



波现象与智能反演成像研究组



后FWI时代

地震数据分析的发展方向是什么？


报告人：王华忠

波现象与智能反演成像研究组 (WPI)

同济大学海洋与地球科学学院，上海

2022年06月06日

目录

- ◆一、概述
 - ◆二、FWI到底能干什么？
 - ◆三、FWI干了些什么？
 - ◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？
 - ◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像
 - ◆六、总结与讨论
- 

◆一、概述

◆油气地震勘探最终目的：

◆精确地描述油气藏，进行准确的含油气性分析，做出最佳的钻井决策，得到最高的油气勘探效益。

◆油气地震勘探核心问题：

◆由叠前地震数据及其它相关的先验信息，进行宽波数带的弹性参数估计（或称广义的高精度地震波成像），与岩石物理知识结合，进行精确的油气藏描述和准确的含油气性评价。

◆一、概述

◆宽波数带的弹性参数估计问题：

- ◆基于叠前地震数据和待估计参数的先验信息，基于地震波理论和波动方程（及其各种简化形式），基于Bayes参数估计理论，一个信息不足情形下的（强）非线性反问题（系统参数反演问题）。

◆油藏描述问题：

- ◆宽波数带的弹性参数估计+井数据+油气地质学+岩石物理学 ➡ 油藏描述+含油气性评价
- ◆一个基于信息综合的最佳决策问题。

一、概述

地震数据分析的全过程的落脚点

最佳判决



信息提取

层位、断层、
特殊地质体、
地震相
现代图像识别或ML/AI

利用波场中波现象同相轴的到达时信息
PSTM/PSDM/RTM

利用波场中波现象同相轴的振幅信息
广义的FWI/真振幅-RTM/宽带波阻抗建
模
AVA/AVO反演/1D波阻抗反演

利用波场中波现象同相轴的振幅信息
属性分析(WT、时频分析、PCA/ICA)

偏移成像剖面

角度反射系数道集
宽带波阻抗剖面

岩石物理、测井、地质信
息综合
空间数据分析/融合/同化
ML/AL

油藏的岩性参数
估计

油藏的定位
油藏的几何形态刻画

油藏的弹性参数估计

油气勘探的最终目标
油藏描述/含油气性评价

◆一、概述

- ◆ **(我感觉到的) 油气地震勘探的困境:**
 - ◆ 复杂情形下油气地震勘探的大部分问题依然故我，没有得到有效地解决。
 - ◆ 新方法、新技术的探索 (FWI、LS_RTM、AI、ML) 收效不显著。
- ◆ 总体感觉：比较气馁 (nei, 三声)、比较茫然、没有很大的成就感。
- ◆ 但是，科学和技术发展就是如此，从来没有一帆风顺，没有一蹴而就。尤其是很多技术问题，不可能根本得到解决。
- ◆ 地震数据分析向何处去？

目录

- ◆一、概述
- ◆二、FWI到底能干什么？
- ◆三、FWI干了些什么？
- ◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？
- ◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像
- ◆六、总结与讨论

◆二、FWI到底能干什么？

- ◆从数据中、从观测结果中、从试验结果中，获得信息，做出合理的决策，是人类生活、生存的基本活动。
- ◆信息 + 决策是两个十分基本的概念。
- ◆FWI是利用信息、做出决策的一个典型的科学问题。它是Bayes估计理论在地震勘探中的一个应用实例。
- ◆我认为：Bayes估计（决策）的思想并没真正地深入人心。

◆二、FWI到底能干什么？

- ◆理论上，只要描述系统的**参数与系统输出**之间**因果关系**的正问题 $F(\mathbf{m}) = \mathbf{d}^s$ 是正确的，实测数据 $\mathbf{d}^{obs} = \mathbf{d}^s + \boldsymbol{\eta}$ 和正问题 $F(\mathbf{m}) = \mathbf{d}^s$ **一定决定了一个可行解集**。
- ◆遗憾的是，这个因果关系可能是**异常复杂的，严重非线性的**。导致这个可行解集异常庞大。
- ◆尽管Bayes估计下的FWI似乎无所不能，任何想要做的参数估计问题，都可以做，实际上，能得到有效反演解的情形却是寥寥的！

