuest公司推出了ECLIPSE100的并行版软件。
- 斯伦贝谢公司Intersect油气藏数值模拟器是从2000年开始与美国Chevron 雪佛龙公司一同研发。2004年法国Total道达尔公司加入Intersect稠油热采模拟技术的研发。Intersect是实现大规模非均质油气藏精细数值模拟的技术手段。
- 挪威国家石油公司开发的OPM模拟器(2021)，具备高性能计算支持的黑油模型。OPM是基于DUNE C++库开发的。

总结： 90年代：Falcon, Landmark-VIP, GeoQuest-ECLIPSE100

2000年以后：SLB-Intersect, Stanford-GPRS, Norway-OPM



2、国外的并行化油气藏模拟器研究

斯坦福大学的GPRS油藏模拟器

General Purpose Research Simulator (GPRS)的基本特性(Cao, 2002):

- unstructured grid (structured grid is handled as a special case of unstructured grid),
- network modeling (connection based approach),
- both two-point flux and multi-point flux calculation for network modeling,
- advanced linear solver technology (need further development),
- fully coupled surface facilities model (future development), and
- fully coupled geo-mechanical model (future development).

Currently, the first four features have been included in GPRS, and the fourth feature needs further development. We plan to add in the last two features in the near future.

组份模拟：黑油模型是组份模型的特例，黑油模型的相平衡关系简化为组份摩尔比例和压强之间的线性关系。**GPRS**中可使用组份公式实施黑油模拟。



2、国外的并行化油气藏模拟器研究

斯坦福大学的GPRS油藏模拟器

6.2 Future Work

GPRS is a general-purpose research simulator. It requires further testing, improvements and enhancements. Work is especially needed in the following areas:

- Evaluation of IMPSAT++ models (including some mole fractions in the implicit set)
- Evaluation of quasi-IMPSAT model, where the mole fractions in the transmissibility part are updated iteration by iteration
- Improvements in preconditions for AIM models
- Better solver for unstructured grid
- Improvements in flash calculations
- Implementation of techniques for parallel computing
- Surface facility modeling
- Complex well modeling
- Automatic selection of the level of implicitness in AIM models
- Thermal modeling
- Fractured reservoir simulation
- Enhancements in the treatment of water to include gas solubility in water and water vapor in gas
- Other structured grid (cylindrical, curvilinear, corner-point)
- Coupled modeling of geomechanics
- Interface with other tools, and allow use of various units

龚斌(2011)在北大介绍了GPRS的研发里程碑:

- 2002: 1st release of GPRS to SUPRI-B members: generalized unstructured, compositional formulation
- 2004: Finished Multi-segment well (MSWell) implementation
- 2005: Started to add energy equation; SLB/CVX/Total's Intersect project initiated largely following the philosophy and system design of GPRS
- 2007: Finished adding advanced upscaling features for NFR (MSR), conventional reservoirs (ALG), and near-well regions
- 2009: Finished generalized chemical-reaction formulation (multi-species)
- 2010: Started to implement auto-differential formulation; finished CO₂ sequestration and CBM module; Collaborative development agreement signed between Stanford and Peking University

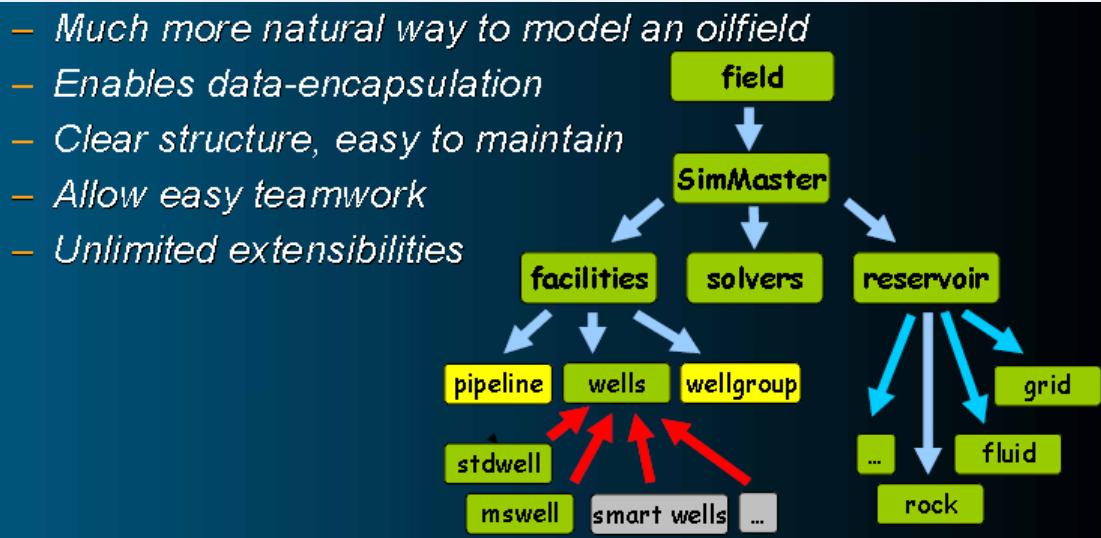
Cao Hui (2002)



