

超级算力在石油地震勘探数据高效处理中的应用研究

张效斌¹, 吴蔚¹, 刘国鑫²

1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 102206

2. 国才(北京)人力资源服务有限公司, 北京 100010

DOI: 10.61369/TACS.2025070046

摘 要 : 随着油气勘探技术不断升级, 其勘探目标也在向更深层、非常规储层以及复杂构造区域延伸, 使得石油地震勘探数据量指数上升, 处理算法的复杂程度也显著提高, 对计算机的处理精度与效率提出了更高要求。在此背景下, 将超级算力引入石油地震勘探数据高效处理环节成为石油工业发展面临的焦点问题, 本文即通过分析石油地震勘探数据处理面临的挑战, 进而提出超级算力的应用价值, 并由此总结其应用路径, 推动石油地震勘探技术向更高效、更精准、更智能化方向发展, 达到降低勘探风险、提升油气发现效率的效果。

关 键 词 : 超级算力; 石油; 地震; 勘探数据; 高效; 处理

Research on the Application of Supercomputing Power in the Efficient Processing of Petroleum Seismic Exploration Data Zhang

Zhang Xiaobin¹, Wu Wei¹, Liu Guoxin²

1. Petroleum Exploration And Production Research Institute of SINOPEC, Beijing 102206

2. Guocai (Beijing) Human Resources Services Co., Ltd., Beijing 100010

Abstract : With the continuous upgrading of oil and gas exploration technology, exploration targets are extending to deeper layers, unconventional reservoirs, and complex structural areas. This has led to an exponential increase in the volume of petroleum seismic exploration data and a significant rise in the complexity of processing algorithms, placing higher demands on the precision and efficiency of computer processing. Against this background, the introduction of supercomputing power into the efficient processing of petroleum seismic exploration data has become a focal issue in the development of the petroleum industry. This paper analyzes the challenges faced in petroleum seismic exploration data processing, proposes the application value of supercomputing power, and summarizes its application pathways. The research aims to promote the development of petroleum seismic exploration technology toward greater efficiency, higher precision, and increased intelligence, thereby reducing exploration risks and improving the efficiency of oil and gas discovery.

Keywords : supercomputing power; petroleum; seismic; exploration data; high efficiency; processing

引言

石油地震勘探是寻求和发现油气藏的核心技术, 旨在通过人工激发地震波, 通过接受、处理、计算与解释不同地层反射的信号数据, 以此描绘地下地层构造与岩性特征。随着“两宽一高”采集技术普及应用, 单次勘探采集的数据量已经向 PB 级跃升, 而传统计算机无法快速处理和分析大规模的数据量。因此, 在大数据时代背景下, 超级算力成为解决现阶段石油地震勘探数据的重要方法。

一、石油地震勘探数据处理面临的挑战

(一) 数据量庞大

随着采集技术革新, “两宽一高”方案使得石油地震勘探可以同时选择更多的震源点、接收道以及更长的采集时间^[1], 由此使得原始数据爆炸式增长, 数据规模可达数十至数百 PB。同时, 数据维度也在不断扩展, 当前地震数据处理不仅需要处理单次采集的数据量, 还需要将多次采集的数据进行整合分析, 甚至需要将

其纵波与横波信息分别计算, 由此还产生了大量的中间数据, 进一步提高了数据规模。此外, 在数据存储环节, 大规模数据的存储、读取与传输同样对计算机系统提出了更高要求, 传统的存储架构已经无法满足现阶段数据高速读写需求, 导致数据处理时间大大延长。

(二) 处理算法复杂

首先, 石油地震勘探数据处理的算法理论不断优化, 从早期的 Kirchhoff 偏移等射线理论算法向波动方程算法升级, 比如波

动方程偏移 WEM、逆时偏移 RTM 等算法具备更精确的地震波传播模拟能力，但其需要的计算复杂度也极高^[2]。其次，随着迭代反演算法普及应用，传统反演技术实现了迭代优化，比如全波形反演（FWI）不断升级，可以更快更准确地将模拟数据与观测数据匹配，从而高效获取超高精度的模型。但在迭代过程中，其需要通过大量计算提炼模型，由此也使得计算负担显著提高。此外，在人工智能技术引入后，机器学习与深度学习等算法在数据去噪、初至拾取、断层识别等环节发挥了巨大作用，但其必须建立在大型神经网络的支持之上，而这必须以巨大的计算资源为前提。

