



波现象与智能反演成像研究组

从IMAGE24看油气勘探领域值得研究的议题

报告人：王华忠

波现象与智能反演成像研究组 (WPI)

同济大学海洋与地球科学学院，上海

2024年09月05日

目录

- ◆一、IMAGE24的基本概况
- ◆二、IMAGE24研究报告情况的分析
- ◆三、油气勘探领域值得研究的议题
- ◆四、结论与讨论

一、IMAGE24的基本概况

- ◆ 1、SEG和AAPG两个协会合在一起举办IMAGE2024，参会人依然不多，7000多人？
 - ◆ **IMAGE=International Meeting of Applied Geoscience and Energy**
- ◆ 2、对技术问题的热情下降很多。
 - ◆ **DAS采集技术；ML/AI技术；FWI反演成像技术；岩石物理建模，都没有实质性的进步。没有带来油气地震勘探的显著进步。**
 - ◆ **很多报告厅，基本没人。以前这是很不常见的。**
 - ◆ **议题过于集中，造成“卷”的情况。可能也使很多人离开油气勘探行业。实际上，其它行业也不一定好于油气行业。**

一、IMAGE24的基本概况

- ◆ 3, 开幕式和整个会议阶段对能源转型（绿色能源、新能源）关注很不显著。
 - ◆ Opening Session - Topic: Global Energy' s Expected Challenges
 - ◆ Panelists:
 - ◆ Tracey Henderson — EVP Exploration, Apache;
 - ◆ Kevin McLachlan — SVP Exploration, TotalEnergies;
 - ◆ John Ardill — VP Global Exploration, ExxonMobil;
 - ◆ Mohd Redhani — VP Exploration, Petronas.
 - ◆ 还在讨论油气资源勘探的问题，对能源转型基本没有提及。与EAGE会议形成明显的反差。
 - ◆ 美国两党及民众的意见分裂可能会严重阻碍美国在能源转型中起到重要作用。
 - ◆ 在能源转型中，哪个国家占领先地位，今后的国运会一路昌盛。

一、IMAGE24的基本概况

◆3, 开幕式和整个会议阶段对能源转型（绿色能源、新能源）关注很不显著。

Geothermal Hub

Geothermal Hub Hours:
Tuesday9:15 a.m.–5:00 p.m.
Wednesday9:00 a.m.–5:00 p.m.
Thursday9:00 a.m.–5:00 p.m.

Location: 3rd Level

The Geothermal Hub, presented by Geothermal Rising, will feature diverse content suitable for everyone; from those who have never heard of geothermal, to those currently working in the industry!

Content will include presentations on the types and applications of geologic, geophysical and engineering data in geothermal exploration and development, geothermal case studies, updates from geothermal companies, as well as a live podcast, panel discussions about transitioning a career from oil & gas into geothermal and dispelling common misconceptions about geothermal, and informal networking opportunities.

Don't miss these Geothermal Hub Highlights:

New for 2024!

Presented by:

GEOTHERMAL RISING
POWERING OUR RENEWABLE FUTURE.

Companies Participating in the Geothermal Hub:

- RESPEC
- University of Nevada, Reno
- Seequent
- Well Control School
- Vallourec USA Corp
- Baseload Power
- KMS Technologies
- Energy Transition Solutions Podcast
- MicroSeismic, Inc.
- Ignis H₂ Energy
- Bureau of Economic Geology, The University of Texas at Austin
- GT Titan
- Sage Geosystems
- SLB
- Fervo Energy
- GA Drilling
- Gradient Geothermal
- Quaise Energy
- GRC TXLAOK Chapter

多。个很小的Booth。参加人也不多。关于地热勘探的讨论仅仅有一



一、IMAGE24的基本概况

- ◆4、新进入油气地震行业的留美博士生显著减少，还是老一批的那些博士生。完全没有了十几年前的光景。很多新博士流入了其他行当。回国的也占较大的比例。
- ◆5、Houston依然是几十年前的老样子。我们住的Holiday Inn旅馆出现了显著的破败。物价涨了很多。美国社会底层出现了明显的止步不前或倒退，尽管在某些领域还是有明显的优势。

