

《计算地球物理学术研讨会》会议通知

计算地球物理学是计算数学和地球物理学紧密结合的交叉学科，其中勘探地震学和计算电磁学是计算地球物理研究的核心内容，包括了基于地震波的传播规律进行数值模拟、偏移成像、速度建模，基于 Maxwell 方程的低频电磁场的模拟和反演。新的计算方案如模型降阶方法在计算效率上的优势日益凸显。除了传统的基于偏微分方程的数值模拟和反演，使用神经网络和人工智能从事相关的新型研究也日益火热。近几年，计算地球物理的研究内容越来越丰富，与之有关的理论、方法已出现在生产应用的各个方面，相应的学术成果日新月异、技术方法层出不穷。因此，在数学理论、计算方法、实际应用等多个方面对有关内容进行深入探讨，可以推动技术的进步和迭代更新，促进国民经济发展和工业应用。

为了与国内同行进一步交流对话、探讨计算地球物理有关的技术、方法、应用，加强各研究机构 and 高校在相关领域的学术合作，拟定于 2024 年 7 月 13 日-14 日在哈工大举办“计算地球物理学术研讨会”。会议主题包括：计算地震学和计算电磁学、正问题数值模拟、反问题的高效求解、相关应用等。

组织委员会：杨鹏亮、王文龙、陈勇、李扬

7 月 12 日下午报到，报到地点：艺霏酒店（哈尔滨市南岗区一匡街 55 号）。无会议注册费，食宿交通的费用自理。

会议时间：2024 年 7 月 13 日——7 月 14 日

会议地点：哈尔滨工业大学一校区 活动中心 327 学术报告厅

联系人：杨鹏亮 E-mail: pengliang.yang@hit.edu.cn



会议日程表  
2024年7月13日，周六上午

时间	报告信息	主持人
08:30-08:45	开幕式	
08:45-09:15	VTI 孔隙介质中的震电耦合波 高永新 合肥工业大学	杨鹏亮
09:15-09:45	逆时偏移的倾角道集及其在复杂构造成像中的应用 杨凯 南方科技大学	
09:45-10:15	各向异性正演与成像方法研究 卢永明 深圳北理莫斯科大学	
10:15-10:45	茶歇 及合影	
10:45-11:15	Efficient multigrid algorithm based on multi-color block-wise Gauss Seidel smoothers for large 3D electromagnetic modelling 郭荣文 中南大学	彭荣华
11:15-11:45	基于非结构化网格和最小熵正则化的大地电磁与重力高分辨率联合反演 蔡洪柱 中国地质大学（武汉）	

2024年7月13日，周六下午

时间	报告信息	主持人
14:00-14:30	探秘脑海：地震成像与反演技术的探索 刘红伟 中国石油大学（华东）	杨凯
14:30-15:00	地震面波全频散谱反演 张振东 中科院地质与地球物理所	
15:00-15:30	基于全波形反演的深反射地震数据速度建模 张盼 吉林大学	
15:30-16:00	混合优化算法全波形反演 赵泽宇 北京大学	
16:00-16:30	茶歇	
16:30-17:00	基于模型降阶理论的地球物理电磁法三维数值模拟 周建美 长安大学	郭荣文
17:00-17:30	基于交替方向乘法的大规模海洋可控源电磁三维反演 彭荣华 中国地质大学（武汉）	
17:30-18:00	海洋可控源电磁发射源位置反演研究 李刚 浙江大学	



2024年7月14日，周日上午

时间	报告信息	主持人
08:30-09:00	Multi-parameter full-waveform inversion applied to distributed acoustic sensing recorded seismic data 潘文勇 中科院地质与地球物理所	王文龙
09:00-09:30	Direct full waveform inversion of DAS fiber-optic data 周伟 KFUPM, 沙特	
09:30-10:00	Algorithmic analysis towards extended source waveform inversion 杨鹏亮 哈尔滨工业大学	
10:00-10:20	茶歇	
10:20-10:50	基于正反演网格解耦的半航空电磁三维反演研究 惠哲剑 成都理工大学	潘文勇
10:50-11:20	基于物理信息深度学习的多频率地震波场模拟研究 宋超 吉林大学	
11:20-11:50	神经网络在地震插值中的稳定性研究 王文龙 哈尔滨工业大学	

报告摘要  
(按姓氏首字母排序)