2、国外的并行化油气藏模拟器研究

GPRS油藏模拟器与ECLISPE, VIP等的区别

大多数的商业油藏模拟器是基于面向过程的编程(Eclipse, CMG, VIP等), 而GPRS采用面向对象编程设计:



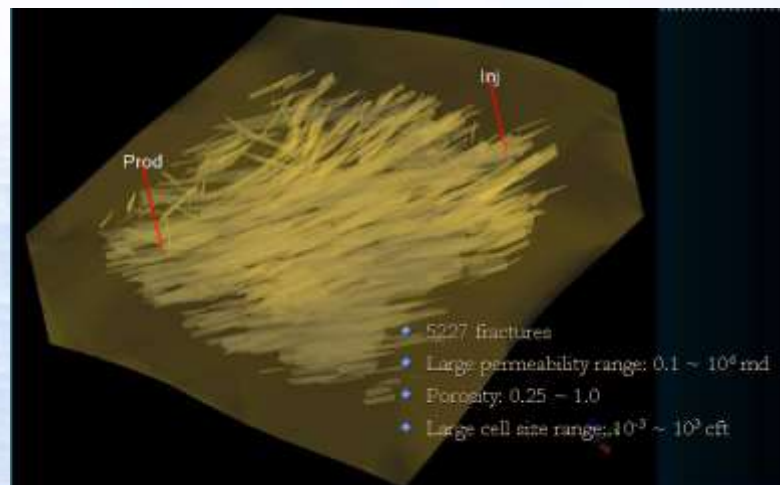
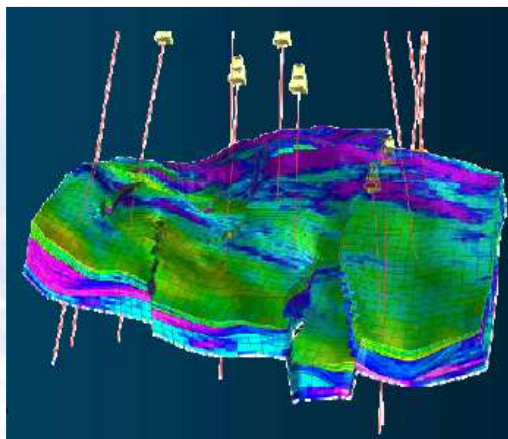
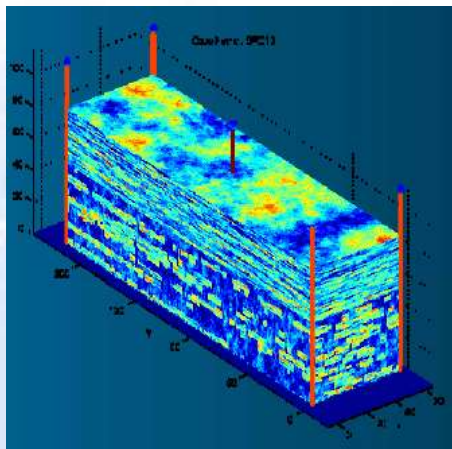


2、国外的并行化油气藏模拟器研究

GPRS的功能:

- (1) 黑油模拟器
- (2) 组份模拟器
- (3) 化学反应模拟器
- (4) 地热（研发中）

GPRS模拟器支持的网格类型：笛卡尔网格、角点网格和非结构网格。





2、国外的并行化油气藏模拟器研究

GPRS的近期发展



自动差分技术 (AD-GPRS): Automatic-Differentiation General Purpose Research Simulator (AD-GPRS). AD-GPRS is built on the **Automatic Differentiation Expression Templates Library**. This library (ADETL) was developed initially by Younis (2011) and further extended by Zhou (2012).

