



No. 2003-06

并行油藏模拟

一体化解决方案

中国科学院软件研究所

并行软件研究开发中心(RDCPS)

2003年11月

本档所有内容的最终解释权归 中国科学院软件研究所并行软件研究开发中心 所有。
最新信息请访问网站：www.rdcps.ac.cn

目 录

一、并行油藏模拟一体化解决方案	4
二、高效并行油藏数值模拟器 --- PRIS.....	7
1. PRIS 软件发展史.....	7
2. PRIS 主要特性.....	8
3. PRIS 已经运行成功的并行计算平台.....	9
4. PRIS 的运行	10
5. 若干数值计算实例	11
三、PRIS 下一个五年研发计划.....	15
四、超大规模油藏数值模拟并行计算对高性能计算机的需求.....	17

一、并行油藏模拟一体化解决方案

油藏数值模拟是应用计算机研究油气水等多相流体在油藏中的渗流规律的数值技术，从五十年代问世到现在一直是广大石油工程师对油藏进行分析和管理的**有效方法**。

油藏数值模拟是以渗流力学, 应用数学, 计算机科学等为基础的综合学科, 并涉及到开发地质、油藏工程、采油工艺等专业知识。

油藏数值模拟通过对地质资料, 生产资料, 油气水等地下流体物性参数资料等进行综合分析和计算, 得出的结果能够综合反映油藏中多种地质参数和开发过程中多种开发措施对油田开发效果的影响, 空间上可以描述油田的全貌, 时间上可重现油田开发历史、评价开发效果并预测未来油田的开发动态, 大至宏观决策。小到微观分析, 只要输入的参数齐全, 调整参数合理, 就能够实现对油田开发过程中的“仿真”模拟。另外, 通过改变地质模型的参数或开发条件可以在计算机上进行模拟计算, 实现对多种开发方案的比较和筛选, 以获得对油田或区块的正确认识, 进而做到优化开发方案或调整措施。同时, 油藏数值模拟是在开发后期对油田的潜力的挖掘、剩余油的分布和提高采收率等的重要手段。

油藏数值模拟工作的主要目标:

- 1、为新井布置, 井网调整等提供依据;
- 2、研究驱替理论;
- 3、评价开发效果, 为提高油田采收率提供可靠依据;
- 4、优化注采系统, 降低油气田开发中的开发成本;
- 5、预测未来指标, 减少油气开发的风险投资;

6、寻找剩余油分布；

7、为制定开发策略提供依据。

随着石油工业的发展和油田的不断开发，油藏数值模拟更是油藏工程师对油藏进行描述和认识的不可缺少的技术。但是，随着油田开发的进行，油藏剩余油分布和压力分布等越来越复杂，模拟越来越复杂的油藏需要把以前的模型网格尺寸成倍的缩小，网格数也相应的增加，这就要求计算机有足够大的内存和足够快的处理速度。而仅靠提高单个 CPU 速度和提高单机内存并不能满足工程需要。大规模并行计算机、小型机，巨型机的出现为这一问题的解决提供了道路，但是这些计算机成本高，难于维护。上世纪 90 年代后期出现的并行微机机群以其高性价比，扩展性强，易维护等特点得到越来越多的应用和重视，联想公司的亿万次和 4 亿万次机器就是微机机群型。

微机机群更适合于具有数据密集的油藏数值模拟。由于机器内存的限制，以前的油藏数值模拟的模型都是通过对地质模型的粗化得到，在粗化过程中，忽略了很多油藏地质信息，可想而知，用这样的模型模拟出来的结果很难正确反映油田实际。而微机机群能提供足够的内存，使得模拟的模型能更多的保留实际的油藏信息，甚至能应用实际的不经过粗化的油藏地质模型进行油藏数值模拟（图-1）。

微机机群的高性价比更适合于计算密集的油藏数值模拟。油藏数值模拟的计算量大，对一个 40 万网格点，近百口井的 20 年模拟，需要在单机上计算 15 小时左右。而用大型机或微机机群可能 1 小时甚至几分钟就能完成。而微机机群的价格却只有相同计算速度的大型机的 30%。当然，对于更大规模的模型，单机需要的时间可能工程是不能接受或没有办法计算，必须借助并行计算处理。

微机机群可扩展性强，易于维护。由于微机机群机器是用商用 PC 元件搭建起来的，通用性强。如果用户对机器有新的要求，比如计算速度需要提高，内存增加，等都可以随时增加调整。微机机群一般采用的系统是免费系统 Linux

系统。Linux 是一套免费使用和自由传播的类 Unix 操作系统，它主要用于基于 Intel x86 系列 CPU 的计算机上。Linux 从一开始就遵循 POSIX 标准。Linux 操作系统软件包不仅包括完整的 Linux 操作系统，而且还包括了文本编辑器、高级语言编译器等应用软件。它还包括带有多个窗口管理器的 X-Windows 图形用户界面，如同我们使用 Windows NT 一样，允许我们使用窗口、图标和菜单对系统进行操作。

