

石油地球物理勘探  
*Oil Geophysical Prospecting*  
ISSN 1000-7210, CN 13-1095/TE

## 《石油地球物理勘探》网络首发论文

题目：多方法多信息电磁联合约束反演方法研究进展  
作者：张朔宁，喻国，何展翔  
DOI：10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2023.06.024  
收稿日期：2023-03-22  
网络首发日期：2023-10-07  
引用格式：张朔宁，喻国，何展翔. 多方法多信息电磁联合约束反演方法研究进展 [J/OL]. 石油地球物理勘探. <https://doi.org/10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2023.06.024>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 多方法多信息电磁联合约束反演方法研究进展

张朔宁<sup>1,2,3</sup>, 喻国<sup>1,2,3</sup>, 何展翔<sup>\*1,2,3</sup>

(1.深圳市深远海油气勘探技术重点实验室, 广东深圳 518055; 2.广东省地球物理高精度成像技术重点实验室, 广东深圳 518055; 3.南方科技大学地球与空间科学系, 广东深圳 518055)

**摘要：**电磁法在油气勘探、深部矿产资源调查、地热地下水勘查、地球深部结构成像以及水下军事目标侦察等方面都发挥着重要作用。文中系统地总结了结合多种信息和多方法的电磁联合约束反演研究进展，从方法应用的角度介绍了研究现状，着重分析了不同电磁联合约束反演方法目标函数的构建形式及存在的问题和技术难点。在地震数据等已知信息较多的地区，利用先验信息构建不同类型约束函数，通过约束反演提高盐岩、火成岩发育区构造成像精度，降低反演的非唯一性。在已采集天然源电磁（MT）数据和人工源电磁（CSEM）数据的地区，可利用这两类方法各自的优势开展联合反演，发展有顺序约束的联合反演及基于统一目标函数的联合反演等多种形式。CSEM法与MT法在反演深度上具有互补性，覆盖整个研究深度，同时可提高目标反演精度，降低解释的非唯一性。文中针对这一类联合反演的目标函数和权重因子的选择进行讨论。根据实际应用效果分析，目前最重要、最有潜力的联合反演是电磁数据与地震数据的联合反演，这种联合反演方式经历了从地震约束电磁反演到基于物理模型的联合反演和基于交叉梯度方法的联合反演。文中分析了速度与电阻率模型之间难以构建合理联系这一难点，说明目标函数中交叉梯度项和物理模型约束项的权重因子设置是目前开展地震—电磁联合约束反演的关键和难点。最后，笔者提出：将电磁联合反演与人工智能算法、三维可视化分析相结合；采用大规模并行计算等新方法新技术的发展方向；发展联合采集系统，为多物理场联合反演提供更有用的数据体。

**关键词：**电磁法勘探，多方法多信息联合反演，目标函数，发展方向

中图分类号：P631 文献标识码：A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2023.06.024

## Progress on joint inversion of electromagnetic constraints combined with multiple methods and multiple information

ZHANG Shuoning<sup>1,2,3</sup>, YU Guo<sup>1,2,3</sup>, HE Zhanxiang<sup>1,2,3</sup>

(1. Shenzhen Key Laboratory of Deep Offshore Oil and Gas Exploration Technology, Shenzhen, Guangdong, 518055;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geophysical High-resolution Imaging Technology, Shenzhen, Guangdong, 518055;

3. Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong, 518055)

**Abstract:** Electromagnetic exploration plays an important role in oil and gas exploration, deep mineral resources, geothermal groundwater exploration, imaging of deep Earth structures and underwater military target reconnaissance. This paper systematically summarized the research progress of electromagnetic joint constrained inversion combining multiple information and multiple methods, introduced the current research status from the perspective of method application, and focused on the analysis of the construction form of the objective function, as well as the existing problems and the technical difficulties. In areas with more known information such as seismic data, different types of constraint functions are constructed by using a priori information to improve the tectonic imaging accuracy in saline and igneous rock development areas through constrained inversion and to reduce the non-uniqueness of the inversion. In areas where magnetotelluric and

\* 广东省深圳市南山区学苑大道 1088 号南方科技大学地球与空间科学系, 518055. Email: hezx@sustech.edu.cn

本文于 2023 年 3 月 22 日收到，最终修改稿于同年 9 月 18 日收到。

本研究受深圳市深远海油气勘探技术重点实验室(ZDSYS20190902093007855)、广东省地球物理高精度成像技术重点实验室(2022B1212010002)、深圳市科技计划项目“深海深地资源探测技术系统研发”(KQTD20170810111725321)及国家自然科学基金项目“深地/深海探测中强电流激发下可控源电磁法激电效应机理研究及应用”(41874085)联合资助。

controlled source electromagnetic method data have been collected, CSEM and MT are utilized to carry out joint inversion with their respective advantages, and various forms such as joint with sequential constraints and joint inversion based on a unified objective function are developed; an important application is that CSEM and MT make up for each other in terms of depth to improve the accuracy of the target to reduce non-uniqueness, and in this paper, the objective function and weighting of this type of joint inversion were discussed, also for the factor selection issues. The most important and potential joint inversion is the electromagnetic and seismic joint inversion method. This paper discussed the difficulty of constructing a reasonable connection between velocity and resistivity models from the perspective of the seismic constraint electromagnetic inversion, the physical model-based joint inversion and the cross-gradient method-based joint inversion, and explained that the setting of the weighting factors of the cross-gradient term and the physical model constraint term in the objective function is currently the key and difficulty. Finally, this paper proposed that the electromagnetic joint inversion can be combined with artificial intelligence algorithms, three-dimensional visualization and analysis, as well as large-scale parallel computation and other new methods and new technologies in the future, and also pointed out the need to synchronize the development of the joint acquisition system for the multi-physical field joint inversion to provide more effective data body.

**Keywords:** electromagnetic exploration, joint inversion of multiple methods and multiple information, objective function, development orientation

张朔宁, 喻国, 何展翔. 多方法多信息电磁联合约束反演方法研究进展[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(6):000-000.  
ZHANG Shuoning, YU Guo, HE Zhanxiang. Progress on joint inversion of electromagnetic constraints combined with multiple methods and multiple information [J]. Oil geophysical Prospecting, 2023, 58(6):000-000.

## 0 引言

电磁法是应用最早、应用最广的物探技术之一, 经历了近百年的发展, 在油气勘探、深部矿产资源与地热地下水勘查、城市环境监测与地下空间开发利用、地球深部结构成像及水下军事目标探测等方面都发挥着重要作用<sup>[1-3]</sup>。按照场源电磁勘探方法分为两类: 一是天然场源电磁法, 如大地电磁法<sup>[4]</sup> (Magnetotelluric Method, MT); 另一类是人工源电磁法, 也称为可控源电磁法 (Controlled Source Electromagnetic Methods, CSEM), 主要包括人工源音频大地电磁法 (Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric, CSAMT)<sup>[5]</sup>和人工源时间域电磁法 (Time-domain Electromagnetic Method, 简称 TEM)<sup>[6]</sup>。在实际勘探开发过程中, 随着勘探目标深度不断加大、勘探地区的地质构造愈加复杂, 常规的电磁方法已不能满足勘探需求, 时频电磁法<sup>[7-8]</sup> (Time-frequency Electromagnetic Method, TFEM) 的提出有效改善了常规电磁方法勘探能力的不足。TFEM 将频率域电磁勘探方法与时间域电磁勘探方法相结合, 可同时获得时域和频域信号, 改变了传统电磁法对时域和频域信息分别处理的方式, 提高

了采集效率和解释效果, 广泛应用于深部资源勘查。不同电磁方法在工作原理和应用领域都具有自身局限性, 除射频段地质雷达方法外, 其他的电磁法都存在体积效应、静态位移等<sup>[1]</sup>问题, 且电磁场强度随着深度的增加呈指数级衰减, 分辨率也呈指数级规律降低。与地震方法相比, 电磁法的垂向分辨率和分层能力也相差较大, 为电磁数据处理和反演带来了困难。

地球物理反演是基于观测物理场推断地下介质物理状态、空间分布和物性结构<sup>[9]</sup>, 反演通常包括单一物理量反演和多物理量联合反演<sup>[10]</sup>。非唯一性问题是地球物理反演固有且难以有效解决的难题, 其主要原因有两点: 其一, 通过观测得到的资料是不完备的, 每一种可能的解都满足不完备观测数据; 其二, 任何地球物理的观测数据都会受到外界干扰, 导致反演结果与实际情况存在差异<sup>[10]</sup>。因此, 对不同的地球物理数据采取联合反演策略, 综合利用不同地球物理场或地球物理资料的优势以降低多节性是地球物理勘探发展的总趋势, 也是发展的必然趋势<sup>[11]</sup>。