1. 蔡洪柱 教授 中国地质大学(武汉)

题目: 基于非结构化网格和最小熵正则化的大地电磁与重力高分辨率联合反演

摘要: 重力和大地电磁作为应用地球物理学的主要分支, 已广泛应用于油气矿产勘查、地质调查和地球深部构造研究等领域。重力和大地电磁法数据的融合解译可从多角度、多尺度对地下介质进行综合评价, 开展重力和大地电磁数据稳健、高分辨率联合反演研究, 有助于改善反演的多解性以及单一地球物理方法对地下结构感知的局限性, 获取分辨率更高的多参数综合地球物理模型。对此, 我们提出基于 Gramian 算子和联合 Entropy 算子的重力和大地电磁联合反演框架, 在保证物性参数结构相似性的同时获取边界更为清晰的反演结果; 并利用 MPI+OpenMP 多层次并行策略加快重力和大地电磁的正演, 为三维联合反演提供高效的算法引擎; 通过高斯-牛顿优化策略最小化目标函数, 实现重力和大地电磁的高分辨率三维联合反演。相关合成算例的研究表明本文提出的重力和大地电磁联合反演框架具有良好的稳健性。最后, 我们将联合反演算法应用于美国 Utah FORGE 地区的重力和大地电磁实测数据综合解释中以进一步测试算法的有效性。

2. 高永新 教授 合肥工业大学

题目: VTI 孔隙介质中的震电耦合波

摘要: 针对 VTI(具有垂直对称轴的横观各向同性)孔隙介质, 提出了一种半解析方法用于计算点源激发的三维震电波场。通过引入一组柱谐坐标, 将位移、电场、磁场等量变换到新的坐标系下, 再带入到 VTI 孔隙介质波动方程中, 将方程解耦为两组形式相同的频率-波数域一阶微分方程组。然后用全局矩阵法求解得到频率波数域波场, 最后由离散波数法和快速傅里叶变换的得到时间空间域响应。通过开展数值算例研究了震电波场的特点, 分别模拟了不同点震源(包含爆炸源、SH 波震源和双力偶源)情况下激发的震电波场。结果表明, 存在三种震电信号, 一种是震源直接激发的电磁波, 第二种是伴随地震波的同震电磁场, 第三种是地震波在界面上激发的电磁波。VTI 介质震电响应具有不同于各向同性介质震电响应的特征。例如, qP 波可以产生磁场, 而各向同性介质中 P 波体波不产生磁场; 爆炸源也可直接激发出直达电磁波信号, 而各向同性孔隙介质情况下是没有直达电磁波信号的。研究发现, qP 波、qSV 波和 SH 波均可以引起伴随电场信号和伴随磁场信号, 但产生震电转换的能力不同。在激发电场能力方面, qP 波最强, 比 SV 波和 SH 波高 1~3 个量级, SH 波最弱; 激发磁场方面, qP 波最弱, SV 波和 SH 波相当。研究发现, 速度、渗透率和电导率等参数大各向异性程度对界面震电信号存在很大影响。

3. 郭荣文 研究员 中南大学

**题目:** Efficient multigrid algorithm based on multi-color block-wise Gauss Seidel smoothers for large 3D electromagnetic modelling

**摘要:** Practical application of 3D magnetotelluric inversion requires efficient forward modeling of electromagnetic (EM) fields in the earth. To resolve realistic 3D structures, large computational domains and extremely large linear systems of equations are required. How to solve the resulting large linear system of equations efficiently and cheaply can be a challenge particularly at low frequencies. The talk will present what we have developed for the large-scale forward modeling based on multi-color block-wise GS multigrid and the comparison with traditional solvers has been made.

#### 4. 惠哲剑 讲师 成都理工大学

**题目:** 基于正反演网格解耦的半航空电磁三维反演研究

**摘要:** 半航空电磁法采用地面发射、空中接收的方式进行数据采集,具有发射功率大、信噪比高、数据采集高效的优点。半航空电磁法通常测区范围较大,测线密集,接收点众多。使用非结构有限元方法进行正演为获得精确的解需在接收点处进行加密,导致计算网格数巨大。为了减少计算时间,采用解耦网格方法。该方法使用了一系列独立网格并行计算正演响应和雅可比信息,其中每个网格只包含部分接收点,这将有效地减小计算网格数。再利用网格的交互信息将网格的计算结果映射到总体网格实现反演参数更新。

