# 刘文革, 王毓玮. 地震成像与反演. 石油工业出版社, 2021.

# 第2章 地震偏移

## 2.1简介

早期的数字成像并不是由偏移得到的，而是通过一个更加有效的过程，即共中心点(CMP)道集叠加。对于非零偏移距的地震观测记录，通过正常时差(Normal MoveOut, NMO)校正以及CMP叠加(Stacking)，可以得到一个类似于零偏移距的地震道。

尽管CMP叠加远不如偏移的作用，但它对速度变化和数据采用所引起的问题不太敏感。CMP叠加能提供基础的地震成像。

CMP叠加是基于地球是平坦的即水平层状介质的假设，它忽略了未偏移记录上构造倾角所产生的影响，因此仅CMP叠加成像仅限局限于构造简单的区域（如构造和速度在横向上变化很小，或者在地震剖面上有少量的绕射）。

Claerbout et al. (1972)最先将波动方程引入数字偏移中，当时处于经济考虑，他提出用一种单程波动方程代替全波方程。直到2000年左右，单程波动方程偏移还是偏移实践的主要途径。

同期还发展了一种不依靠单程波传播的成像方法，通常称为逆时偏移(reverse time migration, RTM)，它使用全（双程）波方程，因此消除了单程波动方程对波场传播方向的限制。但在初期RTM很少用于实践，因为在计算机上计算花费巨大。如今，RTM方法在三维地震叠前偏移中已被广泛使用。

基于波动方程的深度偏移也是一种较好的保幅处理技术，能够为AVO、AVA(amplitude versus angle)分析提供有效的振幅信息，便于地震解释。

## 2.2偏移现象

## 2.3偏移方法分类

2.3.1时间偏移和深度偏移

时间偏移是指成像算法不考虑射线弯曲，而深度偏移则是考虑射线的实际传播路径。两者的明显差异是地震数据的显示。

地震解释以及属性分析通常是在时间域进行，如果估算的速度精度不足，深度域成像可能出现较大的误差。

时间偏移可以利用平均速度将其结果转换为深度域，而深度剖面与可以利用垂直旅行时间显示。

另一个不同点在于它们如何使用速度。。。

2.3.2二维偏移和三维偏移

三维地震勘探所取得的数据更完整、准确可信。

2.3.3叠后偏移和叠前偏移

当地层不水平时，。。。，地震资料需要进行偏移归位。根据叠加和偏移的先后顺序，偏移方法分为叠后偏移（或叠加偏移）和叠前偏移（或偏移叠加）。

一般来说，叠前偏移有助于解决地层大倾角或者复杂构造的成像问题，但处理时间较长。在构造简单的地区，使用叠后偏移可以缩短处理周期。

叠后偏移首先需要进行水平叠加，然后再做偏移归位。

叠前偏移不仅能够解决反射层归位和绕射波收敛，还能解决倾斜界面的非共反射点叠加问题，所以在成像效果上优于叠后偏移。但是叠前偏移的缺点是对偏移速度精度要求较高，并且计算量非常大。

## 2.5地震偏移中的波动方程

2.5.1速度-应力方程

2.5.3单程波动方程

## 2.6射线类偏移

2.6.3克希霍夫偏移

## 2.7波场延拓偏移

2.7.1有限差分偏移

2.7.5逆时偏移

RTM，能以较高的精度对所有地层倾角成像。

现在的逆时偏移是基于精确的波动方程，而不是近似处理。本质上是一种深度偏移方法。这些方法已被推广到三维叠前偏移，且它的效率和精度都有着相当大的提高。

RTM只产生具有运动学特征的图像（即构造成像），不一定有准确的振幅。

缺点：计算量大、存储数据量大、有稳定性和数值弥散问题等。

# 第3章地震偏移实例

Marmousi-2标准模型：研究不同偏移成像效果。

# 第4章 地震正演

地震正演也称为地震数值模拟，是用计算机和数值方法模拟地震波场在地下介质中传播的一种技术。假如提供已知的地质构造信息，地震反演可以预测一组检波器在空间特定位置所谓记录到的振动。

地震正演不仅对地震资料解释有非常重要的价值，还是地震反演算法必不可少的组成部分。

方法大致分为3类：微分方程法、积分方法法和射线追踪方法。

微分方程也称网格法或全波方程方法。能处理介质的不同流变特性，缺点是计算耗时大。

本书主要讨论2D声学波动方程的求解。

## 4.2微分方程方法

FD/FM法

压力方程

速度-应力公式

时间导数计算

空间导数计算

空间频散分析（应该选择高精度的格式抑制数值频散）

交错网格

弹性波动方程离散化（P-SV波）

4.2.4震源实现

复杂震源（如天然地震），则可以表示为一组定向力，如双力偶(Aki et al., 2002)

考虑波动方程震源的弹性数学表达，如P波和S波的传播。定向力具有分量。。。

在弹性波数值模拟中，因为不同的震源加载会产生不同的波场，所以应根据需要选择不同的震源。通常使用的震源有三种类型，即纵向震源、横波震源和集中力源（包括垂向集中力源、水平集中力源）。

还有一种全波震源。

4.2.5边界条件

自由地表面的边界条件。FD法：虚构一条网格点线

4.2.6吸收边界

海绵方法

完全匹配层（PML）方法(Berenger, 1994)

# 第5章 地震正演实例

有限元法正演：横向和垂向尺度（km）、地表起伏500m。两层均匀介质，分别定义其（速度模型）：密度，纵波速度、横波速度。四边形单元。激发条件：垂向应力点震源、主频、震源坐标。吸收边界（PML）厚度200m。网格边长、波场记录长度8s，时间间隔0.25 ms。

# 第6章 地震反演

假定观测数据和模型参数可以用确定的数学模型联系起来，并且以观测数据为基础，使用数值方法来估算模型参数。

基于波动方程反演本身是非线性的，将反演问题线性化，通过迭代确定反演结果，并使理论计算与实际观测记录有最佳的匹配。

在优化过程中可以考虑地震记录的完整信息，这导致了全波形反演(FWI, full waveform inversion)，即在优化的每一迭代过程中，需要使用前期迭代所获得的速度模型进行全波场模拟。在反演中，会涉及所有类型的波。

# 全书总结

HPC可以期望推进的应用有：

* 偏移成像：RTM
* 地震正演（FD，FE）：粘弹性体内的波动方程求解
* 地震反演：FWI