目录

- ◆ 一、IMAGE24的基本概况
- ◆ 二、IMAGE24研究报告情况的分析
- ◆ 三、油气勘探领域值得研究的议题
- ◆ 四、结论与讨论

二、IMAGE24研究报告情况的分析

◆IMAGE24 所有的议题:

Key to Topic Areas

Exploration and Development (Geographic Regions)

AFR: Africa
AP: Asia Pacific
ECR: Europe/Caspian Region
EMME: Eastern Mediterranean/Middle East
LAC: Latin America and the Caribbean
NA: North America

Geology

CAEV: Carbonates and Evaporites
GEOPS: Geochemistry and Petroleum Systems
SILIC: Siliciclastic
STGM: Structure, Tectonics, and Geomechanics

Geophysics

AAS: Anisotropy, AVO, and Seismic Inversion
ACQ: Acquisition
BH: Borehole
DAS: Distributed Acoustic Sensing
EM: Electromagnetics
FWI: Full-Waveform Inversion
GM: Gravity and Magnetics
IPS: Induced and Passive Seismic
NS: Near Surface
RP: Rock Physics
SMT: Seismic Modeling and Theory
SP: Seismic Processing
TL: Time Lapse

Integrated (Geology and Geophysics)

CO2: Low Carbon Solutions/CCS
DMLA: Digitalization, Machine Learning, and Analytics: Energy Applications
INT: Interpretation
INTD: Deep Integration of Data and Disciplines
MME: Mining and Mineral Exploration
NEF: New Energy Frontiers, Critical Minerals, and Geothermal
RC: Reservoir Characterization
STUD: AAPG, SEG, and SEPM Student Research
SUS: Sustainability Energy Development and Environmental Geoscience

Special Sessions

SS: Special Sessions

仅仅几年的功夫, ML/AI也不再单独成为一个 Topic!

二、IMAGE24研究报告情况的分析

◆IMAGE24 Topic情况的分析:

- ◆地区勘探情况及勘探问题的报告，尤其是拉丁美洲和非洲，占据大量的Section。涉及墨西哥湾区的勘探问题的报告逐渐减少。北海和巴伦支海的勘探问题欧洲人自己解决，IMAGE24中讨论很少可以理解。
- ◆AAPG相关的Section及报告数目提升很多，都是针对探区储层描述问题。勘探地球物理的报告大幅度减少，代表性方法技术的研究报告少而又少。
- ◆Recent Advances and the Road Ahead: Hot Topics in Geophysics。看不到有代表性的技术发展，都是零散的技术点。
- ◆数据采集领域也看不到有意义的探索。可能是找不到可行的技术方向。采集技术的需求是在的，但是找不到合适的解决问题的方案。

二、IMAGE24研究报告情况的分析

◆IMAGE24 Topic情况的分析:

- ◆ 仅仅几年的功夫, ML/AI不再单独成为一个Section, 分散在不同的、具体的应用点上。
- ◆ 勘探地球物理的Section, 主要以应用领域列举 (譬如, RP (Rock Physics)、DAS、BH (Borehole)、ACQ等等)。极少出现以方法理论为主题 (FWI除外, 实际上FWI也根本不是在说一个迭代优化算法, 而是整个反演成像过程) 形成Section。



二、IMAGE24研究报告情况的分析

◆分析结论：

- ◆ 勘探地球物理领域中的理论方法技术的探索，逐渐集中在若干个本质问题上，大范围的、尝试性的、探索性的研究已经结束。复杂的实际问题依然没有得到很好的解决。但值得研究的问题却已经相当地明瞭了。还是那几个根本的问题。这就说明了为什么现在IMAGE24的技术报告Section分布情况和十年前、甚至五年前都很不相同。
- ◆ IMAGE24中展示勘探问题的报告占据了大量的数目，就非常容易理解了。方法理论方面的文章缺乏突破、缺乏新意，总感觉在炒冷饭，尤其在资深的研究人员看来尤其如此。