◆二、FWI到底能干什么？

◆即便是大学里的所谓顶尖研究人员，对FWI的“神通”也深信不疑。提出做粘弹介质参数非线性反演等等。如果故弄玄虚，提出这样的研究课题，就是以骗取国家科研经费为目的，根本就不想解决问题。否则，就是对FWI的认知处于幼稚阶段。

◆实质上，FWI到底能干什么，取决于待估计参数与系统输出之间因果关系是否是线性的或接近线性的；取决于关于待估计参数有哪些先验信息。再加一个前提条件是：实测数据 $\mathbf{d}^{obs} = \mathbf{d}^s + \boldsymbol{\eta}$ 和正问题 $F(\mathbf{m}) = \mathbf{d}^s$ 决定了一个可行解集。

◆任何关于FWI的研究，都应该在这样的基本认识上展开。

目录

- ◆一、概述
- ◆二、FWI到底能干什么？
- ◆三、FWI干了些什么？
- ◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？
- ◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像
- ◆六、总结与讨论

◆三、FWI干了些什么？

◆数学上，FWI仅仅解了一个局部线性问题。即便全牛顿法也不过如此。不要迷信我们对非线性问题的求解能力。

数学家看来，我们不过解一个练习题！

◆非线性方程： $F(\mathbf{m}) \approx 0 \Leftarrow F(\mathbf{m}) - \mathbf{d}^{obs} \approx 0$

◆转化为变分问题： $\varphi(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} F^T(\mathbf{m}) F(\mathbf{m})$

◆Gauss-Newton解法： $\nabla \varphi(\mathbf{m}) = [F'(\mathbf{m})]^T F(\mathbf{m}) = 0 \Leftarrow F(\mathbf{m}) \approx F(\mathbf{m}^k) + [F'(\mathbf{m}^k)](\mathbf{m} - \mathbf{m}^k)$
 $[F'(\mathbf{m}^k)]^T \{F(\mathbf{m}^k) + [F'(\mathbf{m}^k)](\mathbf{m} - \mathbf{m}^k)\} = 0 \Rightarrow \mathbf{m}^{k+1} = \mathbf{m}^k - \left\{ [F'(\mathbf{m}^k)]^T [F'(\mathbf{m}^k)] \right\}^{-1} [F'(\mathbf{m}^k)]^T F(\mathbf{m}^k)$

◆全Newton解法： $\mathcal{Q}(\mathbf{m}) \approx \varphi(\mathbf{m}^k) + \nabla \varphi(\mathbf{m}^k)(\mathbf{m} - \mathbf{m}^k) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \mathbf{m}^2} \bigg|_{\mathbf{m}^k} (\mathbf{m} - \mathbf{m}^k)^2$

$$\frac{\partial \mathcal{Q}}{\partial \mathbf{m}} = 0 \Rightarrow \mathbf{m}^{k+1} = \mathbf{m}^k - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \mathbf{m}^2} \bigg|_{\mathbf{m}^k} \nabla \varphi(\mathbf{m}^k)$$

◆三、FWI干了些什么？

◆局部线性性的具体体现：

◆ Gauss-Newton解法中，非线性正问题在 \mathbf{m}^k 处用线性的超平面

◆ $L(\mathbf{m}) \approx F(\mathbf{m}^k) + [F'(\mathbf{m}^k)](\mathbf{m} - \mathbf{m}^k)$ 来代替。典型的局部点上以直代曲的思想。

◆ 全Newton解法中，在 \mathbf{m}^k 点处，用误差泛函 $\varphi(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} F^T(\mathbf{m}) F(\mathbf{m})$ 的二阶 Taylor 展开代替。用 $\mathcal{Q}(\mathbf{m})$ 的近似解作为 $\varphi(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} F^T(\mathbf{m}) F(\mathbf{m})$ 在 \mathbf{m}^k 点附近的局部近似解。在 \mathbf{m}^k 点处的 Hessian 矩阵 $\left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \mathbf{m}^2} \right|_{\mathbf{m}^k}$ 是正定对称时， $\mathcal{Q}(\mathbf{m})$ 是二次型函数，对应它的正问题是线性的！