本文从先验信息约束下的电磁反演、天然源和人工源的联合电磁反演及电磁方法与地震方法联合

反演的角度，分别介绍各自的研究现状，总结现有问题并分析可能的发展方向。

## 1 多类型电磁方法联合反演方法研究现状

### 1.1 基于先验信息约束以降低电磁反演结果非唯一性研究现状

基于已知资料的约束反演广泛应用于地震资料的处理和反演，且应用较早<sup>[12-17]</sup>。在电磁方法发展的早期，计算机技术处于初级阶段，直流电法和大地电磁法的数据处理均采用量板法求取目标深度，直到上世纪80年代才发展了一维反演和二维反演。但是，由于反演非唯一性造成的多解性极强，这一时期主要根据已知的地震、地质及重磁资料，采用交互对比的方法，优选符合地质构造特征的反演模型作为最终结果，这种处理方式很大程度上依赖于技术人员的经验，其结果的有效性和可靠性难以保证。此后，一些学者基于测井、地质、地震资料等先验信息建立约束模型<sup>[18-20]</sup>，提出了模型约束反演方法，以此降低反演的非唯一性。对于不同的地质目标主要采取以下几种不同的方法：（1）对于盐岩构造，由于盐岩具有高速特性，下伏构造利用地震方法无法获得有效反射，这时需要采用电磁方法辅助探测。为了降低电磁反演的非唯一性、提高探测精度，利用地震资料的反射界面构建盐层目标以上的几何模型，利用电测井资料构建电阻率变化范围，采用广义逆反演得到盐下构造，取得了较好效果<sup>[21]</sup>。

（2）对于火成岩<sup>[20, 22]</sup>，由于火成岩对地震反射具屏蔽作用，仅仅依靠地震方法难以厘清火成岩结构及储层信息。因此，可采用电磁方法，借助钻井、地震剖面资料对火成岩上覆电性层的结构进行建模约束，借助电测井资料对电性层电阻率进行建模约束，利用模拟退火法等方法对电磁数据进行约束反演，较好地克服了电磁勘探反演结果的多解性。

利用已知信息构建地层界面和地层电阻率约束模型<sup>[8, 23]</sup>，其形式如下：

$$\mathbf{m}_j^{Q_0} = \mathbf{m}_j^{Q_{\min}} + \beta_j (\mathbf{m}_j^{Q_{\max}} - \mathbf{m}_j^{Q_{\min}}) \quad (1)$$

$$\mathbf{m}_i^{R_0} = \mathbf{m}_i^{R_{\min}} + \lambda_i (\mathbf{m}_i^{R_{\max}} - \mathbf{m}_i^{R_{\min}}) \quad (2)$$

式中： $\mathbf{m}$  代表模型；下标  $i, j$  表征地层界面编号；上标  $Q_0$ 、 $Q_{\min}$ 、 $Q_{\max}$  分别表示模型地层厚度的初始值、最小值和最大值； $\beta_j$  是 0~1 的随机数；上标  $R_0$ 、 $R_{\min}$ 、 $R_{\max}$  分别表示模型地层电阻率的初始值、最小值和最大值； $\lambda_i$  是 0~1 的随机数。不同的  $\mathbf{m}_j^{Q_0}$ 、 $\mathbf{m}_i^{R_0}$  构成了整个构造层的地层界面和层电阻率约束模型。

对于不同的情况，分别采用不同的约束条件进行模型反演。

（1）油田开发区：利用电磁方法探测和监测油水分布，这样的研究区可为建模约束反演提供全方位的三维地震和钻孔资料。因此，由地层界面信息构成的几何模型可完全根据地震和钻孔资料进行构建，即  $\mathbf{m}_j^{Q_{\min}}$  和  $\mathbf{m}_j^{Q_{\max}}$  不变，即实现严约束；电阻率信息可由测井资料得到，其变化范围由电测井数据决定。在井孔附近可提取目标层电测井数据的高斯分布均值  $\mathbf{m}_i^{R_\mu}$ ，其中  $R_\mu$  代表基于测井数据统计的该地层电阻率高斯分布的平均值<sup>[23]</sup>，井孔以远及井间的电阻率模型根据下式确定

$$\mathbf{m}_i^{R_0} = \frac{S_B}{S} \mathbf{m}_i^{dR_{\mu \pm k_d \sigma}^A} + \frac{S - S_A}{S} \mathbf{m}_i^{dR_{\mu \pm k_d \sigma}^B} \quad (3)$$

式中： $S$  为 A 井与 B 井间的距离； $S_A$ 、 $S_B$  分别为井孔以远或井间测点地面位置与 A 井和 B 井的水平距离，且  $S = S_B + S_A$ ； $k_d = 2(S_A + S_B)/S$  为偏离系数； $R_\sigma$  表示基于测井数据统计的地层电阻率高斯分布标准差； $dR_{\mu \pm k_d \sigma}^A$  和  $dR_{\mu \pm k_d \sigma}^B$  分别表示满足高斯分布的 A、B 两井地层电阻率与该井电阻率期望值  $\mu$  有  $k_d$  倍离差值时的电阻率。例如：当测点位于 A、B 二井连线中点时， $k_d = 2$ ，此时  $\mathbf{m}_i^{R_0} = (1/2)\mathbf{m}_i^{dR_{\mu \pm 2\sigma}^A} + (1/2)\mathbf{m}_i^{dR_{\mu \pm 2\sigma}^B}$ ，其中， $(1/2)\mathbf{m}_i^{dR_{\mu \pm 2\sigma}^A}$ 、 $(1/2)\mathbf{m}_i^{dR_{\mu \pm 2\sigma}^B}$  分别表示满足高斯分布的 A、B 两井地层电阻率与该井电阻率期望值  $\mu$  具有 2 倍离差时的电阻率。

（2）对于地震勘探困难区，主要利用电磁方法探测地震空白反射区的目标体，类似前面的火成岩发育区、盐岩构造区等。这类约束建模反演研究比较广泛<sup>[8, 23-24]</sup>。为了提高地震反射盲区的电磁反演效果，通常利用地震反射区域的地震资料构建约束模型，即式(1)中地层厚度模型  $\mathbf{m}_j^{Q_{\min}}$  和  $\mathbf{m}_j^{Q_{\max}}$  由地震资料确定，式(2)中的电阻率模型  $\mathbf{m}_i^{R_{\min}}$  和  $\mathbf{m}_i^{R_{\max}}$  由测井资料确定。待研究的盐岩层、火成岩层的地层界面由地质解释人员根据该区域的地质解释结果给定初始模型，反演时不施加约束；电阻率模型则依据电

测井或岩石物性测试结果给出变化范围<sup>[23]</sup>。

(3) 对于无地震和钻孔数据的地区, 可利用地质和重磁等资料构建约束模型, 进而降低电磁反演的多解性。通常情况下, 地表露头的地质结构是已知的, 而深部的地质结构可以根据地质学家的推断建立多个模型, 即式(1)、式(2)中可建立  $g$  个模型(包括几何模型  $m_j^{Q_0}(p)$  和电阻率模型  $m_i^{R_0}(p)$ ,  $p=1, 2, \dots, g$ ), 分别进行反演, 根据反演结果与重磁异常的相关性及拟合情况选取最佳模型。

上述方法均是利用已知地质、物探资料作为先验信息对模型进行约束, 本质上是通过构建较准确的初始模型降低反演的多解性。这种方法对已知资料的要求较高, 对于成熟的开发区, 已知资料比较多, 该方法效果较好, 而对于一些无先验资料的地区, 无法获得可靠的初始模型, 无法实现有效约束, 这类约束反演方法不可行。

除了上述模型约束反演, 一些学者提出在反演目标函数中加入已知信息约束项, 目的是提高反演精度。其反演目标函数的通用形式为

$$F = F_d + F_m + F_r \quad (4)$$

式中:  $F$  表示目标函数; 下标  $d$ 、 $m$  分别代表观测数据和模型, 下标“ $r$ ”代表正则化。 $F$  包括数据拟合项  $F_d$ 、模型稳定泛函项  $F_m$  和结合已知信息的正则化项  $F_r$ , 其中  $F_r$  在不同的研究中具有不同的构建形式, 本文重点介绍其中的两种方式。

第一种形式是构建参考模型约束项。王传武等<sup>[25]</sup>基于地质钻探得到的介质电阻率信息及地震反射法和地质雷达法得到的异常体界面信息构建参考模型约束, 并将其添加到反演目标函数, 其目标函数为

$$\varphi = \|\Delta d - A(m - m_0)\|^2 + \lambda \|C(m - m_0)\|^2 + \eta \|F_r(m - m_r)\|^2 \quad (5)$$

