

基于 CUDA 的多岛遗传算法可控源电磁反演研究

尤淼，葛诚

安徽省勘查技术院，安徽 合肥 230031

DOI: 10.61369/TACS.2025050060

摘要：为提升可控源电磁数据反演的计算效率与全局搜索能力，本文提出一种基于 CUDA 并行加速的多岛进化算法。为适应 GPU 的硬件架构，将整个种群划分为多个独立演化的子种群，并在 GPU 上进行并行计算，可显著提升种群初始化、适应度评估和进化操作等关键环节的运算效率。模型测试结果表明，该方法在计算效率方面具有显著优势，相较于传统 CPU 串行实现，反演速度提升可达数百倍。本研究为使用 GPU 进行地球物理非线性反演计算提供了一种新的思路。

关键词：可控源电磁法；非线性反演；多岛遗传算法；CUDA 并行计算

CUDA-Based Multi-Island Genetic Algorithm for Controlled-Source Electromagnetic Inversion

You Miao, Ge Cheng

Geological Exploration Technology Institute of Anhui Province, Hefei, Anhui 230031

Abstract : To improve the computational efficiency and global search capability of controlled-source electromagnetic data inversion, this study proposes a CUDA-based parallel multi-island evolutionary algorithm. To leverage the GPU hardware architecture, the entire population is divided into multiple independently evolving subpopulations, which are computed in parallel on the GPU. This approach significantly accelerates key processes such as population initialization, fitness evaluation, and evolutionary operations. Model tests demonstrate that the proposed method offers substantial improvements in computational efficiency, with inversion speed increased by several hundred times compared to traditional CPU-based serial implementations. This study provides a novel approach for applying GPU computing to nonlinear geophysical inversion problems.

Keywords : controlled-source electromagnetic method; multi-island genetic algorithm; nonlinear inversion; CUDA parallel computing

引言

可控源电磁法 (Controlled-Source Electromagnetic Method, CSEM) 是一种人工源电磁勘探技术，通过在地表布设人工电磁场源，观测地下介质对电磁波的响应，通过反演计算获取地下电性结构。该方法具有施工效率高、浅部分分辨率良好等特点，近年来已广泛应用于油气、矿产、海洋等勘探领域^[1]。

CSEM 反演是一个高度非线性的数学问题，常规的反演方法如线性迭代法往往容易陷入局部最优，难以获得全局最优解。为此，近年来多种非线性算法被引入到电磁反演领域，其中遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 作为一种模拟自然界基因遗传系统的算法，因其较强的全局搜索能力受到广泛关注^[2,3]，该算法通过选择、交叉和重组等操作，逐代优化种群个体，适用于非线性、无需梯度信息的问题，适合解决地球物理中的非线性反演问题^[4,5]，在可控源电磁数据反演中也有应用^[6]。传统遗传算法在大规模反演计算中效率较低，但算法结构适合并行化^[7]。因此，本文结合 CUDA 并行计算架构，提出一种多岛进化策略的并行遗传算法 CSEM 反演，旨在保证反演精度的同时大幅提升计算效率，为 CSEM 数据的快速、准确反演提供有效途径。

一、方法原理

位、长度、发射电流、发射频率、测点方位、层状大地模型厚度和电阻率，可计算任意位置地表测点的电场 E 和磁场 H 分量：

(一) 可控源电磁正演

CSEM 正演为非线性问题，已知地表线源频率域电磁场的方

$$(E, H) = F(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n, h_1, h_2, \dots, h_{n-1}, x_0, y_0, x_p, y_p, L, I, f)$$

其中， F 为正演算子， n 为地层数， $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 各层的真实电

阻率, h_1, h_2, \dots, h_{n-1} 为各层厚度, 最下层厚度 h_n 为无穷大, L 为发射源长度, I 为发射电流, x_0, y_0 为发射源中心点坐标, x_p, y_p 为测点坐标, f 为频率。

