

国家重点研发计划“深地资源勘查开采”专项
《综合地球物理联合反演与解释一体化平台建设》项目

综合地球物理联合反演与解释
一体化平台(IPIG)

软件
说
明
书

综合地球物理联合反演与解释
一体化平台(IPIG)

中华人民共和国科学技术部

2020 年 7 月 31 日

综合地球物理联合反演与解算一体化平台(IPIG)

目 录

第 1 章 概述.....	6
第 2 章 高分辨率地震成像	8
2.1 前言	8
2.1.1 基于被动源地震数据的成像.....	8
2.1.2 基于叠前地震资料的频率可控的长波长分量反演.....	9
2.1.3 基于叠前地震资料的高分辨率地震成像.....	9
2.1.4 保幅高分辨率及超分辨率地震反演.....	9
2.1.5 矿体与围岩的边缘检测及矿体内部非均质性及物性变化的刻画	
11	
2.2 镜像说明	13
2.2.1 基于被动源地震数据的成像.....	13
2.2.2 基于叠前地震资料的频率可控的长波长分量反演.....	14
2.2.3 基于叠前地震资料的高分辨率地震成像.....	14
2.2.4 保幅高分辨率及超分辨率地震反演.....	14
2.2.5 矿体与围岩的边缘检测及矿体内部非均质性及物性变化的刻画	
15	
2.3 软件的使用说明	15
2.3.1 输入说明（必要包括参数，网格）	15
2.3.2 输出说明（必要包括数据结果结构说明）	31
2.3.3 绘图文件.....	37
2.3.4 运行说明.....	39
第 3 章 重磁联合反演.....	42
3.1 前言	42
3.1.1 重磁异常数据处理.....	42
3.1.2 重磁异常反演与解释.....	42
3.1.3 重磁联合反演.....	42
3.2 镜像说明	43
3.3 软件的使用说明	44

3.3.1	输入说明（必要包括参数，网格）	44
3.3.2	输出说明（必要包括数据结果结构说明）	71
3.3.3	绘图文件.....	72
3.3.4	运行说明.....	93
第 4 章	电磁联合反演.....	94
4.1	前言	94
4.2	镜像说明	94
4.2.1	多种电磁探测数据频域联合反演方法与技术（正演部分）	94
4.2.2	时间域与频率域电磁联合反演（正演部分）	95
4.3	软件的使用说明	95
4.3.1	输入说明（必要包括参数，网格）	95
4.3.2	输出说明（必要包括数据结果结构说明）	112
4.3.3	绘图文件.....	114
4.3.4	运行说明.....	115
第 5 章	综合地球物理联合反演.....	117
5.1	前言	117
5.2	镜像说明	117
5.3	软件的使用说明	118
5.3.1	输入说明（必要包括参数，网格）	118
5.3.2	输出说明（必要包括数据结果结构说明）	118
5.3.3	绘图文件.....	119
5.3.4	运行说明.....	120
第 6 章	高性能求解器.....	121
6.1	前言	121
6.2	镜像说明	121
6.3	软件的使用说明	122
6.3.1	输入说明（必要包括参数，网格）	123
6.3.2	输出说明（必要包括数据结果结构说明）	127
6.3.3	绘图文件.....	128

6.3.4	运行说明.....	129
第 7 章	人工智能地球物理.....	130
7.1	前言	130
7.1.1	综合地球物理数据特征提取.....	130
7.1.2	深度学习方法.....	130
7.2	镜像说明	130
7.3	软件的使用说明	131
7.3.1	输入说明 （必要包括参数，网格）	131
7.3.2	输出说明（必要包括数据结果结构说明）	133
7.3.3	绘图文件.....	133
7.3.4	运行说明.....	135
第 8 章	可视化.....	136
8.1	前言	136
8.2	镜像说明	137
8.3	软件的使用说明	138
8.3.1	输入说明 （必要包括参数，网格）	139
第 9 章	地质解释与应用示范.....	141
9.1	前言	141
9.2	镜像说明	142
9.3	软件的使用说明	142
9.3.1	输入说明 （必要包括参数，网格）	142
9.3.2	输出说明（必要包括数据结果结构说明）	143
9.3.3	绘图文件.....	143
9.3.4	运行说明.....	143
参考文献	144	
专利文献	152	
软件著作权文献.....	153	

第1章 概述

向地球深部进军，实现“1500米采矿新空间、进军2000-3000米勘查新深度、开辟覆盖区找矿‘新大陆’、加快实现找矿突破”的国家战略，是我国的一项重要战略任务。由于缺少具有国际领先水平自主知识产权的多种、多类型数据联合反演、评价和综合解释一体化平台，极大地制约着我国深部金属矿产资源的勘查能力。本项目从不同尺度对地下资源的多个参数进行联合反演与解释，研发综合地球物理一体化平台并进行找矿示范。

研究3000米以浅多种、多类型数据联合反演解释技术，多元信息评价与预测技术，研发重磁、电磁、地震处理、解释可视化及一体化平台。发展大数据人工智能理论方法，提高大规模数据处理、解释的高性能计算能力，开展岩浆热液型和中低温热液型典型矿集区应用示范，实现中深部金属矿产资源评价与预测。

针对上述研究内容，本项目建立一套多种、多类型数据协同作业的可视化综合地球物理反演解释一体化平台，具体开发内容如下：

- (1) 主动源和被动源联合地震高/超分辨率成像新技术，表征深部矿体的精细结构、空间展布及物性特征。
- (2) 高精度三维地质建模方法和基于结构耦合思想的重磁联合三维体素反演新算法，有效降低反演结果的不确定性。
- (3) 多种电磁法测量数据的时间域与频率域联合反演新技术，准确圈定金属矿(化)体靶位。
- (4) 分布式异构数据的智能化存储、快速访问、高效处理与分析，进行正、反演算法的并行化，建立专业化的高性能计算工具包和算法库。
- (5) 重、磁、电、震综合地球物理联合反演新技术，搭建基于分布式网格技术的数据库系统；实现基于大数据分析的矿集区多元信息智能评价与预测；建立综合地球物理处理解释一体化平台；构建高分辨率显示集群，实现三维可视化。
- (6) 开展湘南(W-Sn)、湘中(Sb-Au)典型矿集区综合示范研究，验证综合地球物理联合反演解释技术、多元信息评价与预测技术的有效性、实用性，检验软件平台的中深部探测功能，总结深部资源找矿模式和多元信息预测新方法，形成专

家智库。

综合地球物理联合反演与解算一体化平台(IPIG)

第2章 高分辨率地震成像

2.1 前言

地震学方法是探测和认识地球深部结构的最有效工具之一，地震资料是地球物理探测的主要数据源之一。地球深部过程的探测可为成矿系统的“源区”分析提供深部依据；通过识别断裂系统、主要块体边界、隐伏岩体边界等横向分界，可厘定成矿系统“通道”；在识别成矿系统“源区”和“通道”基础上，可进一步构建成矿构造背景并发现有利的聚矿“场所”，为新的矿产资源勘查提供深部依据。地震成像作为地球物理勘探的重要组成部分，具有高精度表征地下地质体的几何形态、空间展布和物性参数变化的特点。

由于采集过程中震源和接收器的限制，野外采集到的地震数据缺失低频成分。然而，地震数据的低频成分对于速度建模、深层构造的高分辨率成像至关重要。为突破这一难点，本项目将主动源与被动源联合，提出被动源和主动源地震观测资料的联合高分辨率成像模块。本模块主要聚焦以下几个方面：

2.1.1 基于被动源地震数据的成像

2.1.1.1 远震接收函数上地壳浅层结构成像

接收函数是天然地震中较为常用的探测地球深部结构特别是界面信息的研究手段。远震接收函数富含台站下方的转换波和多次反射波信息，利用反褶积手段获取的接收函数可进一步反演得到台站下方的速度结构信息。该子模块使用时间域迭代反褶积方法来提取接收函数，进而利用远震接收函数在速度间断面近垂直入射的透射波、转换波和多次波信息来进行台站下方的速度结构成像。本模块的时间域反褶积的接收函数计算子程序是基于朱露培教授的程序模块（Zhu, 2000; Zhu and Kanamori, 2000）实现的，而远震接收函数反演计算子程序则是采用CPS程序包（Herrmann, 2013）的相应模块实现的。

2.1.1.2 背景噪声面波成像

背景噪声被越来越多的应用于浅地表结构研究，通过台站对间的互相关函数可提取出台站间面波的经验格林函数，进而提取出频散曲线对地下结构进行反演，能够较好的约束横波速度结构。该子模块使用相移法原理，可从面波背景噪声中

提取出宽频带的频散曲线，以实现对地下结构由浅至深的精细刻画。

2.1.1.3 接收函数和面波联合反演成像

面波资料对速度界面不敏感，对浅层结构速度具有良好的约束，接收函数在研究界面信息时表现出很好的效果，但对速度信息约束不足。因此，利用面波频散曲线对速度结构的良好约束和远震接收函数的速度界面敏感性，通过面波与接收函数联合反演可以对矿区的高速或者低速异常体进行高精度的地震成像。本模块的接收函数与面波频散联合反演计算子程序是采用 CPS 程序包 (Herrmann, 2013) 的相应模块实现的。

2.1.2 基于叠前地震资料的频率可控的长波长分量反演

基于主动源地震数据的全波形反演可有效建立地下介质的高精度速度模型，然而传统全波形反演存在对初始速度模型精度要求高这一理论问题。频率可控包络反演可有效反演长波长速度场，为全波形反演提供初始模型，为主动源地震成像提供偏移速度。本模块基于主动源地震数据，实现了基于地震数据频率可控包络的反演算法，最终实现对地下结构长波长压力速度场的刻画。

2.1.3 基于叠前地震资料的高分辨率地震成像

常规的地震数据偏移方法只是正演方法（反偏移算子）的共轭，而不是它的逆，通常会产生模糊化的成像结果，其成像精度难以满足深层金属矿勘探的精度要求。为了改善常规偏移方法的成像质量，将最小二乘反演思想引入常规偏移方法中，通过梯度导引类迭代算法更新成像结果，，最后得到高分辨率、高保幅度的成像结果。

2.1.4 保幅高分辨率及超分辨率地震反演

随着油气田勘探中勘探对象愈来愈复杂，人们对地震资料处理和解释提出更高的要求，如要求能更准确、精细地刻画地层的结构、岩性变化及流体性质等。要解决这些问题，地震资料必须有足够高的分辨率。高分辨率地震资料数据处理的关键环节是从反射地震数据中去除地震子波效应，得到地层反射系数。研究保地层结构的反射系数反演方法，对于精细地刻画地层的结构、反演高精度的声波阻抗，进而精细刻画地层岩性具有重要意义。

常规的提高地震资料纵向分辨率的方法，如：最小平方反褶积、预测反褶积、

变模反褶积、同态反褶积、最小熵反褶积、基于互信息率准则的盲反褶积以及谱白化等，其中稀疏脉冲反褶积是目前较为流行的方法之一，是本项目研究的重点。

反褶积理论首先由 Enders Robinson 提出，通常用于提高地震资料垂向分辨率。目前，石油勘探开发工作对反褶积结果的要求越来越高。基于线性维纳滤波的传统反褶积无法满足对薄层勘探的精度要求。由于地震数据的带限特性，传统的反褶积方法无法有效的提高地震分辨率。因此三十多年来，学者们致力于研究稀疏约束反褶积方法。1978 年，Wiggins 提出最小熵反褶积（MED），它是稀疏准则约束的第一次应用。最小熵反褶积搜索数量最少的强脉冲使得正演结果与地震观测记录保持一致。Gray 在 1979 年以反射系数具有稀疏性为假设条件，提出变量范数约束反褶积方法。Oldenburg 在 1981 年提出在反褶积中可以通过先验信息约束得到有实际意义的解。Sacchi 分别在 1997 年和 1999 年使用 Huber 分布、Cauchy 分布和 Sech 分布来恢复稀疏反射序列。Kaarsen 和 Taxt 在 1998 年将贝叶斯框架理论应用于反褶积中。Youzwishen 在 2001 年提出了改进的 Cauchy 准则，并将其作为先验信息约束条件应用于贝叶斯反演理论框架。2002 年，Canadas 提出了盲反褶积数学理论，反射系数序列满足的先验分布作为惩罚项加入反演目标函数。盲反褶积可以同时反演反射系数序列和地震子波。Meng 在 2005 年使用 Cauchy 准则作为约束项，并利用预条件共轭梯度法估计地震子波和稀疏反射系数序列^[10]。Zhang 在 2008 年利用改进的 Cauchy 分布进行盲反褶积，采用交替迭代的求解策略得到反射系数和混合相位子波。Danilo 在 2008 年指出稀疏脉冲反褶积本质上是从含噪记录中寻找一些脉冲，并确定它们的位置和振幅。快速模拟退火法被应用于寻找脉冲的位置，而脉冲的振幅值可以由线性最小二乘法确定。Liu 在 2009 年，将传统的稀疏脉冲反褶积结果作为迭代的初始模型，利用 Cauchy 分布稀疏约束得到了基于二阶统计的稀疏反射序列。2014 年，Wang 提出 Geman 范数约束的频率域反射系数反演方法，以 Geman 范数为约束条件，利用加权重迭代法在有效频带内进行频率域反射系数反演，得到了良好的效果。然而，当上述逐道处理方法应用于地层结构不规则的多维地震数据时，往往会出现横向连续性差，反褶积效果因为噪声干扰和子波估计有误差而大打折扣的现象。虽然学者们提出了一些方法来缓解这一问题 (Wang et al., 2006; Lu, 2009; Kazemi and Sacchi, 2014; Guitton and Claerbout, 2015; Nose-Filho, 2016; Yuan et al., 2016)，但是在面

对具有复杂结构和横向变化较大的地震数据时，上述方法仍然难以取得令人满意的效果。这也就导致基于这些数据递推反演得到的波阻抗效果不佳。

为此，本课题研制了一种新的快速的保地层结构的反射系数反演方法。当地震记录满足褶积模型且反射系数稀疏时，地震剖面矩阵可以看做是一个具有 Toeplitz 结构特性的地震子波褶积矩阵和一个稀疏的反射系数矩阵的乘积。基于此，我们提出了一种基于 Toeplitz 稀疏分解的保地层结构反射系数反演方法，通过交替迭代求解两个子反演问题，其一以 Toeplitz 子波矩阵元素为待反演的参数，其二以稀疏反射系数矩阵元素为待反演参数，将地震剖面同时分解为一个子波矩阵和一个反射系数矩阵。Fused Lasso 方法被用来求解 Toeplitz 子波矩阵中的元素，该方法既可保证模型系数的稀疏性（紧支集），又使得邻近系数间更加平滑，即保证子波具有紧支集且是光滑的。基于回溯的快速萎缩阈值迭代算法被用来反演 L1 范数约束下的稀疏反射系数矩阵，从而将 L1 约束项的参数选择问题，转化为反射系数稀疏度的估计问题，使得参数选择简便易行。此外，由于计算机内存的限制，前期课题中的算法需要对于较大的数据进行分块处理，且计算效率非常低（Wang et al., Geophysics, 2016）。本期课题主要对已有算法进行了改进，使得计算效率大大提高，有利于实际数据的反演。

2.1.5 矿体与围岩的边缘检测及矿体内部非均质性及物性变化的刻画

金属矿勘查经常使用的重、磁、电法在深部分辨率低，无法有效找矿。高分辨率地震波探测方法能够精细地刻画金属矿的控矿构造，追踪含矿层，甚至可直接发现深部矿体。因此，地震波探测技术将成为深部找矿的核心技术。为了更清楚的了解矿体的分布构造和空间展布，将通过相空间变换（谱分解）的方法实现对较小规模的矿体的空间展布进行刻画，对断裂、裂隙及矿体边界清晰成像刻画。

1) 三参数小波

针对薄互层地震信号含有快速变化的振幅和频率分量的特点，高静怀等（2006）提出了三参数小波。由于三参数小波具有三个参数，通过调节三个参数，可以灵活地调整其形状，将其应用于层序检测和高精度地震资料分辨中都取得了很好的效果。三参数小波的定义为：

$$\psi(t; \sigma, \tau, \beta) = e^{-\tau(t-\beta)^2} \{ p(\sigma, \tau, \beta) [\cos(\sigma t) - k(\sigma, \tau, \beta)] + iq(\sigma, \tau, \beta) \sin(\sigma t) \},$$

其中， τ 为能量衰减因子， β 为能量延迟时间， σ 为分析小波调制频率，可简写为：

$$\psi(t; \Lambda) = e^{-\tau(t-\beta)^2} \{ p(\Lambda) [\cos(\sigma t) - k(\Lambda)] + iq(\Lambda) \sin(\sigma t) \},$$

其中，

$$k(\Lambda) = e^{-\frac{\sigma^2}{4\tau}} \left[\cos(\beta\sigma) + i \frac{q(\Lambda)}{p(\Lambda)} \sin(\beta\sigma) \right],$$

$$p(\Lambda) = \left(\frac{2\tau}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \left[4(e^{-\frac{\sigma^2}{2\tau}} - e^{-\frac{3\sigma^2}{8\tau}}) \times \cos^2(\beta\sigma) + 1 - e^{-\frac{\sigma^2}{2\tau}} \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$q(\Lambda) = \left(\frac{2\tau}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \left[4(e^{-\frac{\sigma^2}{2\tau}} - e^{-\frac{3\sigma^2}{8\tau}}) \times \sin^2(\beta\sigma) + 1 - e^{-\frac{\sigma^2}{2\tau}} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

2) 计算重排准则（瞬时频率）

信号 $s(t)$ 关于三参数小波 $\psi(t; \Lambda)$ 的小波变换结果为：

$$W_s(a, b) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\omega) \bar{\psi}(a\omega; \Lambda) e^{i\omega b} d\omega$$

$$= \frac{A}{2\pi} [\bar{\psi}(a\omega_0; \Lambda) e^{i\omega_0 b} + \bar{\psi}(-a\omega_0; \Lambda) e^{-i\omega_0 b}]$$

上式可以简化为：

$$W_s(a, b) = \frac{A}{2\pi} \bar{\psi}(a\omega_0; \Lambda) e^{i\omega_0 b}$$

假如三参数小波 $\psi(t; \Lambda)$ 的峰值频率为 ξ_M ，则小波变换的结果将在尺度 $a = \frac{\xi_M}{\omega_0}$ 处取到最大值，并以这个能量最大的尺度为中心形成一个尺度带，造成能量的扩散，为了得到更集中的时频分布，首先参考 Daubechies 等在研究 EMD 时，提出信号 $s(t)$ 的重排准则（瞬时频率）定义为：

$$\omega_s(a, b) = \frac{\partial_b W_s(a, b)}{2\pi i W_s(a, b)},$$

其中， $W_s(a, b) \neq 0$ 。

参考文献

Herrmann R B. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research [J]. *Seismol. Res. Lett.*, 2013, 84: 1081-1088.

Zhu L. Crustal structure across the San Andreas Fault, southern California from teleseismic converted waves[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179: 183-190.

Zhu L, Kanamori H. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B2): 2969-2980.

