非结构网格油藏数值模拟
间断有限元算法及并行程序研究

王昆

摘　要

本文研究油藏数值模拟中多孔介质多相渗流问题的间断有限元算法及并行计算程序。

在油气资源开发中，油藏数值模拟发挥着不可替代的作用。油藏数值模拟通过用数值方法求解描述地层中非均介质多孔多相流体流动规律的偏微分方程组，得到油气资源随着开采过程在地层中的精确分布、流动和变化情况，为油气资源的开发提供定量的模拟、指导和预测。目前，中国科学院国家数学与交叉科学研究中心正在实施一个能源专项课题，其研究内容之一是发展非结构网格上油藏数值模拟的核心算法和软件，本文的工作便是围绕这一内容开展的。

间断有限元方法由于其具有适用于非结构网格、适合求解强间断问题、能够保证局部守恒性、容易实现自适应计算等，在许多复杂计算问题，特别是复杂流动问题中得到了广泛的应用。本文的主要研究内容是针对油藏数值模拟问题设计非结构网格上求解三维多孔介质多相渗流方程的间断有限元算法，同时扩展我们正在发展的并行有限元软件平台 PHG (Parallel Hierarchical Grid) 使之能够方便地支撑并行间断有限元程序的开发，以此为基础发展多孔介质多相渗流问题的并行间断有限元计算程序。本文完成的主要工作如下：

- 提出了在非结构四面体网格上求解三维多孔介质多相渗流问题的间断有限元算法，通过引入全隐式离散、使用限制器和迎风格式等，有效克服了非物理解和数值振荡、扩大了时间步长。对于离散问题产生的线性代数方程组的求解，我们根据不同问题的特性分别采用代数多重网格以及加性 Schwarz 方法结合串行稀疏直接求解器作为并行预条件子，取得了较好的效果。
- 扩展了 PHG 平台，完善了其对间断有限元程序的支撑。我们在 PHG 平台中实现了一个 `GHOST` 数据结构和相关支撑函数，通过它封装了间断有限元并行实现中所需要的常用通信，从而大大方便了间断有限元方算法在 PHG 平台上的实现，同时保证了并行计算的效率。
- 基于 PHG 平台，实现了一个油藏数值模拟间断有限元并行计算程序，完成了一批包括单相流问题、油水两相流问题和黑油模型的算例，通过这些算例验证了程序和算法的正确性，并考察了并行程序的可扩展性。

关键词: 大规模并行计算，间断有限元方法，油藏数值模拟，单相流，油水两相流，黑油模型，PHG 平台