

目 录

前言	王华忠	1
A 地震波反演成像理论		
1. 状态变量独立的地震波反演成像	王华忠	3
2. 特征波反演成像理论框架	王华忠	19
3. 地震波反演成像正则化思想与方法	王华忠	39
B 稀疏反演理论		
4. 稳定主成分分析问题的快速迭代算法	冯伟	53
5. 基于 L1 模约束的反问题求解方法	郭颂	63
6. 最小二乘偏移的总变差正则化方法	郭颂	71
7. 基于压缩感知的观测系统设计与评价	刘守伟	79
8. 压缩感知及其在勘探地震中的应用	王华忠	85
C 速度建模		
9. FWI 的一种实用化策略-三步线性化反演成像方法的串联	冯波	93
10. 基于稀疏反演理论的自动叠加速度反演	冯波	99
11. Monte Carlo 层速度分析方法技术研究	李辉	111
12. 全波形反演初始模型建立策略研究综述	曹文俊	125
D 层析成像		
13. 起伏地表下 VTI 介质射线追踪与多参数联合反演	曹文俊	135
14. 3D 初至层析方法与实践	罗飞	139
15. 预条件网格层析速度建模技术及应用研究	张兵	147
E 偏移成像与角度道集产生		
16. 基于压缩感知的特征波场分解与成像	冯波	153
17. 粘声介质中的最小二乘逆时偏移研究及应用	张猛	161
18. 各向同性（粘）声介质双平方根全三维叠前深度偏移方法	王田珍	167
19. TI 介质射线中心坐标系中 Beam 波传播与叠前深度偏移成像	汪孝文	175
20. 单向波 3D LS_PSDM 方法研究	刘培培	191
21. 基于 GPU 的起伏地表三维单程波叠前深度偏移的实现及应用	段心标	199
22. Hessian 矩阵的构建及叠前深度偏移成像结果去模糊	刘培培	211
23. 高效的逆时偏移角度域共成像点道集生成方法研究	吴成梁	219
F 多次波压制与成像		
24. 基于平面波编码的水体相关多次波压制方法研究	孙维菁	239

25. 编码与解码框架下的鬼波压制方法研究.....王永强	249
26. 层间多次波成像方法研究.....王永强	257
27. 自由表面多次波成像方法研究.....王永强	271

G 地震波正演模拟

28. 起伏地表波现象模拟.....周阳	291
----------------------	-----

H 地震信号处理

29. 散乱数据插值方法及其在勘探地震中的应用.....吴成梁	299
30. 基于径向基函数逼近的数据插值方法.....符琼琲	319
31. 基于 SSA 的低秩近似反演数据插值方法.....符琼琲	327
32. 空间方向谱估计 CLEAN 算法及其在地震数据处理中的应用.....孙维藩	333
33. 一种新的地震数据表达与时频分析方法.....王培尧	341
34. 基于子波形态特征的自动识别与拾取.....汪孝文	345

I 预处理与后处理

35. 地滚波处理方法初探.....厉朗	355
36. 角度道集后处理方法研究.....王田珍	359

J 数值最优化方法

37. 三种非线性数值优化方法的对比分析.....王培尧	367
------------------------------	-----

结论与展望	王华忠 383
-------------	---------

前言

21 世纪的勘探地震学正进入一个以现代信号分析为核心理论框架的技术发展时代,促使进入该时代的最大推进因素首推野外广角度、高密度、宽频带的地震数据观测,然后是高性能的计算平台的出现(譬如每秒千万亿次、甚至万万亿次计算能力的计算机群)。在估计理论框架下进行地震参数反演的技术发展趋势成为勘探地震学中的潮流已是无法改变的,其原因在于整个勘探地球物理本身都是在利用观测数据和所选定的波现象预测器,在一定的估计理论上(主要是 Bayes 估计理论)来估计或反演地下介质的物理性质参数,进而与岩石物理结合来解决资源勘探问题和地球科学问题。随机反演也在逐步进入储层参数的估计过程中。

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:信号的表达与变换;系统参数估计。二者是相辅相成的。既期望得到信号和系统参数的最稀疏的特征表达,也期望参数估计在稀疏表达的空间中进行。对应地,波现象预测方法也要表示在这样的空间中,还要有对应的波现象预测数值计算方法,就是说波动方程最好在数据和参数的特征表达域中求解。

信号/图像处理中的核心问题包括去噪、恢复、插值和图像分割四大基本内容。其中的核心问题依然是提出表达信号/图像的方法(或建模过程),基于 Bayes 估计理论的信号/图像估计/反演。总体而言,可以把地震勘探反问题与信号/图像处理反问题统一在一起。与波动方程预测地震波场一样,信号/图像处理过程中的建模也是非常基础的工作,当前 Wavelet 变换、Framelet 变换、Curvelet 变换、冗余字典等方法表达信号自然是有代表性的信号表达的思想。但对于地震信号处理而言,发展符合地震信号特点的表达方法对于信噪分离、剖面图像处理等是十分有意义的。

