中国科学: 地球科学 2020 年 第 50 卷 第 3 期: 432 ~ 435
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

动 态

地球物理三维电磁反演方法研究动态

殷长春[1], 刘云鹤[1*], 熊彬[2]

1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026;
2. 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004
* 通讯作者, E-mail: lyh19820131@163.com

收稿日期: 2019-09-09; 收修改稿日期: 2019-12-22; 接受日期: 2019-12-31; 网络版发表日期: 2020-01-13

1 研究现状

地球物理电磁数据三维反演具有非线性、欠定和大尺度等特点, 是非常难求解的最优化问题. 过去20年, 随着数值方法不断成熟和计算设备快速发展, 地球物理电磁三维反演技术取得了巨大进步, 多个基于正则化思想的三维电磁反演代码被成功开发并广泛应用于生产和科学研究. 电磁数据三维反演的发展主要围绕以下几个方面.

1.1 高精度三维正演技术

电磁数据三维反演的快速发展主要得益于正演技术的不断进步. 最早的电磁三维正演是基于积分方程法, 但由于计算模型简单, 无法解决复杂地质问题. 20世纪90年代, 基于交错网格的有限差分技术被引入到三维电磁模拟中, 解决了复杂模型正演问题. 基于电流密度散度校正的正演加速技术进一步解决了大地电磁低频段正演收敛速度慢的问题. 基于有限差分的大地电磁三维反演在20世纪90年代发展起来, 具有代表性的是Newman和Alumbaugh(2000)研发的基于有限差分和非线性共轭梯度法的三维大地电磁反演算法. 随后, Egbert和Kelbert(2012)研发的ModEM软件进一步推动了该项技术走向实用化. ModEM具有很好的模块化结构和高计算效率, 开源之后迅速成为标准化的大地电磁三维反演工具.

然而, 传统的基于规则六面体网格的三维正演算法无法满足精细化地球物理勘探的需求. 为了高精度拟合起伏地形和复杂地质结构, 基于非结构有限元算法的三维电磁正演逐渐发展起来, 并成为当今电磁领域的研究热点. 基于非结构单元剖分的有限元法主要分为形变六面体和非结构四面体两类. 基于形变六面体矢量有限元法实现比基于非结构四面体的有限元法简单, 但局部加密时需要处理悬挂点问题. Rücker等(2006)首次将基于非结构四面体网格的有限元法应用于直流电法三维正演模拟, 展示了其解决起伏地形正演问题的技术优势. Schwarzbach和Haber(2013)最早基于非结构四面体网格实现了海洋可控源电磁法三维反演, 并探讨了不同正则化方法的应用效果. 随后, 该项技术被成功应用于大地电磁、海洋可控源电磁和时间域电磁三维反演. 非结构四面体单元比形变六面体具有更大的灵活性, 但程序实现更复杂, 网格数量难以控制. 虽然目前已有多种自适应网格优化策略, 但均只包含网格加密算法, 无法去除冗余单元生成疏密合理的非结构四面体网格. 除了形变六面体和非结构四面体, 基于八叉树网格剖分的有限体积法在电磁三维正反演计算中也有不同程度的应用.

相比于微分方程方法, 基于积分方程的三维正反演技术在电磁领域应用较少. 美国Utah大学M. Zhadnov电磁研究团队提出了基于拟线性和拟解析近似的积分方程法, 可快速求解大尺度正反演问题. 其他新发

中文引用格式: 殷长春, 刘云鹤, 熊彬. 2020. 地球物理三维电磁反演方法研究动态. 中国科学: 地球科学, 50: 432–435, doi: 10.1360/SSTe-2019-0205
英文引用格式: Yin C, Liu Y, Xiong B. 2020. Status and prospect of 3D inversions in EM geophysic. Science China Earth Sciences, 63: 452–455, https://doi.org/10.1007/s11430-019-9570-7

© 2020 《中国科学》杂志社

展起来的正演技术，如基于高阶多项式插值的谱元法、模型剖分灵活的无网格法及混合方法均取得一定进展, 但尚没有研发相应的三维反演算法.