可控源电磁正演的输入为正演算子的各参数, 输出结果为电场 E 和磁场 H 分量。反演即寻找最优的地下电阻率结构模型, 使其尽可能拟合地面观测到的电磁场数据。反演计算的目的是使得由电磁场观测值 (obs) 和计算值 (cal) 差异的 L2 范数构成的目标函数 OF 达到最小^[8]:

$$OF = \|E^{obs} - E^{cal}\|^2 + \|H^{obs} - H^{cal}\|^2$$

(二) 多岛遗传算法反演

遗传算法是一种全局优化方法, 对整个求解空间进行全局搜索寻找最优解。首先, 随机初始化一个包含许多个体的种群。单一个体都有自己的染色体, 即“基因”作为输入参数。随后, 通过对基因的选择、交叉和变异等操作, 进行若干次种群迭代后, 将产生一个包含最优基因的个体, 该个体的基因即代表反演问题的最优解。

遗传算法的执行过程中, 个体的进化过程彼此独立, 这意味着选择、交叉和变异操作可以并行执行。因此, 本文采用基于 CUDA 的并行计算架构, 在 GPU 上实现并行遗传算法以进行反演求解。GPU 的存储结构包括全局内存、本地内存、共享内存、寄存器、常量内存和纹理内存。全局内存和本地内存虽然容量大, 但数据 I/O 速度较慢, 而如寄存器等其他内存容量较小但 I/O 速度极快^[9]。GPU 可通过线程 (thread) 进行并行运算, 这些线程被组织成网格和块的结构, 以掩盖内存延迟。在硬件层面, 每个块分配给一个流式多处理器, 每个线程则运行在该块中的流处理器上, 为匹配该架构, 本研究采用多岛并行遗传算法^[10]。

在 GA 反演过程中, 整个种群被划分为若干等大小岛屿 (种群), 个体的基因为地下模型中各层厚度和电阻率值。如图1所示, 每个个体被映射为一个线程, 而每个种群被映射为一个块。遗传算法中的选择、交叉和变异等操作均在每个种群内部独立进行, 即每个线程或块在计算上是彼此独立、可并行的。由于全局内存的数据 I/O 速度较慢, 因此每个块中的个体信息被存储在共享内存中, 以利用其高速 I/O 性能。而全局内存仅用于岛屿之间以及整个种群之间的信息交换, 例如迁移操作和计算完成时的数据汇总。为提高算法的收敛速度, 每个岛屿中的部分个体会迁移到其相邻的岛屿。在这个过程中, 共享内存与全局内存之间会进行数据交换。

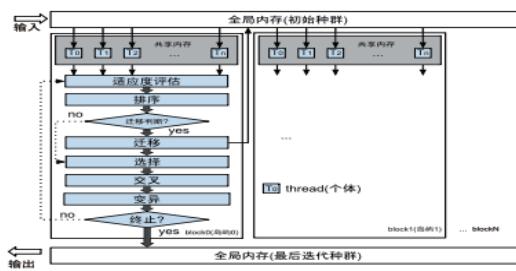


图1 基于 CUDA 架构优化的多岛遗传算法结构

(三) 算法实现

种群: 在基于岛屿的遗传算法中, 每个岛屿拥有各自的种群, 种群内部独立演化。每个个体都有自己的染色体, 该染色体的基因即为正演模型的输入参数。

适应度: 适应度即为目标函数值, 适应度越小的个体表示拟合效果越好。

基因选择: 每两个相邻线程 (个体) 构成一对, 适应度较小者被选为父代之一, 另一个在岛内种群中随机选出。

基因交叉: 对个体指定概率决定是否执行交叉操作, 采用以下方式:

$$O_1 = a \cdot p_1 + (1-a) \cdot p_2$$

$$O_2 = (1-a) \cdot p_1 + a \cdot p_2$$

其中, O_1 和 O_2 表示子代, p_1 和 p_2 表示父代, a 为权重系数。

变异: 变异概率设定为一个常数, 随机选择染色体中的一个基因, 并将其替换为在模型参数范围内的另一个随机值。

迁移: 迁移操作每 10 代执行一次, 相邻岛屿之间交换 10% 最优个体。

二、模型测试

CSEM 频率范围设置为 0.1–10000Hz, 共 30 个频点, 计算五层大地模型 (参数见表1) 的电磁场响应。将模型的电磁场分量数据作为反演输入, 为模拟真实情况, 对数据加入 5% 的高斯白噪音。反演使用 NVIDIA A5000 GPU 和 Intel i7-13700KF@5.4GHz CPU, 总迭代 2000 次。在不同的种群规模和岛屿数量设置下, GPU 相较于 CPU 的加速比从最低的 9.2 倍提升至最高的 1820 倍。随着种群规模和岛屿数量的增加, GPU 在计算效率方面展现出远超 CPU 的优势。