#### 5. 李刚 副教授 浙江大学

**题目:** 海洋可控源电磁发射源位置反演研究

**摘要:** 海洋可控源电磁发射源位置信息在数据处理及反演解释中起到重要作用。实测数据中往往会出现发射源位置信息丢失情况。我们基于海洋可控源电场信息实现了发射源位置的反演,通过合成数据和南黄海实测数据验证了该反演算法的有效性。为实测数据中丢失源位置信息的恢复提供了参考。

#### 6. 刘红伟 教授 中国石油大学(华东)

**题目:** 探秘脑海:地震成像与反演技术的探索

**摘要:** 地震成像与反演技术,传统上用于探测地球内部结构,近年来在医学领域,特别是人脑成像中,展现出广阔的应用前景。这些技术利用地震波传播和反射特性,通过数据采集和反演算法,生成高分辨率的内部结构图像。在人脑成像中,类似的方法通过声波或其他形式的波动,提供非侵入性、高精度的脑部结构和功能信息。这些技术的应用有助于更准确地诊断脑部疾病、监测治疗效果,并推动神经科学研究的发展。本文将介绍地震成像与反演技术的基本原理,并探讨其在人脑成像中的具体应用和前景。

#### 7. 卢永明 讲师 深圳北理莫斯科大学

**题目:** 各向异性正演与成像方法研究

**摘要:** 各向异性正演与成像方法的研究和应用,在地球物理探测和成像中具有重要意义。本报告综述了各向异性程函方程正演方法的发展,包括不同类型的各向异性模型和数值模拟技术,重点介绍了在复杂地质条件下各向异性波场的传播规律和数值模拟方法。随后,讨论了各向异性成像方法,主要是各向异性逆时偏移,在提高成像分辨率和准确性方面的优势。最后,提出了当前研究中存在的挑战和未来的发展方向,包括更精确的各向异性参数估计和高效的成像算法优化。为地球物理勘探中的各向异性正演与成像技术提供了理论基础和技术支持,对提升地球物理成像的精度和效率具有重要意义。

#### 8. 潘文勇 研究员 中科院地质与地球物理所

**Title:** Multi-parameter full-waveform inversion applied to distributed acoustic sensing recorded seismic data

**Abstract:** As an emerging seismic acquisition technology, distributed acoustic sensing (DAS) has drawn significant attention for long-term and cost-effective monitoring of underground activities in recent years. It is being widely evaluated as an enabler of seismic monitoring for carbon sequestration in characterizing subsurface structures. To advance this evaluation, field seismic surveys with optical fibers deployed in surface trench and borehole were conducted at the Newell County Facility of Carbon Management Canada in Alberta, Canada. Full-waveform inversion (FWI) is considered as the most

promising approach for providing high-resolution subsurface model properties. This presentation will introduce the theory of multi-parameter FWI in complex media and its latest developments and applications with DAS-recorded surface-waves and vertical seismic profile (VSP) data. The recovered near-surface model parameters (velocity, density, anisotropy and attenuation) by multi-parameter FWI can provide valuable information for carbon sequestration and monitoring.

#### 9. 彭荣华 副教授 中国地质大学（武汉）

**题目：**基于交替方向乘子法的大规模海洋可控源电磁三维反演

**摘要：**为获得地下复杂电性结构的精细分布，电磁勘探的数据规模正以前所未有的速度增长，特别是在航空电磁及海洋可控源电磁勘探等领域。勘探尺度及数据规模的增大给电磁数据三维高精度反演解释的可靠性及计算效率带来了巨大挑战。如何有效提升大规模电磁数据三维反演算法的性能仍是当前研究重点之一。为此，本研究采用交替方向乘子法，通过将全局反演优化问题分解为若干个易于快速并行求解的子问题，从而有效提升大规模电磁三维反演效率。本报告将主要汇报近期在大规模海洋可控源电磁数据三维反演研究方面的进展。

#### 10. 宋超 教授 吉林大学

**题目：**基于物理信息深度学习的多频率地震波场模拟研究

**摘要：**针对传统数值方法在频率域中无法进行多频率地震波场模拟的局限，报告人建立了基于傅立叶特征物理信息神经网络(PINN)的智能化多频率地震波场模拟框架，突破了数值算法只能进行单频地震波场模拟的局限。在此基础上，报告人提出使用 GaborPINN 来加速 PINN 的训练收敛效率，进一步提高频率域地震波场的模拟效率。