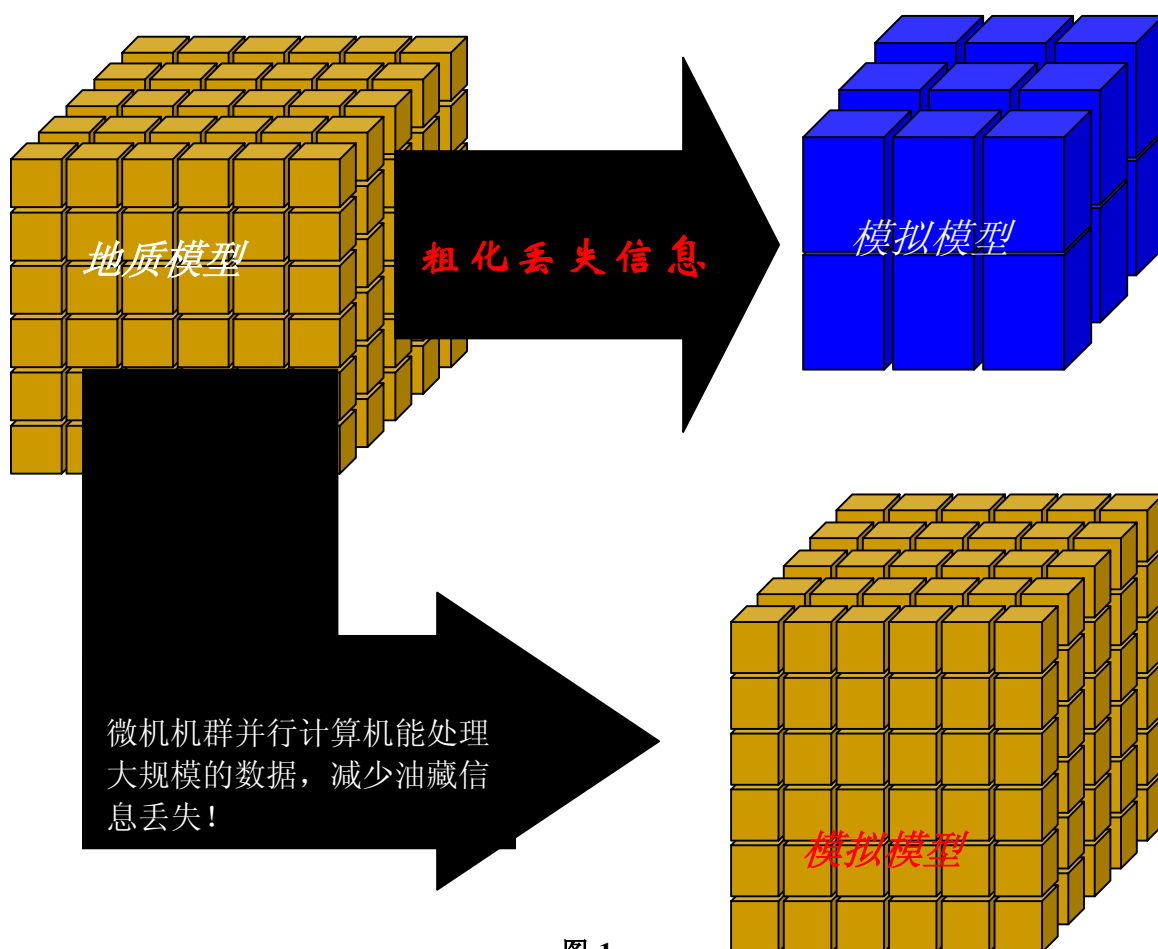


图-1

二、高效并行油藏数值模拟器 --- PRIS

PRIS 是基于高性能并行计算机及微机机群的并行油藏数值模拟器，主要技术(包括：完全的数据并行-SPMD，并行 I/O,通信极小化，井的并行处理算法，高效并行解法器等等)由中国科学院软件研究所并行软件研究开发中心(RDCPS)自主研制开发。

1. PRIS 软件发展史

- ◇ 1997 年开始并行版本软件的应用开发，形成 **PRIS1.0 PVM** 版；
- ◇ 1998 年对并行软件的关键部位进行加速，形成 **PRIS1.0 MPI** 版；
- ◇ 1998 年在高性能计算机 **SR2201**、**SGI Power Challenge**、**IBM SP2**、**SGI Origin 2000** 成功移植，并对国内石油部门提供的数十套历史拟合数据（规模为 2 万 ~ 45 万）进行油藏数值模拟计算，取得了较好的效果；
- ◇ 1999 年在国产高性能并行计算机**神威**、**曙光**及自行组装的 **Linux 微机机群**上，进行国内某油田两套实际数据：**104 万和 116 万**网格点、**三维三相黑油模型**、**历史拟合达 13~31 年**的的大规模计算模拟和应用分析，并通过了大庆油田专家的测试，其主要成果被列入国家“八六三”十五周年成果展览中；