二、IMAGE24研究报告情况的分析

◆延伸出的观点：

- ◆ Applied Geophysics 到底还有什么问题值得研究？到底是应该针对特定的实际问题开展解决该实际问题的方法的研究，还是针对理论问题，寻找解决理论问题的方法。
- ◆ 大学研究团队，自然是希望开展后者的研究，发表“所谓的”高水平论文。前者应该是油公司的做法。
- ◆ 事实上，从实际问题中，提炼出有一定理论性的问题，用已经奠定的理论基础及解决理论问题的能力，去解决实际问题，应该是**应用基础研究**的正确做法。Applied Geophysics大学研究团队应该如此开展研究。

目录

- ◆ 一、IMAGE24的基本概况
- ◆ 二、IMAGE24研究报告情况的分析
- ◆ 三、油气勘探领域值得研究的议题
- ◆ 四、结论与讨论

三、油气勘探领域值得研究的议题

- ◆ 1、油气勘探的根本目的就是寻找油气藏。
 - ◆ 从这一点看，SEG (Society of Exploration Geophysicists) 和AAPG (American Association of Petroleum Geologists) 合在一起，是非常合理的。仅仅靠勘探地球物理学家，不可能很好地解决油藏描述问题。
- ◆ 2、油气勘探的本质问题就两个：
 - ◆ Applied Geophysics 或Exploration Geophysicists解决油藏的**定位、成像**（**几何形态刻画**）和**物理性质参数的估计问题**；
 - ◆ 油气地质学家（Petroleum Geologists）在此基础上解决**油藏的岩石性质及含油气性的描述及钻井决策问题**。

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆ 3、本质性问题的抽象：

- ◆ 油藏的定位、成像（几何形态刻画）和物理性质参数的估计问题，理论上是Bayes参数估计问题。
- ◆ 其中，实际数据的采集、数据（预）处理、反演成像是三个核心环节。
- ◆ 我一直非常关注实际数据的采集。从反演成像的需求理解震源、传播和接收是更本质的事情。信号的采样定理是相对简单的理论问题。
- ◆ 到底如何看待“从反演成像的需求理解震源、传播和接收是更本质的事情”的说法？
 - ◆ Applied Geophysicist 不深刻地理解数据采集，能称为合格吗？

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆ 3、本质性问题的抽象：

- ◆ 数据（预）处理的本质，我认为理论上已经比较清楚了，即在非高斯和非平稳的实测数据情形下，如何最佳地预测出其中包含的线性或非线性信号（结构）。
 - ◆ 这是现代信号分析的本质问题。到目前为止，在复杂情形下，这个问题远远没有得到解决。
 - ◆ 博士论文研究这个问题是可以的。但是，在这方面做出有贡献的研究需要高度扎实的数学背景。
 - ◆ 随机信号、随机过程、时间序列、空间随机场的建模，解决信号预测正问题是理论基础，Bayes参数估计是解决最佳信号预测的方法理论。
 - ◆ 信号的特征表达也是这样一个反问题。我认为：一定要在反问题框架下思考信号特征表达！
 - ◆ 还能做出什么有新意的成果？
 - ◆ “正问题” + “反问题”的模式，具有广泛的普适性。
 - ◆ Bayes参数估计理论，是现代信号分析的核心内容。我认为：应该把地震波反演成像统一在现代信号分析的理论框架下，仅仅是正问题不同而已。