1.2　高效方程求解技术

传统三维电磁正演方程主要基于Krylov子空间迭代法求解，如共轭梯度法(CG)、拟最小残差法(QMR)和稳定双共轭梯度法(BICG-STAB)等. 此类方法要求正演方程条件数小，同时需要预处理器和散度校正技术以加速求解过程. 近年，直接求解技术有力推动了电磁三维模拟技术发展, 主流工具有MUMPS、Paradiso和SuperLU. 直接求解技术应用于三维电磁问题的优势在于: (1) 该技术可克服方程条件数过大的影响, 实现稳定求解; (2) 在多源和多时间道电磁(比如移动平台航空和海洋电磁)正演方程中左端正演矩阵相同, 源和时间道的改变只影响右端项，因此可通过保存矩阵分解结果并替换右端项进行回代实现加速. 由于基于非结构四面体网格的有限元法形成的代数方程条件数很大, 直接求解是计算该类方程的主流技术. 直接求解技术的缺点是占用内存较大，难以适用于超大尺度模型的三维问题求解，需要配合模型降维实现大尺度问题计算. 由于迭代法占用内存小，因此具有高效预处理技术的迭代求解是未来电磁大尺度三维正反演的研究热点和重要发展方向.

除了通过改进方程求解技术提高三维反演效率外，将大尺度模型变成若干个小尺度模型计算也是有效的提速方法. 典型的应用案例是航空电磁法. 由于航空电磁系统的紧凑性(影响范围小)，可以对每个数据点应用单独的子模型进行电磁响应和灵敏度计算. Cox等(2010)提出了基于“moving footprint”的航空电磁三维快速反演技术. 由于积分方程法不需要扩边, 其使用的频率域航空电磁单个测点计算网格仅需8×8×10个单元，平均单个测点反演时间为1.75s，使得大数据量三维反演成为可能. 另外，近年提出的局部网格正演算法解决了时间域航空电磁三维快速反演问题. 此类模型分解方法的计算量随发射源个数呈线性增加, 有望成为三维电磁反演的主流加速技术.

1.3　正则化方法

Tikhonov正则化是近代地球物理反演的理论基础. 其基本思想为: 对反演目标函数中的待求解参数进行先验约束，进而在满足约束条件下使得目标函数极小化. 正则化技术在一定程度上解决了反演不适定性问题，减弱噪声对不适定性的影响，保证不出现过度拟合. 正则化反演的目标函数定义为

$$\Phi = \phi_d + \lambda \phi_m, \tag{1}$$

式中，ϕ_d为数据拟合差，而ϕ_m为模型先验约束项(正则化项), 用于度量模型粗糙度. λ用于平衡两者在目标函数中的权重, 称为正则化因子. 正则化反演的关键在于如何确定最优正则化因子λ. L曲线法是选择λ的可靠方法, 但其需要多次正演计算, 因此在三维反演中使用不多. 自适应下降法应用效果与L曲线法相当, 目前已成为三维电磁反演中选择正则化因子的主要方法. ϕ_m对反演结果的结构形态影响很大，不同的定义产生不同特征的反演结果. 目前主流反演算法中ϕ_m定义为模型参数空间一阶或二阶差分的L_2范数. 此种定义方式虽然使得目标函数保持较好的凸函数特征，反演稳定、收敛速度快，但获得的反演模型较为光滑，对陡变边界识别能力差. 聚焦反演和基于L_1范数的正则化反演通过对L_0范数进行近似，可有效提高反演的边界分辨率. 另一种利用解的稀疏性改进反演分辨率的方法是基于多尺度分析的稀疏正则化反演，例如小波变换和曲波变换等. 此类方法是将反演模型变换到稀疏域后反演稀疏域中的系数，最后通过反变换得到空间域模型参数. 由于在反演目标函数中采用L_1范数构建正则化项，反演过程中可较好地控制系数解的稀疏性，实现从粗到细的多尺度反演，兼顾了反演解的稳定性与分辨率. Liu等(2018)基于小波变换实现了频率域航空电磁三维稀疏正则化反演，并对比分析了该方法与传统方法在计算速度和分辨率上的差异. 目前，多尺度图像处理工具发展很快，例如曲波、剪切波、字典学习和深度学习神经网络等技术，可实现图像在不同尺度的特征提取, 为相关反演方法提供了发展空间.

1.4　最优化方法

电磁数据三维反演采用的最优化方法主要有非线性共轭梯度法(NLCG)、高斯-牛顿法(GN)和拟牛顿法(QN)等. 最优化方法的进步主要源于数学领域，在三维电磁反演中没有取得突破性进展. Egbert和Kelbert(2012)在ModEM中对非线性共轭梯度法进行优化，提高了反演的稳定性及计算效率. 非线性共轭梯度法和拟牛顿法只需要目标函数的梯度信息，无需显式计算灵敏度矩阵，因此每次反演迭代中所需正演次数少.