式中:  $\Delta d$  为实际观测值与模型正演理论值之差;  $m_0$  为参考模型;  $m - m_0$  为模型参数相对于参考模型的增量;  $m - m_r$  为当前模型与所构建的参考模型的差值;  $A$ 、 $C$ 、 $F_r$  分别为敏感度矩阵、光滑度矩阵和参考模型的系数矩阵;  $\lambda$  为控制光滑矩阵约束的权重系数;  $\eta$  为参考模型约束的权重系数。

第二种形式是构建空间结构约束项。采用这种方式的前提是利用地震反射法、地质雷达法可以获得局部异常体确切的位置和形态信息, 且异常区域中的介质电阻率分布近似相同。在反演过程中, 不断迭代该区域内的网格电阻率, 最终使得该区域所

有网格电阻率值与区域内电阻率均值之差的平方和达到最小。这种方法的目标函数为

$$\varphi = \|\Delta d - A(m - m_0)\|^2 + \lambda \|C(m - m_0)\|^2 + \eta (F_s \Delta m)^T (F_s \Delta m) \quad (6)$$

与第一种形式(式(5))相比, 式(6)中的  $\eta (F_s \Delta m)^T (F_s \Delta m)$  项特指局部异常区域的空间结构约束,  $\Delta m$  为模型更新量,  $F_s$  为空间结构约束矩阵<sup>[26]</sup>。

上述两种形式均利用了地震反射数据和地质雷达数据对界面识别能力强, 以及利用钻孔方法能直接得到地下介质物理性质的优势。但是, 这一类反演方法依赖于其他方法处理结果的准确性, 特别是空间结构约束对于异常体的大小、位置和形态的先验刻画要求高。因此, 这两类反演约束方法目前主要仅应用于工程勘察中浅部三维电阻率反演。

## 1.2 天然场源与人工源电磁方法联合反演

不同的电磁方法对于地下电性结构的灵敏度和探测深度不同, 如果能平衡不同电磁方法数据集的贡献, 相对于单一电磁方法反演, 不同电磁方法联合反演具有更高分辨率。MT 数据对于区域性构造的电阻率变化较敏感, 而利用 CSEM 数据则可较好地探测局部电性异常体, 对薄层电性异常体的识别能力较强。因此 MT 和 CSEM 数据联合反演能够取长补短, 提高反演精度。Da Silva Pinheiro 等<sup>[27]</sup>计算了这两种方法联合反演过程中海塞矩阵的奇异值, 得到了联合反演的零空间小于单独反演零空间的结论, 从数理角度证明了 MT 和 CSEM 数据联合反演可在一定程度上降低反演的非唯一性。

早期关于这种方式的联合反演多为顺序联合反演, 即以 MT 的反演结果作为 CSEM 数据反演的初始模型, 其优点是克服了 CSEM 反演中初始模型对反演结果的影响, 但这种顺序联合方式并未充分利用数据之间的约束关系, 是一种伪联合。此后, 陆续发展了真正意义上的联合反演, 主流方法是基于非线性共轭梯度法<sup>[28]</sup>的联合反演。Commer 等<sup>[29]</sup>在模型参数化的同时采用了单元约束和结构约束, 利用非线性共轭梯度法进行三维同步反演, 结果表明, 在恰当选取权重因子的情况下, 联合反演结果可清晰地反映异常体的形态和位置。

MT 与 CSEM 联合反演的效果主要表现在三个方面: (1) MT 方法能弥补 CSEM 法深部信息不足

的缺点。Mackie 等<sup>[30]</sup>在海洋可控源合成数据中加入了三个大地电磁台站的人工合成信号，利用非线性共轭梯度反演方法同步反演两个数据集，结果表明在 CSEM 数据频率难以达到的深度，反演得到的电阻异常体轮廓和深部界面清晰。(2) MT 和 CSEM 在地震勘探困难区(盐岩及岩下构造、玄武岩及岩下构造)具有相互补充的作用。Gribenko 等<sup>[31]</sup>构建了盐丘和储层模型，利用共轭梯度法比较了 MMT (Marine Magnetotelluric, MMT)和 MCSEM (Marine Controlled Source Electromagnetic Method, MCSEM) 数据单独反演和联合反演的结果。研究发现，MMT 单独反演结果可以较好地反映盐丘位置，但对厚度很小的油气储层的刻画效果欠佳；MCSEM 单独反演结果可以较好地恢复油气储层和盐丘的平面位置，但无法准确解释盐丘的深部界面；联合反演结果兼具 MMT 和 MCSEM 的优势，表现出较高的模型分辨率。Kumar 等<sup>[32]</sup>研究发现，MT 数据对于较厚的玄武岩层和其岩下构造识别能力较强，但对玄武岩薄层无法刻画；CSEM 甚至可以恢复玄武岩薄层的横向长度。因而，联合 MT 和 CSEM 方法，可以准确地恢复玄武岩构造。(3) MMT 有助于 MCSEM 压制空气波的影响<sup>[33]</sup>。受空气波的影响，MCSEM 在对浅层油气目标进行探测时，数据反演误差大，联合反演 MMT 和 MCSEM 数据可以更准确确定目标位置，具有更高分辨率。

目前，CSEM 和 MT 联合反演主要存在如下四个关键问题。

(1) 非平面波效应与移动的多场源问题。人工源电磁法的应用包括陆上和海上。在陆上区域，地面可控源电磁勘探通常将发射源置于距离目标一定距离，如果源与接收点的距离不够远，CSAMT 勘探会存在非平面波效应，对于面积较大的工区，基于平面波理论的解释结果会出现较大的误差<sup>[34]</sup>，在构造比较复杂的情况下，会出现严重的阴影效应和复印效应，导致解释结果出现错误，然而目前地面电磁法已经发展了时频电磁法和广域电磁法，均不考虑非平面波校正问题，与此同时，移动源施工方法<sup>[35]</sup>也有助于有效克服 CSAMT 法的缺点。在 MCSEM 勘探中，发射与接收同线，移动的激发场源使得后续联合 MT 与 MCSEM 数据开展反演的问题更为复杂。因此，开展 CSEM 与 MT 联合反演时，需充分考虑所用方法是否存在非平面波效应，以及

如何处理多源移动的问题，才能确保反演结果的正确性。

(2) 联合反演目标函数的构建和权重因子的选取。目前研究中对于 CSEM 和 MT 联合反演目标函数的构建大多沿用吉洪诺夫正则化的反演格式。虽然 Abubakar 等<sup>[36]</sup>在构建目标函数时将各个数据的目标函数做乘积处理，但这种构建方式的合理性尚存在争议。传统的构建形式时在目标函数中同时加入 CSEM 和 MT 的数据拟合项，这种方法依赖于两种方法数据权重因子的合理选取。联合反演目标函数为

$$\varphi = \alpha \varphi_{d_{MT}}^{MT} + \beta \varphi_{d_{CSEM}}^{CSEM} + \lambda_m \varphi_m \quad (7)$$

式中： $\varphi_{d_{MT}}^{MT}$ 、 $\varphi_{d_{CSEM}}^{CSEM}$  分别为 MT 和 CSEM 的数据拟合项，下标  $d_{MT}$ 、 $d_{CSEM}$  分别代表 MT 和 CSEM 的观测数据； $\varphi_m$  为模型正则化项，下标  $m$  代表模型参数； $\alpha$ 、 $\beta$  分别为平衡 MT 和 CSEM 数据拟合项的权重因子； $\lambda_m$  为正则化因子。目前对于式(7)中权重因子的构建形式尚无统一的结论，下面介绍具有代表性的三种构建形式。

第一种权重因子构建形式是 Commer 等<sup>[29]</sup>基于两种方法的数据量提出的，这种构建形式无需确定式(7)中的  $\beta$ ，只需确定  $\alpha$  即可

$$\alpha = \sqrt{N_{MT} / N_{CSEM}} \quad N_{MT} > N_{CSEM} \quad (8)$$

$$\alpha = \sqrt{N_{CSEM} / N_{MT}} \quad N_{CSEM} > N_{MT} \quad (9)$$

式中  $N_{MT}$ 、 $N_{CSEM}$  分别表示 MT 和 CSEM 的数据点数。

对于 MCSEM 勘探，由于电性源是移动的，电磁场的振幅、相位随偏移距是变化的；MMT 勘探利用的是与 MCSEM 相同的接收台站所采集的视电阻率和相位数据。因此，MCSEM 的数据量远大于 MMT 的数据量，故式(9)的构建形式更常见。艾正敏等<sup>[37]</sup>采用这种构建方法取得了一定成效，但同时也发现这种加权系数的选择单纯基于数据量，没有考虑探测深度和探测精度及不同方法分辨率的问题。

第二种权重因子构建形式也是 Commer 等<sup>[29]</sup>提出的，其依据 MT 和 CSEM 数据拟合项对模型参数的梯度值。与第一种构建方式一样，无需确定式(7)中的  $\beta$ ，仅确定  $\alpha$  即可，其形式如式(10)所示。

$$\alpha = \sqrt{\left\| \nabla \varphi_{d_{CSEM}}^{CSEM} \right\| / \left\| \nabla \varphi_{d_{MT}}^{MT} \right\|} \quad (10)$$