AD-GPRS最新的功能:

- Unstructured Grids, DFM
- Fully Implicit or Sequentially Implicit
- Finite Volumes / Finite Elements
- Dead Oil / Black Oil / Compositional
- Thermal
- Standard and multi-segment wells
- Geomechanics (elasticity, plasticity, fractures)
- Reactions (kinetics, solid phase)
- Electrical resistivity
- Tracer, time-of-flight
- Block linear solvers, multistage preconditioners (CPR, Fixed-Stress)

Wong Zhiyang 2015在AD-GPRS的框架下增加了地热模拟功能。



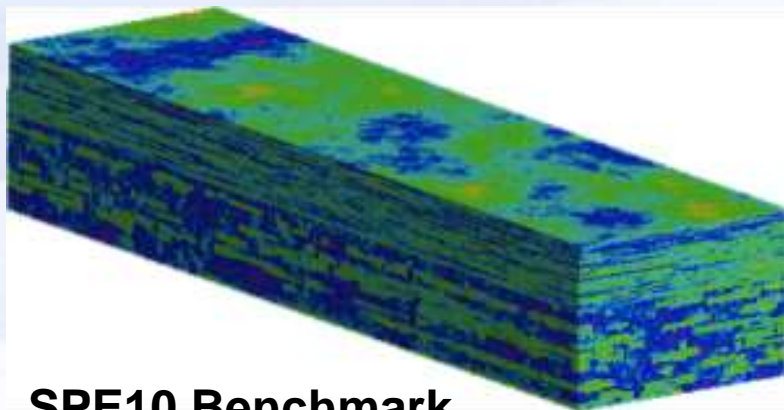
2、国外的并行化油气藏模拟器研究

吴淑红与张晨松（2020）的专著介绍油藏数值模拟的常用模型、分散方法、非线性求解方法等，着重介绍线性代数求解方法和如何改进这些线性代数求解方法，从而提高在现代计算环境下的适应性和加速效果。适用于一般黑油模型的全隐式离散的线性代数求解算法，算法具有较强的通用性，可以推广到组分模型的全隐式求解。

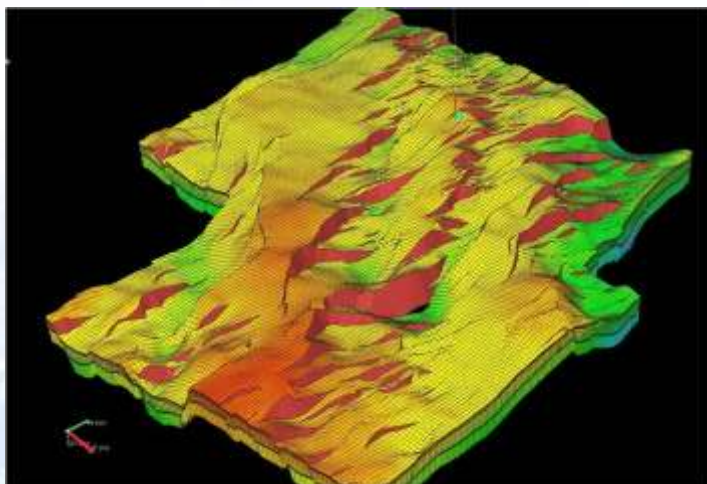
近年开始使用GPU异构加速的线性求解器库加速油气藏数值模拟计算效率。但是，GPU异构加速的求解器应用于油气藏模拟器的研究较少，极少能够落地的。例如，Middya, et al. 2021开发了黑油模型和组份油气藏模拟器（**in-hous code**），使用GPU异构并行的线性求解器加速模拟。Nvidia公司科技人员，使用公司开发的AmgX（GPU加速的线性方程组求解器），加速隐式油藏模拟器的计算效率。博客中没有披露是基于什么油藏模拟器，但可以肯定基于PETSc-AmgX加速OPM模拟器是有益的。数值计算库的使用是关键，包括：PETsc, DNUE-istl, AmgX (Nvidia)。



GPU异构并行的求解器AmgX在油气藏模拟的应用 (Nvidia公司)



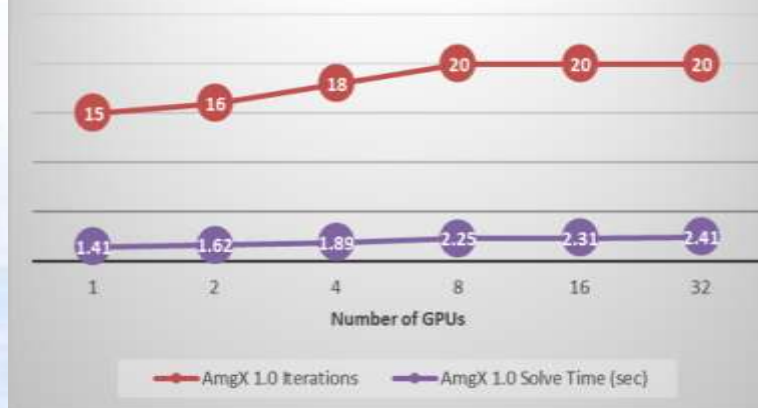
SPE10 Benchmark



AmgX Vs HYPRE Speedup for SPE10



Classical AmgX Weak Scaling



<https://developer.nvidia.com/blog/amgx-v1-0-enabling-reservoir-simulation-with-classical-amg/>