高斯-牛顿法因具有二阶灵敏度信息, 反演收敛速度明显优于非线性共轭梯度和拟牛顿法, 但高斯牛顿反演中方程求解需大量正演计算, 因此总体计算速度常低于另两种方法. 对于显式计算灵敏度矩阵与计算目标函数梯度时间接近的电磁勘探方法(如频率域航空电磁法), 显式计算灵敏度矩阵并构建高斯-牛顿反演方程可节省求解过程中的正演计算, 充分发挥高斯-牛顿法在反演速度上的优势. 拟牛顿法(QN)在迭代过程中近似计算海森矩阵的逆, 在步长搜索上比非线性共轭梯度效率更高, 反演计算速度略优, 目前已成为大尺度三维电磁反演的主流技术. 最优化理论近年的主要进展是随机优化算法的提出, 包括随机L-BFGS和随机高斯-牛顿法等. 此类方法的优势在于优化过程中使用的已知信息少, 可基于有限计算资源实现大尺度三维反演, 但其精度和计算速度仍是需要重点解决的问题.

1.5 联合反演

不同地球物理方法具有不同的探测能力, 联合反演可实现多种数据的优势互补, 提高反演分辨率. 联合反演分为三种类型: (1) 不同数据同一种物性的联合反演, 例如大地电磁和可控源电磁、时间域和频率域航空电磁等联合反演地下电性结构. 此类方法可综合一种方法高分辨和另一种方法大探测深度的技术优势, 明显提高地下电性结构的成像分辨能力. 典型案例为海洋大地电磁和海洋可控源电磁三维联合反演. 通过利用大地电磁数据控制区域性构造背景, 进而利用海洋可控源电磁实现对高阻储层的精确成像. 目前工业界应用较广的是海洋大地电磁和海洋可控源二维联合反演, 高效和实用的三维联合反演方法尚待开发. (2) 基于反演参数的岩石物理特性, 建立地下介质不同物性之间的经验函数关系, 然后基于该函数关系将地下不同介质等效为同一介质进行联合反演. 此类函数关系的建立需要大量的岩石物理实验, 其准确性决定了联合反演的可靠性. (3) 不同物性之间的结构相似性约束反演, 例如重磁电数据联合反演和震电联合反演等. 此类方法利用同源异常体不同物理属性的结构相似性对反演进行约束, 实现高精度成像. 目前应用较广的技术为交叉梯度方法(Gallardo和Meju, 2003), 已有较为成熟的重磁电和震电二维联合反演软件及大地电磁与地震走时的三维联合反演. 殷长春等(2018)提出了基于局部相关性约束的三维大地电磁和重力数据联合反演方法, 通过设置不同尺度的Pearson相关系数实现结构相似约束和反演. 另一种结构相似性约束是首先利用高精度方法确定地下主要结构特征(例如地震或测井方法实现对地下界面的定位), 进而在结构约束条件下实现对其他物性参数的反演.

1.6 各向异性反演

电磁法的分辨率有限, 难以分辨微小的电性结构或地层, 通常只能从宏观角度对其进行研究. 地层层理或具有定向排列的各向同性结构和构造从宏观上可用各向异性进行描述. 各向异性对电磁观测数据影响很大, 忽略其影响会产生错误解释结果. 电磁数据中各向异性信息提取与反演已成为当前电磁勘探的研究热点. 海洋可控源电磁法在海底资源探测中的成功应用推动了三维电磁各向异性反演技术的进步. 由于海底沉积环境具有典型的各向异性特征, 能否有效反演地层的各向异性是海洋电磁勘探成功的关键. Newman等(2010)首先实现了海洋可控源电磁数据的各向异性反演. 对比各向同性和各向异性三维反演结果发现, 使用简单的各向同性模型反演受各向异性影响的电磁数据会产生虚假异常. Wang等(2018)集成非结构有限元、一次场分离和直接求解方法的技术优势, 实现了海洋可控源电磁高精度、快速三维各向异性反演. 基于灵活的非结构四面体网格剖分, 该算法可反演复杂起伏海底条件下海洋可控源电磁数据. 研究表明地球深部是各向异性的, 因此在地球深部探测的大地电磁数据解释中经常需要考虑各向异性影响, 然而目前电磁领域尚没有实用化的大地电磁各向异性反演算法和软件. 由于自然界中各向异性的复杂性, 同时各向异性反演具有强欠定性, 导致目前各向异性电磁反演的相关算法主要是针对TI或三轴各向异性等简单模型. 考虑任意各向异性参数的三维反演是电磁勘探领域亟待解决的难题之一.

2 研究展望

电磁三维反演目前已实现从无到有的转变, 研发的各种软件已具备基本反演功能. 然而, 受计算条件、软件复杂性以及面积性三维数据采集难度等因素的影响, 三维反演实用化程度仍然较低, 没有成为常规的数据处理技术. 电磁三维反演未来发展主要集中在

如下领域.