◆ 全Newton解法本质上是在迭代求解一个局部凸二次优化问题。

◆三、FWI干了些什么？

- ◆ Gauss-Newton解法本质上也是在解一个局部凸二次优化问题。此时，正问题在局部点上也被线性化了。
- ◆ LS_RTM就是在用Gauss-Newton解法求解实际上的非线性问题。
- ◆ 当前的FWI，仅有极少人探索直接计算Hessian矩阵 $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \mathbf{m}^2} \Big|_{\mathbf{m}^k}$ 。
- ◆ 不少的文章讨论用L-BFGS计算近似Hessian，近似实现Gauss-Newton解法。

◆三、FWI干了些什么？

- ◆解数学家眼中的数学练习题，显然不能解决复杂介质地震波成像问题。
- ◆不收敛和收敛慢是数学上经典FWI的表现。
- ◆基于Bayes参数估计的思想，引入关于解的先验信息，有望改善反演解的收敛性和收敛效率。从实测数据 $\mathbf{d}^{obs} = \mathbf{d}^s + \boldsymbol{\eta}$ 和正问题 $F(\mathbf{m}) = \mathbf{d}^s$ 规定的可行解集中，大幅缩小可行解，提高收敛性和收敛效率。
- ◆我们笼统地把这些都归为正则化思想和方法。

◆三、FWI干了些什么？

- ◆我认为：正则化思想的根本要点是建立待反演参数与波现象之间的近似线性的关系。
 - ◆其他的正则化思想都不是第一位的。
 - ◆能做到使待反演参数与波现象之间关系是近似线性的，非线性反问题的主要矛盾就抓住了，或非线性反问题基本解决了。
- ◆其他的正则化方法，譬如引入稀疏约束（L1范数）、引入结构约束（TV约束）、引入马氏数据误差泛函定义、引入相对熵及互信息误差泛函定义等等，都是第二位的。

◆三、FWI干了些什么？

◆我认为：正则化思想的根本要点是建立待反演参数与波现象之间的近似线性的关系。

◆选一个非常好的、接近于真解的初始值 m^k 当然是有效求解非线性反问题的方法。但这是不可行的方法。

◆事实上，现在求解非线性反问题的路线已经十分清楚了：不要迷信既有的数学算法，要根据对问题物理本质的理解，提出合理信息约束下的、正问题尽可能接近线性的反问题，然后展开求解。

◆实际问题的物理，始终是第一位的！

◆三、FWI干了些什么？

◆ “哲学（**应该是自然哲学、应该是物理，我的注释**）写在这部称为宇宙的大书上，这本书永远打开着，接受我们的凝视。但要是我们不先掌握它的语言，不去解读它赖以记录的字符，那我们就不可能理解这部大书。”

◆ “它以数学语言写就，其字符是三角形、圆形和其他几何图形。没有这些，凡人连一个词也读不懂；没有这些，人们就在黑暗迷宫中徘徊。”

◆ 伽利略，1623年，《试金者》

◆ 油气地震勘探这本书的字符应该是什么？

◆ 子波应该算一个！

◆ 子波为基本元素的同相轴飘在一定分布的随机噪声中。

目录

- ◆一、概述
- ◆二、FWI到底能干什么？
- ◆三、FWI干了些什么？
- ◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？
- ◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像
- ◆六、总结与讨论

◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆“两宽一高”地震数据观测、高性能计算机技术进步、AI+ML算法的发展、FWI可能性边界的深度探索，标志着勘探地震中后FWI时代的到来。

◆假如从2005年算起，FWI+LS_RTM的深入研究，差不多持续了20年时间。

◆Bayes估计理论下的地震参数反演FWI，标志着地震波成像的理论水平到了一个新的高度。但是，实际数据中FWI的应用依然步履维艰。

◆不是Bayes估计理论有缺陷。数学理论已经很美妙了。

◆数学家瞧不上我们所解决的问题，看来是有道理的。



◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆我认为：当前，整个地震数据分析都可以放在Bayes估计理论下。从地表一致性处理、去噪、子波估计，到TTI+Q层析、PSDM、RTM，AVA反演、1D波阻抗反演等等概莫能外。

◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆我认为：当前地震波成像不能满足油藏描述的要求的根源，出在观测方式、观测数据上，出在待估计参数与波现象的关系（正问题）上。