#### 11. 王文龙 教授 哈尔滨工业大学

**题目：**神经网络在地震插值中的稳定性研究

**摘要：**深度学习（Deep learning）在地震数据处理中具有广泛应用，包括数据插值、去噪和反演等任务。然而与传统方法相比，对深度学习方法的可解释性差，且网络的稳定性缺乏统一的衡量标准。我们针对深度学习地震数据插值问题，提出神经网络稳定性的判定标准。首先是“微小最坏情况扰动”，指在神经网络预测过程中可能引起大幅输出扰动的微小噪声，通过对训练好的网络进行二次梯度下降，可以找到引起网络判断产生偏差的最小扰动，从而评价网络的稳定性。另一方面，通过在网络输入中加入小异常体和断层等结构，通过衡量神经网络在恢复特殊结构方面的能力来衡量其稳定性。最后，通过在训练集中加入固定位置和形态的异常，测试网络是否通过“记忆”的方式进行数据恢复。使用上述三个判定标准，我们对 DnCNN、U-Net 和 RDN 三个成熟的网络架构进行评价，在数值模拟中展现了他们的特点与表现，为以后网络搭建和训练集设计提供方向。

#### 12. 杨凯 助理教授 南方科技大学

**题目：**逆时偏移的倾角道集及其在复杂构造成像中的应用

**摘要：**Subsalt imaging is challenging with coherent noise prevalent beneath complex salt structures. The coherent noise degrades the imaging quality, making image enhancement and interpretation difficult and potentially erroneous. The dip gathers of reverse time migration (RTM) serve as an ideal domain for separating signals from coherent noise due to their distinct distributions in the dip domain. Methods utilizing the Poynting vector offer an efficient and cost-effective means to produce dip gathers. However, the presence of zero points in the Poynting vector causes instabilities in direction or angle estimation, leading to the leakage of reflection energy into false dip angles. This issue complicates the separation of desired signals from coherent noise. We address this instability by employing a stabilized Poynting vector to produce high-quality RTM dip gathers. The stabilized Poynting vector does not contain zero points within the range of wave propagation, thus mitigating the instability problem. The dip gathers generated using the stabilized Poynting vector provide a clearer and more precise depiction of signal and noise distributions, allowing us to identify the boundaries of desired signals and mute all noise outside these boundaries. Two numerical examples with a synthetic dataset and a field dataset are used to demonstrate our method's effectiveness in reducing coherent noise and improving quality of subsalt images.

#### 13. 杨鹏亮 副教授 哈尔滨工业大学

**Title:** Algorithmic analysis towards extended source waveform inversion

**Abstract:** Full waveform inversion (FWI) updates the subsurface model from an initial model by comparing observed and synthetic seismograms. Due to high nonlinearity, FWI is easy to be trapped into local minima. Extended domain FWI, including wavefield reconstruction inversion (WRI) and extended source waveform inversion (ESI) are attractive options to mitigate this issue.

This paper makes an in-depth analysis for FWI in the extended domain, identifying key challenges and searching for potential remedies towards practical applications. WRI and ESI are formulated within the same mathematical framework using Lagrangian-based adjoint-state method with a special focus on time-domain formulation using extended sources, while putting connections between classical FWI, WRI and ESI: both WRI and ESI can be viewed as weighted versions of classic FWI. Due to symmetric positive definite Hessian, the conjugate gradient is explored to efficiently solve the normal equation in a matrix free manner, while both time and frequency domain wave equation solvers are feasible. This study finds that the most significant challenge comes from the huge storage demand to store time-domain wavefields through iterations. To resolve this challenge, two possible workaround strategies can be considered, i.e., by extracting sparse frequencial wavefields or by considering time-domain data instead of wavefields for reducing such challenge. We suggest that these options should be explored more intensively for tractable workflows.

