

目 录

前言	王华忠	1
----------	-----	---

观测系统设计及评价

1. 同时源数据可分离性和采集效率定量评价方法的建立	杜娟	3
----------------------------------	----	---

地震信号处理

2. S 变换域时变反褶积方法研究	曹文俊	13
3. 基于压缩感知的高分辨率平面波分解方法研究	王雄文	23
4. 地震数据快速无损压缩技术	刘守伟	39
5. 同时源数据分离方法研究	王雄文	45

多次波压制

6. 基于编码解码思想的水体鸣震压制方法研究	符琼珮	73
7. 模型驱动类水体相关多次波压制方法研究	孙维蕾	79
8. 自由表面相关多次波和鬼波统一压制方法研究	孙维蕾	85
9. 基于编码解码思想的鬼波压制方法研究	王永强	89

地震波反演成像理论

10. 面向岩性油气藏的地震波反演成像理论	王华忠	95
11. 地震波反演成像中的线性与非线性方程组的解法	王华忠	121
12. 地震波反演成像中的现代图像处理方法及应用	王华忠	143
13. 面向岩性油气藏的最小二乘叠前深度偏移成像	王华忠	163
14. 基于 CPU/GPU 异构平台的全波形反演 及在陆上数据应用中的问题分析	张猛	189

Beam 波传播与成像

15. 基于三维高斯束叠前深度偏移的方位角度道集提取技术研究	蔡杰雄	197
16. Gabor 域模型扰动的散射波场模拟及偏移成像	李辉	203
17. 特征高斯波包分解及参数分析	李辉	225
18. 各向异性介质菲涅尔带 Beam 波成像方法研究	刘少勇	235
19. 基于稳相原理与克希霍夫统一成像理论对射线束类成像方法的一种新观点 : 以 CRS 叠加为例	杨锴	241
20. 三维射线中心坐标系下的单程波外推方法研究	汪孝文	249
21. 高效的 Kirchhoff PSDM 角度道集生成方法研究与应用	刘太臣	253
22. 输出道方式共反射面元叠加方法(CRS-OIS) 结合偏移-反偏移提高信噪比 并压制倾角歧视现象: 以渤海某二维实际数据为例	杨锴	263

层析成像

23. 基于波动方程的初至波走时反演方法.....	冯波	277
24. 波动方程反射波层析: 反射波敏感度核函数研究.....	冯波	287
25. 基于立体层析反演的偏移速度建模应用研究: 以南海某二维深水地震数据为例.....	李振伟	295
26. 三维立体层析反演的理论和方法.....	李振伟	307
27. 基于结构张量的二维立体层析反演实例.....	王宇翔	321
28. 层析反演预条件技术研究.....	张兵	331

自动速度建模及问题分析

29. 地震波自动成像处理流程及关键技术分析.....	王华忠	335
30. Monte Carlo 自动速度建模方法研究.....	凌越	345
31. 非水平地表下以 Kirchhoff PSDM 为引擎的 Monte Carlo 初始速度反演方法.....	凌越	351

逆时偏移成像与角度道集产生

32. 基于高分辨率 Radon 谱的波动方程共角度域道集提取.....	赵磊	367
33. 缝洞储集体逆时偏移成像研究.....	段心标	375
34. 基于余弦基的高效最小二乘逆时偏移方法.....	胡江涛	383

各向异性介质中波传播与偏移成像

35. Tilted TI 和 Orthorhombic 介质中稳定的拟声波方程 及在逆时偏移上的应用.....	周阳	391
36. VTI 介质特征波场合成及成像方法研究.....	刘少勇	401
37. 基于相速度表征的各向异性射线追踪系统的研究.....	蒋波	409

成像影响因素与地震分辨率问题

38. 基于 Hessian 算子的地震成像分辨率分析.....	刘培培	413
39. 近地表速度模型对深度域成像处理的影响分析.....	胡鑫	421

结论与展望	王华忠	427
-------------	-----	-----

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发展时代,促使进入该时代的首要因素为野外广角度、高密度、宽频带的地震数据采集,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集群)。千年之交单向波动方程叠前深度偏移成像成为了勘探地震学的标志性技术,然后是各向异性介质中的 Kirchhoff 积分法和单向波动方程叠前深度偏移成像技术,2006 年前后的 GPU/CPU 异构计算机群的出现引出了各向同性介质中的双向波逆时深度偏移(RTM),接着就是各向异性介质中的 RTM 技术。2008 年后全波形反演(FWI)进入了勘探地震学的核心技术圈。2010 年,正交各向异性 RTM 也进入生产试用。无论当前及今后相当长一段时间内的实用性如何,RTM 和 FWI 的结合将在勘探地震学中占据着领先技术的位置。其原因在于该两项技术进行波现象预测与反演的方式和勘探地球物理核心思想是一致的。整个勘探地球物理本身就是利用观测数据和一定的波现象预测器,在一定的估计理论基础上来估计或反演地下介质的物理参数,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。随着勘探形式的发展,随机反演也在逐步进入储层参数的估计过程中。这种在估计理论框架下进行参数反演的技术发展趋势是无法改变的,而且随着偏移成像方法技术的成熟和完善,参数估计和建模将成为勘探地震中最核心的工作内容。

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弹性参数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的数值计算方法,即波动方程最好在数据和参数的特征表达域中求解。

与波动方程预测地震波场一样,信号处理过程中的建模也是非常基础的工作,当前基追踪、匹配追踪、冗余字典等方法表达信号是比较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。这其中,介质参数的几何结构是非常重要的信息。现代图像处理逐步地在勘探地震学中得到重要应用,从图像中自动地提取几何结构信息是关键点。这也是地震数据成像处理逐步走向(半)自动化的核心技术所在。图像的结构张量分析方法、Level-set 方法、TV 方法、高维小波变换方法就是代表性的自动图像信息提取技术。

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步的参数模型,其中步长的选择是很关键的。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。再退一步,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原因。但是,由于地震介质的复杂性导致的波场的不可预测性给勘探地震学的信号处理带了挑战,我们的观

点是提出特征波场，增加波场的可预测性，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，把 FWI 逐步导引到实用化。其中，特征波场的预测方法依然是问题的核心之一。

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 反演方法在宏观背景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复杂介质条件下已经不再有效，必须发展以叠前深度偏移为引擎、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。

最后，对反演解的评价，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。

2013 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，包括地震信号处理（4 篇文章）；观测系统设计及评价（1 篇文章）；地震波反演理论（5 篇文章）；Beam 波传播与成像（8 篇文章）；层析成像（6 篇文章）；自动速度建模及问题分析（3 篇文章）；逆时偏移成像与角度道集产生（3 篇文章）；各向异性介质中波传播与偏移成像（3 篇文章）；多次波压制（4 篇文章）；地震分辨率问题（2 篇文章）。

围绕地震波成像与反演，本报告集涉及了随机采样观测系统设计、特征域波场传播方法研究、各向同性与各向异性介质中 RTM 引擎的制造及 Beam 波偏移成像、层析速度反演与自动速度建模、地震波反演理论和方法、多次波和鬼波的模型表达与压制、同时激发源记录的分解，最后是地震分辨率问题讨论，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。