在信号和波场预测表达的基础上,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。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是第二位的。目前,对于偏移速度场(模型)的层析反演问题,提成一个凸问题不是很难,尤其是背景偏移速度场比较准确,构造不是很复杂的情况下,基于到达时的速度层析反演问题可以认为是一个拟凸问题。我们提出分波型(透射波和反射波)层析反演的目的也是为了此目的。但是,数据信噪比低、地下构造复杂且存在小尺度速度异常时,把旅行时层析提成或变成一个较凸的问题也是很难的。此类情形下速度反演和建模很困难也说明了这一点。当然,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。把速度场分成背景和其几何结构已被证明是极其有效的。现代图像处理逐步地在勘探地震中得到重要应用,从图像中自动地提取几何结构信息逐渐成为了反演成像过程中的核心步骤。自动的图像信息提取方法,譬如,结构张量分析方法、Level-set 方法、TV 方法、高维小波变换方法就是代表性方法技术。偏微分方程在图像处理中的应用为把波动理论和信号理论统一在一起解决地震反演问题提供了方向。

一般情况下,介质参数估计归结为梯度导引类的迭代反演问题。用误差反传播或反投影来修正上一迭代的参数模型。误差反传播或反投影原则上可以认为是“RTM 过程”。因此,参数估计问题(FWI)最核心的运算就是 RTM。再倒推一步,RTM 的核心就是波场模拟或预测。因此,波现象以及它的数值预测方法的研究才是整个勘探地震学的理论核心。这也是我们把研究组称为波现象与反演成像研究组的根本原因。但是,针对地震介质的复杂性及激发和接收环节的复杂性所导致的波场的不可完全预测性,我们的观点是提出特征波场,增加波场的可预测性,并把波形反演问题由一次特征波场,推到多次特征波场,逐步进展到全波场。并且不一定基于波形进行反演,而是基于波形所蕴含的达到时信息或相位信息进行反演。实质上,就

是把 FWI 反演技术分解成不同波型的特征波场进行反演，可控制地（即单步精度可预测地）把 FWI 逐步引导到实用化。

另一方面，基于 Bayes 估计的 Monte Carlo 反演方法是在所有可能的参数模型空间中在一定的梯度引导下搜索寻找全局最优解的方法。在目前的超级计算机系统计算能力越来越强的情况下，Monte Carlo 反演方法在宏观速度估计方面会起到非常重要的作用。我们认为，在复杂探区的地震波反演成像中，背景速度估计是最核心的，依赖 CMP 道集叠加进行背景速度估计的方法在此情况下已经不再有效，必须发展以 Kirchhoff 积分 PSDM 为引擎、以成像聚焦最佳为准则的背景速度估计方法技术。

无论何种反演方法，正则化或预条件都是非常重要的研究内容。现代图像处理在反演成像中的应用也体现于此。

目前地震波反演方法包括，基于旅行时的层析反演、基于振幅的反射系数（最小二乘偏移）反演/1D 波阻抗反演/AVA 弹性参数反演。当然理论上也可以用 FWI 把两类反演方法统一在一起。但是，基于旅行时的层析反演和基于背景速度的叠前深度偏移成像是误差基本可控的、精度基本可以评价的反演方法。然而，基于地震波振幅的反演到目前为止还严重缺乏反演结果的精度评价。事实上，实际测量的地震波振幅的真实物理意义都值得仔细考虑，所用的波动方程在多大程度上能数值模拟实测地震波的振幅，震源子波的未知和空变引起多大的振幅计算误差，波场和反演参数之间的非线性性能否保证目前的基于凸或拟凸优化的反演方法收敛等等问题都使得目前的基于振幅的反演结果充其量不过是一种提取的子波属性，也不一定比直接在保真子波上进行属性提取和储层预测的精度高。对反演结果进行精度评价，讨论它的无偏性和方差展布情况是反问题求解的不可分割的一部分。

总之，勘探地震学中的地震数据采集、成像处理和参数反演逐步统一在了现代信号分析的理论框架下。在此总框架下，数学、物理方法相结合，最终解决参数估计问题（纵横波速度、密度；各向异性参数和吸收衰减参数）和储层描述问题是比较明确的学术和方法技术发展导向。

2015 年，波现象与反演成像研究组(WPI)年度报告集反映了上述观点。

本报告集分为 10 个部分，包括地震波反演成像理论（3 篇文章）；稀疏反演理论（5 篇文章）；速度建模（4 篇文章）；层析成像（3 篇文章）；偏移成像与角度道集产生（8 篇文章）；多次波压制与成像（4 篇文章）；地震波正演模拟（1 篇文章）；地震信号处理（6 篇文章）；预处理与后处理（2 篇文章），数值最优化方法（1 篇文章）。

围绕地震波成像与反演，本报告集涉及了地震信号处理、速度建模方法、地震波反演成像理论、层析成像理论、偏移成像理论、角度道集产生、多次波压制与成像、地震波正演模拟、预处理与后处理以及最优化方法等议题，构成了本年度文集的基本框架。其中，有些问题是我们提出的新理论和新方法，有些是对所关注问题的抽象及总结，为进一步的研究工作奠定基础。