(1) 解决大尺度模型的高效正演问题. 高效和高精度三维正演是反演的基础和前提. 目前的三维反演模型单元剖分一般是百万级以下, 难以对地下介质的电性分布进行精细刻画, 因此研发适用于千万级及以上的高效正演模拟技术、网格优化策略及快速求解方法是当前电磁领域的首要任务.

(2) 基于人工智能技术的快速三维反演. 深度学习及神经网络等人工智能方法可构建数据之间的非线性关系, 完成数据至模型的快速映射, 进而实现电磁数据快速成像, 服务于诸如油井开采、注水压裂监控、地下工程稳定性、灾害监测等领域. 虽然此类成像结果存在不同程度的近似性, 但可用于构建较准确的初始模型, 改善三维电磁反演收敛性和精度. 该项技术的难点在于如何构建庞大的训练集及如何使训练的网络模型具有普适性.

(3) 基于压缩感知理论的随机采样正反演方法. 电磁勘探具有很强的体积效应, 数据在时间、空间上具有光滑连续变化特征, 因此基于压缩感知理论可利用较少的随机采样点重构整体数据. 基于此思想, 可对实测电磁数据进行随机欠采样, 完成响应计算和灵敏度计算, 进而实现全部测点信息重构, 减少反演中的正演次数, 提高反演效率. 近年随机优化方法的发展进一步丰富了该项研究内容. 然而, 如何设计合适的随机采样函数和采样方法以提高反演精度和加速计算速度是该项技术中需要解决的技术难点.

(4) 电磁数据三维各向异性反演. 各向异性一直是电磁领域的研究热点, 但进展缓慢. 常规算法仅能进行三轴各向异性模型反演, 难以满足实际地球深部结构构造研究的需要, 因此亟需进行任意各向异性模型响应特征识别和三维电磁反演研究.

(5) 瞬变电磁激发极化数据三维反演技术. 在瞬变电磁测量过程中, 激发极化效应会造成响应的快速衰减甚至变号. 由于激发极化效应耦合在多个时间道电磁信号中, 无法利用数学工具进行有效分离, 因此常规的反演技术无法实现此类电磁数据反演, 亟需研发相应的激电多参数反演技术. 同时, 激发极化部分模型参数具有很强的非线性和非唯一性, 如何通过反演获取真实激电参数是具有挑战性的优化问题.

(6) 基于多信息融合的三维反演技术. 电磁法本身分辨率有限, 如何利用正则化及相关技术引入先验信息实现地下结构的高精度成像是未来电磁法重要的发展方向之一. 目前主流的方法是联合反演技术, 可综合多种探测数据的优势实现地下结构的精确成像. 电磁数据与其他地球物理数据联合反演的技术难点在于如何耦合不同方法的计算网格以及如何实现合理的结构相似性约束.

电磁数据的三维反演研究正处于快速发展期, 各种数值模拟及图像和信号处理技术的进步为三维电磁反演提供了多种可能的途径. 可以预期: 在不久的将来, 三维电磁反演将迅速地发展成为实用化的电磁勘探数据解释工具.

参考文献

殷长春, 孙思源, 高秀鹤, 刘云鹤, 陈辉. 2018. 基于局部相关性约束的三维大地电磁数据和重力数据的联合反演. 地球物理学报, 61: 358–367

Cox L H, Wilson G A, Zhdanov M S. 2010. 3D inversion of airborne electromagnetic data using a moving footprint. Exploration Geophys, 41: 250–259

Egbert G D, Kelbert A. 2012. Computational recipes for electromagnetic inverse problems. Geophys J Int, 189: 251–267

Gallardo L A, Meju M A. 2003. Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of DC resistivity and seismic data. Geophys Res Lett, 30: 1658

Liu Y H, Farquharson C G, Yin C C, Baranwal V C. 2018. Wavelet-based 3-D inversion for frequency-domain airborne EM data. Geophys J Int, 213: 1–15

Newman G A, Alumbaugh D L. 2000. Three-dimensional magnetotelluric inversion using non-linear conjugate gradients. Geophys J Int, 140: 410–424

Newman G A, Commer M, Carazzone J J. 2010. Imaging CSEM data in the presence of electrical anisotropy. Geophysics, 75: F51–F61

Rücker C, Günther T, Spitzer K. 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography—I. Modelling. Geophys J Int, 166: 495–505

Schwarzbach C, Haber E. 2013. Finite element based inversion for time-harmonic electromagnetic problems. Geophys J Int, 193: 615–634

Wang F Y, Morten J P, Spitzer K. 2018. Anisotropic three-dimensional inversion of CSEM data using finite-element techniques on unstructured grids. Geophys J Int, 213: 1056–1072

(责任编委: 潘永信)