2.2 镜像说明

2.2.1 基于被动源地震数据的成像

本镜像仓库名为 `igg_seismic_jointinv` 和 `ustc_erps`, 容量大小分别为 7.14GB 和 9.19GB, 分别实现了远震接收函数成像和接收函数-面波联合反演成像与背景噪声面波成像的功能。

`igg_seismic_jointinv` 镜像主要包含了 Anaconda 等集成环境, 常用的地震处理软件如 SAC、GMT 等, 程序语言主要为 Python、Fortran、C 以及少量 Bash 脚本。可执行程序主要存放于 /root/ 根目录下。程序均已实现了与界面分离并且可稳定运行, 输入参数主要由每个子程序文件夹下的参数文件 `parameters.conf` 进行控制和传递。

/root/calculate_rf 为基于时间域反褶积的接收函数计算子程序文件夹。

/root/inversion_rf 为远震接收函数反演子程序文件夹

/root/joint_iversion_rf 为接收函数与面波频散联合反演子程序文件夹

/root/EventTest 为远震事件地震波形数据（小规模测试数据集）

/root/dispTest 为面波频散数据（小规模测试数据集）

`ustc_erps` 镜像主要配置了 matlab 环境, 程序语言为 matlab 脚本。该方法的实现需要大量的人机交互, 在 docker 中配置了图形交互界面用来更方便、更准确的提取频散曲线进而获取研究区的横波速度结构。输入参数位于 matlab 脚本中, 不同处理流程之间的参数传递基于 matlab 的 mat 数据格式。

主要包括：

/home/cal_CFs/NoiseCorr 用来计算台阵内任意两台站组合原始地震记录的互相关函数

/home/ustc_erps/script_cal_disp 用来计算阵内相移法和阵外相移法频散能量

/home/ustc_erps/DispersionPick_V2 通过 GUI 交互用来提取阵内相移、阵外相移频散曲线

/home/ustc_erps/script_merge 融合阵内频散曲线和阵外频散曲线得到宽频带频散曲线

/home/ustc_erps/script_inversion 利用宽频带频散曲线反演得到横波速度结构

/home/ustc_erps/script_plot_result 对速度结构做地形校正并作图保存

2.2.2 基于叠前地震资料的频率可控的长波长分量反演

本镜像仓库名为 xjtu_work_2_gzq，大小为 2.91G，实现了 2.1.2 小节的叠前地震资料的频率可控的长波长速度建模。

FSEI_hardrock 镜像程序语言主要为 C 和 CUDA。可执行程序主要存放于 /opt/zqgao/FSEI_hardrock/bin 目录下。程序可稳定运行，输入参数主要由 /opt/zqgao/FSEI_hardrock/SourceFile 路径下的参数文件 fwi_pars.dat 进行控制和传递。

2.2.3 基于叠前地震资料的高分辨率地震成像

本镜像仓库名为 xjtu_lsrtm，容量大小为 6.85GB，主要实现了基于叠前地震资料的最小二乘逆时偏移的功能。xjtu_lsrtm 镜像主要包含了 MPICH2 编译环境，常用的地震处理软件如 SEISMIC UNIX 等，程序语言主要为 Fortran、C。可执行程序主要存放于 /home/lc/xjtu/data/hardrock_lsrtm/test_plsrtm/ 目录下，通过批处理文件 run_lsrtm.sh 执行。输入参数主要由参数文件 coord.par 和 parfile 进行控制和传递。

2.2.4 保幅高分辨率及超分辨率地震反演

本镜像仓库名为 ITSMF_package_ver5.3，实现了 3.1 小节中的改进的交替迭

代盲反褶积。ITSMF_package_ver5.3 镜像主要包含了 C++ 矩阵运算库 Eigen、C++ 快速傅里叶变换库 fftw，程序语言为 C++。可执行程序主要存放于 /root/ 根目录下。程序均已实现了与界面分离并且可稳定运行，输入参数由 /root/ITSMF_package_ver5.3/ITSMF_ver5.3/input 中的参数文本进行控制和传递。

/root/ITSMF_package_ver5.3/eigen-3.2.5 为 C++ 矩阵运算库 Eigen 文件夹。

/root/ITSMF_package_ver5.3/fftw3 为 C++ 快速傅里叶变换库 fftw 文件夹。

/root/ITSMF_package_ver5.3/ITSMF_ver5.3/cpp 为软件 cpp 文件夹。

/root/ITSMF_package_ver5.3/ITSMF_ver5.3/input 为软件输入参数文件夹。

/root/ITSMF_package_ver5.3/ITSMF_ver5.3/result 为软件输出结果文件夹。

/root/ITSMF_package_ver5.3/ITSMF_ver5.3/run 为软件编译后可运行程序文件夹。

/root/ITSMF_package_ver5.3/ITSMF_ver5.3/tmp_whx_lib 为软件头文件文件夹。

2.2.5 矿体与围岩的边缘检测及矿体内部非均质性及物性变化的刻画

- 1) 本程序放置 */opt/work/STTA
- 2) 进入到 */opt/work/STTA 文件下，执行 STTA 即可

2.3 软件的使用说明

2.3.1 输入说明（必要包括参数，网格）

2.3.1.1 基于被动源地震数据的成像子模块

（1）时间域反褶积的接收函数计算子程序输入说明

此子模块要求输入远震波形数据以及其他相关参数：

远震波形数据为 SAC 格式的数据。要求以地震事件为单位存放于输入文件夹内。同一地震事件的 SAC 格式数据存放于命名格式为“YYYYMMDDHHMM”的事件文件夹内。例如 2019 年 9 月 16 日 12 时 48 分的地震事件，则存放于“201909161248”(不 包 含 引 号) 事 件 文 件 夹 内 。 以“TIME.STATION_NAME.ARRAY.COMPONENT”命名的 SAC 格式数据存放于事件文件夹内，其中 TIME 为地震发生时刻，STATION_NAME 为台站名，ARRAY 为测线名或台网名，COMPONENT 为分量名。例如，2019 年 9 月 16 日 12 时 48 分发生的远震事件，记录台站名为 430L200，测线为 200，记录分量为东西分量的地震事件波形数据命名为“201909161248.430L200.200.BHE”。事件波形文件要求填写好台站经纬度和高程 (STLA STLO STEL) 信息与地震事件的震中经纬度和震源深度 (EVLA EVLO EVDP) 信息。具体实例可参照/root/EventTest 文件夹中的实际数据。

其他相关参数主要放置于 parameters.conf 文件中，由主程序读取和解析。
parameters.conf 文件中内含参数说明如下：

parameters.conf

[getRawEvent]

input_dir = /root/EventTest SAC 格式事件波形数据文件夹路径
(default value: /root/EventTest)

output_dir = 完成筛选后的 SAC 格式事件波形数据文件夹路径
(default value: /root/EventRaw)

time_before_earthquake = 截取理论到时前多少秒的数据(default value: -50)
-50

time_after_earthquake = 截取理论到时后多少秒的数据 (default value:
+100) +100

gcarc_min = 28 筛选要求的最小震中距，单位为度 (default value:
28)

gcarc_max = 92 筛选要求的最大震中距，单位为度(default value:
92)

resample_dt = 0.05	重新采样后的时间间隔 (default value: 0.05 秒)
filter_lowfreq = 0.05	带通滤波频带左端截止频率 (default value: 0.05)
filter_highfreq = 1.5	带通滤波频带右端截止频率 (default value: 1.5)
[calculateRFZhu]	
input_dir = /root/EventRaw	进行筛选后的 SAC 格式台站波形数据文件夹路径 (default value: /root/EventRaw)
output_dir = /root/EventRF	接收函数结果的输出文件夹路径 (default value: /root/EventRF)
gauss = 3	高斯滤波参数 (default value: 3)
iter_max = 100	迭代反褶积的最大迭代次数 (default value: 100)
time_start = -10	接收函数结果的起始时刻 (default value: -10 秒)
time_end = 30	接收函数结果的结束时刻 (default value: 30 秒)

(2) 远震接收函数反演计算子程序输入说明

此子模块要求输入接收函数、初始速度模型以及其他相关参数：

接收函数为时间域反褶积的接收函数计算子程序的输出。

初始速度模型为文本文件，不含表头。文本文件从左至右的 6 列分别为：层厚（单位：km）、P 波速度（单位：km/s）、S 波速度（单位：km/s）、密度（单位： g/cm^3 ）、P 波衰减因子、S 波衰减因子。最后一行给出的最深一层为无限半空间，厚度设置为 0。具体实例可见 /root/inversion_rf/rftnModel

其他相关参数主要放置于 parameters.conf 文件中，由主程序读取和解析。

parameters.conf 文件中内含参数说明如下：

parameters.conf

[getRawEvent]	
input_dir = /root/EventRF	存放接收函数文件夹的路径 (default value: /root/EventRF)
gauss = 3	反演时的高斯滤波系数 (default value: 3)

[invertRFcps]	
output_dir = /root/EventInvRF	反演结果的输出文件夹路径 (default value: /root/EventInvRF)
vel_file=	反演初始模型的速度文件路径(default value: /root/inversion_rf/rftnModel)
isFlat = 0	速度模型是否考虑地球曲率, 0 为否, 1 为是 (default value: 0)
TMin = -2.5	参与反演的接收函数起始时刻 (default value: -2.5 秒)
TMax = 3	参与反演的接收函数结束时刻 (default value: 3 秒)
[figOutput]	
output_dir = /root/InvRFFig	反演结果图件的输出文件夹路径 (default value: /root/InvRFFig)

(3) 背景噪声互相关计算子程序输入说明

此模块要求输入台阵坐标文件、仪器响应文件、地震原始记录及计算相关参数。

密集台阵坐标文件为文本文件，第一列为台站名，第二列为台站纬度坐标，第三列为台站经度坐标，第四列为台站高程（m）。

仪器响应文件为 resp 文本文件。

地震原始记录为 SAC 文件，单个台站为一个文件。

相关参数包括：

变量名	参数意义
data_type	仪器类型: 1.一种仪器 2.两种仪器
StaFile	台阵坐标文件
respfile	仪器响应文件
outCFdir	互相关输出目录
datadir1	第一种数据所在目录

datadir2	第二种数据所在目录，若一种仪器 datadir2=datadir1
PeriodBand	分频带滤波
IndexRmResp	去除仪器响应： 0.不去 1.using polar and zeros 2.read freq-amp-phase file
IndexWhiteSpec	谱白化： 1.做 2.不做
indexCorrMethod	时域归一化方式： 1.one bit 2.temporal normalization
fsOrig	数据原始采样率(Hz)
fsNew	重采样后新的采样率(hz)
MaxLagTime	互相关函数最大时间(s)
Seghour	预处理时间长度及计算 (h)
cut_number	数据文件切割数
day_range	数据完整天数序列（指一天中的第几天）
cmp	'Z'计算 Z 分量, 'N'计算 N 分量, 'E' 计算 E 分量
IndexParfor	1.并行计算, otherwise.不并行
n_parpool	并行核心数

(4) 背景噪声面波频散能量计算子程序输入说明

此子模块要求输入密集台阵坐标文件、台站记录两两计算互相关函数的结果及脚本 script_cal_disper 中相关参数。

密集台阵坐标文件是与互相关计算子程序相同的文本文件。

台站互相关结果为互相关计算子程序的输出文本文件。

相关参数包括：

变量名	参数意义
sta_list	台阵坐标文件
CFs_dir	互相关文件所在目录

output_dir	频散能量文件输出目录
is_internal	1.阵内相移 0.阵外相移
beam_half_aper	划分次级线阵的 1/2 孔径
dt	互相关函数时间采样间隔
fmn	频散能量计算最小频率
fmx	频散能量计算最大频率
df0	频散能量计算频率采样间隔
vmn	频散能量计算最小相速度
vmx	频散能量计算最大相速度
dv	频散能量计算相速度间隔

(5) 背景噪声面波频散提取子程序输入说明

此子模块要求输入频散能量、GUI 提取界面 (DispersioPick_V2) 的相关提取参数。

频散能量为频散能量计算子程序的输出文件，格式为 mat 文件。

其他相关参数从 GUI 界面窗口中输入，包括：

变量名	参数意义
Open Folder 按钮	选择频散能量所在目录
列表框	选择将要提取的频散能量
smooth	平滑参数
Pick ext.	提取频散时随鼠标联动点数
fmin	提取频散最低频率
fmax	提取频散最高频率
Win size	暂时无用
Tout_min	频散曲线最短周期
dTout	频散曲线周期采样间隔
Tout_max	频散曲线最长周期
Mode	Extract 提取频散曲线, QC 检查已提频散曲线。

Calculate 按钮	计算频散曲线
单支性	提取时： A->B 选择正支频散能量， B->A 选择负支， SYM 选择对称叠加。
Load Pre.	加载上一条已提频散曲线
Load Next	加载下一条已提频散曲线
Load	加载已提频散曲线
Clear	清屏
Save	保存频散曲线
鼠标左键拖动	修正频散曲线

(6) 面波频散曲线融合子程序输入说明

此子程序要求输入台站坐标文件、频散曲线及脚本 script_merge 相关参数。

台站坐标文件为与互相关计算子程序相同的文本文件。

频散曲线为频散提取子程序的输出文件，格式为 mat 文件。

相关参数控制阵内、阵外频散曲线融合，包括：

变量名	参数意义
sta_file	台站坐标文件
disp_dir_shallow	阵内相移频散曲线所在目录
disp_dir_deep	阵外相移频散曲线所在目录
output_dir	输出文件目录
disp_exist	第 1、2 个元素分别表征阵内、外频散 曲线是否使用。0 不使用，1 使用。
group_ids	台站编号序列(1,2,...)
merge_period	频散曲线融合中心周期点
dt_merge	融合后频散曲线周期采样间隔
merge_taper	频散曲线融合的频带 taper (in Hz)
tmin	频散曲线截断最小周期
tmax	频散曲线截断最大周期

(7) 面波频散曲线反演子程序输入说明

此子程序要求输入宽频带频散曲线及脚本 script_inversion 相关反演参数。

宽频带频散曲线为频散曲线融合子程序的输出文件，为 mat 格式文件。

相关反演参数包括：

变量名	参数意义
disp_merge_dir	频散文件存放目录
model_result_dir	速度模型输出目录
iter_no	反演迭代次数
vsmin	横波速度下限 (km/s)
vsmax	横波速度上限 (km/s)
res_bound	
damp	垂向阻尼
damp_h	横向阻尼
lambda2L	波长与敏感深度经验转化系数
beta	相速度与横波速度经验比值系数
layer_thickness	速度模型层厚序列
iwave	1.Love wave 2.Rayleigh wave
mode	1.fundamental 2.first higher mode ...
igr	0.相速度反演 1.群速度反演

(8) 面波反演结果绘制速度模型子程序输入说明

此子程序要求输入速度模型文件及脚本 script_plot_result 作图相关参数。

速度模型文件为反演子程序的输出文件，为 mat 格式文件。

相关作图参数包括速度模型所在目录、c_range 为 colormap 颜色范围，该程序为脚本而非函数文件，可根据自身需求进行灵活修改。

(9) 接收函数与面波频散联合反演计算子程序输入说明

此子模块要求输入接收函数、初始速度模型、面波频散曲线以及其他相关参数：

接收函数为时间域反褶积的接收函数计算子程序的输出结果。

初始速度模型为文本文件，不含表头。文本文件从左至右的 6 列分别为：层

厚（单位：km）、P 波速度（单位：km/s）、S 波速度（单位：km/s）、密度（单位： g/cm^3 ）、P 波衰减因子、S 波衰减因子。最后一行给出的最深一层为无限半空间，厚度设置为 0。具体实例可见/root/joint_inversion_rf/rftnModel

面波频散曲线要求以台站为单位，存放在频散曲线输入文件夹内，文件储存形式为 ASCII 文本文件，文件名为台站名。不含表头的频散曲线输入文件，从左至右的 9 列分别为：SURF96、频散种类（瑞利波为 R，勒夫波为 L）、速度种类（群速度为 U，相速度为 G）、标志位（观测数据为 X，理论计算数据为 T）、阶数（基阶为 0，一阶为 1）、周期（单位:s）、速度观测值（单位:km/s）、观测误差。

其他相关参数主要放置于 parameters.conf 文件中，由主程序读取和解析。
parameters.conf 文件中内含参数说明如下：

parameters.conf

[preData]

input_dir = /root/EventRF 存放接收函数文件夹的路径
(default value: /root/EventRF)

input_disp_dir = /root/dispTest 存放频散曲线文件夹的路径
(default value: /root/dispTest)

output_dir = /root/JointInv 联合反演结果输出文件夹
(default value: /root/JointInv)

[jointInv]

LovePhase_mode_num = 0 勒夫波相速度模式的个数(default value: 0)

LoveGroup_mode_num = 0 勒夫波群速度模式的个数(default value: 0)

RaylPhase_mode_num = 1 瑞利波相速度模式的个数(default value: 1)

RaylGroup_mode_num = 0 瑞利波群速度模式的个数(default value: 0)

vel_file= 反演初始模型的速度文件路径(default value:

/root/inversion_rf/rftnModel)

isFlat = 0 速度模型是否考虑地球曲率，0 为否，1 为是
(default value: 0)

TMin = -2.5 参与反演的接收函数最小时刻 (default

value: -2.5 秒)
 TMax = 3 参与反演的接收函数最大时刻(default value:
 3 秒)
 weight = 0.5 接收函数与面波频散联合反演的权重, 0 为
 只用接收函数反演, 1 为只用面波频散反演
 (default value: 0.5)
 [figOutput]
 output_dir = /root/JointInvFig 反演结果图件的输出文件夹路径
 (default value: /root/JointInvFig)

2.3.1.2 基于叠前地震资料的频率可控的长波长分量反演

1、模块输入:

模块输入参数文件位于 /opt/zqgao/FSEI_hardrock/SourceFile/fwipars.dat, 如下图所示。

```
*****parameters for FWI*****
dt:          0.0006
dx:          10
dz:          10
f0:          6
Nt:          4000
Nx:          750
Nz:          350
PML:         50
ShotN:       75
IterN:       40
TrueVp:      /opt/zqgao/FSEI_hardrock/Data/Input/vp1_20m_pml50.sgy
InitVp:      /opt/zqgao/FSEI_hardrock/Data/Input/vp1_20m_pml50_init_v3.sgy
Besta:       /opt/zqgao/FSEI_hardrock/Data/Input/a_n_dt=0.0006_Nt=4000_2_8_cut0.sgy
Wavelet:     Null
Uobs:        Null
DAS:         Null
*****end of parameters*****
Author: zhaoli gao
```

各个参数详细说明如下:

参数	说明
dt	时间采样间隔(s)
dx	横向空间采样间隔(m)
dz	纵向空间采样间隔(m)
f0	Ricker 子波主频
Nt	有限差分正演模拟总的时间步数
Nx	横向网格点数
Nz	纵向网格点数
PML	吸收边界宽度
ShotN	总共设置的炮点个数 (炮在横向均匀布设)

IterN	反演迭代次数
TrueVp	真实速度模型文件 (Sgy)
InitVp	初始速度模型文件 (Sgy)
Besta	频率可控包络反演中控制频率的参数文件
Wavelet	若不使用 Ricker 子波, 则应该提供子波文件
Uobs	若不是做模型而是实际资料, 则应该提供地震观测数据文件
DAs	如若需要去除直达波, 则应提供直达波到达时