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆ 3、本质性问题的抽象：

◆ 反演成像

- ◆ **九九归一**。目前都已经回归在Bayes参数估计理论下。FWI仅仅是Bayes参数估计理论在勘探地震中的一个应用实例。而且主要用梯度导引类的迭代算法具体实现参数估计。
- ◆ **正问题依然参数估计的基础！** 我一直讲：有什么样的正问题就有什么样的反问题。
 - ◆ 实际问题的物理，物理问题，物理问题的数学模型，正问题，各种数学物理方程，是解决问题的基础。
 - ◆ **我感觉：很多博士生，距离这个越来越远。忘记了问题来自何处，问题的物理实质是什么。**
 - ◆ **IMAGE24会议上，中国优秀的博士生逐渐工具化，成为给西方人提供做决策的工具人。关键是不自知，还乐此不疲！还心理优越！**
- ◆ **事实上，由后验概率密度生成“随机产生”一族反演解，然后根据这族反演解做最佳决策才是更合理的参数估计方法。希望大家关注这样的思想，发展出独特的方法。这样的研究应该是有创新性的。**

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆ 3、本质性问题的抽象：

◆ 油藏描述

- ◆ 我认为：油藏描述的基础数据应该是井数据、岩石物理性质参数的估计结果。
- ◆ 构建起岩石物理性质参数和岩石性质参数之间关系的岩石物理关系式是正问题。
- ◆ 由岩石物理性质参数的估计结果，构建反演理论，估计岩石性质参数，是反问题。
- ◆ 估计岩石性质参数的核心困难依然正问题决定的。岩石物理性质参数和岩石性质参数之间关系更多是某种相关关系，不是因果关系。
- ◆ 因此，估计岩石性质参数的反问题，更多是一个Bayes推断问题，不是典型的参数估计反问题。
- ◆ 到目前为止，估计岩石性质参数的反问题还不能认为已经是一个科学问题，更多是艺术问题。

◆ 钻井定位：

- ◆ 这是一个Petroleum Geologists做出的综合决策问题。AI应能辅助决策。这样的AI系统如何构建？

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆4、若干重点模型的观点：

- ◆ 随机信号及空间随机场模型
- ◆ Hilbert空间中函数逼近模型
- ◆ 波动方程模型
 - ◆ 各种波动方程的简化及变种
 - ◆ 表示定理 (Aki&Richards, Chapter2, 2.5)
 - ◆ Born散射级数
 - ◆ Zoeppritz方程
 - ◆ 高频近似
- ◆ 岩石物理模型
- ◆ Markov状态演化模型

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆4、若干重点模型的观点：

◆随机信号及空间随机场模型---本质上即随机信号的生成或预测

◆时间序列建模---ARMA模型

- ◆ 从信号与系统的角度看，白噪声冲击因果系统参数平稳随机信号。存在逆系统，由平稳随机信号估计出白噪声。
- ◆ 数学上，白噪声的线性叠加生成平稳随机信号。这就是MA模型。
- ◆ 需要对ARMA模型（AR模型、MA模型）数学物理机制的深入理解。

◆空间随机场建模---Kirging方法

- ◆ 这是把Hilbert空间中的函数逼近（建模）扩展应用在空间随机场建模中。
- ◆ 也可以说是AR模型扩展应用在空间随机场建模中。
- ◆ 非平稳情形下、非高斯情形下，由散乱的空间随机场，生成正确的规则的高维信号模型依然是没有得到解决的。

◆所谓的生成扩散模型（Generative Diffusion Models），由Markov状态演化模型导引出来。

- ◆ 任何初至状态出发的随机过程，在转移概率控制下，无限次演化后，总会收敛到既定分布的随机过程上。
- ◆ 某种情况下，总会收敛到白噪声随机过程上。
- ◆ 如果这个过程可逆，相当于用白噪声冲击一个“黑匣子”，产生期望的随机过程。
- ◆ 这个问题需要思考清楚。用于空间随机场的建模过程中。