- ◇ 2000 年，油藏数值模拟并行版本软件 PRIS 正式定版，并于 9 月份在北京友谊饭店正式对外宣布；
- ◇ 2001 年，在国产高性能并行计算机曙光 3000 上模拟国内某油田 116 万网格点全部生产史，仅需 11.9 小时，达到了“夕发朝至”；用 17.4 小时完成了 100 多年的生产预测，全区最终综合含水为 96.7%（2100 年）；这些结果为石油生产调度部门制定开采计划、保持稳产提供了软硬环境方面的保障。
- ◇ 2001 年，提出并有效地实现了“微机机群软硬件一体化的油藏数值模拟并行模拟专用系统”。并和国内某油田开发部合作，为其采油厂实现了 8 个节点的“微机机群软硬件一体化的油藏数值模拟并行模拟专用系统”。
- ◇ 2002 年，在实现通信极小化，井的并行处理算法，高效并行解法器等技术后，成功推出 PRIS2.0 版，并在联想深腾 i1800 Linux 机群上用 128 个 CPUs 模拟国内某油田 116 万网格点全部生产史，用时为 0.94 小时；
- ◇ 2003 年与国内某油田合作，并为其实现了 32 个节点的“微机机群软硬件一体化的油藏数值模拟并行模拟专用系统”。

2. PRIS 主要特性

- ◇ 油藏数值模拟并行版软件 PRIS 采用了完全的数据并行方式，有效解决了并行程序对内存需求的可缩放性，减少了并行系统对问题求解规模的限制；

- ◇ PRIS 完全适用于共享的高性能计算机
- ◇ PRIS 完全适用于分布式并行机 (MPP) 以及微机机群 (PC Cluster)、Beowulf 机群等并行计算机系统;
- ◇ PRIS 在线性方程高效求解技术方面得到大的突破, 采用了“内迭代-外迭代”的双重迭代模式, 有效地综合了不同类型的 Krylov 子空间算法的优点, 形成了两套最佳求解方案, 缺省方案采用基于“子空间多角度斜交投影校正”预处理的 GMRES 方法;
- ◇ 线性方程组求解方法中采用的多角度投影校正预条件子, 由嵌套预处理、加法 Schwarz 预处理、松弛型 ILU 分解预处理、约束剩余预处理、多重网格加速、内迭代方式预处理等组成, 采用多步法的手段有机结合在一起, 得到了优势互补、效果叠加的新型预条件子;
- ◇ 并行软件的基本模块调用 BLAS 库函数;
- ◇ 并行软件的消息传递模块采用了独立定义的模块子程序, 体现了计算程序与通讯平台相对分离的研究开发思想, 有利于并行软件在不同的高性能计算平台上的移植。缺省的消息传递模块采用 MPI 通讯库函数进行通讯。

3. PRIS 已经运行成功的并行计算平台

- ◇ HITACHI SR2201;
- ◇ SGI Origin 2000.
- ◇ SGI Power Challenge;
- ◇ Intel Paragon;
- ◇ IBM SP2;
- ◇ 曙光 1000A;

- ◇ 曙光 2000-II;
- ◇ 曙光 3000;
- ◇ 国家气象中心神威-I;
- ◇ 国家并行计算机工程技术研究中心神威机;
- ◇ 国家高性能计算环境网格计算平台;
- ◇ 中科院软件所并行中心 Linux 机群 (四套);
- ◇ 联想深腾 i1800;
- ◇ 中科院大规模科学与工程计算国家重点实验室 Linux 机群(两套);
- ◇ 中科院网络中心超级计算研究室 Linux 机群;
- ◇ 中石油大庆油田勘探开发研究院 Linux 机群;
- ◇ 中石化胜利油田采油厂 Linux 机群;
- ◇ 中国海洋石油勘探开发研究院 Linux 机群;

4. PRIS 的运行

分为两个阶段：**初始化模型和主模型。**

- ◇ 初始化部分负责对静态初始化数据文件进行合理性检查，计算油藏初始压力和饱和度的分布，生成重启记录文件，以及对整体数据场进行区域划分等。
- ◇ 在初始化完成之后，用户启动主模拟器，读取动态模拟数据文件，

对油藏开采过程进行数值模拟和预测。

5. 若干数值计算实例

下面为国内油田的实际生产数据。

- **实例 1:** 网格剖分为 $130 \times 123 \times 10$ (159,900)，双孔介质，黑油模型，377 口井，英制，5 种岩石类型，历史拟合时间 31.5 年。

