

基于 HLLC 的七方程可压缩两相流模型数值解法及其 GPU 计算

梁姗

摘要

基于体积分数的可压缩多相流模型是数值模拟多介质流和多相流问题的一种重要方法，它舍弃了界面变化的细节，只用体积分数的的大梯度来间接反映物质界面。这种模型对于分层流、自由表面流、以及流体间有掺混或离析的问题均可以很好的模拟。

本文针对 Saurel 和 Abgrall 提出的两速度两压力的七方程可压缩多相流模型，改进了其数值解法并应用于模拟可压缩多介质流动问题。在 Saurel 等的算子分裂法基础上，本文根据 Abgrall 提出的多相流系统应满足速度和压力的均匀性不随时间改变的思想，推导了建立在 HLLC 格式基础上的非守恒项离散格式以及体积分数发展方程的迎风格式。进一步，通过改变分裂步顺序，构造了稳健的结合算子分裂的三阶 TVD Runge-Kutta 方法。另外，通过特征分解获得了适用于该计算模型的无反射边界条件。在对高密度比高压比气液两相流的数值算例中可以看到，本文的方法在计算精度和稳健性上都有一定改进效果。

为了大规模问题的高效计算，本文将上述数值方法用 CUDA 编程模式在多 GPU 设备上实施并行计算。首先从一个网格点对应一个 GPU 线程的思想出发，设计合理的数据结构实现 GPU 全局存储器的高带宽访问，通过原子操作、计数器等手段成功地实现 block 之间同步，从而保障了在单 GPU 上的高效数值求解。相对于 CPU 串行程序，我们的单个 GPU 运算获得了 31 倍以上的加速。其次，通过对计算问题进行区域分解，将子区域的计算映射到不同的 GPU 上进行。在单结点多 GPU 的服务器上分别采用 Pthread 线程与 MPI 进程两种方式进行控制：Pthread 控制方式是将一个 GPU 与一个 Pthread 线程绑定，线程间通过条件子实现同步，并且利用加锁操作实现共享信息的互斥访问；MPI 控制方式中，进程间的同步由 MPI 的栅栏函数实现，操作相对简单。我们在有 8 个 GPU (Fermi C2075) 的服务器上的计算结果表明，随着 GPU 数量的增加，单个 GPU 的效率会有所降低，但是程序整体的运算速度仍保持线性的增长。