由于目前我们进行的是模型测试，所以 Wavelet, Uobs 和 Das 不用提供，写成 NULL 即可。

2、模块编译和运行：

a) 编译：

在 /opt/zqgao/FSEI_hardrock/SourceFile 路径下，执行 make 即可。

b) 运行：

编译后，进入 /opt/zqgao/FSEI_hardrock/bin 路径下，执行 ./FWIFSEI_run 即可。

运行后的反演结果存储在 /opt/zqgao/FSEI_hardrock/Data/Output/InvertedVp.sgy 中。注意：InvertedVp.sgy 文件中的数值为速度的平方，尺寸为：(Nz + 2 * PML) * (Nx + 2 * PML)，即：输出模型包含 PML。

2.3.1.3 基于叠前地震资料的高分辨率地震成像

(1) 最小二乘逆时偏移

该模块的输入包括参数文件及参数文件列出的速度场等文件。参数文件包括两个，即“coord.par”和“parfile”。前者为生成观测系统的参数文件，后者为地震成像的参数文件。

“coord.par”文件截图如下所示，参数列表自上而下分别为炮点个数、检波点个数、炮点间隔和检波点间隔。

文件(E) 编辑(E) 查看(V) 搜索(S) 终端(T) 帮助(H)
375
750
10
5
~
~
~
~
~
~
~
~

“parfile”文件如下图所示。

文件(F) 编辑(E) 查看(V) 搜索(S) 终端(T) 帮助(H)

VEL_IN=./Model/smooth.dat
REFL_IN=./Model/ref.dat
COORD_FILE=./coord.dat
CSG_OUT=CSG/csg_
NX=750
NZ=350
NPML=30
DX=5.0
DT=0.0004
NT=4001
FREQUENCY=40.0
VMIN=2000
IMAGE_CONDITION=2
SIMULATE=2
PRECONDITION=0
NIT=40
PNUM=30
AMIN=-0.3
AMAX=0.2

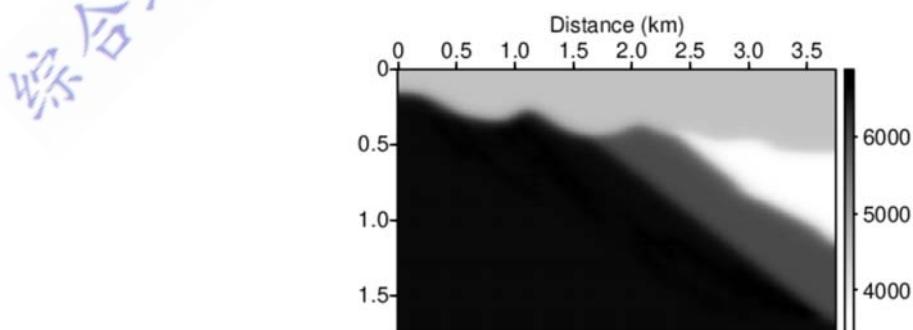
“parfile”参数列表说明如下：

参数	说明
VEL_IN	速度模型（二进制文件）
REFL_IN	反射系数模型（二进制文件）
COORD_FILE	观测系统文件（coord.o 生成）
NX	横向网格点数

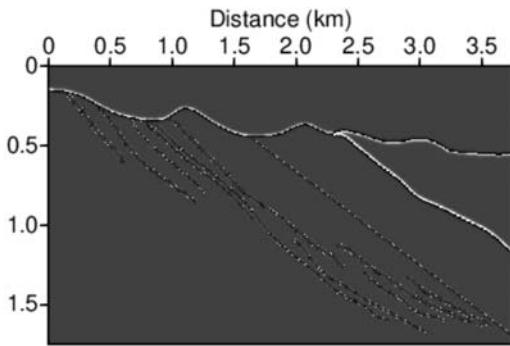
NZ	纵向网格点数
NPML	边界厚度
DX	网格间距
DT	时间采样间隔
NT	时间采样点数
FREQUENCY	子波主频
VMIN	近地表速度
IMAGE_CONDITION	成像条件 (填 2)
SIMULATE	填 0 时, 需要提供观测数据合成的平面波道集, 此时速度文件为偏移速度; 填 1 时, 程序通过有限差分正演模拟得到地震数据并进行成像, 此时速度文件为真实速度; 填 2 时, 程序通过反偏移模拟得到地震数据并进行成像, 此时速度文件为偏移速度。
PRECONDITION	预条件标志, 一般填 0
NIT	迭代次数
PNUM	平面波道集的数量
AMIN	平面波震源的射线参数最小值
AMAX	平面波震源的射线参数最大值

以下为 SIMULATE 为 2 时 (即程序自己通过反偏移模拟观测地震数据, 然后成像) 的输入展示。

输入的偏移速度场:



输入的反射系数模型 (当 SIMULATE=2 时需要提供):



(2) 三维弹性波逆时偏移

此子模块要求输入三维速度模型、观测数据(可选)以及其他相关道头参数。

输出结果为三维声波单炮逆时偏移成像结果和观测数据。

三维速度模型为二进制文件(bin), 单位以 m/s, 存放于 3D-velocity 文件内, 以 3D-vp-301-101-101-new.bin 为例, 代表水平方向(x) 网格点数 nx=301, 代表水平方向(y) 网格点数 ny=101, 代表垂直方向(z) 网格点数 nz=101。

观测数据存放于 shotgather 文件夹内, 二进制文件(bin), 文件名为 obs_tp_shot_sx_sy, 其中 sx 和 sy 为地表震源坐标(m 为单位)。

其他相关参数主要放置于 parameters.sh 文件中, 由主程序读取和解析。 parameters.sh 文件中内含参数说明如下:

parameters.sh

[preData]

vp_path	存放速度模型文件夹的路径(default value: ./3D-velocity/3D-vp-301-101-101-new. bin)
----------------	---

den_path	存放炮数据文件夹的路径(default value: /shotgather/obs), 默认观测数据的文件抬头为 obs
-----------------	---

input_shot_name	3D 声波逆时偏移成像结果输出文件夹 (default value: ./3DRTM-result/)
------------------------	--

build_output_all.txt	程序运行的日志文件
-----------------------------	-----------

log.txt

3D RTM migration parameter

GPU_start = 0	GPU 卡开始号(default value: 0)
GPU_N = 1	程序运行的 GPU 卡数目(default value: 1)
angle_image_bool = 0	是否输出成像角度信息 (default value: 0)
join_shot = 0	观测数据速度模型正演生成(default value: 0), 当设置不等于 1 时, 需要提供观测数据
join_vp = 1	由 vp_path 文件名读入速度模型(default value: 1)
join_den = 0	由纵波速度模型计算密度(default value: 0)
nx,ny,nz	速度模型沿 x.y.z 方向的网格点数
dx,dy,dz	速度模型沿 x.y.z 方向的网格大小 (m)
dt	时间采样间隔 (ms)
lt	时间方向采样点数目
freq	震源子波主频
cut_direct_wave=200	切除直达波采样点数(default value: 200)
shot_num_x,shot_num_y,shot_num_z	x.y.z 方向的震源数目
shot_start_x,shot_start_y,shot_start_z,	第 1 个震源 x.y.z 方向的空间网格位置
shot_interval_x,shot_interval_y, shot_interval_z,	震源沿 x.y.z 方向的空间网格间隔
receiver_num_x,receiver_num_y, receiver_num_z,	沿 x.y.z 方向的检波器数目
receiver_start_x,	
receiver_start_y,receiver_start_z,	第 1 个检波器 x.y.z 方向的网格位置
receiver_interval_x, receiver_interval_y, receiver_interval_z,	检波器 x.y.z 方向的空间网格间隔
boundary_up, boundary_down, boundary_left, boundary_right, boundary_front, boundary_back,	上下, 左右, 前后 PML 吸收边界厚度

coe_attenuation=200	PML 吸收边界衰减参数(default value: 200)
smooth_time_vp=5	偏移速度模型高斯平滑窗口大小;(default
smooth_time_den=5	value: 5)
[figOutput]	
output_dir = ./3DRTM-f	观测数据和成像结果图件的输出文件夹路 径(default value: ./3DRTM-f)

2.3.1.4 保幅高分辨率及超分辨率地震反演

- "t_segment_num"是时间方向均匀分段的数量，平稳地震录取 1，非平稳地震记录可根据局部频谱分析取
- "init_w_trace_ratio"是用来给出较精确初始子波的地震道比率，在[0,1]之间取值，一般取 0.1 左右
- "Kw_w_period_ratio"是子波支撑长度与子波主周期的比，一般取 3 左右
- "lambda2"是子波光滑性参数，一般无噪模型取 0，含噪模型取 0.02 或 0.03 左右(噪声越大 lambda2 越大，同时可根据反演得到的子波的光滑程度适当调节)
- "use_fixed_r_sparsity"是决定是否固定非零反射系数个数的布尔变量，1 表示 true，0 表示 false
- "top_Kr_envelop_peaks_ratio"是均匀分段后，最上段固定非零反射系数个数与地震记录包络峰值个数之比，一般取 4 左右；"bottom_Kr_envelop_peaks_ratio"是相应最下段的参数
- "use_relative_r_sparsity"是决定是否固定最小非零反射系数幅度与最大反射系数幅度之比的布尔变量，1 表示 true, 0 表示 false, 注意"use_fixed_r_sparsity"和"use_relative_r_sparsity"必须选且只选一个
- "top_valid_amp_ratio"是均匀分段后，最上段"最小非零反射系数幅度"与"最大反射系数幅度"之比，一般无噪取 0.005 左右，有噪取 0.01 左右(噪声越大 valid_amp_ratio 越大，同时可根据反演得到的反射系数的稀疏性适当调节)；"bottom_valid_amp_ratio"是相应最下段的参数

- "gen_stationary_S"是决定是否根据得到的反射系数，褶积地震记录主频的零相位 Ricker 子波，并输出平稳化地震记录的布尔变量，1 表示 true，0 表示 false

"thread_num"是用于 openmp 多线程的线程数，应根据所用电脑的最大可用线程数决定(若大于最大可用线程数则自动选为最大可用线程数)

2.3.1.5 矿体与围岩的边缘检测及矿体内部非均质性及物性变化的刻画

输入的数据为 SEGY 的标准 IBM 格式或者微机格式，程序执行前需要的需要输数据的文件名和计算结果输出数据的文件，输入需要计算的参数。

以下参数可以根据不同的数据资料选择合适的参数

Sigma 小波的调制频率

Tau 控制衰减快慢

Beta 控制相位

F 输出数据的频率

2.3.2 输出说明（必要包括数据结果结构说明）

2.3.2.1 基于被动源地震数据的成像子模块

(1) 时间域反褶积的接收函数计算子程序输出说明

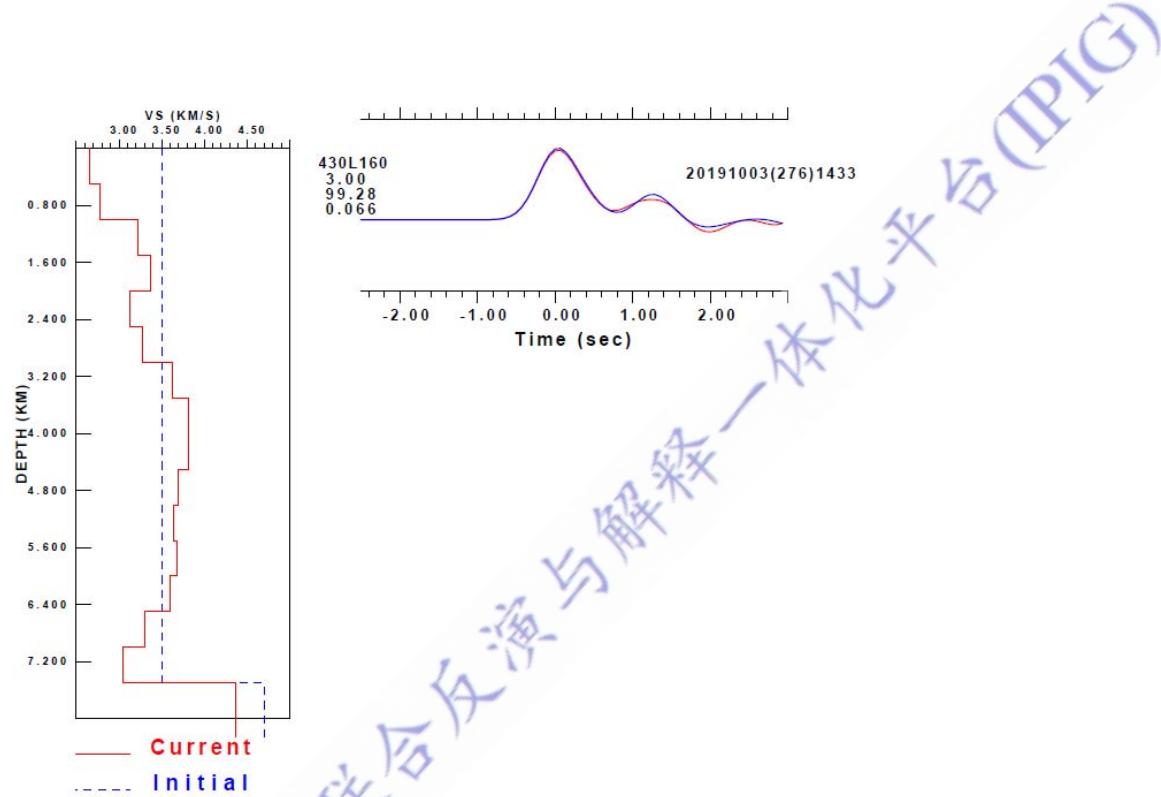
该子程序成功运行后，将生成 /root/EventRF 和/root/EventRaw 文件夹。其中，/root/EventRaw 文件夹内是符合筛选要求的地震波形数据，/root/EventRF 文件夹内是以台站名汇总存放的接收函数，子文件夹名为台站名。接收函数命名规则为：“发震时刻.台站名.台阵名.分量”，其中 eqr 为径向分量，eqt 为切向分量。例如，对 2019 年 10 月 3 日 14 时 33 分的远震事件，测线号为 160 的 430L160 台站提取的径向接收函数名称为“201910031433.430L160.160.eqr”(不包含引号)

(2) 远震接收函数反演计算子程序输出说明

该子程序运行成功后，将生成 /root/EventInvRF 和/root/InvRFFig 文件夹。其中/root/EventInvRF 存放的是反演结果，以台站来汇总存放，文件名为台站名。

速度模型的命名规则为“台站名.model”，例如，430L160 台站的速度反演结果文件为“430L160.model”(不包含引号)，从第 12 行起为反演结果，第 12 行为表头。

/root/InvRFFig 文件夹内存放的是 eps 格式的图件。命名规则为：“台站名.类型.eps”，其中，类型为 inversion 的是反演结果图件。如下图所示，图件左侧展示的是初始模型和反演的速度模型，右侧为接收函数的反演结果。



(3) 背景噪声互相关计算子程序输出说明

程序成功运行后，会在输出目录\$outCFdir 输出互相关函数文件，包括所有的台站对组合，命名方式为”第 1 个台站名”.”第 2 个台站名”.dat (不包含引号)，文件内第一行是台站 1 的经纬度，第 2 行是台站 2 的经纬度，以下第一列为时间采样点 (s)，第二列为互相关的正支，第三列为互相关的负支。

(4) 背景噪声面波频散能量计算子程序输出说明

程序成功运行后，会在目标输出目录\$output_dir 下生成大量频散文件，保存利用相移法计算得到的频散能量相关信息，文件命名方式为”pshift_group_{\$台站编号}.mat”(不包含引号)，均为 mat 数据类型，台站编号按照台站坐标文件中各个

台站的顺序从 1 开始编号，与其行号相同。

(5) 背景噪声面波频散提取子程序输出说明

程序成功运行并进行频散曲线人工提取后，会在频散文件目录\$Open Folder下新建子目录 \$Open Folder/dispersions/，其中包含三类文本文件：picked_dispersion.plist、pshift_group_台站编号_dispersion.dat 和 pshift_group_台站编号.disper，台站编号与频散能量计算子程序含义相同，表示在台阵坐标文件中出现的顺序。picked_dispersion.plist 中只有一列数字，表示对应行是否进行了频散曲线提取，0 表示未提取，1 表示已提取。pshift_group_台站编号_dispersion.dat 保存了频散提取时设定的相关参数，最下方的两列数据中第一列表示提取的频率点，第二列表示该频率下对应的相速度。pshift_group_台站编号.disper 中包括两行数据，第一行表示频散曲线提取的周期点，第二列表示该周期下谐波对应的相速度，“NaN”（不包含引号）表示该周期点下的相速度未进行提取。三类文件中 pshift_group_台站编号.disper 最重要，是用以反演的基础。

(6) 面波频散曲线融合子程序输出说明

程序成功运行后，会在输出目录\$output_dir 下输出宽频带频散曲线文件，文件名为”merged_disper.mat”（不包含引号），为 mat 数据格式，保存着融合后的频散曲线，为下一步反演提供数据。

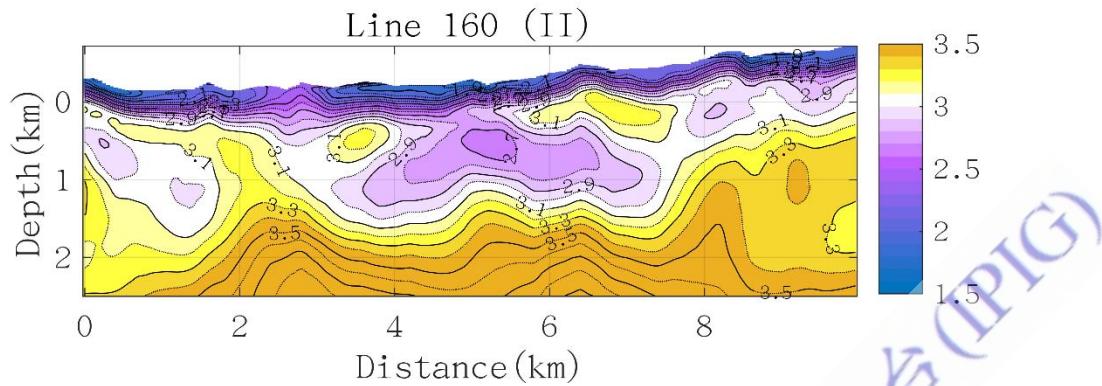
(7) 面波频散曲线反演子程序输出说明

反演程序成功运行后，模型输出目录\$model_result_dir 下输出反演得到的横波速度模型，文件名为”joint_inv.mat”（不包含引号），为 mat 数据格式。

(8) 面波反演绘制速度模型子程序输出说明

脚本成功运行后，会在模型所在目录\$model_dir 下生成一张 png 格式图片，文件名为”result.png”（不包含引号）。横轴为水平距离变化（km），起点为台阵坐标文件中的第一个台站，终点为最后一个台站，纵轴为深度(km)，参考面为大