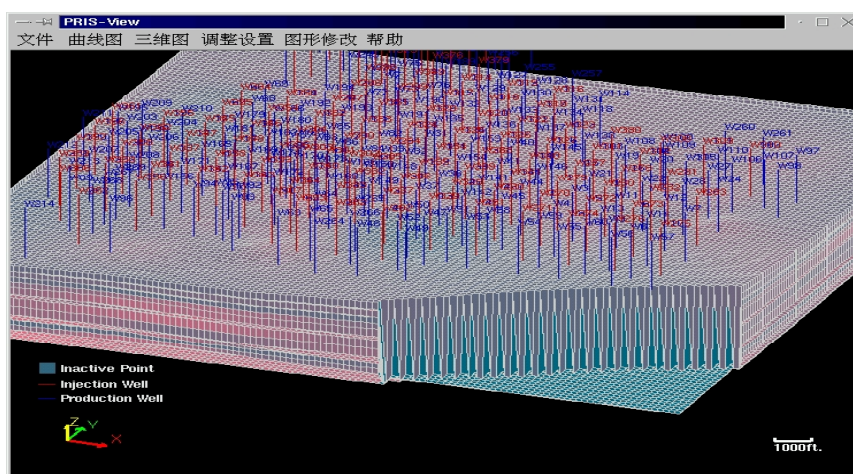


图 1. 实例 1 网格剖分及井位信息图

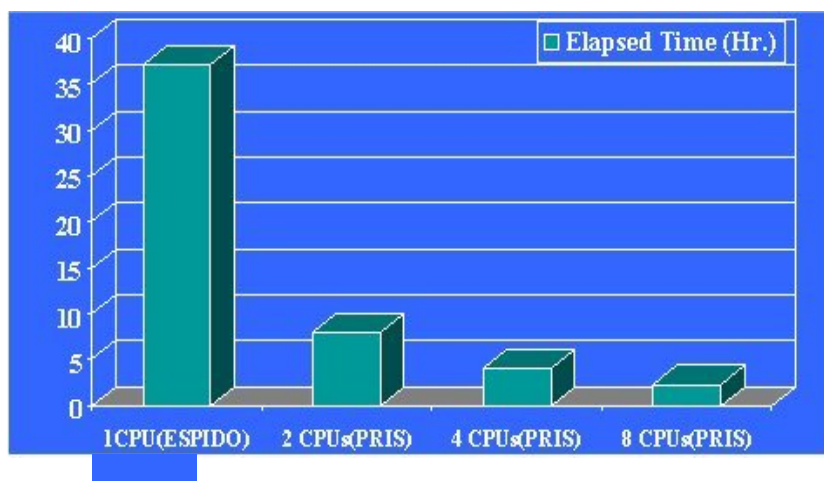
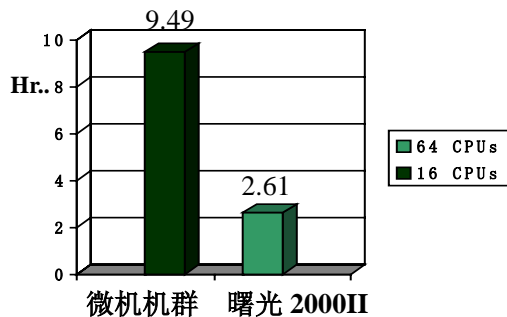


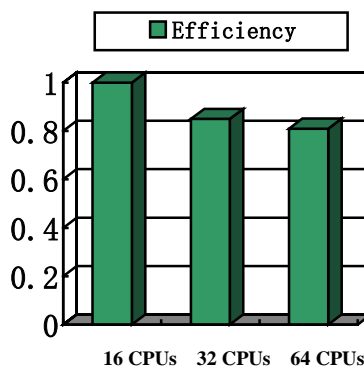
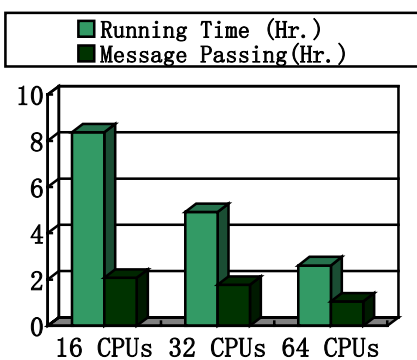
图 2. 实例 1 在 RDCPS-I 上的并行解法器 PRIS 计算时间(小时)

实例 2

- ✓ 175 x 176 x 34 (1,047,200)
- ✓ BLK
- ✓ 35 井
- ✓ 1 岩石类型
- ✓ 拟合时间: 13.5 年
(1960.5 --- 1973.12)

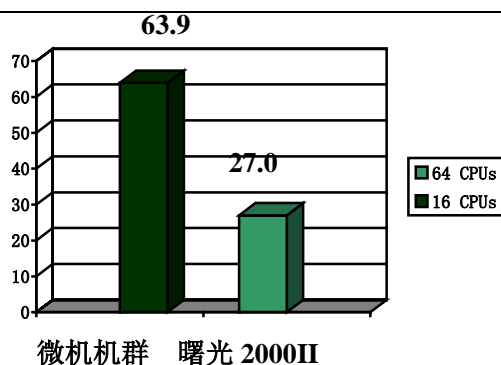


曙光 2000-II 上结果



实例 3

- ✓ 199 x 87 x 67 (1,159,971)
- ✓ BLK
- ✓ 291 井
- ✓ 6 岩石类型
- ✓ 拟合时间: 31.5 年
(1966.11 --- 1998.6)