这种权重因子考虑的是两种方法相对于初始模

型的数据拟合项梯度，考虑了对整体数据拟合项的贡献，因而依赖于初始模型的选取。

上述两种构建形式均是在反演阶初始阶段就确定了，并不参与后续的反演迭代过程。

针对上述方法所构建的权重因子无法参与整个反演过程的问题，Meqbel 等<sup>[38]</sup>提出了一种可以参与反演流程的权重因子，其计算公式为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\|J^T r\|}{\|J_{MT}^T r_{MT}\|} \\ \beta = \frac{\|J^T r\|}{\|J_{CSEM}^T r_{CSEM}\|} \end{cases} \quad (11)$$

$$J^T r = J_{MT}^T r_{MT} + J_{CSEM}^T r_{CSEM} \quad (12)$$

$$r_{MT} = W_{MT} [d_{MT} - f(m)_{MT}] \quad (13)$$

$$r_{CSEM} = W_{CSEM} [d_{CSEM} - f(m)_{CSEM}] \quad (14)$$

式中： $d_{MT}$ 、 $d_{CSEM}$  分别为 MT 和 CSEM 的数据向量； $f(m)_{MT}$ 、 $f(m)_{CSEM}$  分别为 MT 和 CSEM 的理论计算向量； $J_{MT}$ 、 $J_{CSEM}$  分别为 MT 和 CSEM 灵敏度矩阵； $r_{MT}$ 、 $r_{CSEM}$  分别为 MT 和 CSEM 的数据拟合项； $W_{MT}$ 、 $W_{CSEM}$  分别为 MT 和 CSEM 的对角权重矩阵。

基于这种构建形式的反演思路是在每一次反演迭代时都要重新计算权重因子。Liao 等<sup>[39]</sup>将这种构建形式应用于简化地热模型和实测数据，均得到了较好的反演结果。

(3) 合理选择参与反演的数据。CSEM 方法在实际勘探中需要选取多个激发频率，获取由浅至深的电性结构，为了在联合反演中最大限度发挥 MT 和 CSEM 方法对深部、浅部成像的互补优势，CSEM 数据频段的选取至关重要。除此之外，选取 CSEM 的哪些电磁场分量参与反演也需慎重，关于这个问题相关的研究不多，同时讨论激发频率和参与反演电磁场分量选取的文献亦是鲜见。赵宁等<sup>[40]</sup>对不同激发频率下采集的 CSEM 数据与 MT 数据的反演结果进行对比，发现基于相对较低和较高发射频率得到的 CSEM 数据与 MT 数据的联合反演能够兼顾浅部和深部地层的成像，沿发射源极化方向的 CSEM 电场分量具有电场能量强的优势，反演结果的成像效果较好。但是，文献并未给出相应的理论解释及针对更复杂地质情况的选取依据和结论。

(4) 提高联合反演计算效率。在反演问题中，特别是三维反演问题，需要进行大量的正演计算。

现有的联合反演方法很少应用模拟退火法、遗传算法、粒子群算法等非线性反演方法，而这种全局最优化算法最关键的制约因素是计算消耗内存大、计算效率低。针对这种情况，Gribenko 等<sup>[31]</sup>提出了一种“footprint”方法，并应用于 CSEM 和 MT 的联合反演。该方法在反演计算灵敏度矩阵时无需对整个目标域进行计算和存储，缩小了反演范围，一定程度上减少了运算时间。

### 1.3 地震数据与电磁数据联合反演

电磁方法和地震方法对于复杂或特殊地质构造成像时有各自的优点和局限性。与地震方法相比，利用电磁方法可以较好地识别目标的电阻率差异，对流体和岩性的辨识能力更强。但是，由于低频电磁波在地下传播机制主要是波场的扩散和感应，对构造的分层识别效果不及地震方法。因此，电磁与地震数据的联合反演对于解决油气储层精细评估至关重要。

电磁—地震联合反演相关研究近年来得到广泛关注，但目前尚欠成熟。早期的地震—电磁联合反演研究主要有参考建模方面的联合和约束反演方面的联合。目前，参考建模已经进入实用阶段，主要做法是电磁参考地震建模，可明显提高反演结果的可靠性；地震解释过程中可参考电磁信息，对反射不清楚的地震模型进行修改，再进行偏移成像。关于约束反演方面的联合，则是利用地震剖面建立地层深度（厚度）模型，进行电阻率约束反演；反之，利用电阻率剖面建立地震速度模型，为地震反射盲区成像提供依据。胡祖志等<sup>[41]</sup>结合上述思路构建了地震和电磁联合反演建模流程（图 1）。图 1 所示的电磁—地震联合反演流程主要分为两步：首先，以地震偏移结果得到的层位解释信息作为电磁数据反演的约束，进行电磁约束反演，得到符合地震解释的电阻率模型；然后，根据测井资料获得电阻率与速度之间的对应联系，通过电磁—地震约束反演得到电阻率剖面修正速度模型，并进行迭代。当工区没有测井数据，无法获得较准确的物性关系时，则需依赖速度与电阻率的经验公式<sup>[41-42]</sup>进行地震速度模型的修正。

$$V = aR^b \quad (15)$$

式中： $a$ 、 $b$  为经验参数； $R$  为电阻率； $V$  为速度。显然这种方法要求电阻率与速度有较强的相关性，因此该方法只在特定的工区条件下适用，不是真正

意义上的联合反演。

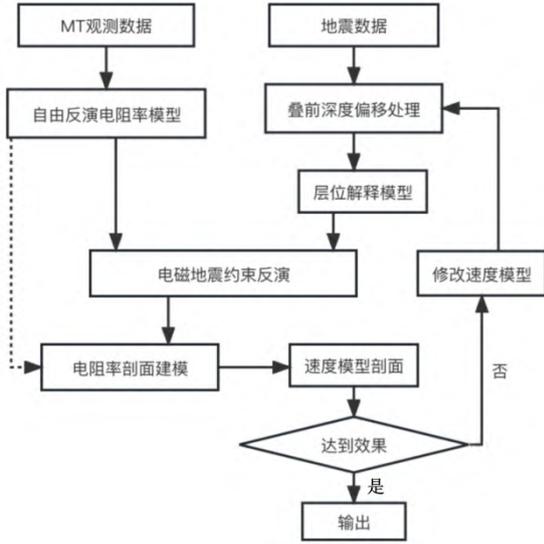


图1 电磁与地震联合反演流程<sup>[39]</sup>

目前地震—电磁联合反演主要有两个方向，一是基于物理模型的联合反演，二是基于交叉梯度方法的联合反演。

基于物理模型的联合反演目前主要有两种，第一种是根据物性资料构建速度—电阻率相关的物理模型，进而构建岩石物理约束，为目标函数中的速度和电阻率拟合搭建一个桥梁，主要步骤如图2所示。这里的关键步骤是利用物性的内在联系，实现相互补充、相互约束，降低反演的多解性。这类联合反演的目标函数通用形式为

$$\varphi(\sigma, V_p) = \varphi_{EM}(\sigma) + \varphi_{seismic}(V_p) + \lambda_R \varphi_R(\sigma, V_p) \quad (16)$$

式中： $\sigma$ 、 $V_p$ 分别为电导率和纵波速度； $\varphi_{EM}(\sigma)$ 和 $\varphi_{seismic}(V_p)$ 分别是电磁数据和地震数据拟合项； $\varphi_R(\sigma, V_p)$ 是根据速度—电阻率对应关系建立的约束条件； $\lambda_R$ 为正则化因子。约束条件需根据电测井数据统计分析得到地震波速度和电阻率之间的关系，如图3所示。这类方式要求速度与电阻率之间有明显的统计学规律，适用范围有限，可借鉴的例子不多。

基于物理模型的第二种联合反演方法是根据 Archie 公式和 Gassmann 公式构建地震和电磁数据与油气储层参数之间的关系<sup>[43-49]</sup>，然后通过联合反演直接得到储层参数。这种方法的应用前提是目标工区已有比较完整的测井储层参数，能够为后续反演提供数据。这种联合反演的理论依据是：当研究对象为双相储层模型时，根据 Archie 公式，电导率对储层含水饱和度灵敏，对孔隙度则不甚灵敏；根据 Gassmann 公式，密度和纵波速度对孔隙度反应