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆4、若干重点模型的观点：

◆ Hilbert空间中函数逼近模型

- ◆ 这是最基本的建模方法的思想来源。
- ◆ 在Hilbert空间中选一组基函数，它们的线性组合构成对被逼近函数的数学模型。
- ◆ 在Bayes框架下，最佳地确定这个逼近模型。完成建模过程。

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆4、若干重点模型的观点：

◆波动方程模型---由广义Hook' s Law和Newton运动定律，以及能量守恒定理导出。

◆各种波动方程的简化及变种

◆Green函数法求解波动方程

◆表示定理 (Aki&Richards, Chapter2, 2.5)

◆Marchenko方法的理论根源

◆Born散射级数

◆Zoeppritz方程

◆高频近似

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆4、若干重点模型的观点：

◆岩石物理模型

- ◆ 岩石弹性模量与岩石性质参数之间的关系
- ◆ 岩石电性、磁性参数与岩石性质参数之间的关系
- ◆ 密度与岩石性质参数之间的关系
- ◆ 岩石物理学是地球物理学的基础。往往被我们所忽视。
- ◆ 岩石物理学是科学还是艺术？一门学科如何判断其是科学或是艺术？

◆ Markov状态演化模型

- ◆ 这是随机过程的经典模型。
- ◆ 自然和社会科学中的很多问题可以由此模型来描述。
- ◆ 状态及状态演化，状态演化的规律，状态演化规律的描述，具有广泛的应用场景。
- ◆ 譬如强化学习，就是基于Markov最佳演化决策，发展出来的。

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆5、大学研究组应该研究什么？

- ◆大学研究组应该研究的首先是物理实体及与物理实体对应的各种变化规律的描述。
就是对正问题的研究。就是要构建出合理的数学物理模型。
- ◆然后，在Bayes决策和Bayes参数估计理论框架下，解决各种各样的实际问题。
- ◆无论IMAGE24技术报告分布如何随形势变化、演变，大学研究组研究问题的上述模式是不应该变的。否则，博士生们培养不出真正的研究能力。毕业后也就很难为社会做出贡献，得到个人发展。

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆6、WPI重点研究的问题：

◆1、FWI (TFWI+RFWI) 的实用化，尤其在中国陆上地震勘探中的实用化。

◆发展出有效的“同因之果”时差检测方法是核心，目前差距还比较大。

◆初至波检测也是在解决“同因之果”的时差检测问题。

◆2、保真、定量、弱旁瓣的反射系数成像---LS_RTM的实用化

◆这是地震波偏移成像今后长时间追求的目标。

◆3、井、震、岩石物理和地质知识的有效结合生成三维空间中的、尽可能准确的、有效的初始模型。

◆空间数据分析+信息融合+随机模拟 Generative Diffusion Models ?

◆4、宽带弹性参数重构

◆尤其期望生成纵波宽带阻抗和横波宽带阻抗

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆ 6、WPI重点研究的问题：

◆ 6.1 反射波FWI最核心的问题是克服Cycle-Skipping（周期跳）现象。

◆ 从具体实现的角度，认为主要应该关注如下三个关键点：

◆ 1、“同因之果”的时差测量；

◆ 如果能解决这个问题，Cycle-Skipping问题基本可以被解决了。

◆ 2、RFWI中，层析梯度项和偏移梯度项的有效分解。

◆ 3、梯度分解基础上的正则化信息提取与施加。

◆ 我们认为：解决了这三个关键点，反射波FWI，即便针对陆上数据，也可逐步地得到实用化。

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆ 6、WPI重点研究的问题：

◆ 6.2 保真、定量、弱旁瓣反射系数的生成应该成为地震波成像的当前及今后较长一段时间的目标。

◆ 数学理论当然是LS_RTM。

◆ LS_RTM在陆上地震勘探中的实用化存在很大问题。

◆ LS_RTM实用化的基本逻辑路线：

- ◆ 最佳照明优选保真成像，目前的实现还很不完善
- ◆ 井震匹配定量化
- ◆ 高维PSF反褶积+随机反演生成无旁瓣反射系数？

◆ 6.3 多信息融合宽带弹性参数重构

◆ 基于空间数据分析方法的伪井生成

◆ 多信息融合宽带弹性参数重构提成一个约束优化反问题

FWI_Imaging/FWI_Derived
_reflectivity
?