（三）实时性要求高

油气勘探属于资本密集型活动，钻探开发一口油井有着极高的成本，因此在石油地震勘探环节必须保证勘探决策的时效性，既要获得可靠的地下成像结果，又要加速数据处理时间，以此才能缩短投资周期、降低投资风险。随钻地震与油藏监测对实时性也有较高要求，尤其在随钻 VSP 或生产油田四维地震监测等环节中，其数据处理必须尽量接近实时，以此才能为调整钻井轨迹、完善生产方案提供决策支持^[3]。此外，在激烈的市场竞争下，锁定油气目标的速度更快，才能占据先机。因此高效的数据处理能力也是石油公司的核心竞争力之一。

二、超级算力在石油地震勘探数据处理中的应用价值

（一）强大的计算能力

第一，海量核心并行计算。超级计算机有着大量的计算节点，以国内某超算中心“神威·太湖之光”为例，其单节点配备 40 核 CPU 与 4 块 GPU，基于 MPI 并行编程模型处理 30PB 地震数据时，可将传统服务器需 720 小时完成的叠前时间偏移计算任务，压缩至 48 小时内，实现计算时间维度 15 倍的缩减^[4]。

第二，高性能硬件加速。GPU、TPU 等协处理器的浮点计算能力和内存带宽远高于 CPU，如 NVIDIA A100 GPU 的单精度浮点算力达 19.5 TFLOPS，是传统服务器 CPU 的 8 - 10 倍，在处理 200 万道地震数据的矩阵运算时，可将数据处理效率提升 6 - 8 倍，显著缩短波动方程偏移算法的运行周期。

（二）高效的数据存储与管理

第一，分级存储架构。超算中心采用“高速 SSD+NVM 缓存 + 大容量硬盘”的存储阵列系统，某油田超算平台的 SSD 缓存读写速度达 3.2 GB/s，NVM 缓存带宽突破 8 GB/s，相较传统存储架构，冷数据读取延迟从 120ms 降至 15ms，热数据写入效率提升 12 倍，满足 100PB 级地震数据的高速读写需求^[5]。

第二，并行文件系统。超级算力使用的 Lustre 并行文件系统，在某海上油田地震数据处理项目中，支持 2048 个计算节点同时读写，聚合 I/O 带宽达 1.8 TB/s，相较传统 NFS 文件系统，数据传输效率提升 25 倍，完美适配大规模地震数据的并行处理需求^[6]。

三、超级算力在石油地震勘探数据高效处理中的应用路径

（一）地震数据预处理

1. 去噪处理

第一，传统算法并行化。在超级算力支撑下可以对传统算法进行优化，以此实现去噪处理目标。比如可以通过改造频域滤波、Radon 变换、FK 滤波等方法，借助超算多核同时处理不同地震道数据或不同频率的切片数据，从而快速实现去噪效果。

第二，AI 算法加速。在人工智能视域下，还可以依托深度学习开发如 DnCNN、U-Net 等去噪方法^[7]。在大量样本训练环节，即可利用超算 GPU 集群完成高效化训练，比如将一个地震剖面数据集切片后通过多个 GPU 并行去噪，可以达到更高的效率。

2. 数据插值与重建

第一，高精度算法实现。在石油地震勘探数据的传统插值环节，其主要以压缩感知或 POCS 完成先插值算法计算，但其成本过高且效率不足。运用超算可以建立并行系统同时重建不同空间位置或频率成分，从而可以达到高效恢复因采集缺口造成的数据缺失问题，并为后续的高精度成像提供数据依据。

第二，多维数据重建。基于超算能力支持，石油地震勘探数据重建环节可以同时从多维度完成数据规则化处理，主要通过海量数据分析提取，进而从着炮点、检波点、偏移距、方位角和时间五个维度完成重建任务，既可以改善数据质量，又可以达到宽方位数据处理的目的。

（二）地震成像

1. 叠前深度偏移成像

第一，波动方程 WEM 并行策略。在地震成像环节，“按炮并行”是最常见的并行策略。该方法强调每个计算节点或计算核心独立完成一炮或几炮数据的波场延程和成像计算。但传统的计算系统运行能力有限，并不能达到高效处理数据的目的和效果。而超算系统可以将数千个节点同时用于处理数据，由此可以实现数千炮数据线性化处理的效果，有着鲜明的加速成效。

第二，面向 GPU 的优化。在 GPU 支持下，石油地震勘探数据的成像还可以将 WEM 中的核心波场传播算法转移到 GPU 之上。而超级算力可以将 GPU 大量计算核心同时用于并行计算，可以显著提升其单节点计算性能，从而提升其成像效率与质量^[8]。