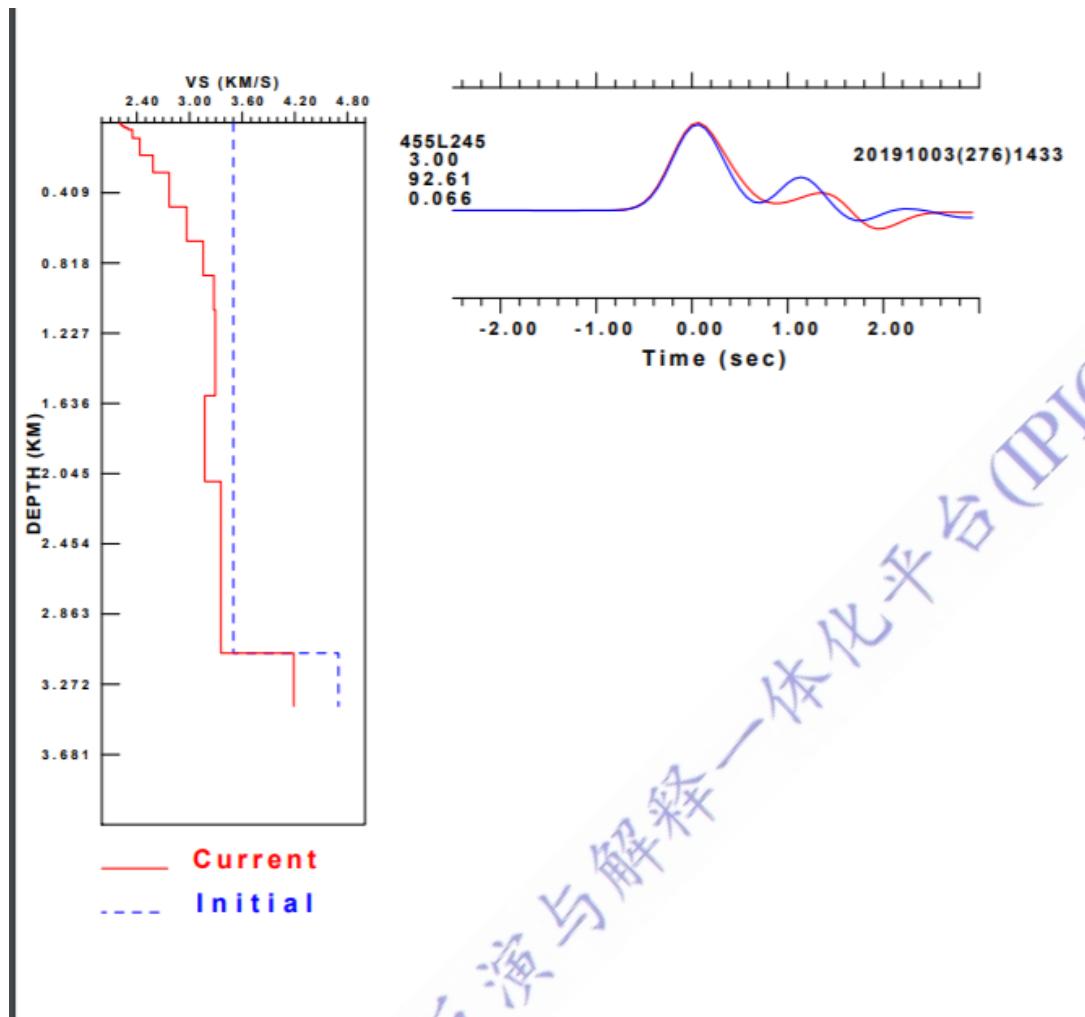
地水准面，绘图时根据台阵坐标文件的高程信息加入了地表起伏修正，如下图为示例中的成像结果：



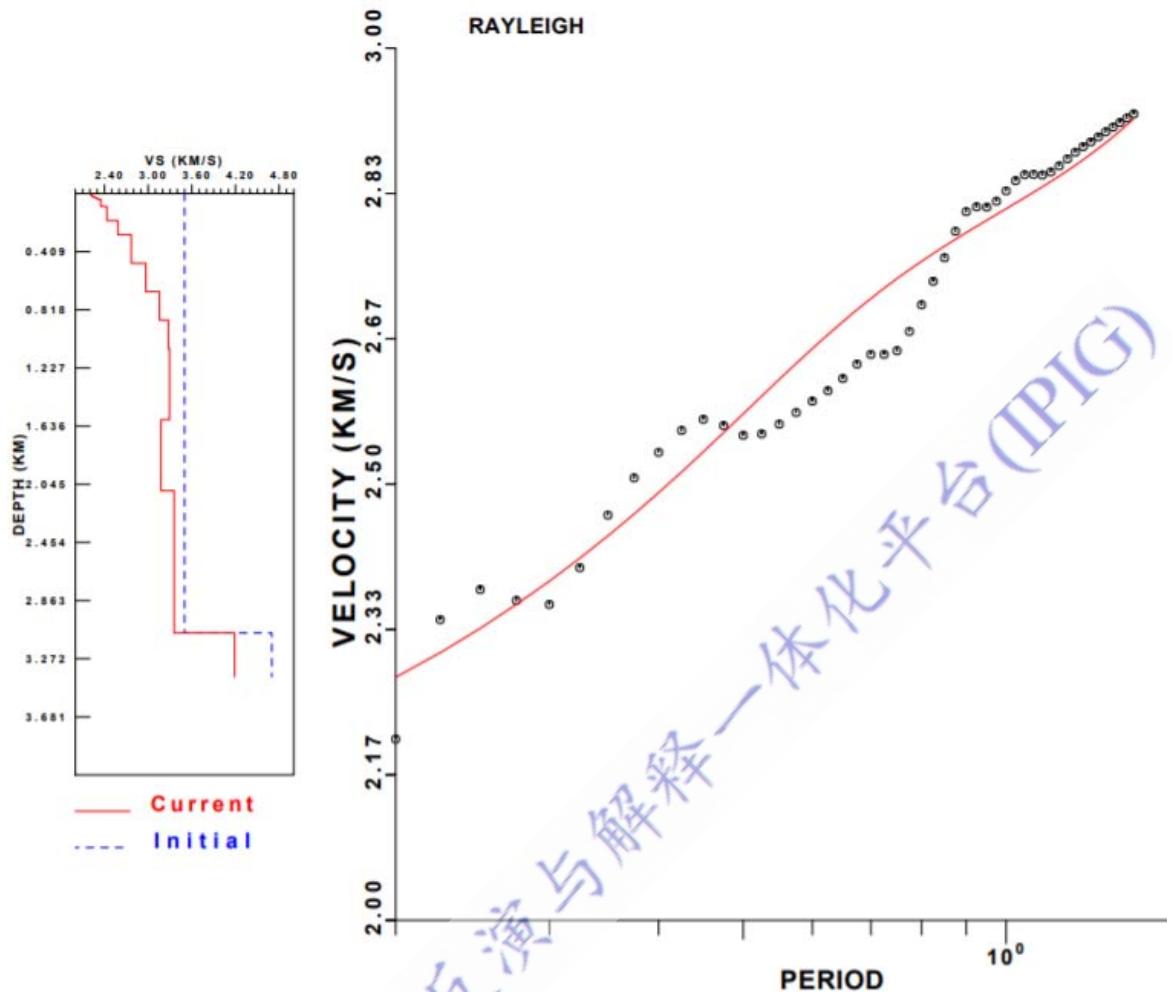
(9) 接收函数与面波频散联合反演计算子程序输出说明

该子程序运行成功后，将生成 /root/JointInv 和 /root/JointInvFig 文件夹。其中 /root/JointInv 是反演结果，以台站来汇总存放，文件名为台站名。反演结果存放在“model.out”文件中（不包含引号）从第 12 行起为反演结果，第 12 行为表头。

/root/JointInvFig 文件夹内存放的是反演结果图件。命名规则为：“台站名.类型.eps”(不包括引号)，其中类型为 rftn 的是接收函数拟合结果，类型为 surf96 的则为面波频散拟合结果。

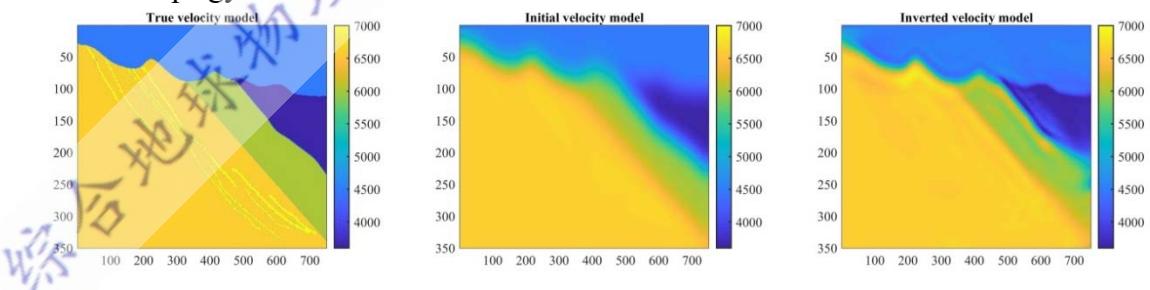


综合地球物理联合反演与解算—一体化平台(IPIG)



2.3.2.2 基于叠前地震资料的频率可控的长波长分量反演

程序运行成功后，反演结果存储在 /opt/zqgao/FSEI_hardrock/Data/Output/ InvertedVp.sgy，数值实验结果如下：



2.3.2.3 基于叠前地震资料的高分辨率地震成像

(1) 最小二乘逆时偏移

程序运行成功后，将输出以下文件：

程序生成的地震数据为：PCSG_*.bin，其中*为炮号，文件大小为 NT*NX；

程序输出的叠加成像结果为：mig_stk*.bin，其中*为迭代次数，文件大小为

NZ*NX;

该方法为平面波扩展域最小二乘偏移，程序也会输出各个平面波道集的叠前成像结果：mig*.bin，其中*为迭代次数，文件大小为 NZ*NX*PNUM；

输出的日志文件为：process_lsrtm2d.log。

(2) 三维弹性波逆时偏移

该子程序成功运行后，将生成 /root/3DRTM-result，/root/shotgather，/root/someoutput 文件夹，log.txt 和 build_output_all.txt。

其中，/root/3DRTM-result 文件夹内是三维逆时偏移成像结果，为二进制文件，后缀以震源位于空间网格点数目命名。以 vresult-tp-50-150 为例，表示震源位于网格点 150,50 处的三维逆时偏移成像结果。

/root/shotgather 文件夹内是观测地震数据，为二进制文件，文件后缀以震源位于空间的坐标命名。以 obs_tp_shot_500_1500 为例，表示震源位置位于（1500m,500m, 0m）的地震记录。

/root/someoutput 文件夹是程序产生的中间结果，为二进制文件。s_vp.bin 和 s_den.bin 是偏移时采用的速度模型，wavelet.bin 是偏移时采用的子波。log.txt 和 build_output_all.txt 是程序运行的日志文件。其中包括运行时间等一些基本信息。

2.3.2.4 保幅高分辨率及超分辨率地震反演

软件运行成功后，将在/root/ITSMF_package_ver5.3/ITSMF_ver5.3/result 文件夹中生成通过交替迭代得到的分段反射系数 segy 文件、分段子波 segy 文件。特别地，如果 gen_stationary_S 参数选为 true，还将 在 /root/ITSMF_package_ver5.3/ITSMF_ver5.3/result 中生成平稳化后的地震记录 segy 文件。

2.3.2.5 矿体与围岩的边缘检测及矿体内部非均质性及物性变化的刻画

输出文件与输入文件格式一致均为 SEGY 数据，输入数据为时间域信号，输出数据为单频数据，数据为二维数据和三维数据均可。

2.3.3 绘图文件

(1) 远震接收函数反演计算子程序和接收函数与面波频散联合反演计算子程序都会在默认的图件输出位置输出反演结果的 eps 图件，具体见上所述。

(2) 背景噪声面波成像子程序在模型所在目录下输出反演得到的横波速度

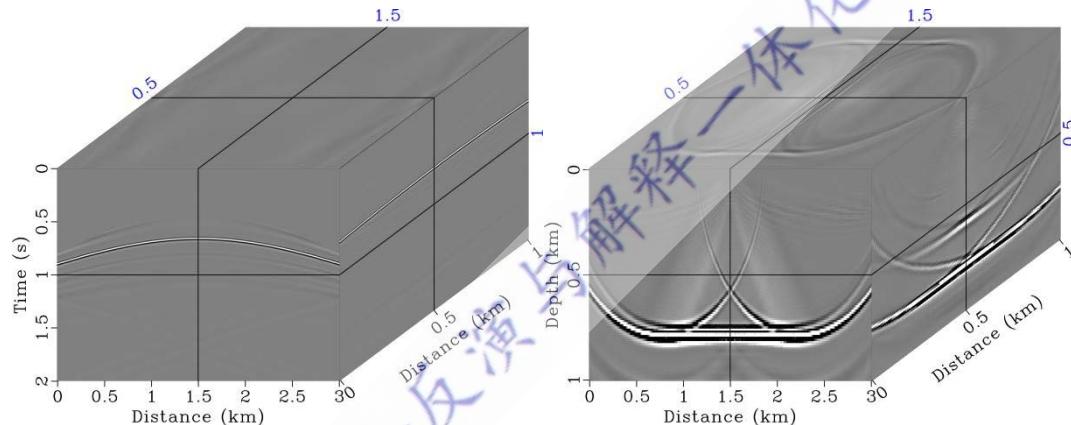
模型，为 png 的图片格式。

(3) 3D 声波逆时偏移

/root/3DRTMig 文件夹内存放的是 eps 格式和 pdf 格式的图件。子文件包括 obs-eps 和 result-eps。

子文件内文件的命名规则为：“成像结果名字.eps”和“成像结果名字.pdf”，“观测记录名字.eps”和“观测记录名字.pdf”。例如：obs_tp_shot_500_1500.eps 和 vresult-tp-50-150.eps。

如下图所示，为一个水平层状介质的单炮观测记录以及叠前 3D 逆时偏移成像结果。观测记录纵轴为走时 (s)，成像结果的纵轴为深度 (km)。图件左侧展示的是观测数据，右侧为成像结果。



3D 叠前地震记录和 3D 逆时偏移成像结果

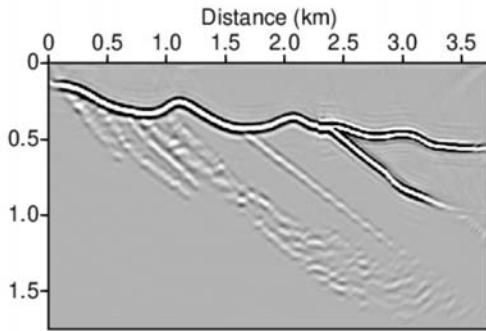
(4) 最小二乘逆时偏移子程序在程序执行目录输出成像结果，可通过 Seismic Unix 绘图，绘图命令：

```
psimage <mig_stk40.bin n1=350 n2=750 d1=0.005 d2=0.005 lable1="Depth (km)"  
lable2="Distance (km)" d1num=0.5 d2num=0.5 height=3 width=5 perc=98>  
mig_plsrtm.eps
```

看图命令：

```
evince mig_plsrtm.eps
```

输出的成像结果如下图所示：



(5) 保幅高分辨率及超分辨率地震反演模块的输出文件均匀 segy 文件，可直接通过 Fimage 或 MIAS 等软件绘图，也可通过 matlab 读取后绘图。

2.3.4 运行说明

2.3.4.1 igg_seismic_jointinv 镜像仓库

进入 docker 命令行交互后，启动时间域反褶积的接收函数计算子程序示例：

```
cd /root/calculate_rf
```

```
python calculate_rf.py
```

启动远震接收函数反演计算子程序示例：

```
cd /root/inversion_rf
```

```
python inversion_rf.py
```

启动接收函数与面波频散联合反演计算子程序示例：

```
cd /root/joint_inversion_rf
```

```
python joint_inversion_rfswd.py
```

2.3.4.2 ustc_erps 镜像仓库

因该方法需要大量的人机交互来保证结果可靠性与准确度，需要图形界面的支持，需要允许 docker 启动本地 X11 接口进行显示。导入镜像后：

```
xhost +
```

开放 X11 显示接口给所有用户，包括 docker

```
docker run -it -v /etc/localtime:/etc/localtime:ro -v /tmp/.X11-unix:/tmp/.X11-unix/ -e DISPLAY=unix$DISPLAY -e GDK_SCALE ustc_erps:v1.0.0 /bin/bash
```

启动 docker 容器时共享本地 unix 端口和修改环境变量，使其启动的容器支持图形界面

```
cd /home/cal_CFs/  
matlab  
启动植入的 matlab 软件，自动显示图形界面与本地使用相同  
NoiseCorr  
计算台站间互相关函数  
cd /home/ustc_erps/  
script_cal_disper  
启动频散能量计算子程序  
DispersionPick_V2  
启动频散提取子程序  
script_merge  
启动频散曲线融合子程序  
script_inversion  
启动频散曲线反演子程序  
script_plot_result  
启动绘制速度模型子程序
```

2.3.4.3 xjtu_work_2_gzq 镜像仓库

进入 docker 命令行交互后，启动频率可控包络反演程序示例：

```
cd /opt/zqgao/FSEI_hardrock/bin  
.FWIFSEI_run
```

2.3.4.4 xjtu_lsrtm 镜像仓库

本节以沃溪金锑钨矿速度模型的成像测试为例介绍该模块的使用方式。成像测试所用的运行命令如下所示：

```
! 启动 docker 容器  
sudo docker start 1f46927e859a  
! 进入 docker 容器  
sudo docker attach 1f46927e859a  
! 进入子模块测试目录  
cd /home/lc/xjtu/data/hardrock_lsrtm/test_plsrtm/
```

! 查看并填写参数文件

```
vim coord.par
```

```
vim parfile
```

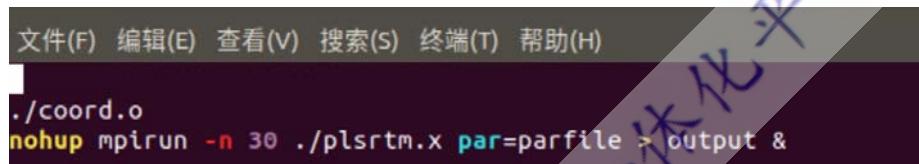
! 查看并修改程序执行命令

```
vi run_lsrtm.sh
```

! 运行程序

```
sh run_lsrtm.sh
```

“run_lsrtm.sh”文件如下图示，其中第一行命令的作用是生成观测系统文件，第二行命令的作用是执行平面波最小二乘逆时偏移程序。



```
./coord.o
nohup mpirun -n 30 ./plsrtm.x par=parfile > output &
```

2.3.4.5 保幅高分辨率及超分辨率地震反演模块

Step 1: 将叠后数据(最好先去噪)放入"tmp_model_data"文件夹。

Step 2: 参考"input"文件夹已有的参数文本和下面的"重要参数说明"设置所需的参数文本。

Step 3: 将相应参数文本放入"input"文件夹。

Step 4: 将当前路径设为"ITSMF"文件夹。

Step 5: 根据"compile and execute.txt"编译"evenly_nonstationary_ITSMF_SSD.cpp"(一般只需编译一次)

Step 6: 根据"compile and execute.txt"运行 evenly_nonstationary_ITSMF_SSD

2.3.4.6 矿体与围岩的边缘检测及矿体内部非均质性及物性变化的刻画

- 1) 首先执行以编译好的可执行文件
- 2) 输入需要处理的数据文件名
- 3) 输入输出数据的文件名
- 4) 输入三参数小波变换的参数
- 5) 输入需要数据的频率值
- 6) 执行可执行的文件 . /XXXX

