

目 录

前言	王华忠	1
A 地震波反演成像理论		
1. 特征波反演成像理论框架	王华忠	5
2. 最小二乘叠前深度偏移成像理论与方法	王华忠	19
3. 勘探地震中应用泛函分析基础知识总结	王华忠	37
B 背景速度建模及层析成像		
4. 散乱数据插值方法及其在背景速度建模中的应用.....	吴成梁	75
5. TTI 介质中的成像域层析与建模技术	李辉	93
6. 近地表射线束 (Beam) 到达时层析速度反演	罗飞	115
7. 层析反演预条件技术的 SVD 分析	张兵	125
C 高波数参数估计		
8. 反射波成像与散射波成像的对比分析	王华忠	131
9. 地下角度域波动方程反演问题理论分析	任浩然	145
10. 高频近似下的模型高波数成分估计及 RTM 实现 I.....	周阳	151
11. 高频近似下的模型高波数成分估计及 RTM 实现 II.....	周阳	157
12. 基于变密度声波方程的相对波阻抗估计	郭颂	169
D 偏移成像与保真角度道集分析		
13. 基于 CPU/GPU 异构平台的三维粘声最小二乘逆时偏移技术及应用	张猛	177
14. VTI 介质全三维双平方根叠前偏移方法研究	王田珍	183
15. 保真角度道集影响因素分析	吴成梁	189
E 地震波正演模拟		
16. SLS 模型下的粘弹性波动方程及其数值模拟.....	王培尧	227
F 地震数据处理		
17. 基于“低秩-稀疏”联合约束的混叠采集地震数据分离方法	徐鹏	237
18. 基于地震数据特征表达的反射时差估计方法.....	冯波	245
19. 带限子波走时测量问题初探	罗飞	251
20. 稀疏拟平面波分解方法研究	冯波	259

G 岩石物理建模

21. 一种横波速度和岩石模量的自适应估算方法.....	曹文俊	267
------------------------------	-----	-----

H 地震子波相位问题

22. 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.....	王华忠	275
23. 匹配滤波中的相位特征分析方法	张如一	289

I 深层与超深层勘探地震波成像

24. 深层与超深层油气勘探中的地震波反演成像问题分析与评价.....	王华忠	299
-------------------------------------	-----	-----

J 现代图像分析及在勘探地震中的应用

25. 扩散方程和椭圆方程在地震波反演成像中的应用.....	王华忠	307
26. 扩散方程在地震图像处理中的应用	厉朗	325

K 地震数据成像处理软件平台及高性能计算

27. 地震偏移成像的 MapGather 编程框架	刘守伟	341
----------------------------------	-----	-----

结论与展望	王华忠	345
-------------	-----	-----

前言

随着全球油气工业的发展,油气勘探地域由陆地向深水、目的层由中浅层向深层和超深层、资源类型由常规向非常规快速延伸,石油工业发展具有战略性的“三新”领域可以归纳为:水深大于 3000m 的海洋超深水等新区;埋深超过 6000m 的陆地超深层等新层系;储集层孔喉直径小于 1000nm 的超致密油气等新类型。

针对上述复杂的勘探目标,地震数据采集技术的进步必须是先行的。目前,“两宽一高”的地震数据采集技术已经成为公认的发展方向,尽管要达到真正的“两宽一高”的数据采集还需要在采集理论和硬件技术方面做艰苦的努力。譬如随机采样理论、高效采集理论、宽频震源、独立的数字检波器等方面有了明显的技术进步。

AlphaGo 为标志的人工智能在提高参数建模精度、辅助人工进行更精确的地震地质解释方面预计将发挥重要作用,关键是深度学习机制给出的启发在信号和图像分析、地震波反演成像、地震地质解释等方面具有深刻的借鉴价值。

我们一直认为,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。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,在一定的估计理论基础上(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,进而与岩石物理知识相结合来解决资源勘探问题和地球科学问题。医学成像、水声成像、电磁成像、无损探伤等等相关学科的核心问题及解决方法都是类似的。归结为对波在介质中传播的正问题和 Bayes 估计理论下的反问题。当前,凸优化理论、稀疏表达与反演理论的进步对于提高反演成像的质量是很有助益的。

我们一直认为应该把信号系统与勘探系统统一起来。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。这样赋予波传播意义的信号分析和处理方法就可以与一般意义下的现代信号分析统一在一个理论框架下。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。

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。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、各向异性扩散方程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。

目前，各种来源的、与弹性参数有关的信息基本上表现为空间散乱数据的形式，这与地表测量到的波场是很不相同的。这些信息可能反映弹性参数的不同空间位置上的、不同尺度的、不同精确度（或可靠性）的成分，如何把它们有机地融合在一起，形成有地震地质意义的弹性参数场，成为了勘探地震中的一个重要问题。尤其是在目前大数据处理概念与思想流行的时代，这个问题尤其值得关注。

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。可以看出，梯度的计算在当前的各种反演方法中占据着极为核心的位置。但是，我们认为，在数学物理方程的严格意义下考察梯度计算这件事并没有做得很严谨。很显然，梯度计算主要涉及到地震波场正传和反传，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 逐步导引到实用化。

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导引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（或者为提高效率计，基于叠前 Map Migration 方法）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。图像（结构）特征表达、特征图像归类（聚类）、图像识别、一直到图像认知，会在勘探地震中起到越来越重要的作用。到了充分重视现代图像处理的时间了！

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成像到目前为止还严重缺乏反演结果的精度评价。事实上，在地震子波的相位不确定的情况下，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都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、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，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。

2016 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 11 个部分，包括地震波反演成像理论（3 篇文章）；背景速度建模及层析成像（4 篇文章）；高波数参数估计（5 篇文章）；偏移成像与保真角度道集分析（3 篇文章）；地震波正演模拟（1 篇文章）；地震数据处理（4 篇文章）；岩石物理建模（1 篇文章）；地震子波相位问题（2 篇文章）；深层与超深层勘探地震波成像（1 篇文章）；现代图像分析及在勘探地震中的应用（2 篇文章）；地震数据成像处理软件平台及高性能计算（1 篇文章）。

围绕地震波反演成像这个中心问题，本报告集涉及了地震反演成像理论、背景参数层析反演、高波数参数成分的估计、地震数据预处理方法、地震子波的相位问题、现代图像处理方法及应用、一直到地震数据成像处理软件平台及高性能计算的讨论，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。