波动方程时间域全波形反演方法研究

罗嘉

摘　要

地震波形反演是一种利用地震反射数据得到地下介质特征的方法。全波形反演（FWI）是一种用全波长模拟数据与实际资料数据进行数据拟合的过程，数学上，它相当于求解一个非线性的最小二乘问题。FWI 能得出地下介质物理参数的高精度高分辨率的成像。

本文将着重在三个方面的研究：1、FWI 方法的本质是非线性优化问题，文中将讨论如何有效求解非线性极小化问题，比较各种方法的优劣性。2、FWI 方法的非线性性会使目标函数收敛到一个错误的局部极小值，文中将研究一些策略来避免陷入局部极小值的情况。3、如果模型参数的数量庞大，那么优化方法的收敛速度将会很慢，它直接影响到算法的效率，文中将研究加速迭代收敛的方法。

本文以 2D 声波方程为数学模型，使用有限差分法进行波场模拟，再进行时间域的全波形反演。本文将共轭梯度法、拟牛顿法和高斯牛顿法应用于声波方程反演，并比较了各种方法的收敛性、计算量和存储量需求。由于传统的线搜索方法只利用了目标函数一阶导数信息，为了充分利用高斯牛顿法中已求得的二阶导数信息，本文将 Levenberg-Marquardt 法和信赖域法应用于波形反演，这两种方法都是利用二阶导数信息调整步长，构造搜索方向。文中分析并阐明了这两种步长搜索策略在应用中的优势和劣处。

对于大规模复杂模型的计算，本文以 Marmousi 模型为例，构造了单尺度上求解 FWI 的算法。为了处理局部极小值问题，在单尺度算法基础上提出了频率多尺度算法。从数值算例可以看出，频率多尺度有效利用低频信息为高频反演构造出一个可靠的初始模型，有效地解决了初值离真解较远时，反演易陷入局部极小值的问题。为了节约计算时间，本文将频域多尺度全波形反演算法区域并行化，将区域划分为多块交给不同的进程计算。此外，还结合多重网格的思想进行了频率多尺度全波形反演，充分发挥了低频反演的优势，大大地减少了计算量。

小规模反演结果的分析表明了各优化方法用于非线性问题的效率和效果，可以为其它领域求解非线性优化问题作为参考，也给以后推广到大规模算法奠定了基础；而大规模的并行反演计算结果表明了文中所构造算法的有效性，为进一步应用提供了基础。

关键词：声波方程，有限差分，全波形反演，多尺度，非线性最优化，并行算法