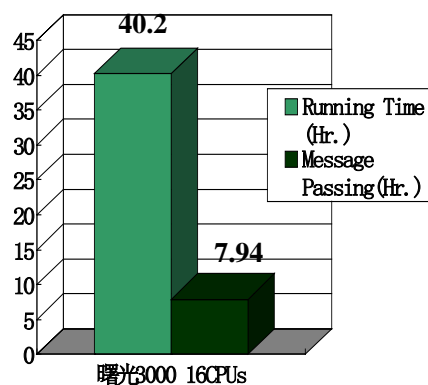
曙光 3000 上结果

NO. CPU	运行时间(hr.)	通讯时间 (hr.)
16	11.9	3.99

百万网格点，模拟 20-30 年历史，夕发朝至。

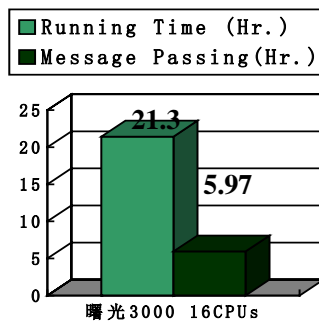
实例 4-1

- ✓ 199 x 87 x 67 (1,159,971)
- ✓ BLK
- ✓ 291 井
- ✓ 6 岩石类型
- ✓ 拟合时间：
14 年(1966.11 — 1981.1)、基础井网
- ✓ 预测时间：119 年(1981.1 — 2100.1)
- ✓ 最终全区综合含水：92.9%



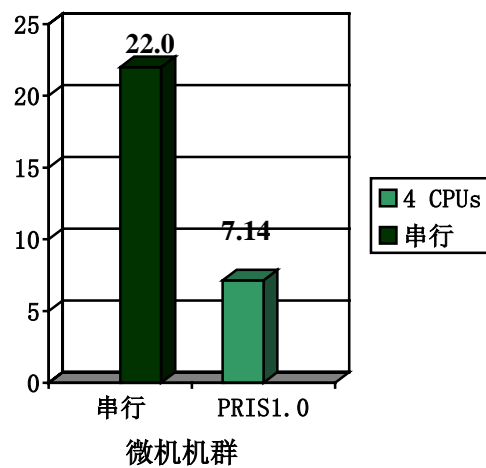
实例 4-2

- ✓ 199 x 87 x 67 (1,159,971)
- ✓ BLK, 6 岩石类型, 291 井
- ✓ 拟合时间：
27 年(1966.11 --- 1994.1)、一
次井网
- ✓ 预测时间：106 年 (1994.1 ---
2100.1)
- ✓ 最终全区综合含水：96.1%



实例 5

- ✓ 100 x 100 x 22 (220,000)
- ✓ BLK
- ✓ 109 井
- ✓ 1 岩石类型
- ✓ 10 年



三、PRIS 下一个五年研发计划

目前我国石油部门所使用的高性能计算机和油藏模拟软件基本上依赖于进口，所以我们科研部门与中国石油化工股份有限公司进一步加强合作，强强联合就显得尤为迫切。该项目研究成果在油田开发部门推广应用后，所能产生的经济效益和社会效益将是多方面的：

- 促进微机机群在油田开发中的应用，为油田单元管理提供良好的软硬件平台。
- 提高国家石油资源的利用率。
- 能为国家节省大量投资（包括外汇）。
- 对放宽西方国家对我国在高性能计算机进口的限制，以及我国企业在对外合作中争取主动权等具有重要意义。

PRIS 作为一个面向国民经济的工业应用软件，可持续的发展尤为重要。本中心在下一个五年研发计划为：

- 从理论与应用两个方面，进一步研究并行计算方法和并行软件技术。重点解决高效通讯、并行 I/O、大文件读写的处理、高效并行迭代方法及高效并行预条件子的研究、构造与实现等；
- 油藏数值软件外围部分的并行化，油藏数值模拟特殊功能模块的有效并行处理，面向对象技术在并行软件中的应用，高速后处理器的开发等方面。
- 构建适用于快速求解超大规模油藏数值模拟计算的高效 Linux 微机

机群。

- 通过对并行计算方法和计算机应用技术的研究，为解决超大规模油藏数值模拟计算问题提供最优性能价格比的解决方案。
- 与石油部门的强强联合，最终实现用自主开发的油藏数值模拟并行软件取代国外进口软件，应用于实际油田的开发生产过程。
- 目前我们正在提高百万量级网格点的油藏数值模拟问题的求解效率，并取得了大的进展。在 64 个处理器的微机机群（配备 Myrinet 或 SCI 网络）上，百万网格点的黑油模型一般可在 2~6 个小时之内完成 30 年的历史拟合，在 128 个处理器上，百万网格点的模拟可压缩在 1~3 个小时内完成。目前由国内油田所提供的百万网格点的黑油模型均在 3 个小时内完成了整体模拟。
- 我们中心致力于同国内三大石油公司进行多方位的技术合作、技术研究和技术开发。作为国家提供支持的国立研究所，我们愿意提供我们的并行计算技术、并行求解技术和并行实现技术，与石油公司合作，推出基于油田实际的高效的并行油藏数值模拟软件或油藏数值模拟一体化系统。
- 我们正致力于研究千万网格点量级的油藏数值模拟问题的高效求解技术，针对具有高性能价格比的大规模微机机群，计划在 24 小时之内能够有效地求解来自于油田的实际数据。目前，我们已经与中海油公司有效地展开了这方面的技术合作。