第3章 重磁联合反演

3.1 前言

本课题提出了以“重磁力异常处理、反演及联合反演解释及评价软件研发”为链条，从“数据-模型-反演-评估”四方面对重磁反演方法技术实现关键技术突破，提出了研发具备数据预处理、异常计算、三维复杂地质模型构建、大规模数据并行、远程云平台运行能力、反演及联合反演解释及评价能力的重磁位场处理、反演、联合反演与解释软件模块。重点布局更有效的结构约束和物性约束的重磁联合反演方法。并选取不同场景下的2~3个典型矿区实际数据，进行综合数据处理与解释的全流程测试、检验与示范应用。

本模块具体开发以下几个方面：

3.1.1 重磁异常数据处理

研究支持多源、多平台观测重磁异常信号提取、分离、增强和融合技术，实现重磁信号滤波与场分离提取，非常规地形改正，异常计算，重磁位场延拓，断裂信号增强，边缘识别，重磁位场变换等算法，形成一套重磁异常数据预处理程序库及相应测试数据库，模块处理数据能力不低于1TB。为重磁异常数据进一步处理解释提供了重要的基础程序资源。

3.1.2 重磁异常反演与解释

综合使用多种反演策略，提供多种先验假设约束，研究空间域、频率域、界面和物性多样化、可约束的反演与预测方法反演结果的定量评估方法。构建具备三维复杂地质参考模型构建、大规模数据并行、远程云平台运行能力、反演解释及评价能力的全流程化、统一接口规范、可自由组装的重磁位场软件模块安装包。实现基于多种模型约束驱动的反演算法模块，实现更好的分布式智能反演与解释分析功能，从而达到寻找目标地质体的目的。

3.1.3 重磁联合反演

与单一的重、磁反演手段比较，重磁联合反演充分利用多种观测数据的信息，使得反演结果更准确，并且解释深度变化大，在研究区域的深度方向上的分辨率

可以互补。重点布局更有效的结构约束和物性约束的重磁联合反演方法，并使用贝叶斯理论框架进行重磁统计学联合反演。

3.1.3.1 模糊聚类联合反演

重磁模糊聚类反演（FCM）是在传统的正则化反演的基础之上，加上模糊聚类约束项。模糊聚类约束项中包含了经过一定的方法统计得到的不同物性模型之间的关系，并将这种物性关系作为一种先验信息，将反演得到的不同的物性模型的参数关系向这个方向靠拢，达到一种聚类效果。

3.1.3.2 交叉梯度、相关分析联合反演

基于不同物性模型的交叉梯度、相关关系的联合反演方法是基于不同地质模型的结构一致性的思想。通过交叉梯度与相关分析方法将构造一致性约束引入到重磁联合反演中，获取更符合区域构造解释和更加具备实际地质意义的反演结果。

3.1.3.3 贝叶斯联合反演

基于贝叶斯反演方法的反演可以利用离散的局部和稀疏先验信息，实现多模型约束数据的自动同化。在贝叶斯框架下利用地质岩石识别和岩石物理建模等手段将物性约束加入联合反演中，使反演结果更准确并降低计算量要求。同时也进行同时使用结构约束和物性约束的统计学反演方法研究，以尽量充分利用相关约束信息。统计学反演能对结果模型和结果的不确定性定量评估，进而提供更丰富、更全面的评估方式。

3.2 镜像说明

包含两个镜像，一个是重磁数据处理与单独反演的镜像 1，一个是重磁联合反演的镜像 2。

镜像 1：本镜像基于 Docker 技术打包，在镜像中已经包含了重磁正、反演执行程序、源代码、全部依赖的 Python 环境和第三方辅助包。该 Docker 镜像支持 Jupyter Notebook 人机交互界面实现系统集成示例程序的演示和函数调用。并附带了测试用的数据，支持三维重磁位场反演和贝叶斯最优化算法。该镜像在 Ubuntu 18.04 LTS 的 Linux 64 位系统下制作，并测试通过。本 Docker 镜像已经上传到阿里云，可以通过以下两种方式加载镜像：

(1) 远程拉取 Docker 镜像

执行命令： docker pull registry.cn-beijing.aliyuncs.com/rular099/geoist:0.0.1

(2) 加载本地 Docker 镜像

执行命令： docker load -i geoist.tar

其中， geoist.tar 为已下载的镜像名。成功运行该镜像后，可以在 notebooks 目录下，找到 ipynb 类型文件，启动后可以在 Jupyter 环境下看到程序调用接口方法，以及示例程序运行结果。

镜像 2：整个程序开发是在 Linux 系统上进行的，程序语言主要使用 Fortran 与 Python 两种语言，以及基于 CPU/GPU 并行异构开发加速反演。因此，所需要的的镜像的基本环境是 Ubuntu 18.04、Pgfotran、OpenMp、OpenAcc、CUDA 与 Python 等。

3.3 软件的使用说明

3.3.1 输入说明（必要包括参数，网格）

3.3.1.1 重磁异常数据处理模块

该模块包括了重力异常校正、磁化极计算、位场延拓、位场空间变换、位场数据格网化、位场数据趋势分析 6 类主要功能，其简要使用说明如下：

(1) 重力异常计算

由于地球是一个椭球体，随着纬度不同，重力值变化很快。重力随着场源与观测点之间的不同差别很大。同时，地球表面有山、有谷，高度不同测量得到的重力值也不一样。因此，应用重力数据研究地球内部物质结构差异之前，必须进行一些与纬度、高度等相关的重力变化一系列校正，才能得到地球内部物质不均匀引起的重力异常。校正一般分四种：正常场校正、高度校正、中间层校正、地形校正。前两种称之为自由空气校正、四种统一校正称为布格校正。计算正常场的代码在 normgra 模块中实现，支持两种计算正常重力值的公式，接口分别为 gamma_closed_form 和 gamma_somigliana_free_air。应用示例：

```
from geoist.pfm import normgra
```

```
lat = 45.0
```

```
height = 1000.0
```

```
grav = 976783.05562266 #mGal
```

```

gamma = normgra.gamma_closed_form(lat, height)
gamma1 = normgra.gamma_closed_form(lat, height, ellipsoid = GRS80)
somi = normgra.gamma_somigliana_free_air(lat, height)
somi1 = normgra.gamma_somigliana_free_air(lat, height, ellipsoid = GRS80)
bug = normgra.bouguer_plate(height)
print(gamma, gamma1)
print(somi, somi1)
print(bug)

```

运行后，三个 print 的结果如下：

```

980311.2896926827 980311.4329622437
980311.1769377294 980311.3202522187
111.94694713134103

```

此外，还有函数 bouguer_plate 可以计算布格板（中间层）重力异常，输入参数为观测高度。输入重力值单位为 mGal，高度单位为 m，经纬度为 dd.ddd 格式。布格异常的计算代码如下：

```

bouguer = grav -gamma - bug
-3640.181017154048

```

(2) 磁化极

因为地球磁场在每个位置方向都不相同，在两极近似垂直磁化，赤道位置近似为水平磁化，将磁异常化到地磁极 (RTP, reduced to the pole)，是一种将斜磁化 ΔT 或 Z_a 磁异常换算为各种垂直磁化磁异常的磁场换算方法。应用示例：

```

inc, dec = -60, 23 # 地磁场方向
sinc, sdec = -30, -20 # 源磁化方向
mag = giutils.ang2vec(1, sinc, sdec)
model = [Prism(-1500, 1500, -500, 500, 0, 2000, {'magnetization': mag})]
area = (-7e3, 7e3, -7e3, 7e3)
shape = (100, 100)
x, y, z = gridder.regular(area, shape, z=-300)
data = prism.tf(x, y, z, model, inc, dec)

```

```
# 化极  
data_at_pole = pftrans.reduce_to_pole(x, y, data, shape, inc, dec, sinc,  
                                     sdec)
```

(3) 位场延拓（信号提取）

位场解析延拓是地球物理数据分析应用中最重要的技术环节之一，其含义是根据一个面上的一组位场数据确定另一个不同高度面上位场值的过程。位场向上延拓计算其高度大于已知场高度的位场的过程，目的是将数据观测面远离位场源体，更好的凸显地球内部深层物质分布异常引起的地球重力场或磁场的异常特征。向下延拓位场是计算其高度小于已知场高度的位场，目的是将数据观测面外推到更接近于位场源体，通过改善观测数据的信噪比，增强地球内部浅层质量分布异常的映射强度，来凸显地球重力场或磁场的局部变化特征。应用示例：

```
#模型设置  
model = [  
    geometry.Prism(-3000, -2000, -3000, -2000, 500, 2000, {'density': 1000}),  
    geometry.Prism(-1000, 1000, -1000, 1000, 0, 2000, {'density': -800}),  
    geometry.Prism(1000, 3000, 2000, 3000, 0, 1000, {'density': 900})]  
  
area = (-5000, 5000, -5000, 5000)  
shape = (50, 50)  
z0 = -100  
  
x, y, z = gridder.regular(area, shape, z=z0)  
  
#正演及添加噪声  
gz = giutils.contaminate(prism.gz(x, y, z, model), 0.5, seed=0)  
  
#延拓高度 1000m  
height = 1000 # How much higher to go  
  
#延拓异常计算  
gzconf = pftrans.upcontinue(x, y, gz, shape, height)
```

(4) 位场空间变换（信号增强）

重磁力不同异常可以反映不同的边界特征和局部异常特征。准确计算出重磁力不同空间异常可以在地球物理勘探边界特征分析及局部异常解释中发挥重要作用。应用示例：

求导数和解析信号，代码使用形式如下：

```
bgas_dx = pftrans.derivx(x, y, bgas_contf, shape)
bgas_dy = pftrans.derivy(x, y, bgas_contf, shape)
bgas_dz = pftrans.derivz(x, y, bgas_contf, shape)
bgas_tga = pftrans.tga(x, y, bgas_contf, shape)
```

(5) 位场数据插值融合（信号融合）

1) 投影变换

实际陆地重磁数据处理过程，重力观测点一般是不均匀的，要看重力异常场的特征或者进一步进行空间导数和延拓变换都需要重力数据的格网化插值处理。一般在插值前，需要将经纬度坐标，转换为投影坐标，那就需要先做个投影变换。

应用示例：

```
import pyproj
p_jw = "+proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +no_defs"
p_lcc = "+proj=lcc +lon_0=102.5 +lat_0=24.38 +lat_1=45 +ellps=WGS84
+datum=WGS84 +no_defs"

proj_xy = pyproj.Proj(p_lcc) #projection = pyproj.Proj(proj="merc",
lat_ts=gradata['lat'].mean())
proj_coords = proj_xy(gradata['lon'].values, gradata['lat'].values)
gradata['x'] = proj_coords[0]
gradata['y'] = proj_coords[1]

proj_jw = pyproj.Proj(p_jw) # 目标坐标系统
origin_lon, origin_lat = pyproj.transform(proj_xy, proj_jw, gradata['x'].values,
gradata['y'].values)
```

2) 格网化

数据网格化方法有很多，最小曲率法、克里金法、最小二乘配置法、反距离加权平均法等。应用示例：

```
from geoist.gridder import spline, mask
BGA = spline.Spline().fit(proj_coords, gradata['BGA_s'].values)
```

```

res_BGA = gradata['BGA_s'].values - BGA.predict(proj_coords)
grid = BGA.grid(spacing=2e2, data_names=["BGAs"])
print('4. 网格化信息如下: ', grid)
type(grid)
grid1 = mask.distance_mask(proj_coords, maxdist=5e2, grid=grid)
grid1.BGAs.plot.pcolormesh()

```

(6) 位场趋势分析（信号分离）

在重力位场数据处理中，根据研究目的的不同，常常需要去除背景性的趋势变化特征。根据研究对象，往往需要去掉趋势性的异常进行场源分离。示例代码如下：

```

from geoist.gridded import trend
trend = trend.Trend(degree = 1).fit(proj_coords, gradata['BGA_s'].values)
print('4. 拟合的趋势系数: ', format(trend.coef_))
trend_values = trend.predict(proj_coords)
residuals = gradata['BGA_s'].values - trend_values
resBGA = spline.Spline().fit(proj_coords, residuals)
grid2 = resBGA.grid(spacing=2e2, data_names=["resBGA"])
grid3 = mask.distance_mask(proj_coords, maxdist=5e2, grid=grid2)
plt.figure()
grid3.resBGA.plot.pcolormesh()

```

表格 3-1 数据处理相关接口函数输入输出说明

号	.inp 模型文件	说明	是否可调与建议
	//重力异常归算 lat = 45.0 height = 1000.0	1. 需要输入纬度和高度两个参数，默认是WGS84椭球，还支持GRS80椭球参数。 2. 支持两种计算正常重力值的公式 normgra.gamma_closed_form(lat, height, ellipsoid = GRS80) 和 normgra.gamma_somigliana_free_air(lat, height, ellipsoid = GRS80)	可根据需要选择 gamma_somigliana_free_air 或者 gamma_closed_form

	<pre>//磁化极 # 地磁场方向 inc, dec = -60, 23 # 源磁化方向 sinc, sdec = -30, -20 #磁数据维度 shape = (100, 100) #磁异常数据</pre>	<ol style="list-style-type: none"> 需要输入地磁场方向、源磁化方向、磁数据维度和磁异常数据。 需要输入的磁数据格式为x,y,z形式，这三个都必须是1维数组 	
	<pre>//位场延拓 # 位场格网维度 shape = (50, 50) # 延拓高度 1000m height = 1000</pre>	<ol style="list-style-type: none"> 位场延拓需要使用pftrans模块下的upcontinue函数，其中有两个参数需要设定，一个是shape，另一个是height，其单位为m，向上为正。 需要输入的位场数据格式为x,y,z形式，这三个都必须是1维数组。 	
	<pre>//空间变换 #位场经纬度坐标: xp, yp #位场格网维度 shape = (50, 50) #空间导数阶数 order</pre>	<ol style="list-style-type: none"> 空间变换计算函数都在pftrans模块下，其中derivx, derivy, derivz分别对应三个方向的空间导数，可以通过order参数设置求取不同阶数的空间导数。 求位场的解析信号使用函数tga 需要输入的位场数据格式为x,y形式，这两个都必须是1维数组 	
	<pre>//投影变换 #位场经纬度坐标: xp, yp, gradata #转换坐标系信息 p_jw, p_lcc, proj_xy</pre>	<ol style="list-style-type: none"> 投影变换需要使用pyproj库及Proj和transform两个函数。 需要输入的位场数据格式为x,y, gradata形式，这两个都必须是1维数组 	
	<pre>//网格化 #位场数据: x,y, gradata</pre> <p>需要输入参数为x,y, gradata形式，其中这三个都必须是1维数组</p>	<ol style="list-style-type: none"> 离散点网格化，需要使用到geoist的gridder模块。 需要导入gridder模块中的spline, mask两个类函数。 	
	<pre>//趋势分析 #位场数据: x,y, gradata</pre> <p>需要输入参数为x,y, gradata形式，其中这三个都必须是1维数组</p>	<ol style="list-style-type: none"> 求趋势项需要使用到geoist的gridder模块。 需要导入gridder模块中的trend类函数。 	

3.3.1.2 三维建模与正演计算模块

该模块主要包括种类型剖分单元正演计算、复杂格网构建、重磁模型生成、重磁场源正演、数据噪声生成等功能。重点扩展了基于 Tesseroid 球型棱柱体单元的重磁正演、复杂格网剖分与模型生成等功能。其简要使用说明如下：

(1) 剖分单元正演

要进行实现重力或磁力反演、测试算法，首先是要设计一个场源模型，并实现其正演。PrismMesh 函数可以生成一个指定场源参数的网格。模块下 geometry.py 定义了各种几何单元类型已经实现的几种类型见下表。

表格 3-2 不同类型剖分单元

单元	网格	类型
Prism	PrismMesh	六面体
Tesseroid	TesseroidMesh	球面六面体
Prism	PrismRelief	起伏界面
Square	SquareMesh	2D 正方形
Sphere	PointGrid	点源-球体

(2) 复杂格网构建

在 Geoist 中，inversion 模块下 mesh.py 是以不同单元剖分网格的批处理类实现。要设计一个场源模型，PrismMesh 函数可以生成一个指定场源参数的网格。生成的 mesh 对象，

```
from geoist.inversion.mesh import PrismMesh  
area = (-47500, 47500, -47500, 47500, 4000, 32000)  
shape = (20, 20, 5)  
mesh = PrismMesh(area, shape)
```

可以通过 addprop 方法添加指定位置的密度或磁化率参数，然后，dump 方法支持模型导出。

```
mesh.addprop('density', 1000.*rho1.ravel()-2529.99997)  
mesh.addprop('magnetization', mag1.ravel())  
mesh.dump(meshfile, densfile, 'density')
```

```
mesh.dump(meshfile, magfile, 'magnetization') #输出网格到磁盘,  
MeshTools3D 可视化
```

(4) 正演计算

不管基于哪种剖分单元得到的重力和磁力异常、相对于密度和磁化率参数都是线性的，因此，地面上任意测点的重力和磁力异常是所有剖分的单元效应总和。每一个场源单元对每一个观测点都可以计算得到一个单位密度的理论异常值，全部组合起来就是一个 M 单元 $\times N$ 个测点数的大矩阵可以先用一个空的 list 对象 kernel 来准备装该矩阵。根据模型 m 和核函数矩阵 G，就可以计算理论重力或磁力异常了。下面代码计算得到的 field 变量，就是正演的理论观测重力或磁力异常值。

```
for i, layer in enumerate(mesh.layers()):  
    for j, p in enumerate(layer):  
        x1 = mesh.get_layer(i)[j].x1  
        x2 = mesh.get_layer(i)[j].x2  
        y1 = mesh.get_layer(i)[j].y1  
        y2 = mesh.get_layer(i)[j].y2  
        z1 = mesh.get_layer(i)[j].z1  
        z2 = mesh.get_layer(i)[j].z2  
        den = mesh.get_layer(i)[j].props  
        model=[geometry.Prism(x1, x2, y1, y2, z1, z2,  
                               {'magnetization': giutils.ang2vec(1, inc,  
                                                               dec))}]  
        field = prism.tf(xp, yp, zp, model, inc, dec)  
        kernel.append(field)  
  
kk=np.transpose(kernel) #kernel matrix for inversion, 500 cells * 400 points  
field_mag=np.mat(kk)*np.transpose(np.mat(mag1.ravel()))
```

(5) 噪声生成

为了测试反演算法的有效性和抗噪性，需要对一些正演异常添加噪声。

```
field_mag1 = giutils.contaminate(np.array(field_mag).ravel(), 0.05, percent = True)
```

```
field_gra1 = giutils.contaminate(np.array(field_gra).ravel(), 0.05, percent = True)
```