2 国外的并行化油气藏模拟器研究

HPC在油气藏模拟的最新研发与应用可参考一些公司的网站：

<https://developer.nvidia.com/blog/amgx-v1-0-enabling-reservoir-simulation-with-classical-amg/>

<https://www.hpcwire.com/2018/05/03/enis-gpu-based-hpc4-speeds-oil-reservoir-simulations/>

<https://www.ogj.com/exploration-development/article/17231181/reservoir-modeling-and-simulation-in-todays-highperformance-computing-environments>

<https://insidehpc.com/2015/09/hpc-in-seismic-processing-and-interpretation-and-reservoir-modeling/>

<https://stoneridgetechnology.com/company/blog/seismics-little-brother-comes-of-age-reservoir-simulation-software-and-hpc/>



3 国内的并行化油气藏模拟器研究

清华大学与胜利油田有限公司地质科学研究院合作(杨耀忠, 2003)实现集群并行的油气藏模拟, 实现了100.2万网格点的实际大规模油藏数值模拟问题, 在17个处理机并行计算时, 加速比达6.75。实际油藏模型: 胜坨二区沙二1~3砂层组实际油藏为计算对象。并行计算环境为清华大学千亿次集群计算机系统。

中科院软件所并行计算实验室自1992年以来, 致力于并行算法与高性能软件的研究(曹建文, 2002)。在为国产高性能计算机进行正确性和性能测试过程中, 与中国三大石油公司CNPC, SinoPEC, CNOOC在不同层面上展开合作, 以80年代末引进的黑油模型串行软件为蓝本, 进行了油藏模拟软件并行化、线性问题并行求解器、非线性问题高效求解技术、针对耦合PDE的自适应并行预处理技术等研究与开发。1999年针对并行油藏模拟器软件推出了基于分布式高性能计算机的并行求解器PRIS V1.1。2001年以来, 针对中国科学院陆续安装的万亿次科学计算平台, 科研人员对大规模油藏模拟并行软件中的高效求解及预处理技术进行了深入研究, 在此基础上, 实现了基于高性能处理器规模的非线性问题并行求解器, 并改进了并行模拟器的实现策略(??), 形成了新版本的高效并行求解器PRIS V2.1。



3 国内的并行化油气藏模拟器研究

- 国内大庆油田勘探开发研究院2000年引进了一套并行油藏数值模拟系统（曹建文，2006），配置Parallel VIP 2000商业并行软件，用该系统数值模拟实例2，一次耗时70小时以上。其它石油公司也陆续引进了几套并行版的VIP，ECLIPSE软件。由于国外并行机及并行软件的技术壁垒和高价政策，引进的油藏数值模拟系统难以有效地进行百万量级网格点的数值模拟。
- 中石油勘探开发研究院（2020）发布了HiSim 2.0，但没有发现该程序的任何文献及应用场景。
- 中科院计算数学研究所的张晨松（2022）开发了OpenCAEPoro，开源，国产的油藏模拟软件，基于C++开发的高效、跨平台的多组分多相渗流数值模拟软件，可以同时处理黑油模型和组份模型。



3 国内的并行化 油气藏模拟器研究

中石油勘探开发研究院开发的
新一代油藏数值模拟软件
HiSim

（没有找到任何关于HiSim
的代码、论文和应用案例）

中国石油勘探开发研究院有形成果



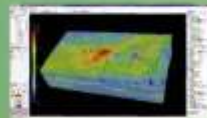
新一代油藏数值模拟软件HiSim®

——实用 精细 高效——

中国石油勘探开发研究院历经十年持续攻关，在数值模拟理论、大规模高效数值求解技术、新一代油藏数值模拟软件系统等方面取得一系列技术突破，形成了具有自主知识产权的新一代油藏数值模拟软件——HiSim®。