灵敏，但无法反映含水饱和度的变化<sup>[45]</sup>。因此，联

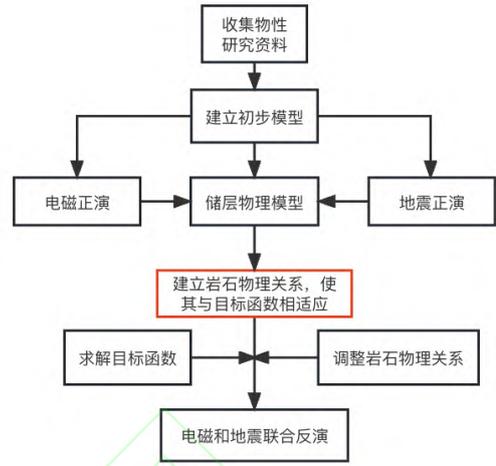


图2 基于岩石物理约束的地震—电磁联合反演流程

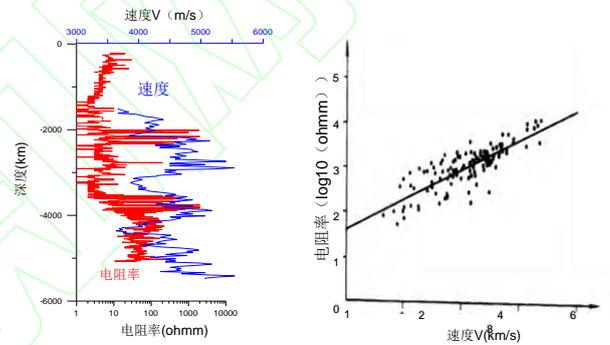


图3 测井数据（速度与电阻率）交汇拟合曲线

合电磁数据和地震数据才能对油气储层参数做出合理的评估，这类问题的通用目标函数<sup>[46]</sup>为

$$\varphi(\mathbf{m}) = \varphi_{d_{SM}}^{SM}(\mathbf{m}) + \gamma \varphi_{d_{EM}}^{EM}(\mathbf{m}) + \lambda_{mod} \varphi_m(\mathbf{m}) \quad (17)$$

式中：上标/下标“SM”和“EM”分别代表地震方法和电磁方法； $\varphi_m(\mathbf{m})$ 是模型正则化项，下标 $\mathbf{m}$ 代表反演的未知参数， $\mathbf{m} = [\mathbf{m}^p, \mathbf{m}^{s_w}]^T$ ，其中 $\mathbf{m}^p$ 表示孔隙度矩阵， $\mathbf{m}^{s_w}$ 表示含水饱和度； $\varphi_{d_{SM}}^{SM}(\mathbf{m})$ 与 $\varphi_{d_{EM}}^{EM}(\mathbf{m})$ 分别为地震和电磁的数据拟合项，下标 $\mathbf{d}_{SM}$ 、 $\mathbf{d}_{EM}$ 分别代表地震和电磁的观测数据，二者数据拟合项的具体形式为

$$\varphi_{d_{SM}}^{SM}(\mathbf{m}) = \frac{\eta_k^2}{2} \sum_{k=1}^{N_k^{SM}} \left\{ \sum_{i=1}^{N_S^{SM}} \sum_{j=1}^{N_R^{SM}} |w_{d;i,j,k}^{SM} [\mathbf{d}_{i,j,k}^{SM} - \mathbf{s}_{i,j,k}^{SM}(\mathbf{m})]|^2 \right. \\ \left. \div \sum_{i=1}^{N_S^{SM}} \sum_{j=1}^{N_R^{SM}} |w_{d;i,j,k}^{SM} \mathbf{d}_{i,j,k}^{SM}|^2 \right\} \quad (18)$$

$$\varphi_{d_{EM}}^{EM}(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_k^{EM}} \left\{ \sum_{i=1}^{N_S^{EM}} \sum_{j=1}^{N_R^{EM}} |w_{d;i,j,k}^{EM} [\mathbf{d}_{i,j,k}^{EM} - \mathbf{s}_{i,j,k}^{EM}(\mathbf{m})]|^2 \right. \\ \left. \div \sum_{i=1}^{N_S^{EM}} \sum_{j=1}^{N_R^{EM}} |w_{d;i,j,k}^{EM} \mathbf{d}_{i,j,k}^{EM}|^2 \right\}$$

(19)

其中:  $N_F$  表示频率数;  $N_S$  表示源的个数;  $N_R$  表示接收器个数;  $d_{i,j,k}$  表示观测数据;  $s_{i,j,k}^{SM}(m)$ 、 $s_{i,j,k}^{EM}(m)$  分别表示基于参考经验岩石物理公式得到的理论孔隙度和含水饱和度正演响应函数;  $w_{d,i,j,k}^{SM}$ 、 $w_{d,i,j,k}^{EM}$  分别为地震和电磁数据拟合项中的权重系数, 其目的是平衡地震和电磁数据量级的不统一问题;  $\eta_k$  是常数, 其作用是避免地震高频数据主导反演过程;  $\gamma$  是平衡两种数据拟合项的权重因子, 其定义为

$$\gamma = \frac{\varphi_d^{SM}(m_0)}{\varphi_d^{EM}(m_0)} \quad (20)$$

其中  $m_0$  是给定的初始储层参数(孔隙度或者含水饱和度)模型。

杜润林等<sup>[44]</sup>和徐凯军等<sup>[48]</sup>利用上述方法构建储层理论模型, 采用模拟退火并结合粒子群算法实现了一维 MCSEM 和地震数据的联合反演, 无需计算繁琐的雅可比矩阵, 反演结果较准确预测了储层的孔隙度和饱和度; 彭国民等<sup>[49]</sup>采用类似思路构建了归一化的联合反演目标函数, 利用模拟退火法进行 MCSEM 和地震 AVA (Amplitude Versus Angle, 简称 AVA) 数据的联合反演, 效果较好。

这类直接反演储层参数的联合反演严重依赖于稳定可靠的岩石物理关系, 工业界广泛应用的 Archie 公式和 Gassmann 方程中的系数也需要根据实际测井资料确定, 因而对于反演结果的准确性缺少评判依据。针对这个问题, Chen 等<sup>[50-51]</sup>基于统计岩石物理模型和贝叶斯框架, 利用马尔可夫链的蒙特卡罗抽样方法对储层参数预测值进行不确定性分析, 结果表明联合 CSEM 数据和 AVA 数据可以减小对流体饱和度预测的不确定性, 但这种方法对实测含噪数据的处理效果欠佳; 同时, 现有的大多数研究仅仅考虑了双相储层介质(仅含油和水)情况, 适用性差, 对于同时含油、气和水的三相油气储层则需进一步地深入讨论。

基于岩石物理关系的地震电磁联合反演存在很多问题, 因此基于交叉梯度方法的联合反演自提出后就得到了广泛的应用和发展<sup>[52-59]</sup>。这种方法基于目标区域电导率剖面 and 地震剖面的结构相似性, 即电导率变化和地震波速度变化方向是一致的。在联合反演的目标函数中引入交叉梯度函数来约束不同参数, 相比岩石物理关系的耦合更普遍适用, 反演

效果良好, 并形成了成熟的算法架构。图 4 为体波走时和直流电阻率联合反演流程图。可见, 交叉梯度方法在此流程中作用于地震速度模型和电磁电阻率模型, 在反演中对模型值进行迭代更新。

交叉梯度函数的定义<sup>[52]</sup>为

$$t(x, y, z) = \nabla m_s(x, y, z) \times \nabla m_r(x, y, z) \quad (21)$$

式中  $\nabla m_r$ 、 $\nabla m_s$  分别代表电阻率的梯度和地震波速度的梯度; 下标 s、r 分别代表地震速度模型和电阻率模型。交叉梯度约束就是使  $t(x, y, z)$  的模趋向于 0, 其意义是只有当两个模型的梯度向同一(相反)方向变化或者其中一个梯度的值为零时才满足此条件, 这就保证了电阻率和地震参数的结构相似性。基于交叉梯度约束的地震—电磁联合反演主要有如下两个关键问题。

(1) 基于交叉梯度约束的联合反演的迭代流程。一种思路是将交叉梯度约束独立于地震和电磁各自的反演流程, 只作用于整体的目标函数, 其目标函数形式为

$$\varphi(m_s, m_r) = \alpha_s \varphi_s(m_s) + \beta_{EM} \varphi_{EM}(m_r) + \lambda_s \varphi_{m_s}(m_s) + \lambda_r \varphi_{m_r}(m_r) + \gamma_t \|t(m_s, m_r)\| \quad (22)$$

式(22)中:  $\varphi_s(m_s)$ 、 $\varphi_{EM}(m_r)$  分别为地震和电磁的数据拟合项;  $\alpha_s$ 、 $\beta_{EM}$  分别为平衡地震和电磁数据拟合项的权重因子;  $\varphi_{m_s}(m_s)$ 、 $\varphi_{m_r}(m_r)$  分别为地震和电磁的模型正则化项;  $\lambda_s$ 、 $\lambda_r$  分别为平衡地震和电磁模型正则化项的权重因子;  $\|t(m_s, m_r)\|$  为交叉梯度约束项;  $\gamma_t$  为交叉梯度约束项的权重系数。