四. 超大规模油藏数值模拟并行计算对高性能计算机的需求

如何高效地开采、利用好本国及世界的各类自然资源，尤其是石油等一类不可再生资源，反映了一个国家的综合国力水平，并最终将影响到一个国家的国际地位、国家安全和可持续发展。我国内陆的部分油田经过几十年的开采，有些已进入高含水、储块分散的阶段；同时，由于近十年来，地质勘探技术的不断提高，地质模型描述也越来越精细。如何规划好油田的二次开发，如何合理制定新油田的开采方案，这些都需要对地下油藏的分布进行大规模的数值模拟。

油藏数值模拟是一项动态数字仿真技术，是高性能计算（包括计算机和应用软件）在石油工业中的一项极为重要的应用，目前已成为油气田开发中不可缺少和不可替代的工具。油藏数值模拟是通过数值求解大型非线性偏微分方程组来模拟油田开发史，进而描述地下流体的分布。对于一个已开发油气田可以描述地下剩余原油的分布。如果对地下剩余油描述不清，不但提不出合适的提高采收率的工艺手段，即使采取了措施，其效果很可能不理想，甚至完全失败。因此精确描述地下剩余油的分布是各类提高采收率方法的基础和前提，而超大规模的油藏模拟技术又是描述剩余油分布的关键技术。

近年来，随着储层地质建模技术的高速发展，综合了地震、测井、地质和油藏等众多学科的储层地质模型其规模已达到了几百万甚至数千万个网格节点，基本达到了足够精细的程度。然而，由于油田应用部门在高性能计算机、高效率并行软件使用上的滞后，由于生产实际对油藏数值模拟计算时效性的追求，目前油藏数值模拟的规模还只在 10 万~30 万个网格节点水平，远远达不到精细的程度。正是由于受计算机能力的制约，高精度的地质模型必须进行粗

化处理，才能用于油藏模拟，这导致大量地质信息的损失，达不到精细描述油藏流体分布的目的，使油田中后期的开发调整方案及实施效果受到很大影响。

为了解决超大规模油藏模拟计算这样一个具有重大现实意义的问题，国际上一致认为应同时从计算机硬件和应用软件两方面入手，即拥有大规模并行计算机和适应此类计算机的高效并行油藏模拟应用软件。

具有工业化应用价值的油藏数值模拟并行软件应当具有什么样的时效性要求呢？

我们知道，为了精确描述地下剩余油的分布，油藏工程师需要通过对生产过程的历史拟合，估计、评价并选取油藏模型拟合效果最佳的特性参数。这实际上是油藏数值模拟的“逆过程”，它最终要寻找所有油藏特性参数（渗透率、空隙度、压缩率、油藏边界等）的最佳逼近，回归分析是最有效、最常用的技术。经验表明，一次成功的回归分析需要进行 15~50 次相同规模的油藏数值模拟计算。因此，每次的模拟计算不能耗时太长。

石油界的多名技术专家指出，一次模拟计算耗时三天以上是不能容忍的，耗时一至三天的模拟计算只能用于研究人员的测试分析，夕发朝至（16 小时以内）的模拟计算基本可以满足需求，朝发夕至（8 小时以内）的模拟计算才真正具有工业化的应用价值。

明显地，我们需要从高性能计算机、高效率并行软件两个方面着手去提高油藏数值模拟计算的效率。

高性能计算机是价格在 10 万元以上的服务器。它跟微机与 PC 服务器相比而言具有性能、功能方面的优势。从应用的角度来划分，高性能计算机的中高档系统可分为两种，一种是超级计算机，主要用于科学工程计算及专门设计，如 Cray T3E；另一种是超级服务器，可用来支持计算、事务处理、数据库应

用、网络应用与服务，如 IBM 的 SP。高性能计算机的发展趋势主要表现在网络化、体系结构主流化、开放和标准化、应用的多样化等方面。在体系结构上，高性能计算机市场的低档产品主要是 SMP（对称多处理机），中档产品是 SMP、CC-NUMA（支持缓存一致性的非均匀内存访问）和机群，高档产品则将采用 SMP 或 CC-NUMA 节点的机群。值得注意的是，所有厂家规划的高档系统都是机群。

在组成计算机系统的部件出现标准化、商品化趋势的情况下，研制高性能计算机系统的门槛大大降低了，这集中表现为 Beowulf 系统的出现。Beowulf 系统是指：将大量的商品化硬件和开放源码软件组装成“个人超级计算机”，然后根据需求，开发少量的能够满足自己工作需求的脚本代码和管理、调度程序。其主要特点是，它主要由少数用户使用，用户可以象对待 PC 那样对它进行管理。大多数的 Beowulf 系统是由使用者、企业以微机（一般使用 Intel 架构的 PC 服务器）机群的形式搭建，因此，人们可以在短时间内做出万亿次（TFLOPS）量级的计算机系统。Beowulf 系统对宣传并行计算思想、拓宽并行计算应用领域、提升基础研究科研平台、培训用户等方面有巨大的优势。它的最大特点是廉价和 FLOPS 密集。

