# 蔡杰雄. 深度域地震层析反演速度建模方法与技术. 中国石化出版社. 2020

基于反演理论的偏移速度估计方法：

一是在成像域判断成像道集是否拉齐；

二是在数据域判断预测地震数据与实际观测数据是否匹配。

## 近地表层析反演速度建模（高斯束层析）

Semtchenok et al. (2009)利用高斯束(Gaussian beam)算子在中心射线一定范围内的波动来合并建立一个层析方程，再进一步通过建立多个层析方程可以减少单一层析方程的病态性，从而提高反演的精度和分辨率。

## 深度域层析反演速度建模方法体系与分类

地震层析成像技术主要包括：走时层析和波形层析

走时层析成像技术的目标函数与速度扰动之间为拟线性关系，非线性程度较弱，对初始模型要求不高。在地震勘探学领域，走时层析成像技术被广泛应用，例如：用初至波或折射波走时层析反演近地表速度结构，利用反射波走时层析反演中深层速度，利用井间投射波走时层析反演两井之间储层的精细结构，利用VSP资料中的下行或上行地震波走时层析反演井旁有限区域的速度结构，利用共成像点道集进行叠前深度偏移剩余曲率速度分析等。

层析反演速度建模的实施涉及两个问题，即正问题所采用的理论是基于射线还是基于波动，以及所输入的数据空间（成像域或数据域）、数据属性（走时、振幅、相位或波形）和数据类型（折射波、初至波、投射波、反射波等）。

## 缺陷及解决

射线理论的问题：阴影区、多路径问题

波动方程(FWI)的问题：叠前数据（特别是陆上数据）的不完备（缺低频和大偏移距、信噪比低等）、正演模型的不完善（正演算子无法客观描述地震波在实际介质中的传播过程）、初始模型不准确（周期跳问题, cycle-skipping）、地震子波问题（空变）等因素的影响，FWI常常难以反演出高分辨率的速度场，甚至不收敛。FWI在国外海上资料探区的成功案例尚且不多，相对而言，国内陆上资料，特别是山前带非水平地表、低信噪比资料的FWI应用更需要一个过程。

成像域射线层析方法是目前石油工业界应用的核心技术，发展历程长且实用化程度较高，目前没有方法可以替代其在速度建模处理中的地位。

成像域射线层析的结果可以为FWI提供高质量的初始速度模型，有效改善数据域波动层析的稳定性、收敛方向和速度、反演精度等，提高层析反演速度建模技术的实用性，以及在复杂探区的适应性。

## 高精度速度建模实现

实际资料处理中，一般采用基于射线层析的初始速度建立方法。

对于陆地资料准确的近地表速度直接影响全波形反演的正确性与地震成像的准确性。

初至波层析技术方法具有局限性，仅利用地震波运动学特征，精确度不高，存在建模的盲区，再加上人工拾取初至波存在较大误差、工作量较大，已经不能满足高精度近地表速度建模的要求。

1 递进式初始速度建模

FWI具有高度的非线性和病态性，初始速度的建立一直是FWI所面临的巨大挑战。初始模型需要在目标函数的收敛域内，即产生的模拟数据与观测数据的走时误差不能超过半个周期，否则会产生非常严重的周期跳跃问题，导致反演结果陷入局部极值无法收敛。

建议采用递进式的速度建模方法来构建初始速度模型，即首先使用射线走时层析反演复杂速度场的低波数背景成分，实现从时间域建模到深度速度域模型的建立。基于射线走时层析的结果，再进行高斯束层析反演复杂构造的中波数速度成分，得到更高精度的速度场，为后续的FWI高精度反演提供更稳健的输入。

同时，针对陆地资料复杂近地表问题，提出早至波(early arrival waves)近地表FWI方法。

## 层析反演速度建模配套技术

实用化的深度域层析反演是一套完整的技术流程，除了射线追踪、矩阵求解等核心算法之外，往往还需要层位拾取、道集输出、正则化约束等相应的配套技术，才能应用于实际资料中，进行大规模的生产应用。

对于层位拾取，2个问题：地震资料的信噪比往往较低，正确拾取走时成为极其困难的工作；识别同相轴需要人工解释，往往会给层析成像带来人为影响。精细化的层析反演往往需要数以百万条射线，无法完全靠人工拾取，需要开展自动化的层析属性拾取技术研究。

正则化约束，即反演过程中加入包括层位、构造产状、井速度等多种已知信息约束以实现正则化，提高反演稳定性及分辨率。主要有2类：(1) 在速度层析过程中加入地质层位信息，通过层位约束提高反演精度；如果层位解释错位，会使层析结果误差更大；(2) 通过引入含有构造信息的正则化算子。

图像引导的结构张量算法，在地震资料解释中应用较为广泛，是利用结构张量算法进行的层位自动解释结果，采用各向异性扩散方程解析解(Hale, 2009)。