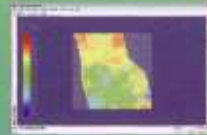
丰富的数学模型

- 油气水三相多组分渗流模型
- 低渗透油藏多模式渗流模型
- 高含水油藏优势渗流通道模型
- 多元复合化学驱数学模型



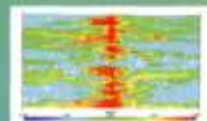
适用于多种油藏类型

- 常规砂岩油藏
- 砾状油藏
- 边底水油藏
- 孔隙—裂隙性油藏



领先的技术原理

- 可扩展的一体化多功能数学模型
- 灵活的角点网格有限体积离散技术
- 高效的多阶段预处理大规模求解技术



适用于多种开发方式

- 天然能量开采
- 水驱开发
- 非混气驱
- 聚合物驱、调驱、化学驱合驱

高效的模拟性能

• 单机上实现百万网格规模的小时级数值模拟



精细的模拟结果

• 高分辨率油藏模拟为老油田剩余油研究、精细挖潜、提高石油采收率研究提供技术依据



应用HiSim®油藏数值模拟软件，
踏上全新、高效、科学的油气开发之路！



4 总结

(1) 如何快速建立油气藏模拟的输入项目，即地质建模？

(2) “三桶油”公司的内部研究能力很有限，主要是与清华大学和中科院合作开发，研发成功应用于我国油田项目，取得了较好的成果。（OpenCAEPoro是我国自主研发，唯一的开源油气藏模拟器）

(3) 基于HPC的线性求解器加速油气藏模拟是一个前沿课题，特别是Krylov子空间算法和预条件子组合线性方程组求解器。

研究前沿：OPM + Zoltan + PETSc + AmgX



参考文献

- 杨耀忠, 舒继武, 郑纬民. 基于Cluster的大型油藏数值模拟的并行计算. 清华大学学报(自然科学版). 2003, 43(9): 1284-1287.
- 刘义坤, 罗鑫, 初阳. 基于MPI的Eclipse并行计算在油藏模拟中的应用. 科学技术与工程, 2011(25): 6167-6170.
- 曹建文, 赵国忠. 并行油藏模拟软件的实现及在国产高性能计算机上的应用. 计算机研究与发展, 2002, 39(8): 973-980.
- 曹建文, 刘洋, 孙家昶, 等. 大规模油藏数值模拟软件并行计算技术及在Beowulf系统上的应用进展. 数值计算与计算机应用. 2006, 27(2): 86-95.
- 罗冬阳, 王风, 李元元. Intersect大型油气藏模拟器助力高效开发油气田. 电脑知识与技术. 2017, 13(9)
- 张晨松. 油藏数值模拟中的线性求解器. 数值计算与计算机应用. 2022, 43(1): doi: 10.12288/szjs.s2021-0813
- 吴淑红, 张晨松, 王宝华. 油藏数值模拟中的线性代数求解方法. 石油工业出版社. 2020
- Usuf Middya, et al. 2021. A Massively Parallel Reservoir Simulator on the GPU Architecture. Paper presented at the SPE Reservoir Simulation Conference, On-Demand, October 2021. <https://doi.org/10.2118/203918-MS>



GPRS的参考文献

- Cao Hui. 2002. Development Of Techniques For General Purpose Simulators. Stanford University. Doctoral Dissertation
- L.J. Durlofsky, K. Aziz, Advanced Techniques for Reservoir Simulation and Modeling of Non-conventional Wells, Final Report to U.S. Department of Energy, contract no. DE-AC26-99BC15213 (2004) 213 pp. 2004
- Y. Fan, Chemical Reaction Modeling in a Subsurface Flow Simulator with Application to In-Situ Upgrading and CO₂ Mineralization, Ph.D. thesis, Stanford University, 2010
- Gong Bin. 2011. A General Purpose Research Simulator (GPRS) for Numerical Simulation On CO₂ Sequestration. Peking University, 2011.8.24.
- Garipov et al. Discrete fracture model for coupled flow and geomechanics. Computational Geosciences, 2016.
- Garipov et al. Thermo-Hydro-Mechanical Model for Source Rock Thermal Maturation. 50th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2016.
- Garipov et al. Unified Thermo-Compositional-Mechanical Framework for Reservoir Simulation. Computational Geosciences, 2017
- Tomin & Lunati. Local-global splitting for spatiotemporal-adaptive multiscale methods. Journal of Computational Physics, 2016.
- Wong Zhiyang. 2015. A Geothermal Reservoir Simulator In AD-GPRS. Stanford University. Master Dissertation.
- Wong et al. Comparison of a Fully Implicit and Sequential Implicit Formulation for Geothermal Reservoir Simulations. 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 2017.