#### 14. 张盼 副教授 吉林大学

**题目:** 基于全波形反演的深反射地震数据速度建模

**摘要:** 深反射地震方法是探测岩石圈精细结构最为有效的方法。当前的深反射地震数据速度成像仅仅利用了地震波的走时信息。为提升速度成像分辨率,充分利用地震波所携带的动力学信息是十分必要的。全波形反演技术可以同时利用地震波形所包含的走时、振幅、相位等信息,从而获得高精度高分辨率的地下介质速度建模结果。本研究针对陆地深反射地震数据全波形反演面临的震源函数反演困难、波场成分复杂等问题开展研究,提出了双时移波形反演震源估计方法,采用双重多尺度策略保证反演稳健收敛。针对库木库里盆地深反射地震数据开展全波形反演速度建模,成功获得盆地内部断裂空间展布与地层沉积特征。

#### 15. 张振东 副研究员 中科院地质与地球物理所

**题目:** 地震面波全频散谱反演

**简介:** 地震面波反演是地球内部速度结构成像的重要方法,可用于壳幔、油气藏、城市地下空间等跨尺度目标成像。目前常用的一维面波频散曲线反演方法假设地下为层状介质、需要拾取频散曲线,不适合复杂构造地区大规模地震面波成像;更为先进的面波波形反演方法具有强非线性,对数据质量和初始速度模型精度等要求较高,在处理实际数据时还存在诸多问题。作者结合传统一维面波频散曲线反演方法和地震全波形反演理论提出了波动方程面波全频散谱反演方法,通过求解弹性波波动方程模拟地震面波在任意复杂介质中的传播过程;将复杂的地震面波波形变换到保留其频散特征的频散谱域进行相似度比较,极大地降低了反演的非线性。借助全波形反演统一理论框架,使用伴随状态法计算速度模型梯度和局部优化算法迭代更新速度模型。所提出的方法适用于三维任意复杂介质速度结构成像,模拟算例和实测地震数据表明该方法具有比拟波形反演的成像精度并可用于实际资料的处理。随着油气、地热、二氧化碳封存等陆地勘探目标的涌现,该方法有望为陆地探区高精度速度建模提供一种新的解决方案。

#### 16. 赵泽宇 助理教授 北京大学

**题目:** 混合优化算法全波形反演

**摘要:** 地震数据全波形反演利用地震波波形和走时信息获取高精度、高分辨率的地下介质参数,一直受到学界、工业界广泛关注。全波形反演是一类高维度、非线性病态反问题,传统的基于局部优化算法的全波形反演求解在实际应用中会遇到如低频信息缺失,初始模型不准确等问题。针对上述问题,报告人研究了快速全局搜索全波形反演方法,提出一种适用于高维度反演的混合优化算法。混合优化算法结合局部优化和全局优化的思想,使反演大幅降低对低频信息和初始模型的依赖。将介绍新算法原理,并介绍方法在不同模拟数据、盲测模型与实际海洋拖缆地震数据中的应用。

#### 17. 周建美 副教授 长安大学

**题目：**基于模型降阶理论的地球物理电磁法三维数值模拟

**摘要：**模型降阶理论能够有效降低高维模型的理论分析难度和减少数据运算量，在各类大型复杂工程问题的数值模拟和参数最优化计算中有着广泛的应用。报告主要介绍模型降阶理论在地球物理电磁法三维数值模拟中的应用和最新进展。首先介绍地球物理频率域电磁法和时间域电磁法对应的三维数值模拟问题，然后综述基于 Krylov 子空间投影的模型降阶算法在地球物理电磁法三维数值模拟中的研究进展，最后介绍全波形时间域电磁法的三维模型降阶快速算法。

**18. 周伟 助理教授    KFUPM, 沙特**

**Title:** Direct full waveform inversion of DAS fiber-optic data

**Abstract:** The particle-displacement or velocity-stress formulation of the elastic wave equation is often adopted for seismic waveform modeling and inversion. However, when dealing with the strain data that is acquired by the optic fiber (DAS), this formulation requires gauge-length correction and velocity-strain conversion before waveform inversion, which can complicate data preprocessing and inevitably generate noise in the data. In this work, I propose a momentum-strain formulation of the elastic wave equation, for direct modeling and inversion of strain data without the need for velocity-strain conversion. The gauge-length effect is considered in the definition of the FWI misfit function; thus, the gauge-length correction is also not required, minimizing preprocessing efforts and data noise. For the free surface boundary condition, the stress image method is implemented and is adapted to this momentum-strain formulation. The adjoint-state method is used to derived the gradient terms to update the model parameters through linearized optimization methods. Numerical example shows that the proposed direct FWI approach can better resolve the P and S-wave velocity structures by a cascaded inversion workflow, and is more robust against data noise, than conventional FWI that is based on the velocity-stress formulation and requires data correction and conversion prior to inversion.