表1列出了在岛屿数量为 128、种群规模为 512 的设置下, GPU 反演结果的模型参数, 结果显示了良好的反演精度。图2展示了适应度随迭代次数的变化趋势。初期迭代阶段, 适应度曲线波动较大, 但随着进化的进行, 曲线逐渐趋于平稳, 表明算法具有良好的收敛性。

表1 模型参数和反演结果

层号	实际厚度 (km)	反演厚度 (km)	实际电阻率 ($\Omega \cdot m$)	反演电阻率 ($\Omega \cdot m$)
1	0.2	0.19	100	104
2	0.5	0.46	500	496
3	1.0	0.97	50	45
4	2.0	2.1	500	560
5	∞	—	1000	1226

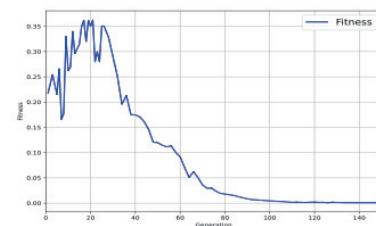


图2 适应度收敛曲线

为研究岛屿数量和种群规模对反演结果的影响，计算了不同组合的最优适应度结果。测试发现，在岛屿数量为128、种群规模为512附近时，适应度最优，而在种群规模少于32时，岛屿数量的增加对精度提升有限，反映出小规模种群基因多样性的不足。实际计算中，可根据选择适当的岛屿数量和种群规模组合，以平衡效率与精度。

三、结论和建议

本文提出了适配CUDA并行架构的多岛遗传算法，用于可控源电磁数据反演。通过在GPU平台上进行并行计算，该方法在保持反演精度的前提下，显著提高了反演计算速度。该方法证明了CUDA平台在地球物理非线性反演计算中的高效性与可行性，同样适合推广至其他类型的地球物理反演问题。

参考文献

- [1] 沈金松, 陈小宏. 海洋油气勘探中可控源电磁探测法(CSEM)的发展与启示 [J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(01):119–127+130+11. DOI:CNKI:SUN:SYDQ.0.2009-01-024.
- [2] 李敏强, 寇纪淞, 林丹, 李书全. 遗传算法的基本理论与应用 [M]. 科学出版社, 2002.
- [3] 边霞, 米良. 遗传算法理论及其应用研究进展 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(07):2425–2429+2434. DOI:CNKI:SUN:JSYJ.0.2010-07-006.
- [4] 赵改善. 求解非线性最优化问题的遗传算法 [J]. 地球物理学进展, 1992, (01):90–97. DOI:CNKI:SUN:DQWJ.0.1992-01-011.
- [5] 杨文采. 地球物理反演的遗传算法 [J]. 石油物探, 1995, (01):116–122. DOI:CNKI:SUN:SYWT.0.1995-01-015.
- [6] M.Ayani, L.MacGregor, and S. Mallick, "Inversion of marine controlled source electromagnetic data using a parallel non-dominated sorting genetic algorithm," Geophys. J. Int., vol.220, no. 2, pp. 1066 – 1077, 2020.
- [7] 郭彤城, 慕春棣. 并行遗传算法的新进展 [J]. 系统工程理论与实践, 2002, (02):15–23+41. DOI:CNKI:SUN:XTLL.0.2002-02-002.
- [8] 汤井田, 任政勇, 化希瑞. 地球物理学中的电磁场正演与反演 [J]. 地球物理学进展, 2007, (04):1181–1194. DOI:CNKI:SUN:DQWJ.0.2007-04-024.
- [9] 邹岩, 杨志义, 张凯龙. CUDA并行程序的内存访问优化技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(12):2504–2506. DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2009.12.033.
- [10] 宋昕, 谷正气, 张清林, 等. 基于多岛遗传算法的湍流模型优化研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(02):23–29. DOI:CNKI:SUN:HNDX.0.2011-02-004.