随着计算机技术、网络通讯技术、并行软件技术的不断发展，采用高性能价格比的 Beowulf 系统 - Linux 微机机群，结合我国自主开发的并行油藏数值模拟软件，解决我国石油开采中的超大规模油藏数值模拟问题成为可能。Linux 微机机群具有以下五种优势：功能强大且可靠；成本低；有效的跨平台运行；可保持 Unix 的投资价值并延长 Unix 软件的使用寿命；前端机可使用 Windows 系列的操作系统，充分利用用户 Windows 下的资源和办公软件。从

1998 年 Amerada Hess 公司首次利用 Linux 机群处理大规模三维叠前深度偏移问题以来, Conoco、Shell、WesternGeo、CGG 等石油巨头纷纷加入到 Linux 机群的应用行列里来。

毫无疑问, 高效率的油藏数值模拟并行软件是提高模拟计算效率的关键因素。

油藏数值模拟并行软件的开发和应用也是上个世纪末开始的。1997 年 Landmark 公司宣布了并行 VIP 油藏数值模拟软件。随后几年, GeoQuest 公司推出了 Eclipse100、Eclipse300 的并行版本软件。1998 年, Argonne 国家实验室和 Texas 大学利用 IBM SP 成功地试算了 400 万网格点、3200 万个未知数的超大规模油藏数值模拟问题。

在国内, 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院于 2000 年左右引进了 Orogen2000 高性能计算机及一套 Parallel VIP 2000 商业版并行软件, 该系统上运行一次 116 万网格点规模、300 口井、30 年拟合历史的数据, 需要 70 小时以上; 其它石油公司也陆续引进了几套 Parallel VIP、Parallel 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, 引进的软硬件系统难以有效地进行百万量级网格点的数值模拟; 中国科学院软件所并行软件中心研究开发了一套油藏数值模拟并行软件 PRIS, 并有一定的后处理并行显示能力, 在可计算能力和计算效率方面, PRIS 有着其它商业并行软件不可比拟的独特优势。

2000 年在国家八六三项目的支持下, 通过与大庆勘探开发研究院的合作,

PRIS V1.1 在 Linux 微机机群 (16 P-III 500 + Ethernet 100Mb) 上完成了 116 万网格点规模、300 口井、30 年拟合历史的数据的并行模拟, 一次模拟历时 64 小时, 与大庆引进的国外商业并行机、商业并行软件的计算性能相当; 同年, PRIS V1.1 在曙光 3000 高性能并行机上模拟同样的数据, 一次模拟仅需要 13.7 小时; 2001 年, PRIS V2.0 在 Linux 微机机群 (16 P-III 500 + Ethernet 100Mb) 上模拟一次 116 万网格点规模的相同数据, 历时不超过 27 小时; 2002 年, PRIS V2.1 在 Linux 微机机群 (16 Xeon 2G + Myrinet 2000) 上模拟一次同样的数据, 仅仅需要 6 个小时即可完成。这说明, 经过对大规模数值模拟非线性问题并行求解技术的研究和开发, PRIS 在并行计算能力上有了质的飞跃。

油藏数值模拟并行计算对高性能计算机的需求是全方位的。以中科院软件所的并行软件运行大庆油田的 116 万网格点、291 口井、31.5 年历史拟合的数据为例, 在 LSSC-II 万亿次量级的 Linux 微机机群 (256 结点, 512 Xeon 2G CPU + 1G Memory/CPU, Myrinet 2000) 上, 使用 128 CPU 进行模拟, 需要消耗的时钟时间为 0.77 小时 (单结点单进程情形) 或 0.87 小时 (单结点双进程情形), 每个处理器使用的内存不超过 50MB, 程序运行一次所发生的 I/O 总量约为 40GB, 其中读取文件的总量约占 500MB。就并行计算领域的科学研究而言, 百万量级的数据模拟, 需要的硬盘总量约为 150GB; 如果百万量级的数据用于生产实际中, 需要为可视化程序提供大量数据, 需要的硬盘总量至少为 300GB。

根据油藏数值模拟的时效性和问题规模的理想需求，我们容易推算出油藏数值模拟计算对高性能计算机的实际需求。地质模型数据的直接精细模拟，需要求解的问题规模为 1G - 3G 网格点，时效性要求整个模拟的时间为 8 小时以内。明显地，进行一次上述规模的油藏数值模拟计算需要消耗的内存总量约为 50GB (1G 规模) 或 150GB (3G 规模)，程序运行一次所发生的 I/O 总量约为 400GB (1G 规模) 或 1200GB (3G 规模)，整个硬盘需求量约为 1500GB (1G 规模) 或 5000GB (3G 规模)，需要参与计算的 CPU 数量至少应为 128 个 (1G 规模) 或 384 个 (3G 规模)，合理的 CPU 使用数量应当是 256 - 1024 个 (1G 规模) 或者 768 - 3072 个 (3G 规模)。

我们以 1G 网格点规模的问题求解为例进行说明。在使用的处理器个数为 128 - 512 的情况下，每个处理器使用的内存约为 500MB - 128MB；400GB 的 I/O 发生量要求该并行计算机不能使用网络文件系统，只能使用并行文件系统；300 口井、30 年的历史拟合数据，模拟一次需要消耗的时钟时间约为 20 - 8 小时。由此可以推算，一次成功的回归分析，平均需要消耗的时钟时间约为 600 - 240 小时。以上数据形象地指出了油藏数值模拟并行计算对高性能计算机系统的巨大需求。