这种方式真正实现了地震、电磁反演系统与交叉梯度结构约束的融合, 高级等<sup>[60]</sup>基于阻尼最小二乘反演思路计算了含交叉梯度项的地震电磁联合反演目标函数形式(式 22)下的灵敏度矩阵, 该矩阵除了包括地震和电磁对应的灵敏度矩阵, 还耦合了交叉梯度项, 计算求解十分复杂, 同时这种形式不利于选取合适的权重因子, 很难平衡地震和电磁数据, 甚至无法体现交叉梯度结构约束的作用。

其后, 学者提出了一种交替式交叉梯度约束联合反演方法, 其目标函数形式为

$$\varphi_{seismic} = \varphi_s(m_s) + \lambda_s \varphi_{m_s}(m_s) + \eta_{seismic} \|t(m_s, m_r)\| \quad (23)$$

$$\varphi_E = \varphi_{EM}(m_r) + \lambda_r \varphi_{m_r}(m_r) + \eta_{EM} \|t(m_s, m_r)\| \quad (24)$$

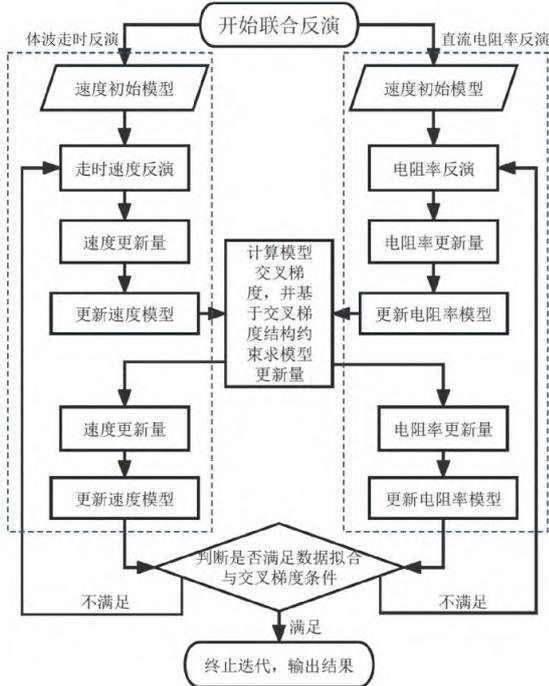


图4 交叉梯度联合反演框图<sup>[60]</sup>

式中： $\varphi_{seismic}$ 、 $\varphi_E$  分别为交替式交叉梯度联合反演的地震和电磁目标函数； $\eta_{seismic}$ 、 $\eta_{EM}$  分别为控制交叉梯度项在地震、电磁目标函数中的权重系数。这种方式将交叉梯度约束项加入每一数据类型的反演目标函数，避免了将不同属性的数据直接耦合导致因数量级和反演系统不一致的问题。式(23)中的交叉梯度约束只用于改变地震的速度模型，使其与电阻率模型结构一致，并通过权重因子 $\eta_{seismic}$ 对二者进行平衡。基于式(24)对电阻率模型结构进行约束的方式与式(23)是相同的。

彭淼等<sup>[53]</sup>基于这种思路实现了大地电磁数据和地震走时资料的三维联合反演，并设计了单、双棱柱体模型进行理论模型测试，取得了较好的效果；齐嘉慧<sup>[54]</sup>利用交替交叉梯度反演实现了大地电磁与地震全波形数据的联合反演，讨论了权重系数的选取范围，获得了较单一反演更较好的结果。

(2) 交叉梯度约束的适用性。基于交叉梯度约束的联合反演研究大多是基于预构建的简单理论模型进行验证，当地质体的电阻率与速度的空间分布不一致时，基于交叉梯度的电磁—地震联合反演难以调整电阻率和速度模型的边界，使电阻率模型和速度模型有相似的物性结构<sup>[55]</sup>。针对这种情况，彭国民<sup>[55]</sup>提出了基于 K 均值聚类和回归分析技术的自适应修正方法，其本质是利用可信度高的物性模型修正另一种物性模型，可提高交叉梯度约束的准

确度，但也存在一个问题，即 K 均值聚类算法依赖于聚类数目和初始聚类中心，适应性不强。

综上所述，对于地震—电磁联合反演，无论是基于岩石物理模型约束还是基于交叉梯度约束都有其固有限制条件，因此需要引入新思路和新方法进行进一步完善。

## 2 电磁联合反演的发展方向

针对联合反演中对反演框架研究不足的问题，陈晓等<sup>[61]</sup>提出了一种联合反演新框架：采用多次建模、综合约束和分步反演的策略，降低初始模型建模中人为因素的影响，一定程度上降低了反演结果对于初始模型的依赖性，但其方法仍局限于现有的反演研究思路。笔者认为未来电磁联合约束反演研究可以重点考虑以下几个方面。

(1) 利用人工智能方法构建较精确的初始模型。人工智能方法在大地电磁反演中取得了一系列的研究成果<sup>[62-65]</sup>，但目前研究尚不成熟，对于联合反演而言，直接利用人工智能手段获取地层属性参数还为时尚早，但可以考虑结合人工智能手段获取更准确的初始模型。常规联合反演方法采用最优化方法寻找最优模型，例如高斯—牛顿法和非线性共轭梯度法，需要计算目标函数的梯度和灵敏度矩阵，同时依赖于初始模型的选取。如果初始模型选取不合理，得到的解往往只是局部最优解。而人工智能手段无需计算目标函数的梯度，对于大地电磁法而言，输入大地电磁的视电阻率和相位信息即可得到电阻率值。相对于传统反演方法，在计算精度和稳定性上表现较好<sup>[63]</sup>，可以很好地估计异常体的位置、横向维度和电阻率特征。人工智能方法可以为联合反演提供更准确的初始模型，进而提高联合反演的精度和可靠性。

(2) 引入聚类分析和岩石物理信息构建约束模型。近二十年来，现有的正则化约束方法主要局限于先验测井资料约束、结构约束和岩石物理约束，这种全局的约束手段过于粗糙，特别是目标地域不适合采用结构约束方法、物性参数变化方向没有明显的相关性且岩石物性关系不明显时，现有约束方式的作用会有限，甚至对反演结果造成误判，无法得到准确的地球物理剖面。Sun 等<sup>[66]</sup>另辟蹊径，利

用模糊 C-均值聚类方法将岩石物理资料看成模型参数域中的不同聚类单元, 这样可以对特殊区域利用特定的岩石物理信息进行约束, 提高精度的同时也在一定程度上减少了运算量。相对于传统的岩石物理约束, 这种约束方式更适用于不同的岩性目标, 能够改善现有岩石物理约束的经验公式准确度有限的问题。

(3) 充分利用 GPU 并行计算手段进行联合反演。非线性的全局优化算法, 例如模拟退火法、蒙特卡洛法、粒子群算法和量子遗传算法等, 虽然无需依赖于初始模型的选取, 也无需求解繁杂的敏感度矩阵, 但往往占用计算内存巨大, 在计算效率和收敛速度方面不占优势。研究<sup>[64]</sup>表明, 随着模型复杂度的增加, 内存和时间消耗呈指数级增长, 因而复杂模型不适用于大规模的三维联合反演。杜润林等<sup>[67]</sup>基于并行计算、利用模拟退火法提出了 MCSEM 和地震数据联合反演方法, 反演结果可以收敛到全局最优解, 算法具有很好的并行性, 明显提高了反演速度和精度。

(4) 引入三维可视化与人机交互结合的反演思路。传统的联合反演流程大多采用迭代循环方式, 程序运行后直到整个反演流程结束才能恢复用户响应, 无法实现用户对于可视化交互操作和反演进程的掌握和控制<sup>[68]</sup>。张晨<sup>[69]</sup>利用可拓展拓扑结果的模型构建技术和模型体可视化交互编辑技术, 提出了一种三维可视化与人机交互结合的反演思路, 不但可以实时查看反演的中间结果, 根据结果的好坏实时地调整权重值等反演参数, 还可在反演过程中对待反演的模型实时改变形状、大小和位置, 实现了反演流程的人机交互性和实时性。对于联合反演, 通过上述思路可以实时调整不同方法之间的权重, 进而控制整个联合反演进程。

(5) 发展基于多物理场同步采集数据仪器的联合反演。国内外关于联合采集技术方面的研究, 特别是海洋环境下地球物理数据联合采集几乎为空白, 故联合反演研究对于实测资料的应用有限, 仅在理论层面上论述联合反演的可能性。资源勘探将逐渐转向海洋, 这是一个必然的趋势, 且海洋环境为多物理场一体化采集仪器及方法的发展提供了有利条件。多物理场传感器可搭载在一套水下采集系统中, 已有电磁—地震一体化仪器处于研发阶段, 这必为电磁—地震联合反演提供最佳的数据体, 同时, 基

