



波现象与反演成像研究组

Wave Phenomena and Inversion Imaging Group

王华忠文集

Bayes估计观点下的
地震信号分析与地震波反演成像



同济大学海洋与地球科学学院

前言

勘探地震学从一开始就是个以数据采集和数据分析为基本任务的学科。数据采集和数据分析也是信号分析学科的基本研究内容。我们一直认为, 21 世纪的勘探地震学进入了一个以现代信号分析为核心理论框架的技术发展时代。信号的预测理论和 Bayes 框架下的参数估计理论是现代信号分析学科的两项基本任务。勘探地震学中地震数据分析的核心任务也是这两项。

油气地震勘探的根本目标是利用叠前数据体通过反演成像方法获取宽波数带的弹性参数场, 与岩石物理结合, 对含油气储层实现尽可能精确的描述。其中的关键问题是如何获取宽波数带的弹性参数场。

我们一直认为应该用系统的观点看待信号分析、图像分析和弹性参数估计问题。信号是随机的, 信号总是系统的输出。把三维探区视为一个要研究的系统, 在地表(或空中、或井中)接收到的信号和探区内弹性参数场构成了信号与系统的关系。研究它们之间的关系是现代信号分析学科, 也是勘探地震学科, 的根本任务。现代信号分析本质上包含两部分研究内容: 信号的表达(或建模); 系统参数估计。信号的建模是基础, 期望建立的模型能对信号进行准确的预测。若把波动方程视为波场预测器, 信号分析和弹性参数反演就完全统一在了一个理论框架下, 可以认为就是 Bayes 估计理论框架。当前, 所有的现代信号/图像分析的新思想和新进展都可以借用来进行地震波反演成像。

在信号和波场能被准确预测表达的基础上, 估计理论框架下要解决的问题就是假设地震数据是符合某种分布的随机信号(就是说随机噪音的分布是可以某种统计模型描述的), 然后建立合适的误差泛函, 并假设它是在局部上具有一定凸性的, 接着求解一个局部最优问题, 得到介质参数的某种估计。信号分析中的去噪音、插值等等也是按上述逻辑进行的。在这个过程中, 把反演问题提成一个拟凸问题或凸问题是最关键的; 拟凸问题或凸问题的求解方法是第二位的。多尺度特征表达数据和模型, 并建立分尺度的二者之间的比较线性的关系是把反演问题提成一个凸问题的核心思想。现代图像处理逐步地在勘探地震中得到重要应用, 从成像中自动地提取反射结构信息逐渐成为了反演成像过程中的核心步骤。

Tarantola (2005) 的代表作“模型参数估计的反问题理论与方法(Inverse Problem Theory and methods for Model Parameter Estimation)”非常明确地指出地震波反演要估计的是波动理论正问题模型中所包含的模型参数。模型参数和地下介质弹性参数之间的关系由波动理论正问题能预测实际观测数据而建立起来。正是基于此, 估计模型参数也就能在某种程度上“等价于”估计地下介质弹性参数。可以说我们直接地估计模型参数, 间接地估计地下介质的弹性参数。从这一点可充分地看出波动理论正问题模型在地震波反演中到底有多重要! 正问题描述与刻画的合理性才是有效地解决反问题的核心!

数据, 实测数据, 是估计地下介质弹性参数真正的信息源, 波在地下介质中的传播过程受到地下介质弹性参数的改造, 从而使得在地表接收到的数据(或波场)中携带了地下介质弹性参数的信息。勘探地震中的实测数据总是不完备的, 所蕴含的信息不足以高精度地估计地下介质弹性参数。

因此, Bayes 框架下的弹性参数估计是当然的选择。Bayes 估计理论真是一个完美的理论架构!