期望基于空间数据分析方法的伪井生成结果也用在反射波FWI梯度约束中

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆6、WPI重点研究的问题

◆6.4 特征反射层相关多次反射波FWI (CMRFWI = Characteristic Multiple Reflection FWI) 的概念。

◆特征反射层相关特征多次反射波FWI的基本逻辑步骤包括：

- ◆ ①、初始背景速度+特征反射层构成的速度模型；
 - ◆ ②、特征反射层相关的特征多次反射波的模拟；
 - ◆ ③、特征多次反射波模拟波场震相与实测特征多次反射波震相的（非线性）时差测量；
 - ◆ ④、特征多次反射波FWI（重点依然是用特征多次反射波层析梯度项更新背景速度）。
- ◆ 上述步骤要迭代进行。更新初始背景速度+特征反射层构成的速度模型，重新进行下一轮的速度更新。期望这样迭代更新的轮次不要太多。
- ◆ 其中，能否得到有效的速度建模结果，核心依然在于特征多次反射波模拟波场震相与实测特征多次反射波震相的（非线性）时差测量上。
- ◆ 当前，先把特征反射层相关多次反射波预测与压制问题解决好。

目录

- ◆一、IMAGE24的基本概况
- ◆二、IMAGE24研究报告情况的分析
- ◆三、油气勘探领域值得研究的议题
- ◆四、结论与讨论

四、结论与讨论

- ◆从IMAGE24看，问题导向的Applied Geophysics研究趋势非常明显。所谓的问题当然是资源勘探领域中存在的问题。近地表勘探问题也逐渐越来越受重视。CCS无非是把当前的技术应用在CO₂的储存与监控上。
- ◆方法理论问题的研究逐渐聚集到一些本质问题上。我觉得：现代信号分析或随机信号分析基础上，由建模+ Bayes参数估计为框架，发展出的ML和FWI逐渐统一了勘探地震领域的方法研究。
- ◆即便如此，越来越复杂的实际问题依然没有得到有效的解决。



四、结论与讨论

- ◆ **大学研究团队还能干什么？无论如何，还是要从实际问题中进行抽象，把本质性的东西抽出来，针对它们开展研究。我认为：本质问题是正问题！实际问题的物理是本质！**
- ◆ **WPI博士生的培养一定要重基础、重本质问题、重分析能力、当然最后是培养创新解决问题的能力。**

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆ 大学研究团队还能干什么？

◆ 提出WPI重点研究的四个方面的问题：

- ◆ 1、FWI (TFWI+RFWI) 的实用化，尤其在中国陆上地震勘探中的实用化。
- ◆ 2、保真、定量、弱旁瓣的反射系数成像
 - ◆ 多次波成像一定是我们关注的重点问题。
- ◆ 3、井、震、岩石物理和地质知识的有效结合生成三维空间中的、尽可能准确的、有效的初始模型。
- ◆ 4、宽带弹性参数重构。

三、油气勘探领域值得研究的议题

◆ 大学研究团队还能干什么？

- ◆ 至于复杂介质（各向异性、弹性、吸收衰减）情形下的反演成像，我认为这仅仅是推广性的研究。在DAS、近地表勘探、时延地震、OBN观测、CCS等中的应用，更是推广性的研究。
- ◆ ML的关注，是必要的，但主要是理解思想、发展思想（如果能的话）。利用已有的思想及程序，拿来应用一下，不是WPI博士生该做的事情。



谢谢
欢迎批评指正