于电磁—地震一体化仪器的数据采集可保证不同地球物理数据的信息同步及噪声类型和量级的一致性, 这为震电效应嵌入电磁效应与振动波机理相结合的耦合方程、进而联合利用电磁、地震方法解决深层次地质问题提供了数据基础。

### 3 认识与展望

综上所述, 由于不同的地球物理方法都有其优、缺点, 所以应尽可能收集多种地球物理信息, 从不同的角度研究地质目标, 联合多种方法进行反演, 最终获得地下结构更客观准确的地质特征, 降低多解性。因此, 多信息、多方法结合的电磁联合约束反演受到业内学者的关注和重视, 相关研究取得长足进步。从最初结合地震和测井信息的建模约束, 到天然源与人工源、电磁数据与地震数据的多方法联合反演, 推进了电磁探测方法走向全面应用。但无论是哪种约束联合反演方法, 其解决地质问题的能力都是有限的, 需结合实际需求合理选择约束联合方法, 冗余的约束联合反演方法往往起不到最佳的成像效果。因而, 需充分发挥先验信息、充分挖掘各种地球物理数据、充分利用先进的数据处理方法手段、充分结合现有的高性能计算方法, 才能让联合反演真正为生产实践赋能, 充分发挥其方法优势。

#### 参考文献

- [1] 何展翔. 电磁勘探技术的机遇与挑战及发展方向[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(4): 433-447.  
HE Zhanxiang. Opportunities, challenges and development directions of electromagnetic expectation today[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 41(4): 433-447.
- [2] 赵国泽, 何展翔, 魏文博. 地球电磁学科的发展现状和展望[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009.
- [3] 赵国泽, 陈小斌, 汤吉. 中国地球电磁法新进展和发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1171-1180.  
ZHAO Guoze, CHEN Xiaobin, TANG Ji. Advanced geoelectromagnetic methods in China[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1171-1180.
- [4] CAGNIARD L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting[J]. Geophysics, 1953, 18: 605-

- [5] SANDBERG S K, HOHMANN G W. Controlled-source audiomagnetotellurics in geothermal exploration[J]. *Geophysics*, 1982, 47(1): 100-116.
- [6] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2007, 84(4): 1195-1200.  
XUE Guoqiang, LI Xiu, DI Qingyun. The progress of TEM in Theory and application[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 84(4): 1195-1200.
- [7] 何展翔. 人工源时间频率电磁测深方法[P]. CN1239922C, 2006-02-01.
- [8] 何展翔, 胡祖志, 王志刚, 等. 时频电磁(TFEM)技术:数据联合约束反演[J]. *石油地球物理勘探*, 2020, 55(4): 898-905.  
HE Zhanxiang, HU Zuzhi, WANG Zhigang, et al. Time-frequency electromagnetic(TFEM) technology: data joint constraint inversion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2020, 55(4): 898-905.
- [9] 敬荣中. 地球物理非线性联合反演方法研究[D]. 湖南长沙: 中南大学, 2002.
- [10] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [11] 王家映. 地球物理反演理论[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 1998.
- [12] 厉波. 测井约束反演中利用声波测井进行精确时深转换[J]. *内蒙古石油化工*, 2005, 11: 114-115.  
LI Bo. Accurate time-depth transformation using sonic logging in log-constraint inversion[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2005, 11: 114-115.
- [13] 谢万学, 王永刚, 邢文军. 井孔与地面地震数据联合反演方法综述[J]. *勘探地球物理学进展*, 2006, 29(1): 1-6.  
XIE Wanxue, WANG Yonggang, XING Wenjun. Review of joint inversion methods for borehole and surface seismic data[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2006, 29(1): 1-6.
- [14] 聂凯轩, 陆正元, 冯斌. 测井约束反演技术在 LZ21-4 构造带储盖层综合分析中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(1): 98-101.  
NIE Kaixuan, LU Zhengyuan, FENG Bin. Application of log-constraint inversion technique in comprehensive analysis of reservoir and cap in LZ21-4 structural belt[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2007, 42(1): 98-101.
- [15] 谭荣彪, 李瑞, 李珂洞, 等. 井~震约束反演在薄互层复杂构造地区的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2008, 30(1): 52-57.  
TAN Rongbiao, LI Rui, LI Kejiong, et al. Application of the well-seismic restrained inversion in thin interbed complex structure area[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2008, 30(1): 52-57.
- [16] 连太炜, 樊洪海, 于玲玲. 测井约束地震反演在地层孔隙压力预测中的应用[J]. *西部探矿工程*, 2009, 21(06): 64-65.  
LIAN Taiwei, FAN Honghai, YU Lingling. Application of the formation pore pressure prediction by log-constraint seismic inversion[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2009, 21(6): 64-65.
- [17] 史小东. 基于高频重建的井电匹配、震电约束反演研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- [18] 孟翠贤, 宋景明, 王永涛, 等. 电法约束反演在目标勘探中的应用[C]. 中国地球物理第二十一届年会论文集, 2005, 677.
- [19] 杨辉, 王永涛, 王家林, 等. 大地电磁测深拟二维模拟退火约束反演[J]. *海相油气地质*, 2001, 6(1): 47-52.  
YANG Hui, WANG Yongtao, WANG Jialin, et al. Quasi-2D simulated annealing constraint inversion in magnetotelluric sounding[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2001, 6(1): 47-52.
- [20] 杨辉, 王永涛, 戴世坤, 等. 带地形的 MT 多参量二维快速模拟退火约束反演[J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(2): 213-217.  
YANG Hui, WANG Yongtao, DAI Shikun, et al. 2-D inversion of magnetotelluric (MT) multi-parameters with topography using fast simulated annealing[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2003, 38(2): 213-217.
- [21] 何展翔, 王永涛, 陶德强. 一种减小电磁测深反演结果非唯一性的方法[P]. CN104422969B, 2017-03-15.
- [22] 石艳玲, 魏强, 胡祖志, 等. 井震约束下的电磁反演技术在深层勘探中应用初探[C]. 2016 中国地球科学联合学术年会论文集, 2016, 57-59.
- [23] 王有涛, 何展翔, 陈学国, 等. 基于物性分析建模的时频电磁反演及储层评价——以准北缘石北构造带为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2022, 57(6): 1489-1497.  
WANG Youtao, HE Zhanxiang, CHEN Xueguo, et al. Time-frequency electromagnetic data inversion and reservoir

- evaluation based on physical property analysis modeling: A case study of the Shibeil structural belt on the northern margin of the Junggar Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(6): 1489-1497.
- [24] 石艳玲, 黄文辉, 魏强, 等. 电磁井震约束反演识别川中深层裂谷[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(6): 1233-1240.
- SHI Yanling, HUANG Wenhui, WEI Qiang, et al. Deep rift identification with MT inversion constrained by shallow logging and seismic data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(6): 1233-1240.
- [25] 王传武, 李术才, 刘斌, 等. 基于参考模型的三维电阻率约束反演方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(9): 1685-1694.
- WANG Chuanwu, LI Shucai, LIU Bin, et al. 3D constrained electrical resistivity inversion method based on reference model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(9): 1685-1694.
- [26] 刘斌, 聂利超, 李术才, 等. 三维电阻率空间结构约束反演成像方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(11): 2258-2268.
- LIU Bin, NIE Lichao, LI Shucai, et al. 3D electrical resistivity inversion tomography with spatial structural constraint[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(11): 2258-2268.
- [27] DA SILVA PINHEIRO J L, SILVA M W C, DA PIEDADE A A, et al. 3D Joint Inversion of MMT and MCSEM data[C]. *Seventeenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, 2021, 1-6.
- [28] RODI W, MACKIE R L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion[J]. *Geophysics*, 2001, 66(1): 174-187.
- [29] COMMER M, NEWMANN G A. Three-dimensional controlled-source electromagnetic and magnetotelluric joint inversion[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 178(3): 1305-1316.
- [30] MACKIE R, WATTS M D, RODI W. Joint 3D inversion of marine CSEM and MT data[C]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2007, 26: 574-579.
- [31] GRIBENKO A V, ZHDANOV M S. Joint 3D inversion of marine CSEM and MT data[C]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2011, 30: 552-557.
- [32] KUMAR K, BORGOHAIN D, MORTEN J P, et al. Offshore sub-basalt exploration using CSEM and MT[C]. *SPG 2013*, 109-112.
- [33] SASAKI Y. 3D inversion of marine CSEM and MT data: An approach to shallow-water problem[J]. *Geophysics*, 2013, 78(1): E59-E65.
- [34] 杨大方, 翁爱华, 杨悦, 等. 一个 CSAMT 非平面波效应的实例及数值分析[J]. *地质与勘探*, 2015, 51(1): 151-156.
- YANG Dafang, WENG Aihua, YANG Yue, et al. An example of non-plane wave effect in CSAMT and numerical analysis[J]. *Geology and Exploration*, 2015, 51(1): 151-156.
- [35] 徐凤姣, 严良俊, 谢兴兵, 等. 移动可控源电磁法成像方法与应用[C]. *2014 年中国地球科学联合学术年会论文集*, 2014, 55-58.
- [36] ABUBAKAR A, LI M, LIU J, et al. Simultaneous joint inversion of MT and CSEM data using a multiplicative cost function[C]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2009, 28: 719-723.
- [37] 艾正敏, 叶益信, 汤文武, 等. 基于非结构三角网格的海洋 CSEM 和 MT 二维联合反演研究[J]. *物探与化探*, 2021, 45(1): 149-158.
- AI Zhengmin, YE Yixin, TANG Wenwu, et al. A test study of 2D joint inversion of marine CSEM and MT based on unstructured triangular grid[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(1): 149-158.
- [38] MEQBEL N, RITTER O. Joint 3D inversion of multiple electromagnetic datasets[J]. *Geophysical Prospecting*, 2015, 63(6): 1450-1467.
- [39] LIAO W, PENG R, HU X, et al. 3-D Joint Inversion of MT and CSEM Data for Imaging a High-Temperature Geothermal System in Yanggao Region, Shanxi Province, China[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-13.
- [40] 赵宁, 王堃鹏, 秦策. 海洋 CSEM 和 MT 一维联合反演研究[J]. *物探化探计算技术*, 2014, 36(2): 148-151.
- ZHAO Ning, WANG Kunpeng, QIN Ce. Research on 1-D joint inversion of marine CSEM and MT[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 36(2): 148-151.
- [41] 胡祖志, 刘雪军, 杨利根, 等. 电磁与地震联合反演改