表格 3-3 正演相关接口函数输入输出说明

号	.inp 模型文件	说明	是否可调与建议
	<pre>/模型生成 #模型文件 1) 重力异常模型 model= [geometry.Prism(-4000, -3000, -4000, -3000, 0, 2000, {'density': 1000})] 2) 磁力异常模型 model = [geometry.Prism(-4000, -3000, -4000, -3000, 0, 2000, {'magnetization': giutils.ang2vec(1, inc, dec)})]</pre>	<p>1. 由 model 实例化为一个重力异常模型空间，输入参数为(xstart, xend, ystart, yend, zstart, zend, {'density': 属性值（单位 kg/m³）}), 其中坐标单位为 m</p> <p>2. 由 model 实例化为一个重力异常模型空间，输入参数为(xstart, xend, ystart, yend, zstart, zend, {'magnetization ': 属性值}), 其中 inc, dec 分别为磁倾角和磁偏角，单位为 degree</p>	
	<pre>/观测数据生成 shape = (100, 100) xp, yp, zp = griddeder.regular((-5000, 5000, -5000, 5000), shape, z=-150)</pre>	<p>1. griddeder.regular 中输入参数为 (xstart, xend, ystart, yend, shape, z=观测高度)，单位为 m。</p>	
	<pre>#模型正演 prism.tf(xp, yp, zp, model, inc, dec) prism.potential(xp, yp, zp, model), prism.gx(xp, yp, zp, model), prism gy(xp, yp, zp, model), prism.gz(xp, yp, zp, model),</pre>	<p>1. prism.py 六面体核函数计算程序，此外还有 Tesseroid/PolygonalPrism/Sphere，分别对应球型六面</p>	

	prism.gxx(xp, yp, zp, model), prism.gxy(xp, yp, zp, model), prism.gxz(xp, yp, zp, model), prism.gyy(xp, yp, zp, model), prism.gyz(xp, yp, zp, model), prism.gzz(xp, yp, zp, model)	体, 多边形和球型 2 参数为模型文件 model 和 观测文件 xp, yp, zp, 单 位为 m。	
.	#噪声生成 giutils.contaminate(field, 0.05, percent = True)	1. taminate(异常数据, 标准差, percent = True)	

3.3.1.3 位场反演与解释模块

位场反演与解释模块同样采用面向对象的程序设计方法, 基于 Python3. 6 语言实现。

表格 3-4 反演相关接口函数及程序代码说明

1、Geoist/pfm 目录下:
prism.py 六面体核函数计算程序 giutils.py 常用函数, safe_dot, safe_solve 等自动判断稀疏矩阵采用合适的实现方式, contaminate 函数生成噪声等 inv3d.py 反演用户接口, 如重力反演, Density3D 类的实现, 该类从 Misfit 派生。
2、Geoist/inversion 目录下:
(1)基础部分: base.py OptimizerMixin, OperatorMixin 等基类的定义 regularization.py 正则化项生成, 继承关系 OperatorMixin->Regularization->Damping hyper param.py LCurve 类的定义, 继承关系 OptimizerMixin->LCurve, 实现 fit 方法 mesh.py 生成场源对象, PrismMesh 为六面体网格, TesseroidMesh 是 PrismMesh 派生类, 生成球坐标系下的六面体 misfitpy 数据项生成, Misfit 类的定义, L2norm, 多重继承 OptimizerMixin, OperatorMixin 基类, 实现 value 方法。 optimization.py 矩阵求解实现, 直接求解, 牛顿法, 马奎特法、最速下降法等
(2)扩展部分:

贝叶斯反演的 ABIC 计算核心程序。

- SmoothOperator: 光滑矩阵 B 和向量 v 的操作, derivation 是计算 Bv , rderivation 是计算 BTv
- AbicLSQOperator: 求解 MinU 时的最小二乘算子
- GravInvAbicModel: 进行 abic 反演计算的类。
- abic_f.py: abic 辅助函数实现, fft 等

大规模正反演核心程序。

- walsh.py 矩阵压缩 walsh 变换, 实现 walsh 变换和反变换的类
- pfmmodel.py, 核心类 InvModel 实现

3、Geoist/others 和 vis 目录下:

utils.py 几个帮助函数, 画图、存取文件等, others 目录下。giplt.py 辅助画图的函数 contour, contour 等, vis 目录下

这里我们将主要功能用法分为设约束反演功能、优化反演功能及结果评价功能三类分别说明如下。

(1) 约束反演

对于线性方程式 $d = Gm$, 在实际反问题中, 由于数据观测存在的误差和正演核矩阵的性质, 方程经常是奇异或者是病态的。同时, 由于观测数据的有限性和正演算子本身的等效性, 方程组的解是不唯一的。根据有限和不精确数据的反问题解的非唯一性理论, 对于上述不稳定的非唯一性反问题, 我们只能根据某种准则求出反问题的一个可以接受的解估计。正则化就是一种有效的准则, 基本思想是通过在原病态观测方程组的基础上添加额外的模型约束函数 ϕ_ρ 建立反演目标函数 ϕ :

$$\begin{aligned}\phi &= \phi_d + \mu\phi_m \\ &= \|d - Gm\| + \mu\|W_m m\|\end{aligned}\tag{1}$$

其中 μ 为正则化因子, 其在数据拟合函数最小和模型约束函数最小之间寻求平衡 (trade-off)。我们的反问题就变成了基于目标函数 ϕ 极小值的情况下求解估计的问题。

1) 最小模型约束反演

反演得到的模型解估计需要符合客观情况，不应出现某个模型参数接近无穷大的情况，因此考虑使模型的“长度”达到尽可能小作为一个约束条件，定义最小模型函数。

2) 光滑约束反演

为了使反演求解的结果更加稳定，反演得到的模型参数部分应避免出现过分的“突变”，因此考虑使模型参数的空间分布更加“光滑”，即模型参数空间在三个坐标轴方向上连续变化，定义粗糙度函数为模型向量在 X、Y、Z 三个方向上

$$\phi = \|d - Gm\| + \mu \|W_m m\|, \quad W_m^T W_m = \alpha_s W_r I + \alpha_x W_r B_x^T B_x + \alpha_y W_r B_y^T B_y + \alpha_z W_r B_z^T B_z$$

式中，分别是 α_s 、 α_x 、 α_y 、 α_z 在最小模型，x, y, z 三个方向光滑的系数； W_r 深度加权，是一个与模型深度相关的对角阵； B_x 、 B_y 、 B_z 为光滑矩阵，通常可以选一阶差分或二阶差分形式。要生成差分矩阵需要用到 pfmodel 里面的 SmoothOperator 函数。

3) 深度加权约束反演

位场数据在深度上是没有分辨率的，主要表现为核函数随深度的增加而衰减，导致了反演结果的集中于地表的趋肤效应。在仅考虑核函数垂直方向衰减的情况下，深度加权函数为：

$$w(z) = \frac{1}{\left(\frac{z_j + z_0}{\max(z_j + z_0)} \right)^{\beta/2}} \quad (2)$$

其中， z_j 为第 j 个剖分单元的中心点埋深， z_0 和 β 为常数。为观测面的高度； β 为衰减因子，它的取值与核函数的衰减相关。这几个参数共同作用决定了深度加权矩阵对病态方程的改善程度。

(2) 优化反演

位场反演中加入的模型约束越多、越准确，反演结果越准确。在最小模型约束、光滑约束、深度加权约束最小二乘正则化的基础上，我们还发展了全变分正

则化方法，并测试了不同的约束及正则化计算的反演效果。

(3) 结果评价功能

反演结果评价主要包括反演结果正演理论值和反演拟合残差两个方面的内容。如果要显示一下反演异常和残差。

简要的反演过程可以总结为：Density3D这个类，创建后实例对象为datamisfit，这部分可以理解为dnorm，Damping是一个生成最小构造正则项的类，实例化后的对象为regul。然后，指定一个要搜索的正则参数列表regul_params，最后，调用LCurve类，生成一个density3d对象。运行density3d对象的fit接口，开始反演。具体的输入输出函数如下表所示：

表格 3-5 反演相关接口函数输入输出说明

号	.inp 模型文件	说明	否 可 调 与 建 议
	<pre>#输入文件 fname1 = "\\\rho1.mat" data1=sio.loadmat(fname1) rho10 = data1['data_dens'] fname2 = "\\\mag1.mat" data2=sio.loadmat(fname2) mag1 = data2['data_dens'] #模型范围及分辨率设置 area = (-100, 100, -750, 750, 0, 700) #x y z shape = (50, 75, 1) # z y x #模型单元设置 mesh = PrismMesh(area, shape) #模型生成 mesh.addprop('density', 1000.*rho1.ravel()-2529.99997) mesh.addprop('magnetization',</pre>	<ol style="list-style-type: none">通过文件导入模型属性值，单位都为 SI 单位制模型范围设置中 area =(xstart, xend, ystart, yend, zstart, zend)，单位为 m shape= (nz,ny,nx) 分别为三个坐标轴方向个数	

	mag1.ravel()		
	<pre>#观测数据范围 narea = (-500, 500, -1000, 1000) #y x #观测数据维度 nshape = (20, 40) #观测坐标 xp, yp, zp = gridder.regular(narea, nshape, z=-1)</pre>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 数据范围设置中 narea =(nxstart, nxend, nystart, nyend), 单位为 m 2. nshape= (ny,nx) 分别为两个坐标轴方向个数 	
	<pre>#核函数求解 Field1 = prism.gz_kernel(xp, yp, zp, model) kernel.append(field1) Field2 = prism.tf(xp, yp, zp, model, inc, dec) kernel.append(field2)</pre>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可以设置多个核函数类型, 其他如 Tesseroid/PolygonalPrism/ Sphere 	
	<pre>#光滑约束 smop = SmoothOperator() p = np.eye(nz*ny*nx).reshape(-1,nz,ny,nx) sx = smop.derivation(p, component = 'dx').reshape(nz*ny*nx,-1) sy = smop.derivation(p, component = 'dy').reshape(nz*ny*nx,-1) sz = smop.derivation(p, component = 'dz').reshape(nz*ny*nx,-1) #二阶光滑约束 sxx = smop.derivation(p, component = 'dxx').reshape(nz*ny*nx,-1) syy = smop.derivation(p, component = 'ddy').reshape(nz*ny*nx,-1) szz = smop.derivation(p, component = 'dzz').reshape(nz*ny*nx,-1) #深度约束 beta = 1.0 #1.0 wdepth = np.diag(1./(np.array(depthz)+z0)**beta) #最小模型约束 regul0 = Damping(nz*ny*nx) #边界约束 minval = initial maxval = initial + 1.0 bounds = list(zip(minval, maxval))</pre>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 其中 nx, ny, nz 分别为模型三方向维度, 为正整数 2. Component='光滑约束类型'。 3. Beta 为衰减因子, 一般对于重力 Beta=2, 重力梯度 Beta=3 4. 边界约束中 minval 为最小密度边界, maxval 为最大密度边界, bounds 生成边界函数 	

	<pre>#正则化约束项 am = 1000.0 ax = 300.0 ay = 300.0 az = 300.0 z0 = 10000 sm = np.vstack((am*np.eye(nz*ny*nx)*wdepth, az*np.dot(sz.T,wdepth), ay*np.dot(sy.T,wdepth), ax*np.dot(sx.T,wdepth))) regul1 = Smoothness(sm) regul2= TotalVariation(0.0001, sm1)</pre>	<p>1. am为最小约束权重， ax, ay, az分别为三个方向光滑约束权重</p>	
	<pre>#目标函数构建 datamisfit = inv3d.Density3D(np.array(field.T).ravel(), [xp, yp, zp], mesh , movemean = False)</pre>	<p>1. 由 inv3d.Density3D 形成反演目标函数</p>	
	<pre>#正则化参数求解 regul_params = [10**i for i in range(-5, 2, 1)] density3d = LCurve(datamisfit, regul2, regul_params, loglog=False)</pre>	<p>1. regul_params给出正则化参数范围 2. LCcurve函数求取正则化参数 3. LCcurve支持多线程，当模型较大的时候可以多线程运行， njobs 参数对应开的线程数量</p>	
	<pre>#目标函数求解 initial = np.zeros(nz*ny*nx) _= density3d.config('levmarq', initial=np.ones(datamisfit.nparams), maxit=100, maxsteps=100, tol=10**-4).fit()</pre>	<p>1. density3d.config进行反演解算</p>	
	<pre>#结果评价 predicted = density3d[0].predicted() residuals = density3d[0].residuals() 其中</pre>	<p>1. predicted为反演结果正演重力值；单位为mgal 2. residuals()为反演求解拟合差，单位为mgal</p>	

3.3.1.4 位场联合反演与解释模块

重磁联合反演程序支持重磁梯度以及重磁力异常反演，开发了二维与三维的反演。网格剖分采用均匀剖分的方式，自适应网格剖分正在开发中。

3.3.1.4.1 重磁模糊聚类联合反演

这里说明的是一般格式，输入输出按照文件以及其他需要的格式进行即可。

目前还没有考虑包含地形。

2d 输入参数包括：

1、 几何参数：

m: x 方向异常数据采样点个数 (default value)

xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value)

xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value)

zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value)

zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value)

zzmax: z 方向地下模型坐标的最大值 (default value)

poufen_parame: x 方向地下模型的个数 (default value)

cengshu: z 方向地下模型的层数 (default value)

2、 物性参数：

C: 聚类类别数

mref_g: 密度参考值

mref_m: 磁化强度参考值

tk(i,1): 重力模糊聚类的目标值 (i=1,2,..C)

tk(i,2): 磁力模糊聚类的目标值 (i=1,2,..C)

3、 并行处理器个数：

omp_set_num_threads: 线程数

number_host_device: GPU 个数

4、 主程序可读取上述定义的参数文件，比如，格式如下：

文件名配置：**top.grd, poufen_parameter.txt, poufen1_parameter.txt, gravity.dat,**

magnetic.dat, tk.txt, 内含例如下述参数

top.grd

m=121

m: x 方向采样点个数 (default value:121)

xmin=0

xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)

xmax=12000	xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value: 12000)
zmin=0	zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)
zmax=10000	zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value: 10000)
	poufen_parameter.txt
poufen_parame=120	poufen_parame(1,i):x 方向地下模型的层数 (default value: 120)
cengshu=100	cengshu: z 方向地下模型的层数 (default value:100)
zmax=10000	zzmax: z 方向地下模型坐标的最大值 (default value:10000)
	gravity.dat
dobs_g	dobs_g:重力异常
	magnetic.dat
dobs_m	dobs_m:化极磁力异常
	tk.txt
tk(i,1)	tk(i,1):重力模糊聚类的目标值 (i=1,2,..C)
tk(i,2)	tk(i,2):磁力模糊聚类的目标值 (i=1,2,..C)

5、 vk.dat: 初始聚类中心文件

	vk.dat
vk(i,1)	vk(i,1):重力模糊聚类的初始聚类中心值 (i=1,2,..C)
vk(i,2)	vk(i,2):磁力模糊聚类的初始聚类中心值 (i=1,2,..C)

6、 加权参数

Lam_g:模糊聚类项重力加权值

Lam_m:模糊聚类项磁力加权值

说明：本模块的输入参数附有缺省值，用户可以根据实际问题，修改输入参数值。

3d 输入参数包括：

7、 几何参数:

m: x 方向采样点个数 (default value)
n: y 方向采样点个数 (default value)
xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value)
xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value)
ymin: y 方向采样点坐标的最小值 (default value)
ymax: y 方向采样点坐标的最大值 (default value)
zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value)
zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value)
zzmax: z 方向地下模型坐标的最大值 (default value)
poufen_parame(1,i): x 方向地下模型的个数 (default value)
poufen_parame(2,i): y 方向地下模型的个数 (default value)
cengshu: z 方向地下模型的个数 (default value)

8、 物性参数:

C: 聚类类别数
mref_g: 密度参考值
mref_m: 磁化强度参考值
tk(i,1): 重力模糊聚类的目标值 (i=1,2,..C)
tk(i,2): 磁力模糊聚类的目标值 (i=1,2,..C)

9、 并行处理器个数:

omp_set_num_threads: 线程数
number_host_device:GPU 个数

10、 主程序可读取上述定义的参数文件，比如，格式如下：

文件名配置: **top.grd, poufen_parameter.txt, poufen1_parameter.txt, gravity.dat, magnetic.dat, tk.txt**, 内含例如下述参数

top.grd

m=121	m: x 方向采样点个数 (default value:121)
n=101	n: y 方向采样点个数 (default value:101)
xmin=0	xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)

xmax=12000	xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value: 12000)
ymin=0	ymin: y 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)
ymax=1000	ymax: y 方向采样点坐标的最大值 (default value: 20)
zmin=0	zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)
zmax=10000	zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value: 10000)
	poufen_parameter.txt
poufen_parame(1,i)=120	poufen_parame(1,i):x 方向地下模型的层数 (default value: 120)
poufen_parame(2,i)=100	poufen_parame(2,i):x 方向地下模型的层数 (default value: 100)
	poufen1_parameter.txt
cengshu=100	cengshu: z 方向地下模型的层数 (default value: 100)
zmax=10000	zzmax: z 方向地下模型坐标的最大值 (default value: 10000)
	gravity.dat
dobs_g	dobs_g:重力异常
	magnetic.dat
dobs_m	dobs_m:磁力化极异常
	tk.txt
tk(i,1)	tk(i,1):重力模糊聚类的目标值 (i=1,2,..C)
tk(i,2)	tk(i,2):磁力模糊聚类的目标值 (i=1,2,..C)

11、 vk.dat: 初始聚类中心文件

vk.dat	
vk(i,1)	vk(i,1):重力模糊聚类的初始聚类中心值 (i=1,2,..C)
vk(i,2)	vk(i,2):磁力模糊聚类的初始聚类中心值 (i=1,2,..C)

12、 加权参数

Lam_g:模糊聚类项重力加权值

Lam_m:模糊聚类项磁力加权值

说明：本模块的输入参数附有缺省值，用户可以根据实际问题，修改输入参数值。

3.3.1.4.2 基于交叉梯度法的重磁三维联合反演

这里说明的是一般格式，输入输出按照文件以及其他需要的格式进行输入输出便可以进行重磁联合反演。目前还没有考虑包含地形的联合反演。

2d 输入参数包括：

1、几何参数：

m: x 方向采样点个数 (default value)

xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value)

xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value)

zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value)

zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value)

zzmax: z 方向地下模型坐标的最大值 (default value)

poufen_parame: x 方向地下模型的个数 (default value)

cengshu: z 方向地下模型的层数 (default value)

2、物性参数：

mref_g: 密度参考值

mref_m: 磁化强度参考值

3、并行处理器个数：

omp_set_num_threads: 线程数

number_host_device: GPU 个数

4、主程序可读取上述定义的参数文件，比如，格式如下：

文件名配置：**top.grd, poufen_parameter.txt, poufen1_parameter.txt, gravity.dat,**

magnetic.dat, 内含例如下述参数

top.grd

m=121

m: x 方向采样点个数 (default value:121)

xmin=0

xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)

xmax=12000 xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value:
 12000)
zmin=0 zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)
zmax=10000 zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value:
 10000)
poufen_parameter.txt
poufen_parame=12 poufen_parame(1,i):x 方向地下模型的层数
0 (default value: 120)
poufen1_parameter.txt
cengshu=100 cengshu: z 方向地下模型的层数 (default value:100)
zmax=10000 zzmax: z 方向地下模型坐标的最大值(default
 value:10000)

gravity.dat
dobs_g dobs_g:重力异常
magnetic.dat
dobs_m dobs_m:磁力化极异常

5、 加权参数

Lam_g:交叉梯度项重力加权值

Lam_m:交叉梯度项磁力加权值

说明：本模块的输入参数附有缺省值，用户可以根据实际问题，修改输入参数值。

3d 输入参数包括：

6、 几何参数：

m: x 方向采样点个数 (default value)

n: y 方向采样点个数 (default value)

xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value)

xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value)

ymin: y 方向采样点坐标的最小值 (default value)

ymax: y 方向采样点坐标的最大值 (default value)

zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value)
zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value)
zzmax: z 方向地下模型坐标的最大值 (default value)
poufen_parame(1,i): x 方向地下模型的个数 (default value)
poufen_parame(2,i): y 方向地下模型的个数 (default value)
cengshu: z 方向地下模型的层数 (default value)

