

目 录

| | | |
|--|-----|-----|
| 前言 | 王华忠 | 1 |
| A 地震波反演成像理论与方法 | | |
| 1. “两宽一高”油气地震勘探中的关键问题分析..... | 王华忠 | 5 |
| 2. 从线性高斯反演成像到非线性非高斯反演成像的演变..... | 王华忠 | 17 |
| 3. 基于二阶统计量的信号分析方法存在问题及解决方案..... | 王华忠 | 31 |
| B 背景速度建模及层析成像 | | |
| 4. 透射波旅行时 Beam 层析成像方法 | 罗飞 | 39 |
| 5. 高阶 Rytov 近似..... | 冯波 | 57 |
| 6. 反射波层析反演速度建模方法 | 冯波 | 65 |
| C 高波数参数估计 | | |
| 7. 基于点扩散函数的黏声介质反演成像 | 任浩然 | 77 |
| 8. 绝对波阻抗估计方法 I: 基于成像域最小二乘偏移的反射系数估计 | 郭颂 | 85 |
| 9. 基于反射模式的多次波正、反演问题初探..... | 周阳 | 93 |
| D 偏移成像与高效成像道集生成 | | |
| 10. 基于数据自适应加权的叠前深度偏移成像方法..... | 吴成梁 | 107 |
| 11. 一种提高叠前深度偏移成像质量的加权叠加方法研究..... | 吴成梁 | 121 |
| 12. 散射波成像方法对比分析 | 朱万怡 | 133 |
| 13. 实用 Kirchhoff PSTM 全方位角度道集生成方法与实现 | 刘守伟 | 137 |
| 14. 基于激励时间梯度场的逆时偏移角度道集提取方法研究及应用..... | 刘少勇 | 145 |
| E 宽带波阻抗反演 | | |
| 15. “两宽一高”地震数据下的宽带波阻抗建模技术..... | 王华忠 | 157 |
| 16. 绝对波阻抗估计方法 II: 基于反射系数与背景阻抗的绝对波阻抗反演..... | 郭颂 | 167 |
| F 地震波正演模拟 | | |
| 17. VTI 介质下的射线追踪和射线中心坐标系的建立..... | 张博汉 | 173 |
| 18. 基于费马波前扩散的衰减 TI 介质频率相关复旅行时计算方法研究..... | 胡江涛 | 183 |

G 岩石物理建模

| | | |
|------------------------|-----|-----|
| 19. Q 弹性流体因子反演方法 | 张如一 | 191 |
|------------------------|-----|-----|

H 地震数据预处理

| | | |
|---------------------------------|-----|-----|
| 20. 浅谈“信噪比”与数据质量评价 | 罗飞 | 199 |
| 21. 高维地震数据的 Wiener 中心滤波方法 | 张力起 | 211 |
| 22. 地震数据高维统计滤波方法 | 王福 | 225 |

I 多次波压制

| | | |
|------------------------------------|----|-----|
| 23. 编码与解码框架下的局部平面波域浅水多次波压制方法 | 徐鹏 | 239 |
| 24. 利用基追踪算法进行鬼波压制 | 徐鹏 | 251 |

J 机器学习算法在勘探地震中的应用

| | | |
|--------------------------------|-----|-----|
| 25. 机器学习框架下多维属性约束的初至拾取方法 | 罗飞 | 257 |
| 26. 面向地震噪声压制的卷积自编码器 | 任浩然 | 265 |

K 现代图像分析及在勘探地震中的应用

| | | |
|--|-----|-----|
| 27. 基于稀疏图像反演的速度谱精度提升 | 王瑞林 | 271 |
| 28. 基于 RGB-HSV 颜色域图像结构增强方法及在地震解释中的应用 | 盛燊 | 279 |

| | | |
|-------------|-----|-----|
| 结论与展望 | 王华忠 | 285 |
|-------------|-----|-----|

前言

当今，油气地震勘探的技术发展趋势越来越明朗。首先地质勘探目标越来越复杂，对成像结果的高要求倒逼数据采集技术的进步。“两宽一高”的地震数据采集技术的确是能满足高精度成像要求的观测方式，但震源与检波器相关的硬件技术以及自动化和智能化的采集手段的发展还不能充分地满足“两宽一高”地震数据采集方式的真正实现。但是，当今时代先进制造、智能制造技术发展很快，无论是海上或是陆上的地震数据自动化采集技术都发展相当快，尤其是海上无人震源、无人检波器技术正逐渐进入实用化阶段，陆上无人“节点”检波器技术也在进行探索。相信不久的将来，自动化和智能化的“两宽一高”采集技术将会实现。

“两宽一高”的数据基础是开展高精度保真成像的必要条件。由“两宽一高”的叠前地震数据通过反演成像得到满足高精度储层描述要求的宽波数带反演成像结果看到了实现的可能性。但是，从海量的“两宽一高”数据中提取与精确描述储层相关信息的技术进展还严重滞后，譬如 FWI 和 LS-RTM 技术距离大规模生产实用化（尤其是直接贡献于储层描述的应用）还相差较大。

大数据分析把各行各业带入了重视数据采集和数据分析的时代。目前似乎人人必言大数据分析和人工智能。2018 年度 SEG 年会，机器学习相关的文章占了相当大的比例。SEG 年会上每年度都设立 **Recent Advances and the Road Ahead** 专题，用 8 篇文章总结当前的技术进展和预测今后的技术方向。2018 年 SEG 年会上，该专题的 8 篇文章有 7 篇讲机器学习在勘探地震中应用，1 篇是预测量子计算技术在勘探地震中应用。2018 年可以认为是机器学习（人工智能）在勘探地震中推广应用的元年！但我们相信没有免费午餐原则，地震数据中没有包含的宽带波阻抗（或其他弹性参数）成分无论用什么先进数据分析方法也无法准确地获得。更好地实现“两宽一高”的叠前地震数据，更多地收集（或采集）井中数据（与宽带波阻抗相关的数据）以及各种地质数据（与估计参数有关的数据），依然是做好高精度地震成像以及更好地进行油藏描述的基础。

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）与系统参数估计。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。

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。

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前的选择。Bayes 估计理论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到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，是我们确定的学术和方法技术发展导向。

2018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与方法（3篇文章）；背景速度建模及层析成像（3篇文章）；高波数参数估计（3篇文章）；偏移成像与高效成像道集生成（5篇文章）；宽带波阻抗反演（2篇文章）；地震波正演模拟（2篇文章）；岩石物理建模（1篇文章）；地震数据预处理（3篇文章）；多次波压制（2篇文章）；机器学习算法在勘探地震中的应用（2篇）；现代图像分析及在勘探地震中的应用（2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波反演成像基本理论与方法、背景速度建模及层析成像、高波数参数估计、宽带波阻抗反演、偏移成像、地震波正演模拟、地震数据预处理方法、多次波压制问题、以及比较热门的机器学习和现代图像分析理论在勘探地震中的应用的讨论，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。