需要指出的是，这些数据是基于一个更为苛刻的前提得到的。该前提是，假定用户拥有一个具有良好可扩展性的油藏数值模拟并行软件；该并行软件对于油藏模拟中的井、井组、集输中心等应当有并行的、有效的处理方法，整个处理过程不应该引入过多的全局通讯；该并行软件的全局通讯量与计算量相比，应当占有很小的比例；该并行软件的非线性问题求解系统应当能够有效地、稳定地、可扩展地解决不同时间步形成的成百上千个差分离散问题；该并行软件

应当拥有一套强大的、自适应的预处理系统和稳定的线性方程求解系统，能够有效地求解涉及到的数千乃至上万个线性方程组。中科院软件所推出的油藏模拟并行软件系统 PRIS V2.1 的主要技术特色，就是比较有效地解决了油藏模拟并行软件的有效计算和可扩展性问题，并且，有关的技术人员已经将“有效地解决上千个处理器上、千万网格点规模油藏模拟问题”纳入有关科研项目的规划进度中。

随着世界经济全球化进程的不断加快，国内石油公司在与国外公司的合作开采过程中，利用国产软件进行开发前期的方案论证，无论从信息安全的角度还是从增强国有企业核心竞争力的角度来讲，都是最优的选择。

如何把千亿次微机机群与油藏数值模拟并行软件有效集成为大规模油藏数值模拟软硬件一体化的并行模拟系统已成为一个热门话题。针对超大规模油藏数值模拟问题，Linux 微机机群与中科院软件所的高性能并行数模软件的结合，无疑是目前可以在石油行业应用推广的、最优性能价格比的、最高效率的解决方案。国外商业并行机及商业并行软件一直对我国采取技术壁垒和高价政策（一套并行数模软件往往需要数十万美金），基于此，充分发挥中国科学院高性能计算和并行软件研制开发的能力，形成并推广具有高科技含量的国内数值模拟并行软件，对于维护国家利益，提高我国石油开采企业的核心竞争力都将起到积极的作用。

中国海洋石油总公司根据自身生产开发的需要，提出在八小时左右完成百万网格点的油藏模拟计算问题的需求。目前中海石油总公司安装的若干套国外商业并行软件均无法满足该需求，中科院软件所提出的“微机机群+并行软件”的一体化方案完全能够在时效性上满足中海石油总公司的要求。正因为如此，在中国海洋石油总公司与中国科学院技术合作项目《海洋石油开发若干重大科学技术问题研究》中，设立了《海洋油气开发中的高新技术专项应用研究-超大

规模油气藏数值模拟并行计算技术》专题，以中国科学院软件所为课题承担单位，基于 Linux 微机机群，在 2003 年完成百万量级网格点、20 年历史拟合的实际数据的有效模拟计算，同时进行千万量级网格点油藏数值模拟问题并行计算的理论、算法、技术、软件、软硬件系统的分析和研究。该项目的完成，无疑将对国内大规模并行计算技术在产业部门的推广应用、对国内油藏数值模拟的规模、效率的提升等产生重要的影响。

中国石油化工股份有限公司则实施了一系列的高性能计算机应用项目，依托国产的高性能计算机，引进或自主开发主要软件；同时，高层领导和技术专家非常关注 Linux 微机机群上的油藏数值模拟并行计算问题，计划在“十五”期间建立国产化微机机群并行油藏数值模拟技术体系。中石化已经与中科院软件所达成意向，计划利用软件所在油藏数模软件大规模并行计算技术方面的优势和对微机机群软硬件一体化系统的体会，构建具有中石化特色的集油藏勘探、数据库、油藏模拟等为一体的油田单元管理系统。

中国石油天然气总公司下属的大庆油田有限责任公司也走了一条类似的道路。中国科学院软件所与大庆勘探开发研究院在国家八六三计划项目上的有效合作，使得大庆油田意识到了微机机群上的并行计算的强大威力和应用前景。基于该项目的研究成果，大庆勘探开发研究院依托自己的科研力量，形成了自己的油藏模拟并行软件，并以“微机机群+国产并行软件”模式推广到了大庆油田所属的若干采油厂。

综观国内三大石油公司对油藏数值模拟并行计算技术的关注和参与，我们深刻地体会到，在国内应用市场上，国产数模并行软件的存在与发展，对国外商业并行软件在国内生产部门的应用，起到了有益的、不可缺少的补充作用。尽管在前后处理界面设计、地质模型数据库与数模软件的无缝连接、研发规模及资金配备等方面，我国的软件有较大欠缺，但是，在关键的并行计算技术、在特定的功能开发技术、在人员成本等方面，国内的研发单位有着不可比拟的优

势，如何充分发挥国内优势，整和国内的力量，形成真正强大的国产一体化软件，是国内三大石油公司必须面对和需要解决的问题。考虑到我国油藏模拟应用单位数百家之多，国产数模并行软件的应用市场是广阔的，应用成功所产生的社会效益和经济效益将是巨大的。