很遗憾, 勘探地震中高维的弹性参数估计过程中并不能计算出后验概率密度函数, 也不能据此算出估计结果的期望值。因此, 实测数据与模型参数之间的先验概率分布被假设成 Gauss 的或广义 Gauss 的。同样地, 必须要引入的模型参数的先验概率分布也被假设成满足 Gauss 的或广义 Gauss 的。引入如此假设的目的是试图利用 Gauss 或广义 Gauss 情形下后验概率密度函数的最大化来对模型参数估计结果的优劣做出判决。众所周知, Gauss 或广义 Gauss 情形下后验概率密度函数的最大化等价于对应的代价函数的最小化, 从而把高维弹性参数估计问题退化为一个对代价函数求极小的最优化问题。

这还没有完! Gauss 或广义 Gauss 情形下后验概率密度函数本质上要求波动理论正问题模型是线性的或弱非线性性的。强非线性性的波动理论正问题模型与后验概率密度函数满足 Gauss 或广义 Gauss 分布假设是矛盾的! 因此, 引入线性化的正问题进行数据预测就成了必须!

为了发展出有效的模型参数估计方法, 我们不得不在各种假设下建立各种“模型”。这些“模型”与要解决的实际问题符合吗? 显然差距甚大。

Gauss 线性反演理论是又一个完美的理论架构! 在对波场预测算子进行线性化、预测误差满足 Gauss 分布(尤其是 Gauss 白噪声分布)、L2 范数定义预测误差的前提下, Gauss 线性反演问题所有内涵全部是清楚的。

最理想情况下，模型参数估计结果是无偏的和方差最小的。理论是完美的！现实却是差距甚大的！当前，勘探地震学中的地震波线性反演方法与技术都在解决复杂的地下介质情况、复杂的地震波场、不完全的地震观测、不准确的地震波数值模拟情况下，如何把线性反演理论用在实际数据的反演过程中，以得到更好的成像结果，各种正则化思想与方法也备受重视。地震波线性反演方法与技术的进步是有目共睹的！但是，代表性的方法 FWI 和 LS-RTM 还是不能广泛地应用与实际数据成像处理中。

下一步应该怎么办？我们认为在非 Gauss 和非线性情况下发展出有效的模型参数估计算法是问题的关键！

总之，勘探地震学中的地震数据采集、成像处理和参数反演、乃至地震地质解释逐步统一在了现代信号/图像分析的理论框架下。在此总框架下，基于“两宽一高”的叠前地震数据，得到宽波数带的弹性参数估计结果，结合机器学习实现高精度的储层描述，是波现象与反演成像研究组确定的学术和方法技术发展导向。

目录

1. 地震波反演的框架性认识.....	1
2. SHANNON 采样与随机采样理论分析.....	11
3. 全波形反演与波形层析成像的数值计算问题.....	43
4. 地震波传播的散射场表达与逆散射成像.....	73
5. 地震波反演成像中的线性与非线性方程组的解法.....	93
6. 地震波反演问题理论分析.....	111
7. 面向岩性油气藏的地震波反演成像理论.....	141
8. 面向岩性油气藏的最小二乘叠前深度偏移成像.....	165
9. 透射波与反射波层析、反射波最小二乘偏移、逆时偏移及全波形反演之间的关系与速度估计的合适方案选择.....	189
10. 地震波反演成像方法与技术核心问题分析.....	207
11. 地震反演及其在储层刻画中的应用.....	219
12. 勘探地震学中可分解的速度反演.....	233
13. 压缩感知及其在勘探地震中的应用.....	241
14. 地震波反演成像正则化思想与方法.....	249
15. 状态变量独立的地震波反演成像.....	263
16. 反射波成像与散射波成像的对比分析.....	279
17. 勘探地震中应用泛函分析基础知识总结.....	293
18. 扩散方程和椭圆方程在地震波反演成像中的应用.....	331
19. 特征波反演成像理论框架.....	349
20. 地震子波相位问题及对地震波偏移成像和反演成像问题影响分析.....	365
21. 最小二乘叠前深度偏移成像理论与方法.....	379
22. 勘探地震学技术发展方向分析.....	401
23. 地震数据成像处理中若干重要问题的思考.....	407
24. 基于二阶统计量的信号分析方法存在问题及解决方案.....	429

25. 从线性高斯反演成像到非线性非高斯反演成像的演变.....	437
26. “两宽一高”油气地震勘探中的关键问题分析.....	451
27. “两宽一高”地震数据下的宽带波阻抗建模技术.....	463
28. PCA/RPCA/CCA/ICA 与地震信号建模	473
29. 反问题提法与解法的本质逻辑探讨.....	491
30. 线性与非线性地震波反演成像理论问题分析.....	509
结语.....	537
致谢.....	439