◆我们仅仅点出几个关键的地方：

- ◆ 观测系统完全不适用于估计近地表模型；
- ◆ 观测系统也不能顾及目前的深层和超深层建模；
- ◆ 噪音太强；
- ◆ 子波未知；
- ◆ 激发与接收的物理机制不能被正问题描述；
- ◆ 缺乏有效的低频和高频波场信息；
- ◆ 照明不均匀；
- ◆ 检波器接收的波场量级是自定的，取决于检波器输出放大器；
- ◆



◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆我认为：当前地震波成像不能满足油藏描述的要求的根源，出在观测方式、观测数据上，出在待估计参数与波现象的关系（正问题）上。

◆我们仅仅点出几个关键的地方：

◆激发接收的物理机制不能被正问题描述，正演模拟中，震源函数和实测波场是脱节的；

◆地表一致性处理不能完全解决问题

◆选择的正问题不合适，譬如试图主要利用炮集数据估计密度、估计Q值、估计复杂的多参数、估计岩性参数、估计流体参数等等都属于正问题选择不合适。根源依然是待估计参数与波现象的关系不够线性。

◆现在还有人强化待估计参数与波现象的非线性关系。譬如基于波场反演Everything（孔隙度、饱和度、岩石脆性、流体因子），进行粘弹性介质的反演等等。

◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆我认为：当前地震波成像不能满足油藏描述的要求的根源，出在观测方式、观测数据上，出在待估计参数与波现象的关系（正问题）上。

◆我们仅仅点出几个关键的地方：

◆缺乏非线性反问题的真正有效的解法。

◆Gauss-Newton和全Newton都是用局部点上线性反问题的求解作为非线性反问题的解法。它们都并非真正的求解（强）非线性反问题的有效解法。它们仅仅对局部凸问题的求解是有效的。

◆目前，数学家没有提供有效的求解工具。

◆我不相信：深度神经网络是求解（强）非线性反问题的有效算法。看不出数学理论的支持依据。

◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆Bayes估计理论下的地震参数反演FWI是：

◆一个信息不足下的强非线性反问题。

◆针对油藏描述的地震数据分析也可以认为是：

◆一个信息不足下的强非线性反问题。

◆后FWI时期地震数据分析向何处去？

◆关注信息提取、信息表达、信息融合，在正确的反问题提法下，充分关注问题的物理实际，继续求解强非线性反问题。



◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆地震数据分析的根本目的应该是基于油藏描述做出正确的钻井决策，尽管地震数据分析从采集开始，到预处理、到成像，整个链条很长。

◆后FWI时期地震数据分析，首先是思想观念的提升。

◆要充分重视信息概念。从数据上升到信息。数据分析的根本目的是从数据中提取有用于决策的信息，基于此做出尽可能正确的决策。

◆譬如，我看炮集的观点：

- ◆地下介质与入射场作用作为二次源产生的波的同相轴的线性叠加飘在不同分布的噪声中。
- ◆同相轴上子波形态由震源、介质决定，受检波器影响。
- ◆同相轴上子波的到时主要由各向异性介质速度决定。
- ◆同相轴上子波的振幅主要由波阻抗变化决定、球面扩散。Q影响振幅。
- ◆波现象由介质性质决定。
- ◆特征反射层引起多次反射波，主要利用多次波的走时和振幅进行成像。
- ◆

把炮集数据拆解成不同角度的信息。



◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆地震数据分析的根本目的应该是基于油藏描述做出正确的钻井决策，尽管地震数据分析从采集开始，到预处理、到成像，整个链条很长。

◆后FWI时期地震数据分析，首先是思想观念的提升。

◆要充分重视信息概念。从数据上升到信息。数据分析的根本目的是从数据中提取有用于决策的信息，基于此做出尽可能正确的决策。

◆譬如，我看各种处理方法的观点：

- ◆ PSTM/PSDM是把叠前地震数据转化成地下介质几何结构的信息的方法技术；
- ◆ Tomography/FWI是把同相轴走时转化为各向异性速度信息的方法技术；
- ◆ LS_RTM是把同相轴振幅转化为反射系数或速度扰动信息的方法技术；
- ◆ AVA反演是把角度反射系数转化成弹性参数信息的方法技术；
- ◆ 属性提取方法是把波形转化成（认为）与地下岩性变化相关联的信息的方法技术；
- ◆

◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆地震数据分析的根本目的应该是基于油藏描述做出正确的钻井决策，尽管地震数据分析从采集开始，到预处理、到成像，整个链条很长。

◆后FWI时期地震数据分析，首先是思想观念的提升。

◆要充分重视信息概念。从数据上升到信息。数据分析的根本目的是从数据中提取有用于决策的信息，基于此做出尽可能正确的决策。

◆譬如，我看叠前地震数据外其他信息的观点：

- ◆地球物理测井、岩芯、录井数据是与地下介质岩性关系最密切、最直接的信息；
- ◆地震波成像的构造/结构信息是比较可靠的反映地下介质构造变化的信息；
- ◆保真地震波成像的振幅是地下介质阻抗发生变化的信息；
- ◆地质知识是定性的、宏观指导性的信息；
- ◆岩石物理知识是（半）定量的信息；
- ◆



◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆地震数据分析的根本目的应该是基于油藏描述做出正确的钻井决策，尽管地震数据分析从采集开始，到预处理、到成像，整个链条很长。

◆后FWI时期地震数据分析，应该聚焦于油藏描述的需求、聚焦于如何做好油藏描述。本质上，是聚焦于物理问题本身，聚焦于物理问题的合理抽象。

◆从物理本质开始进行问题的研究。提出方案、路线、技术、算法。

◆不要再做从论文到论文的纸上作业了！

◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆地震数据分析的根本目的应该是基于油藏描述做出正确的钻井决策，尽管地震数据分析从采集开始，到预处理、到成像，整个链条很长。

◆后FWI时期地震数据分析，应该聚焦于提出正确的反问题。

◆首先是合理的目标函数的确定

◆合理的目标函数确定期望的解。

◆然后是合理的约束条件的确定

◆合理的约束条件规定可行解集。

这件事说起来容易。
但绝对是高手才能
解决的事情。

◆提出正确的反问题是第一重要的，求解反问题的算法是第二位的。

◆因此，我们不必要在数学家面前感到低人一头。是我们提出正确的反问题。对应用而言，数学主要是工具。

◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆后FWI时期哪些地震数据分析问题值得深入研究？

◆1、自由地表相关的噪音压制---新算法；

- ◆陆上---面波+面波散射波

- ◆海上---鬼波+（尤其是浅水体）水体多次波

◆2、面向参数反演（而不是偏移成像）的地表一致性高精度处理；

◆3、面向地震子波保真性的地震波偏移成像方法；

- ◆针对方位角度道集上地震子波的保真性和分辨率，进行合理的地震波偏移成像

◆4、基于子波波形特征（而不是基于地震数据二阶统计量）的地震信号与图像处理方法；

- ◆表达子波波形形态属性的参数定义；子波波形形态相似性度量方法

- ◆基于子波波形形态相似性的层位追踪、特征波（尤其是初至波）同相轴识别、地震相识别、断层识别、最佳照明辨识等

◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？

◆后FWI时期哪些地震数据分析问题值得深入研究？

◆5、基于机器学习算法的地震信号与图像处理方法；

◆非线性结构的建模方法

◆非高斯+非线性结构的建模方法

◆6、基于空间散乱数据的广义线性结构、甚至非线性结构的建模方法；

◆7、基于多信息融合的建模方法；

◆8、信息不足下的强非线性反问题的正确提法和有效解法。

◆特别的研究题目：特征反射层相关多次波的非线性成像方法

目录

- ◆一、概述
- ◆二、FWI到底能干什么？
- ◆三、FWI干了些什么？
- ◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？
- ◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像
- ◆六、总结与讨论

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



- ◆后FWI时期，地震数据分析（地震波成像仅仅是其中的一个环节），应该都要围绕满足储层描述的需求开展各个环节的工作。
- ◆否则，地震数据分析的各个环节的工作就会目标不明，形不成合力。
- ◆储层描述的关键信息是地震波反演成像提供出来的。
- ◆因此，必须弄清楚满足储层描述需求的地震波反演成像应该是什么样的。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