7、 物性参数:

mref_g: 密度参考值
mref_m: 磁化强度参考值

8、 并行处理器个数:

omp_set_num_threads: 线程数
number_host_device: GPU 个数

10、 主程序可读取上述定义的参数文件, 比如, 格式如下:

文件名配置: **top.grd**, **poufen_parameter.txt**, **poufen1_parameter.txt**, **gravity.dat**,

magnetic.dat, 内含例如下述参数

top.grd

m=121	m: x 方向采样点个数 (default value:121)
n=101	n: y 方向采样点个数 (default value:101)
xmin=0	xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)
xmax=12000	xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value: 12000)
ymin=0	ymin: y 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)
ymax=1000	ymax: y 方向采样点坐标的最大值 (default value: 1000)
zmin=0	zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)
zmax=10000	zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value: 10000)

poufen_parameter.txt

poufen_parame(1,i)	poufen_parame(1,i):x 方向地下模型的个数
---------------------------	--------------------------------

=120 (default value: 120)
poufen_parame(2,i) poufen_parame(2,i):x 方向地下模型的个数
=100 (default value: 100)
poufen1_parameter.txt
cengshu=100 cengshu: z 方向地下模型的层数 (default value:100)
zmax=10000 zzmax: z 方向地下模型坐标的最大值 (default
value:10000)
gravity.dat
dobs_g dobs_g:重力异常
magnetic.dat
dobs_m dobs_m:磁力化极异常

9、加权参数

Lam_g:交叉梯度项重力加权值

Lam_m:交叉梯度项磁力加权值

说明：本模块的输入参数附有缺省值，用户可以根据实际问题，修改输入参数值。

3.3.1.4.3 基于相关分析法的重磁三维联合反演

这里说明的是一般格式，输入输出按照文件以及其他需要的格式进行输入输出便可以进行重磁联合反演。目前还没有考虑包含地形的联合反演。

2d 输入参数包括：

1、几何参数：

m: x 方向采样点个数 (default value)

xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value)

xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value)

zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value)

zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value)

zzmax: z 方向地下模型坐标的最大值 (default value)

poufen_parame: x 方向地下模型的个数 (default value)

cengshu: z 方向地下模型的层数 (default value)

2、 物性参数:

mref_g: 密度参考值

mref_m: 磁化强度参考值

3、 并行处理器个数:

omp_set_num_threads: 线程数

number_host_device:GPU 个数

4、 主程序可读取上述定义的参数文件, 比如, 格式如下:

文件名配置: **top.grd**, **poufen_parameter.txt**, **poufen1_parameter.txt**, **gravity.dat**,

magnetic.dat, 内含例如下述参数

top.grd

m=121 m: x 方向采样点个数 (default value: 121)

xmin=0 xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)

xmax=12000 xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value: 12000)

zmin=0 zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)

zmax=10000 zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value: 10000)

poufen_parameter.txt

poufen_param=120 poufen_param(1,i):x 方向地下模型的层数
0 (default value: 120)

poufen1_parameter.txt

cengshu=100 cengshu: z 方向地下模型的层数 (default value: 100)

zmax=10000 zzmax: z 方向地下模型坐标的最大值 (default value: 10000)

gravity.dat

dobs_g dobs_g:重力异常

magnetic.dat

dobs_m dobs_m:磁力化极异常

5、 加权参数

Lam_g: 相关分析项重力加权值

Lam_m: 相关分析项磁力加权值

说明：本模块的输入参数附有缺省值，用户可以根据实际问题，修改输入参数值。

■ 3d 输入参数包括：

6、 几何参数：

m: x 方向采样点个数 (default value)

n: y 方向采样点个数 (default value)

xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value)

xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value)

ymin: y 方向采样点坐标的最小值 (default value)

ymax: y 方向采样点坐标的最大值 (default value)

zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value)

zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value)

zzmax: z 方向地下模型坐标的最大值 (default value)

poufen_parame(1,i): x 方向地下模型的层数 (default value)

poufen_parame(2,i): y 方向地下模型的层数 (default value)

cengshu: z 方向地下模型的层数 (default value)

7、 物性参数：

mref_g: 密度参考值

mref_m: 磁化强度参考值

8、 并行处理器个数：

omp_set_num_threads: 线程数

number_host_device: GPU 个数

9、 主程序可读取上述定义的参数文件，比如，格式如下：

文件名配置：**top.grd, poufen_parameter.txt, poufen1_parameter.txt, gravity.dat,**

magnetic.dat, 内含例如下述参数

top.grd

m=121

m: x 方向采样点个数 (default value:121)

n=101 n: y 方向采样点个数 (default value:101)
xmin=0 xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)
xmax=12000 xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value:
 12000)
ymin=0 ymin: y 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)
ymax=1000 ymax: y 方向采样点坐标的最大值 (default value: 20)
zmin=0 zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)
zmax=100000 zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value:
 10000)

poufen_parameter.txt

poufen_parame(1,i) poufen_parame(1,i):x 方向地下模型的个数
=120 (default value: 120)

poufen_parame(2,i) poufen_parame(2,i):x 方向地下模型的个数
=100 (default value: 100)

poufen1_parameter.txt

cengshu=100 cengshu: z 方向地下模型剖分的层数 (default
 value:100)

zmax=10000 zzmax: z 方向地下模型坐标的最大值 (default
 value:10000)

gravity.dat

dobs_g dobs_g:重力异常

magnetic.dat

dobs_m dobs_m:磁力化极异常

10、 加权参数

Lam_g:相关分析项重力加权值

Lam_m:相关分析项磁力加权值

说明：本模块的输入参数附有缺省值，用户可以根据实际问题，修改输入参数值。

3.3.1.4.4 重磁贝叶斯联和反演

这里说明的是一般格式, 输入输出按照文件以及其他需要的格式进行输入输出便可以进行重磁联合反演。目前还没有考虑包含地形的联合反演。

2d 输入参数包括:

1、 几何参数:

nx: x 方向剖分个数 (default value=600)

nz: z 方向地下模型的层数 (default value=500)

2、 物性参数:

density: 密度值一列矩阵(default value=300000)

3、 并行处理器个数:

单核 CPU

4、 主程序可读取上述定义的参数文件, 比如, 格式如下:

内含例如下述参数

xmin=0 **xmin: x 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)**

xmax=12000 **xmax: x 方向采样点坐标的最大值 (default value: 12000)**

zmin=0 **zmin: z 方向采样点坐标的最小值 (default value: 0)**

zmax=10000 **zmax: z 方向采样点坐标的最大值 (default value: 0)**

poufen=600 **poufen:x 方向地下模型的层数 (default value: 600)**

cengshu=500 **cengshu: z 方向地下模型的层数 (default value:500)**

gravity.dat

dobs_g **dobs_g:重力异常**

magnetic.dat

dobs_m **dobs_m:磁力异常**

说明: 本模块的输入参数附有缺省值, 用户可以根据实际问题, 修改输入参数值。

3.3.2 输出说明（必要包括数据结果结构说明）

3.3.2.1 重磁模糊聚类联合反演

这里说明的是一般格式，输入输出按照文件以及其他需要的格式进行输入输出便可。

1、 物性参数：

m1_g: 密度值矩阵

m1_m: 磁场强度矩阵

2、 主程序可读取上述定义的参数文件，比如，格式如下：

文件名配置：**density.dat, magnetization.dat**，内含例如下述参数

	density.dat
m1_g	m1_g:密度值
	magnetization.dat
m1_m	m1_m:磁化强度
	Rms_g.txt
	迭代重力反演残差
	Rms_m.txt
	迭代磁力反演残差

说明：本模块的输入参数附有缺省值，用户可以根据实际问题，修改输入参数值。

3.3.2.2 交叉梯度联合反演

这里说明的是一般格式，输入输出按照文件以及其他需要的格式进行输入输出便可。

1、 物性参数：

m1_g: 密度值

m1_m: 磁场强度

2、 主程序可读取上述定义的参数文件，比如，格式如下：

文件名配置：**density.dat, magnetization.dat, vk.dat**，内含例如下述参数

	density.dat
m1_g	m1_g:密度值

magnetization.dat

m1_m

m1_m:磁场强度

Rms_g.txt

迭代重力反演残差

Rms_m.txt

迭代磁力反演残差

说明：本模块的输入参数附有缺省值，用户可以根据实际问题，修改输入参数值。

3.3.2.3 相关分析联合反演

这里说明的是一般格式，输入输出按照文件以及其他需要的格式进行输入输出便可。

1、物性参数：

density: 密度值

magnetization: 磁场强度

2、主程序可读取上述定义的参数文件，比如，格式如下：

density.dat

m1_g

m1_g:密度值

magnetization.dat

m1_m

m1_m:磁场强度

Rms_g.txt

迭代重力反演残差

Rms_m.txt

迭代磁力反演残差

3.3.3 绘图文件

3.3.3.1 重磁异常数据处理模块

表格 3-6 典型的重力数据处理及成图个功能示范

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
from pathlib import Path
from geoist.pfm import normgra
```

```

from geoist import DATA_PATH
# 1. 读取数据
datapath = Path(Path(normgra.__file__).parent, 'data')
filename = Path(datapath, 'ynyx_grav.csv') #'ynyx_grav.csv') #ynp1_grav.csv
gradata = pd.read_csv(filename)
print('1. 重力数据已经读入, 格式为: {}'.format(gradata.keys()))
# 2. 计算 FGA
gradata['freeair'] = normgra.gamma_closed_form(gradata['lat'], gradata['elev'])
gradata['buglayer'] = normgra.bouguer_plate(gradata['elev'])
gradata['FGA'] = gradata['grav'] - gradata['freeair']
gradata['BGA_s'] = gradata['grav'] - gradata['freeair'] - gradata['buglayer']
# 2.1 正常场计算方法不同
#gradata['BGA_s1'] = gradata['grav'] - normgra.gamma_somigliana_free_air(gradata['lat'],
gradata['elev']) - gradata['buglayer']
# 2.2 输出结果
gradata.to_csv(Path(DATA_PATH, 'ynp1_grav_anomaly.csv'), index=False, sep=',')
print('2. 重力异常计算完成, 已保存到: {}'.format(Path(DATA_PATH,
'ynp1_grav_anomaly.csv')))

# 观测数据格网化
# 3.1 投影变换
import pyproj
p_jw = "+proj=longlat +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +no_defs"
p_lcc = "+proj=lcc +lon_0=102.5 +lat_0=24.38 +lat_1=45 +ellps=WGS84 +datum=WGS84
+no_defs"
proj_xy = pyproj.Proj(p_lcc) # projection = pyproj.Proj(proj="merc",
lat_ts=gradata['lat'].mean())
proj_coords = proj_xy(gradata['lon'].values, gradata['lat'].values)
gradata['x'] = proj_coords[0]
gradata['y'] = proj_coords[1]
proj_jw = pyproj.Proj(p_jw) # 目标坐标系统
origin_lon, origin_lat = pyproj.transform(proj_xy, proj_jw, gradata['x'].values,
gradata['y'].values)

# 成图
fig, (ax0, ax1) = plt.subplots(nrows=1, ncols=2, figsize=(12, 6))
ax0.set_title("Locations of gravity anomaly")
ax0.plot(gradata['lon'], gradata['lat'], "ok", markersize=1.5)
ax0.set_xlabel("Longitude")
ax0.set_ylabel("Latitude")
ax0.set_aspect("equal")
ax1.set_title("Projected coordinates of gravity anomaly")
ax1.plot(gradata['x'], gradata['y'], "ok", markersize=1.5)
ax1.set_xlabel("Easting (m)")
ax1.set_ylabel("Northing (m)")
ax1.set_aspect("equal")

```

```
plt.tight_layout()
plt.show()
#3.2 格网化
from geoist.gridder import spline, mask
BGA = spline.Spline().fit(proj_coords, gradata['BGA_s'].values)
res_BGA = gradata['BGA_s'].values - BGA.predict(proj_coords)
grid = BGA.grid(spacing=2e2, data_names=["BGAs"])
print('4. 网格化信息如下: ', grid)
type(grid)
grid1 = mask.distance_mask(proj_coords, maxdist=5e2, grid=grid)
grid1.BGAs.plot.pcolormesh()
#4.去趋势
from geoist.gridder import trend
trend = trend.Trend(degree = 1).fit(proj_coords, gradata['BGA_s'].values)
print('4. 拟合的趋势系数: '.format(trend.coef_))
trend_values = trend.predict(proj_coords)
residuals = gradata['BGA_s'].values - trend_values
resBGA = spline.Spline().fit(proj_coords, residuals)
grid2 = resBGA.grid(spacing=2e2, data_names=["resBGA"])
grid3 = mask.distance_mask(proj_coords, maxdist=5e2, grid=grid2)
plt.figure()
grid3.resBGA.plot.pcolormesh()
#5 解析延拓
from geoist.pfm import pftrans
from geoist.vis import giplt
from geoist.others.utils import Grid2Xyz
x, y ,bgas = Grid2Xyz(grid3)
shape = (grid3.getGeoDict().nx, grid3.getGeoDict().ny)
height = 1000 # How much higher to go
bgas_contf = pftrans.upcontinue(x, y, bgas, shape, height)
args = dict(shape=shape, levels=20, cmap=plt.cm.RdBu_r)
fig, axes = plt.subplots(1, 2, figsize=(10, 5))
axes = axes.ravel()
plt.sca(axes[0])
plt.title("Original")
plt.axis('scaled')
giplt.contourf(x, y, bgas, **args)
plt.colorbar(pad=0).set_label('mGal')
giplt.m2km()
plt.sca(axes[1])
plt.title('Upward continuation 1000m')
plt.axis('scaled')
giplt.contourf(x, y, bgas_contf, **args)
plt.colorbar(pad=0).set_label('mGal')
```