- 善高陡构造成像[C]. 中国石油学会 2019 年物探技术研讨会论文集, 2019, 1012-1015.
- [42] DE STEFANO M, GOLFRE ANDREASI F, RE S, et al. Multiple-domain, simultaneous joint inversion of geophysical data with application to subsalt imaging[J]. *Geophysics*, 2011, 76(3): 69-80.
- [43] GAO G, ABUBAKAR A, HABASHY T M. Joint petrophysical inversion of electromagnetic and full-waveform seismic data Joint petrophysical EM and seismic inversion[J]. *Geophysics*, 2012, 77(3): WA3-WA18.
- [44] 杜润林, 张晓波, 刘李伟, 等. 海洋可控源电磁和地震联合反演储层参数研究[C]. 中国石油学会 2019 年物探技术研讨会论文集, 2019, 1009-1011.
- [45] HOVERSTEN G M, CASSASSUCE F, GASPERIKOVA E, et al. Direct reservoir parameter estimation using joint inversion of marine seismic AVA and CSEM data[J]. *Geophysics*, 2006, 71(3): C1-C13.
- [46] ABUBAKAR A, GAO G, HABASHY T M, et al. Joint inversion approaches for geophysical electromagnetic and elastic full-waveform data[J]. *Inverse Problems*, 2012, 28(5): 055016.
- [47] DU Z, MAGGREGOR L M. Reservoir characterization from joint inversion of marine CSEM and seismic AVA data using Genetic Algorithms: a case study based on the Luva gas field[C]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2010, 29: 737-742.
- [48] 徐凯军, 杜润林, 刘展. 海洋可控源电磁与地震一维联合储层参数反演[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(1): 197-203.
- XU Kaijun, DU Runlin, LIU Zhan. Joint reservoir parameter inversion of 1D marine controlled source electromagnetic and seismic data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(1): 197-203.
- [49] 彭国民, 徐凯军, 杜润林, 等. MCSEM 和地震 AVA 数据联合反演储层物性[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(5): 1110-1116.
- PENG Guomin, XU Kaijun, DU Runlin, et al. Reservoir petrophysical parameter estimation with joint inversion of MCSEM and seismic AVA data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(5): 1110-1116.
- [50] CHEN J, HOVERSTEN G M, VASCO D, et al. A Bayesian model for gas saturation estimation using marine seismic AVA and CSEM data[J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): WA85-WA95.
- [51] CHEN J, HOVERSTEN G M. Joint inversion of marine seismic AVA and CSEM data using statistical rock-physics models and Markov random fields[J]. *Geophysics*, 2012, 77(1): R65-R80.
- [52] GALLARDO L A, MEJU M A. Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross-gradients constraints[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109: B03311.
- [53] 彭淼, 谭捍东, 姜枚, 等. 基于交叉梯度耦合的大地电磁与地震走时资料三维联合反演[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(8): 2728-2738.
- PENG Miao, TAN Handong, JIANG Mei, et al. Three-dimensional joint inversion of magnetotelluric and seismic travel time data with cross gradient constraints[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(8): 2728-2738.
- [54] 齐嘉慧. 基于交叉梯度结构约束的大地电磁和地震全波形数据交替联合反演[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2020.
- QI Jiahui. Joint Inversion of Alternating Magnetotelluric and Full-waveform Seismic Data Based on Cross-gradient Structure Constraints[D]. Jilin University, 2020.
- [55] 彭国民. 基于交叉梯度的 CSEM 和地震联合反演方法研究[D]. 山东青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- [56] 恩和得力海, 冯晖, 孙成城, 等. 大地电磁与地震联合反演在深部金属矿模型中的应用[C]. 2017 中国地球科学联合学术年会论文集, 2017, 15-16.
- [57] GALLARDO L A, MEJU M A. Joint two-dimensional cross-gradient imaging of magnetotelluric and seismic traveltimes data for structural and lithological classification[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 169(3): 1261-1272.
- [58] GALLARDO L A. Multiple cross-gradient joint inversion for geospectral imaging[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19): 301-305.
- [59] GALLARDO L A, MEJU M A. Characterization of heterogeneous near-surface materials by joint 2D inversion of DC resistivity and seismic data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(13): 1658.
- [60] 高级, 张海江. 基于交叉梯度交替结构约束的二维地震走时与全通道直流电阻率联合反演[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(11): 4310-4322.

GAO Ji, ZHANG Haijiang. Two-dimensional joint inversion of seismic velocity and electrical resistivity using seismic travel times and full channel electrical measurements based on alternating cross-gradient structural constraint[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(11): 4310-4322.

[61] 陈晓, 于鹏, 邓居智, 等. 地球物理联合反演新框架研究[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(4): 851-858.

CHEN Xiao, YU Peng, DENG Juzhi, et al. A new framework for geophysical joint inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(4): 851-858.

[62] ISAEV I, OBORNEV E, OBORNNEV I, et al. Neural network recognition of the type of parameterization scheme for magnetotelluric data[C]. International Conference on Neuroinformatics. Springer, Cham, 2018, 176-183.

[63] CONWAY D, ALEXANDER B, KING M, et al. Inverting magnetotelluric responses in a three-dimensional earth using fast forward approximations based on artificial neural networks[J]. Computers & Geosciences, 2019, 127: 44-52.

[64] LIU W, XI Z, WANG H, et al. Two-dimensional deep learning inversion of magnetotelluric sounding data[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2021, 18(5): 627-641.

[65] ALYOUSUF T, YAOGUO. Inversion using adaptive physics-based neural network: Application to magnetotelluric inversion[J]. Geophysical Prospecting, 2022, 70(7): 1252-1272.

[66] SUN J, LI Y. Joint inversion of multiple geophysical data using guided fuzzy c-means clustering[J]. Geophysics, 2016, 81(3): ID37-ID57.

[67] 杜润林, 刘李伟, 孙建伟. 基于GPU的海洋可控源电磁和地震联合反演[C]. 2020年中国地球科学联合学术年会论文集, 2020, 165.

[68] 郑元满, 姚长利, 张晨. 重磁三维自动反演软件系统的分析与设计[J]. 现代地质, 2012, 26(6): 1225-1230.

ZHENG Yuanman, YAO Changli, ZHANG Chen. Design a software for 3-D automatic gravity and magnetic inversion[J]. Geoscience, 2012, 26(6): 1225-1230.

[69] 张晨. 磁异常及其梯度多参量联合反演及三维人机交互建模研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.

(本文编辑: 刘海樱)

## 作者简介



张朔宁, 硕士研究生, 1999年生。2021年6月毕业于中国矿业大学, 获地球物理学专业理学学士学位; 2021年保送至南方科技大学, 攻读地球与空间科学系物理学硕士学位, 主要从事海洋电磁法勘探方法与成像理论研究、水下目标电磁探测方法理论与技术研究以及高性能计算和人工智能技术在电磁法探测上的应用研究。