◆储层描述的具体目标：

- ◆①、对储层的几何形态进行准确的刻画；
 - ◆②、对储层的岩性参数进行准确的刻画；
 - ◆③、对储层的含流体性质进行准确的评价；
 - ◆④、对储集体进行综合评价，给出准确的储量评估。
- ◆从对储层描述的具体目标的表述可见，储层描述没有或不存在一个对应的（类似波动方程的）正问题，不能根据Bayes反演理论，把上述储层描述问题提成一个类似FWI问题。
- ◆储层描述只能提成综合信息约束下的最佳判决问题。说它是个“艺术”问题，不是“科学”问题，原因即在于没有对应的描述其正过程的数学物理关系式。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



◆储层描述的关键步骤：

- ◆首先刻画储层的几何形态（基于偏移成像结果及相干增强结果）；
- ◆然后基于反演成像给出的弹性参数（期望是宽带波阻抗模型），与岩石物理结合，进行岩性参数的估计；
- ◆接着，基于各种属性参数，进行流体性质的评估；
- ◆最后，按油气地质学的综合知识，在前三步骤已获信息的辅助下，进行储量评价，做出钻井与否的决策。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



◆储层描述所用的信息：

◆1、PSDM/PSTM方位角度或方位offset成像道集；

◆PSDM/PSTM偏移叠加剖面；

◆并在此剖面基础上，用各种相干性识别方法，对层位、断层做高分辨率增强。

◆2、1D波阻抗反演结果（相对波阻抗）；

◆CWI+BWIM给出的宽带波阻抗模型；

◆3、AVA反演结果；

◆ $R(\theta) = f(\Delta v_p, \Delta v_s, \Delta \rho)$ (v_p, v_s, ρ) 岩石物理关系 \Rightarrow (Everything) $R(\theta) = g(everything!)$

◆4、测井/岩芯/录井信息。

◆5、地质（构造、沉积、岩性、储层物理等）知识；岩石物理学基本知识。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像

◆用于储层描述的信息的可靠性评价---按主观可信度准则，按从高到低的次序排列：

- ◆① 测井/岩心/录井信息；
- ◆② PSDM成像道集→成像叠加剖面→相干处理结果；
- ◆③ CWI+ BWIM⇒宽带波阻抗模型；
- ◆④ 1D波阻抗反演结果；
- ◆⑤ 成像剖面上基于各种变换的属性参数；
- ◆⑥ AVA反演参数；
- ◆⑦ 流体、脆性等AVA关系再次演化出的参数。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



◆目前油藏或储层描述工作的评价：

◆信息提取：

◆计算机软件辅助下，人工进行的信息提取。这是储层描述最主要的具体工作量。

◆决策评价：

◆各个层次上的决策评价，目前都是人工进行的，并未形成决策算法，由算法为主进行自主决策。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



◆目前储层描述技术的评价：

◆目前，所谓精确地进行储层描述的最大障碍是“信息不足”。

◆① 不足以描述储层（包括储集体）的几何形态。

◆② 不足以描述储层的物性参数。

◆③ 不足以评价储层的含流体性。

◆“信息不足”首先是没收集或采集到足够的信息：足够多的井；“两宽一高”的地震数据采集。然后是我们当前数据分析能力或信息提取能力欠缺，不足以很好地挖掘出井、震数据中的有用信息。

◆从科研与生产看，信息提取能力的提升是最核心的、当务之急的事。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



◆油藏描述问题被归结为：

- ◆ 信息提取 + 最佳判决

◆油藏描述的主要信息源：

- ◆ “两宽一高” 地震数据的广义地震波成像 + 井数据

- ◆ 岩石物理学知识 + 油气地质学知识

◆油藏描述问题被提成：

- ◆ 一个基于信息综合的最佳决策问题。

- ◆ 数学上，Bayes最佳决策问题。

◆“两宽一高” 地震数据的广义地震波成像问题被提成：

- ◆ 数学上，Bayes参数估计问题，

- ◆ FWI是Bayes参数估计理论在勘探地震中的一个应用实例。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



- ◆ “两宽一高” 地震数据的广义地震波成像问题评价：
 - ◆ 被认为是基于因果关系的科学问题。
 - ◆ 波动方程建立起了弹性参数 (V_p , V_s , 密度; 反射系数; 波阻抗等) 与 (实测) 波场之间的因果关系。
 - ◆ 基于此因果关系和Bayes参数估计理论, 产生了地震波反演成像方法技术。
 - ◆ 目前, 各种层次的、各种变种的地震波成像处理方法基本上都包容在此理论框架下。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