2. 逆时偏移成像

第一，计算与内存挑战的解决。在逆时偏移成像中，一方面 RTM 需要存储整个时间步的源波场，另一方面也可能面临着边界重建技术的大量应用，这就使得其对内存与计算有更高的要求。超算可以通过提供大内存节点与高速互联网络等方式，建立多节点协同存储与计算系统，实现大型模型分区设计、不同节点完成不同区域波场模拟任务的效果。

第二，激发振幅成像条件。在追求更高质量成像结果的过程中，RTM 结合激发振幅成像条件可以达到提高振幅保真度的效果。但这会引起计算量指数级增加，必须通过超算平台提供算力，由此才能在大规模生产中高效完成数据处理任务。

（三）地震数据反演

1. 速度模型反演

第一，全波形反演 FWI 的可行性。FWI 是计算密集型的典型模型，超算平台可以满足速度模型反演环节同时采用“按频率并行”和“按炮并行”两种策略，并且可以借助 GPU 集群在短时间内完成工区级高分辨率 FWI 模型反演的任务^[9]。

第二，多参数反演与不确定性量化。在超算支持下，可以实现同步反演纵波速度参数与反演横波速度、密度等参数，同时还可以通过多次反演过程，进一步评估结果的不确定性，由此为钻井决策提供更可靠的风险评估。

2. 储层参数反演

第一，叠前同时反演。石油地震勘探过程中，需要以岩石物理模型为基础，将叠前地震道集等储层参数反演，将其分解为波阻抗、纵横波速度比、密度等储层参数^[10]。在该过程中，其数据计算涉及大量矩阵运算与算法迭代，这同样需要超算平台作为支持，以此快速处理地震道数据，并生成全工区的储层参数体。

第二，机器学习与联合反演。借助超算还可以为石油地震勘探训练深度学习网络模型，由此建立从地震属性到储层参数的复杂非线性映射。此外，其还可以进一步建立联合反演体系，通过将地震数据、测井数据、地质信息整合同步反演，建立更精准的算法模型。

四、结语

综上所述，将超级算力应用于石油地震勘探数据处理中，不仅是大数据时代背景下的必然选择，更是适配勘探技术与设备不断优化发展的关键举措。在此背景下，超级算力在解决数据量庞大、算法复杂、实时性要求高等行业痛点方面可以展现出重要的应用价值，而这就需要建立从数据预处理到高级反演的全流程应用路径，以此既可以极大地缩短数据处理周期，又可以使得以往受限于计算能力的高精度算法得以实用化，从而显著提升地震资料对复杂地质目标的成像精度和储层预测的可靠性。

参考文献

- [1] 许银坡, 张纯, 倪宇东, 王乃建, 柳兴刚, 隆波, 白志宏. 基于改进 POCS 的频率域三维地震数据重构技术研究 [A]2024 年中国地球科学联合学术年会论文集——专题四十三最小二乘偏移与全波形反演理论方法及应用、专题四十四多采样率地震勘探技术 [C]. 中国地球物理学会, 中国地球物理学会, 2024: 5.
- [2] 库尔班江·托乎提, 塔依尔·伊布拉音, 张仲祐. 石油勘探大数据高效检索方法的研究 [J]. 信息系统工程, 2024, (09): 90–93.
- [3] 赵改善, 何展翔. 节点地震勘探技术发展的系统性思考 [J]. 石油物探, 2024, 63(04): 718–734.
- [4] 张占辉. 海上油田多分量地震采集发展及关键问题探讨 [J]. 化工管理, 2024, (18): 157–159.
- [5] 官文德. 石油地震勘探 OVT 数据处理技术应用 [J]. 石化技术, 2024, 31(05): 106–108.
- [6] 邵丹. 地震数据时频特征优化与基于学习模型的降噪算法研究 [D]. 吉林大学, 2024.
- [7] 李嘉成, 田刚, 王俊超, 张腾, 佟亮. 岩心-测井-地震信息二步匹配预测页岩储层层理缝 [J]. 新疆石油天然气, 2024, 20(01): 21–30.
- [8] 陈铭帅, 李戈东, 马猛, 王旭, 孙鸿鑫. 数据挖掘技术在石油勘探中的应用探析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(22): 163–165.
- [9] 陈柯宇, 孙韵, 张恩莉, 靳天煜. 石油勘探海量地震数据存储管理研究 [J]. 电子技术与软件工程, 2020, (13): 148–149.
- [10] 左黄金, 赵贻水, 侯颖, 翟桐立, 刘庆格. 多域融合处理技术在页岩油 2.5 次三维地震勘探中的应用及效果 [A]2019 年油气地球物理学学术年会论文集 [C]. 中国地球物理学会油气地球物理专业委员会、中国石化石油物探技术研究院、江苏省地球物理学会, 中国地球物理学会油气地球物理专业委员会, 2019: 4.