

# 海洋数值模式并行化研究综述\*

方民权<sup>12</sup>, 张卫民<sup>1</sup>, 方建滨<sup>2</sup>

(1 国防科学技术大学海洋科学与工程研究院, 长沙, 410073)

(2 国防科学技术大学计算机学院, 长沙, 410073)

**摘要:** 海洋占地球表面的 71%, 作为地球表面最大的储热体, 与大气的相互作用对气候的变化有重大的影响, 是地球气候变化的重要因素之一。因此, 海洋研究是气候变化研究的重要组成部分。近年来, 海洋预报变得越来越重要。海浪和水流情况决定着埋雷的程度, 影响商业和军事活动, 海洋灾害将直接导致人口与财富的损失, 海洋研究至关重要。对于紧急规划或灾后救援人员来说, 对海岸洪水提供准确及时预报就显得尤为重要。目前很多国家都在海洋预报领域投入巨资展开研究。

目前, 研究海洋主要依靠观测、物理实验模拟、理论分析和数值模拟四个手段。海洋数值模拟基于物理原理, 以计算机为手段, 通过数值计算对特定的海洋物理和工程问题进行研究。海洋数值模拟的出现使得海洋科学成为一个可重复、可实验的科学。

第一个三维海洋环流模式于 20 世纪 60 年代末提出, 海洋环流模式是研究海洋变化、动力、热力过程的有力手段之一。目前诸多海洋环流模式各具特色, 能满足不同需求, 如普林斯顿海洋模式 (Princeton Ocean Model, POM), 有限体积近岸海洋数值模型 (Finite Volume Coastal Ocean Model, FVCOM), 并行海洋模式 (Parallel Ocean Program, POP)、混合坐标海洋模式 (HYbird Coordinate Ocean Model, HYCOM) 和区域海洋模式系统 (Regional Ocean Modeling System, ROMS) 等。

随着海洋和气候变化研究的不断深入, 海洋模式正逐步朝着更高分辨率、更多物理过程的方向发展。已有研究结果表明水平分辨率提高到涡分辨率之后, 海洋环流模式的模拟能力将有很大改善。海洋数值模式按水平分辨率不同分为四类, 分别为粗分辨率海洋数值模式、中等分辨率海洋数值模式、涡相容分辨率海洋数值模式和涡分辨率海洋数值模式。其中涡分辨率海洋数值模式的水平分辨率一般不低于  $1/6^\circ$ 。高性能计算机的更新换代、并行算法的设计改进, 为涡分辨率海洋数值模式的建立奠定了技术基础。

随着海洋数值模式分辨率的提高, 对计算资源的需求和计算量呈几何增长。一般水平分辨率每升高一倍, 计算量增长 8-10 倍; 并且, 随着分辨率的提高, 需要增加原来次网格无法描述的物理过程, 且新的次网格参数化过程需要重新调整, 这进一步提高了对计算量和计算能力的要求。Mozdzyński 预测 2030 年预报模式的网格精度将达到 2.5km, 所需要的计算资源达到 E 级。

随着高性能计算的发展, 超级计算机规模越来越大、节点数量越来越多, 类似 CPU/GPU 和 CPU/MIC 等异构平台受到越来越多的关注, 成为 E 级计算的热门使能候选。然而, 单纯超级计算机硬件上的发展很难带来海洋模式模拟性能的成比例提升, 这往往需要进行复杂的代码移植、性能优化工作, 才能在相应计算平台上获得令人满意的性能。

在海洋模式并行化方面, 已有大量研究成果: 李冬等通过对 POM 串程序的数据流向分析, 讨论了 POM 模式并行化所涉及的关键算法和主要技术问题, 并基于消息传递接口 (MPI) 开发了 POM 模式的并行版本。Cowles 利用 MPI 消息传递接口对 FVCOM 进行了并行化改造。张天刚等基于 T63 全球海气耦合业务预报模式, 提出了基于纬圈并行的并行方案, 并对 I/O 作了比较有效的优化, 在神威并行机 8 个处理器上取得了较好

---

\*作者简介: 方民权(1989-): 博士研究生, 就读于国防科学技术大学, 研究方向是高性能计算、异构计算, E-mail: fmq@hpc6.com。  
基金项目: 国家自然科学基金项目 (41375113), 湖南省研究生创新资助项目 (CX2015B030), 国防科学技术大学计算机学院联合博导组项目 (面向异构平台的海洋预报软件可移植性技术研究)

的效果。宋倩等利用并行程序分析软件 TAU (Tuning and Analysis Utilities), 对基于 MPI 的海洋环流模式 FVCOM 2.6 版本进行并行性能分析。孙卓毅结合 MPI 和 Fortran 实现了 MASNUM 模式的并行化, 并分析了并行程序性能。陈宇澍利用软件框架实现了 LICOM1.0 海洋模式和 IAP4.0 大气模式的海气耦合模式的并行计算。季旭等针对地球系统模式的 I/O 问题, 以代表性的海洋环流模式 LICOM2 为研究对象, 全面分析了地球系统模式的典型 I/O 特点, 研究通用的高并发 I/O 技术。张理论等研究了中国科学院大气物理研究所大气科学与地球物理实验室 (LASG/IAP) 的全球海洋环流模式的可扩展并行性, 实现了基于一维纬向剖分的分布式存储和共享存储并行计算。张理论等在四核至强集群上, 研究分析 POP 模式中计算局部块技术和平衡并行数据剖分及其对模式性能的影响; 针对模式的通信性能瓶颈, 采用聚合通信优化技术。郭松等采用 CUDA Fortran 编程模型将 POP 模式移植到 GPU 平台上, 获得 8.47 倍加速效果。

海洋模式研究在 21 世纪非常重要, 由于网格细化、分辨率提高, 海洋模拟所需要的计算性能要求越来越高。随着高性能计算、超级计算机的发展, 特别是近年来 CPU/GPU、CPU/MIC 异构系统的异军突起, 使得 E 级计算成为可能。要充分利用海洋模拟在异构计算平台上的性能, 必须进行代码移植和性能优化两项工作。因此下一步工作将针对某经典海洋模式进行在异构平台上的移植和优化工作。

**关键词:** 海洋数值模式, 并行计算, POM, FVCOM, POP, HYCOM