◆油藏描述问题评价：

- ◆不存在类似波动方程的正问题，描述储层物性参数（譬如孔隙度、渗透率、饱和度、岩石脆性、含油气性）与（实测）波场之间的因果关系。
- ◆储层描述、或储层刻画、或储层评价，而不是储层反演的名字，已经说明了储层描述问题不可能有像地震波成像问题的解决途径。
- ◆储层描述问题是一个基于信息综合的最佳决策问题。
- ◆储层描述问题的核心是信息提取。
- ◆储层描述的关键信息是由广义地震波成像技术提供的。
- ◆储层描述与广义地震波成像应该融为一体。
- ◆广义地震波成像技术应该拓展到提供储层描述所需的一切信息。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



◆油藏描述问题评价：

- ◆正是因为不存在类似波动方程的正问题，描述储层物性参数（譬如孔隙度、渗透率、饱和度、岩石脆性、含油气性）与（实测）波场之间的因果关系，储层描述问题不是一个纯科学问题。
- ◆科学问题的典型特征是：物理上存在一个可检验的因果关系。它通常是用偏微分方程描述的。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



◆油藏描述与地震波成像的一体化发展途径：

- ◆1、把油气地震勘探问题总体上视为一个基于综合信息的最佳决策问题。
- ◆2、Bayes最佳决策作为理论框架。
- ◆3、把（广义）地震波成像作为信息提取方式的一种，所有与储层描述有关的信息提取方法技术都纳入 “（广义）地震波成像” 的研究范围内。
- ◆4、（广义）地震波成像应该彻底地服务于油藏描述。而不是游离在油藏描述过程之外。
- ◆5、跳出仅仅依靠波动方程这个因果关系进行信息提取的思维，充分扩充依靠数据中的统计关系或相关关系进行信息提取的思维。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



◆油藏描述与地震波成像的一体化发展途径：

- ◆6、基于因果关系的信息提取、基于统计关系或相关关系的信息提取方法技术都需要在“两宽一高”数据逐渐普及的情况下、在井数据、非地震数据越来越多的情况下，在油气地质知识、岩石物理知识“数据”越来越丰富的情况下，在机器学习算法越来越被深入研究的情况下，**进一步提升**。为油藏描述提供更高精度的信息。
- ◆7、油藏描述的本质在于信息综合与最佳判决，所有类型的信息提取原则上应该由（广义）地震波成像方法技术完成。但是，很显然，信息提取工作和信息综合与最佳判决工作是不可能完全分离的。**因此。油藏描述与地震波成像的一体化发展是今后必须要走的技术发展路线。**

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



◆油藏描述与地震波成像的一体化发展途径：

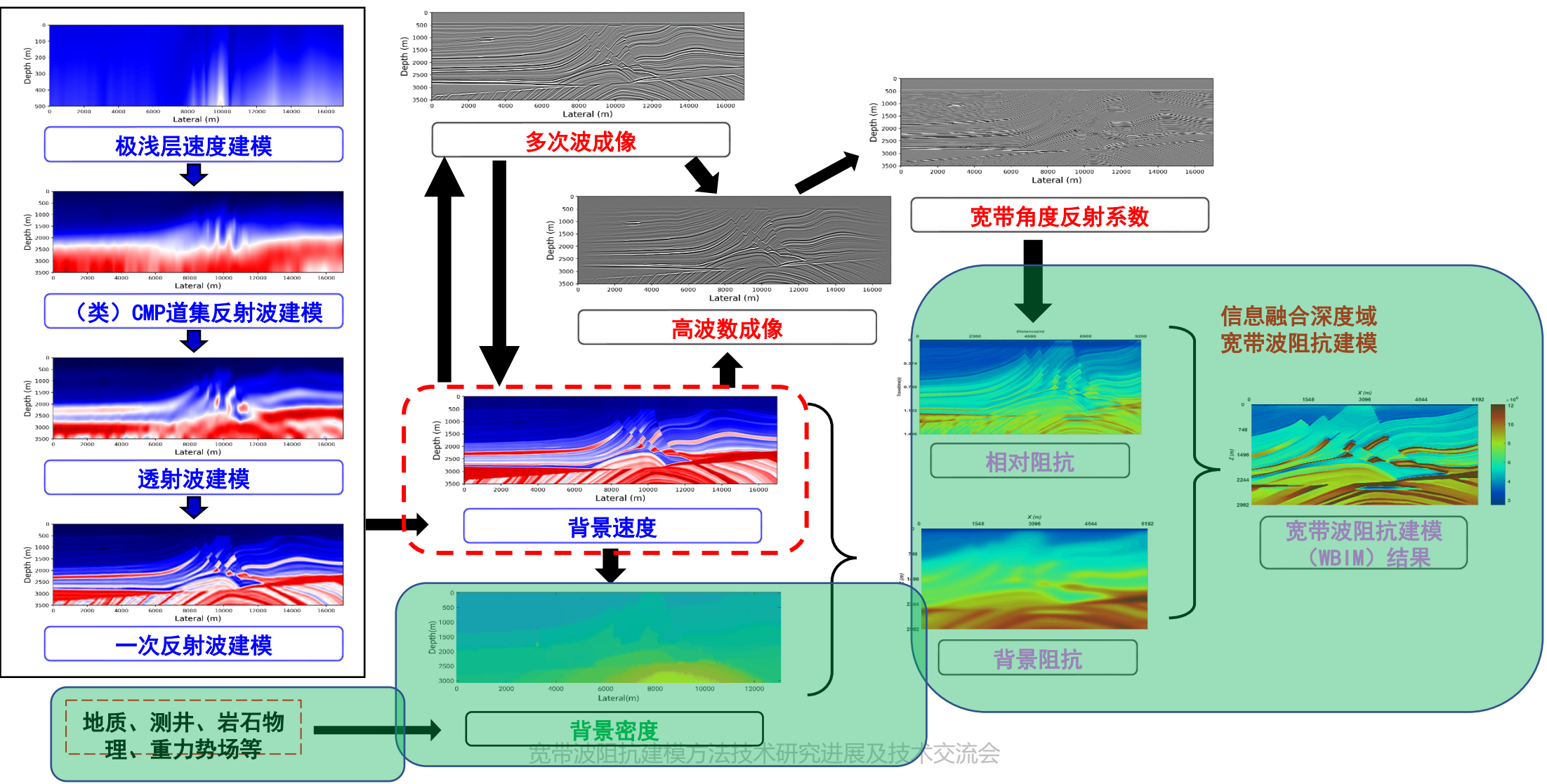
◆对基于定性的地质知识约束下开展参数反演的基本观点：

- ◆当前，由时空关系（或时空坐标）定义的、定量的先验信息的利用，已有很多的研究。对它们的利用已算比较充分。
- ◆但对于非时空坐标定义，甚至非定量的知识的利用，目前的研究还是比较少。也是没形成定式的。知识的定量表达方法、知识作为先验信息的利用，目前在这些方面相当地缺乏研究。
- ◆譬如，井数据（井点上的地层、沉积、岩性信息）如何在地质知识（构造、沉积、岩性）和岩石物理知识的约束下拓展到三维空间中对于提高油藏描述精度是非常有意义的。

◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像



◆ 特征波反演成像（CWI）+ 宽带波阻抗建模（WBIM）的技术路线



目录

- ◆一、概述
- ◆二、FWI到底能干什么？
- ◆三、FWI干了些什么？
- ◆四、后FWI时代地震数据分析向何处去？
- ◆五、基于信息融合的针对储层描述的地震波反演成像
- ◆六、总结与讨论

◆六、总结与讨论

◆后FWI时期地震数据分析向何处去？

◆关注信息提取、信息表达、信息融合，在正确的反问题提法下，充分关注问题的物理实际，继续求解强非线性反问题。

◆关注信息综合

◆关注问题的物理本质，提出正确的反问题

◆继续强化（强）非线性反问题求解的算法研究

◆六、总结与讨论

◆后FWI时期地震数据分析向何处去？

- ◆基于因果关系的信息提取、基于统计关系或相关关系的信息提取方法技术都需要在“两宽一高”数据逐渐普及的情况下、在井数据、非地震数据越来越多的情况下，在油气地质知识、岩石物理知识“数据”越来越丰富的情况下，在机器学习算法越来越被深入研究的情况下，进一步提升。为油藏描述提供更高精度的信息。



谢谢
欢迎批评指正