```
giplt.m2km()
fig.tight_layout()
#6 空间导数计算
bgas_dx = pftrans.derivx(x, y, bgas_contf, shape)
bgas_dy = pftrans.derivy(x, y, bgas_contf, shape)
bgas_dz = pftrans.derivz(x, y, bgas_contf, shape)
bgas_tga = pftrans.tga(x, y, bgas_contf, shape)
args = dict(shape=shape, levels=20, cmap=plt.cm.RdBu_r)
fig, axes = plt.subplots(2, 2, figsize=(10, 10))
#画图
plt.sca(axes[0, 0])
plt.title("Derivative of BGA in X")
plt.axis('scaled')
giplt.contourf(x, y, bgas_dx, **args)
plt.colorbar(pad=0).set_label('mGal/m')
giplt.m2km()
plt.sca(axes[0, 1])
plt.title("Derivative of BGA in Y")
plt.axis('scaled')
giplt.contourf(x, y, bgas_dy, **args)
plt.colorbar(pad=0).set_label('mGal/m')
giplt.m2km()
plt.sca(axes[1, 0])
plt.title("Derivative of BGA in Z")
plt.axis('scaled')
giplt.contourf(x, y, bgas_dz, **args)
plt.colorbar(pad=0).set_label('mGal/m')
giplt.m2km()
plt.sca(axes[1, 1])
plt.title("Total gradient amplitude of BGA")
plt.axis('scaled')
giplt.contourf(x, y, bgas_tga, **args)
plt.colorbar(pad=0).set_label('mGal/m')
giplt.m2km()
```

收集如图3-1a所示的重力异常，并进行投影变换得到新坐标系统下的重力

异常图3-1b

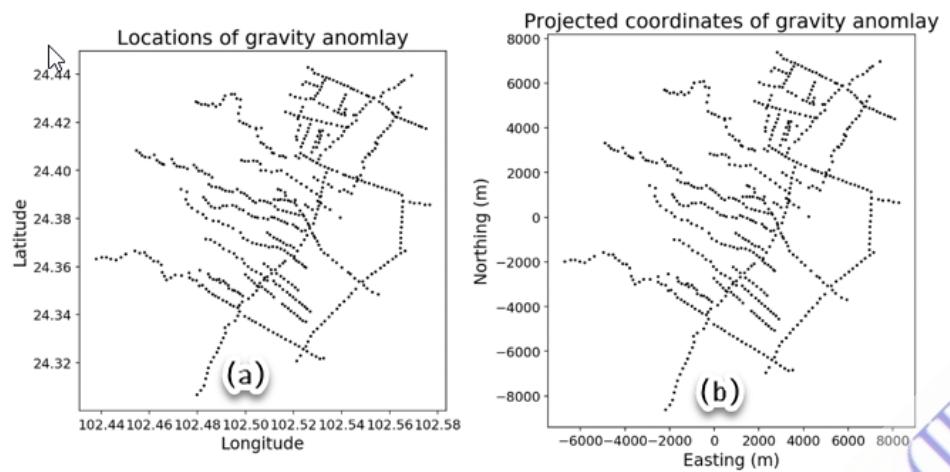


图 3-1 离散点投影变换

数据格网化得到格网化后的异常如图3-2所示

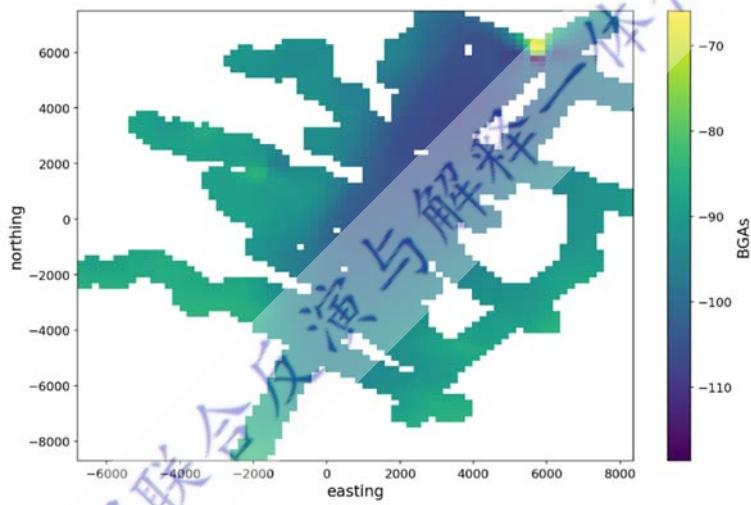


图 3-2 格网化重力异常

重力资料预处理中，经过高度改正、正常场改正得到自由空气异常，再经过地形改正和布格板改正得到布格异常。改正结果如图3-3所示。

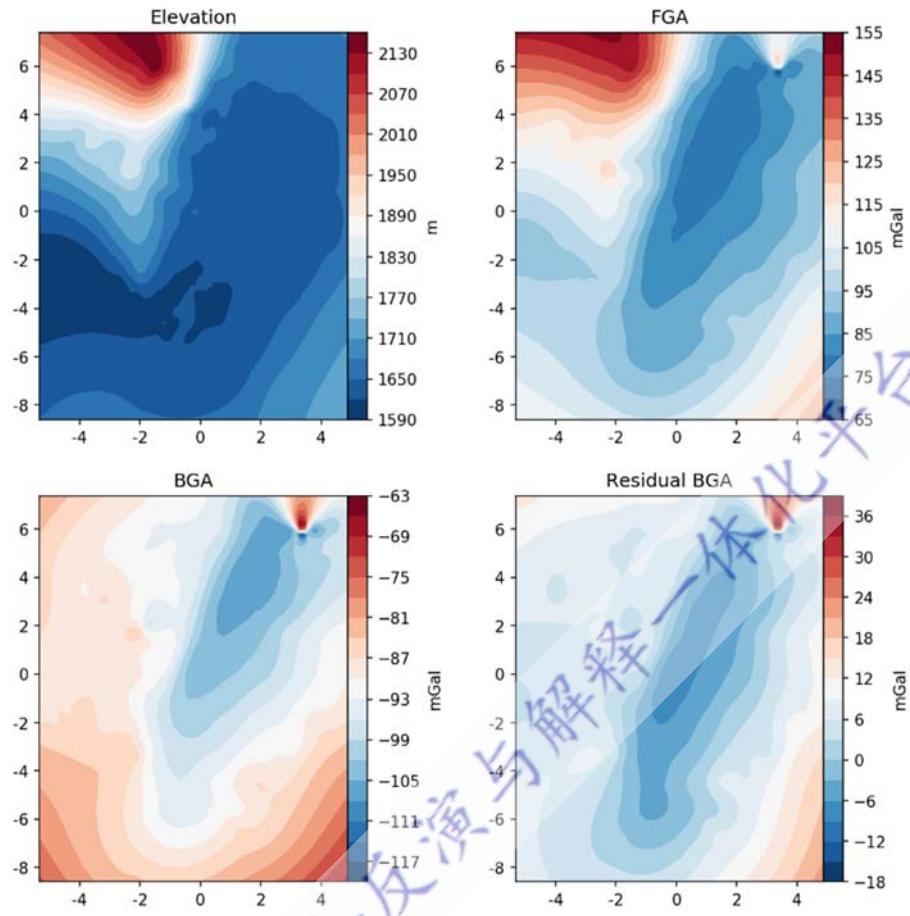


图 3-3 重力异常改正

将上述格网数据进行空间向上延拓1000米，如图 3-4所示

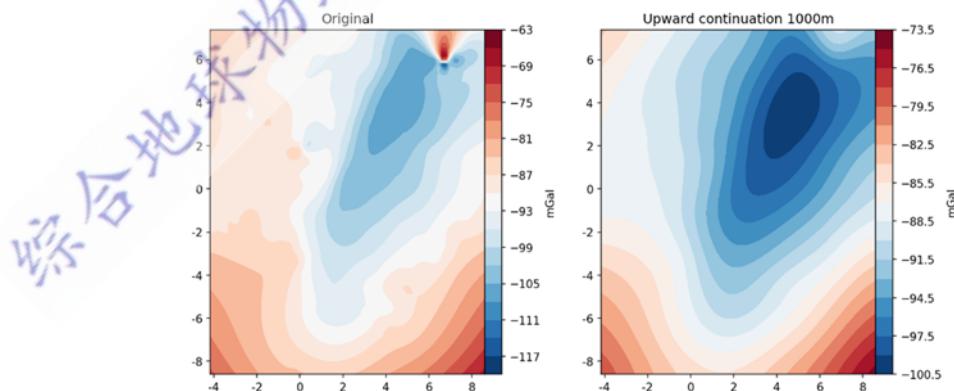


图 3-4 重力异常向上 1000m

同时将BGA异常进行空间导数与解析信号计算，结果为下图。

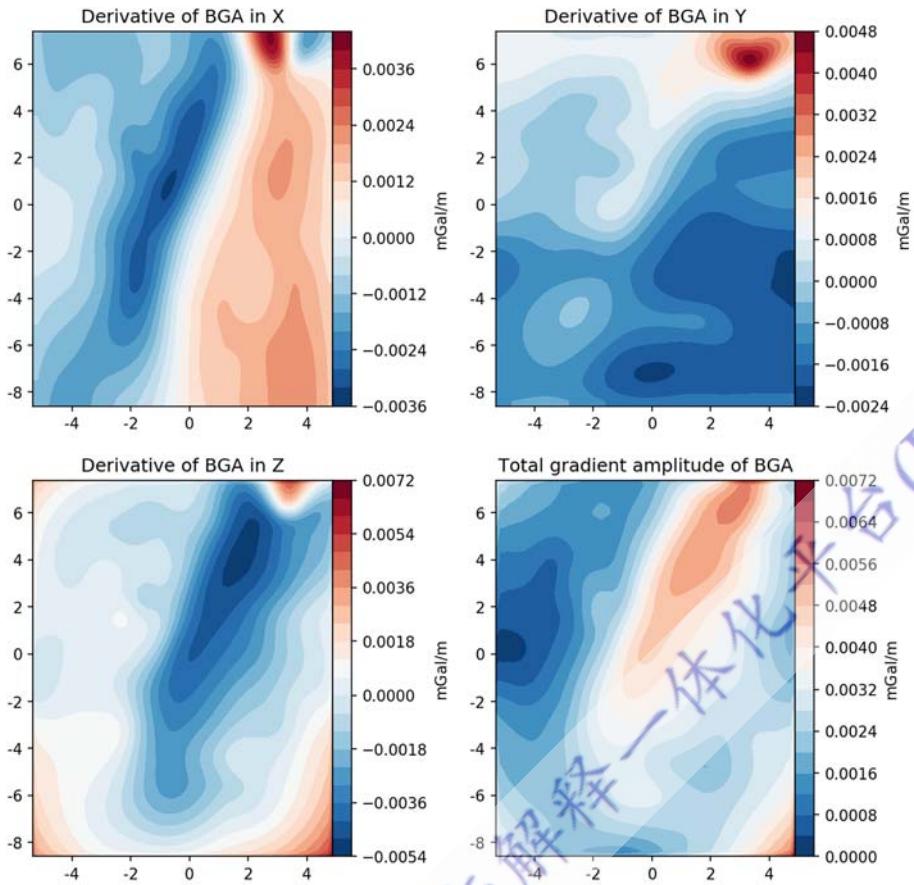


图 3-5 空间导数与解析信号计算结果

产生如图 3-6a 的倾斜磁异常，进行化极处理后得到新的磁异常如图 3c 所示，化极后异常与正演获得的垂向磁异常图 3-1b 相比，异常形态及幅值都得到了很好的恢复。

表格 3-7 典型的磁力数据处理示范

```
#地磁模型计算
import datetime as dt
from geoist.magmod.data import DIFI4
from geoist.magmod.magnetic_model.loader_mio import (
    load_model_swarm_mio_internal,
    load_model_swarm_mio_external)
from geoist.magmod.time_util import decimal_year_to_mjd2000
from geoist.magmod.util import datetime_to_decimal_year
loc = (45.0, 105.0, 1.0)
options = {"f107": 70, "scale": [1, 1, -1]}  # -1 is Z direction
# load DIFI4 model
difi4 = load_model_swarm_mio_external(DIFI4)
difi42 = load_model_swarm_mio_internal(DIFI4)
#get_ipython().run_line_magic('matplotlib', 'inline')
```

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
magdifi = np.zeros(3*24).reshape(24,3)
magdifi2 = np.zeros(3*24).reshape(24,3)
for i in range(24):
    t1 = decimal_year_to_mjd2000(datetime_to_decimal_year(dt.datetime(2019,1,1,i,0,30)))
    magdifi[i] = difi4.eval(t1, loc, 0, 0, **options)
    magdifi2[i] = difi42.eval(t1, loc, 0, 0, **options)
plt.title("DIFI-4 IONOSPHERE MAGNETIC FIELD MODEL")
plt.xlabel("UTC time/h")
plt.ylabel("Sq intensity/nT")
plt.plot(magdifi[:,0],'bo', label = "North-X")
plt.plot(magdifi[:,1],'ro', label = "East-Y")
plt.plot(magdifi[:,2],'go', label = "Vertical-Z")
plt.plot(magdifi[:,0] + magdifi2[:,0],'b', label = "North-X2")
plt.plot(magdifi[:,1] + magdifi2[:,1],'r', label = "East-Y2")
plt.plot(magdifi[:,2] + magdifi2[:,2],'g', label = "Vertical-Z2")
plt.legend()
plt.show()
#磁化极
from geoist.pfm import prism, pftrans
# Reduce to the pole using FFT. Since there is only induced magnetization, the
# magnetization direction (sinc and sdec) is the same as the geomagnetic field
pole = pftrans.reduce_to_pole(x, y, tf, shape, inc, dec, sinc=inc, sdec=dec)
# Calculate the true value at the pole for comparison
true = prism.tf(x, y, z, model, 90, 0, pmag=giutils.ang2vec(10, 90, 0))
fig, axes = plt.subplots(1, 3, figsize=(14, 4))
for ax in axes:
    ax.set_aspect('equal')
plt.sca(axes[0])
plt.title("Original total field anomaly")
giplt.contourf(y, x, tf, shape, 30, cmap=plt.cm.RdBu_r)
plt.colorbar(pad=0).set_label('nT')
giplt.m2km()
plt.sca(axes[1])
plt.title("True value at pole")
giplt.contourf(y, x, true, shape, 30, cmap=plt.cm.RdBu_r)
plt.colorbar(pad=0).set_label('nT')
giplt.m2km()
plt.sca(axes[2])
plt.title("Reduced to the pole")
giplt.contourf(y, x, pole, shape, 30, cmap=plt.cm.RdBu_r)
plt.colorbar(pad=0).set_label('nT')
giplt.m2km()

```

```
plt.tight_layout()  
plt.show()
```

测试化极程序如表格 3-7所示，效果如图9所示

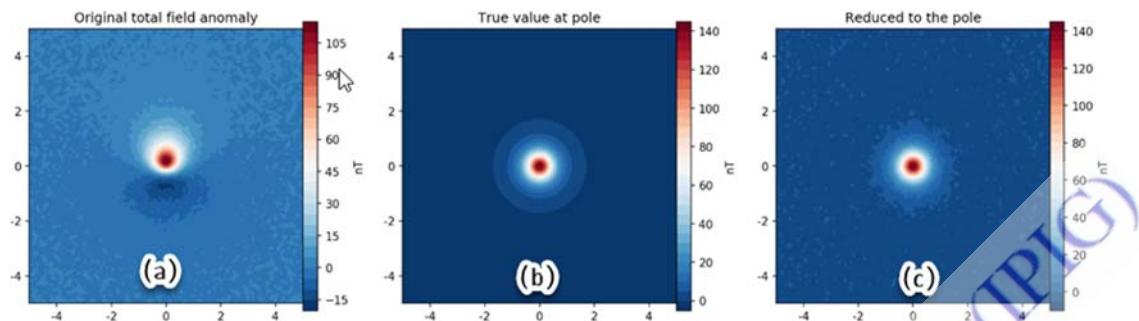


图 3-6 地磁异常化极效果对比

3.3.3.2 三维建模与正演计算模块

在地下三维空间中在一定范围内给定三个直立长方体，其产生的总的重力异常可由下述代码产生。

表格 3-8 典型三维建模及正演计算程序示范

```
import matplotlib.pyplot as plt  
from geoist import gridded  
from geoist.inversion import geometry  
from geoist.pfm import prism  
from geoist.vis import giplt  
  
#模型生成  
model = [geometry.Prism(-4000, -3000, -4000, -3000, 0, 2000, {'density': 1000}),  
         geometry.Prism(-1000, 1000, -1000, 1000, 0, 2000, {'density': -900}),  
         geometry.Prism(2000, 4000, 3000, 4000, 0, 2000, {'density': 1300})]  
shape = (100, 100)  
xp, yp, zp = gridded.regular((-5000, 5000, -5000, 5000), shape, z=-150)  
  
#直立棱柱体正演  
field0 = prism.potential(xp, yp, zp, model)  
fields = [prism.gx(xp, yp, zp, model),  
          prism gy(xp, yp, zp, model),  
          prism.gz(xp, yp, zp, model),  
          prism.gxx(xp, yp, zp, model),  
          prism.gxy(xp, yp, zp, model),  
          prism.gxz(xp, yp, zp, model),  
          prism.gyy(xp, yp, zp, model),  
          prism.gyz(xp, yp, zp, model),  
          prism.gzz(xp, yp, zp, model)]  
  
titles = ['potential', 'gx', 'gy', 'gz',  
          'gxx', 'gxy', 'gxz', 'gyy', 'gyz', 'gzz']
```

```
plt.figure(figsize=(8, 8))
plt.axis('scaled')
plt.title(titles[0])
levels = giplt.contourf(yp * 0.001, xp * 0.001, field0, shape, 15)
cb = plt.colorbar()
giplt.contour(yp * 0.001, xp * 0.001, field0, shape,
              levels, clabel=False, linewidth=0.1)
#球型棱柱体正演
model = [Tesseroid(-60, -55, -30, -27, 0, -500000, props={'density': 200}),
          Tesseroid(-66, -62, -18, -12, 0, -300000, props={'density': -500})]
# Create the computation grid
area = (-80, -30, -40, 10)
shape = (100, 100)
lons, lats, heights = gridded.regular(area, shape, z=250000)
fields = [
    tesseroid.potential(lons, lats, heights, model),
    tesseroid.gx(lons, lats, heights, model),
    tesseroid gy(lons, lats, heights, model),
    tesseroid.gz(lons, lats, heights, model),
    tesseroid.gxx(lons, lats, heights, model),
    tesseroid.gxy(lons, lats, heights, model),
    tesseroid.gxz(lons, lats, heights, model),
    tesseroid.gyy(lons, lats, heights, model),
    tesseroid.gyz(lons, lats, heights, model),
    tesseroid.gzz(lons, lats, heights, model)]
print("Time it took: %s" % (time.time() - start))
#生成模拟数据
from geoist.pfm import giutils
field0 = giutils.contaminate(field0, 0.05, percent = True)
```

程序计算结果如图3-7所示。

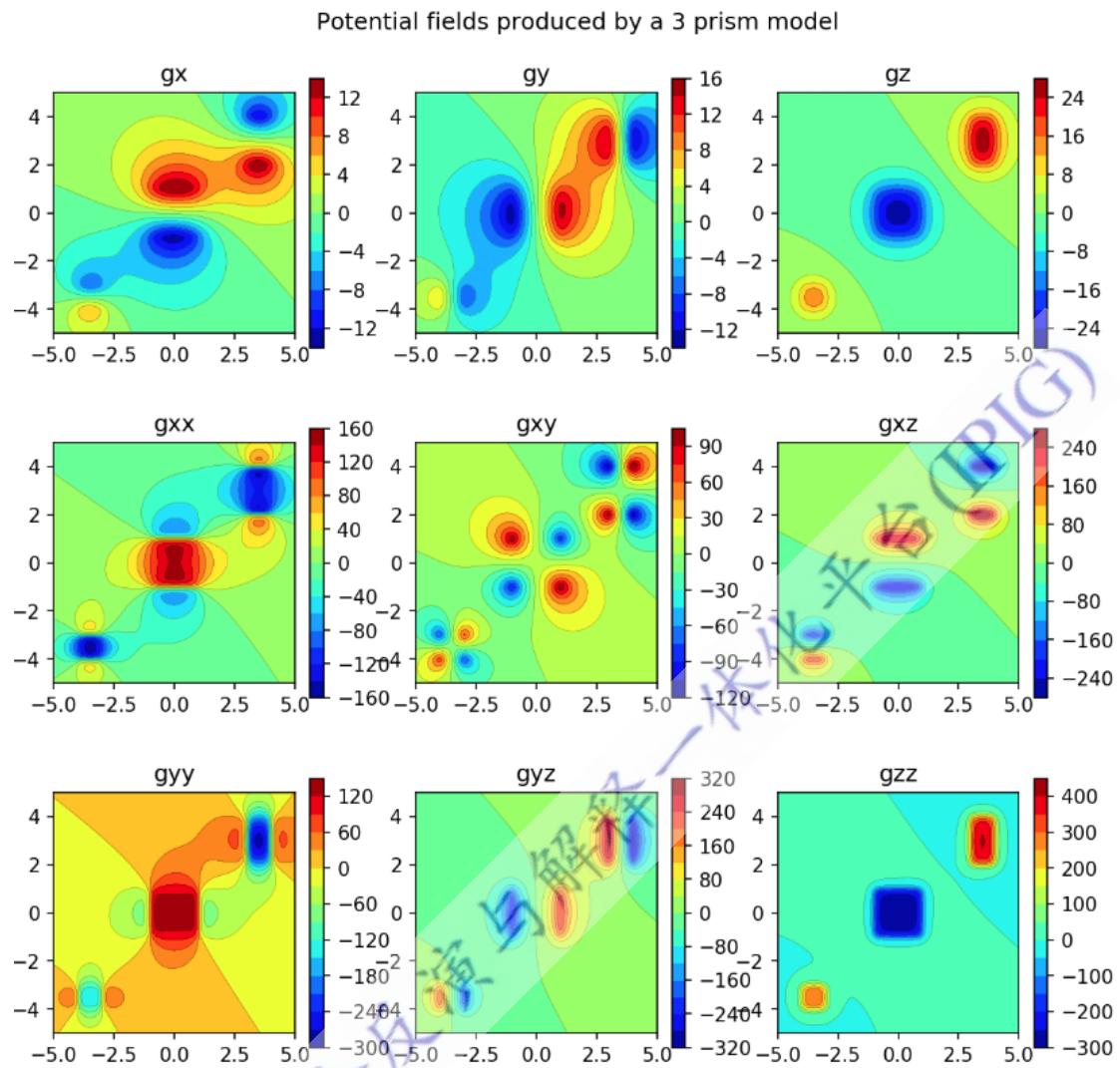


图 3-7 理论重力及重力梯度异常计算结果

3.3.3.3 位场反演与解释模块

通过空间一定埋深的直立长方体对多种约束反演效果进行对比，其实现代码如下表所示，

表格 3-9 典型的重磁位场反演程序及结果评价框架

```
#光滑算子生成
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from geoist import gridded
from geoist.inversion import geometry
from geoist.pfm import prism
from geoist.pfm import giutils
from geoist.inversion.mesh import PrismMesh
from geoist.vis import giplt
from geoist.inversion.regularization import Smoothness,Damping,TotalVariation
```

```

from geoist.inversion.pfmodel import SmoothOperator
from geoist.inversion.hyper_param import LCurve
from geoist.pfm import inv3d

meshfile = r"d:\msh.txt"
densfile = r"d:\den.txt"
#生成场源网格 NS-40km, EW-80km, 500 个单元, z 方向 10 层
area = (-20000, 20000, -40000, 40000, 2000, 32000) #NS EW Down
shape = (10, 20, 5) #nz ny nx
mesh = PrismMesh(area, shape)
density=np.zeros(shape)
density[3:8,9:12,1:4]=1.0 # z x y
mesh.addprop('density', density.ravel())
mesh.dump(meshfile, densfile, 'density') #输出网格到磁盘, MeshTools3D 可视化
#生成核矩阵
kernel=[]
narea = (-28750, 28750,-48750, 48750) #NS, EW
nshape = (30, 40) #NS, EW
depthz = []
xp, yp, zp = gridder.regular(narea, nshape, z=-1)
for i, layer in enumerate(mesh.layers()):
    for j, p in enumerate(layer):
        x1 = mesh.get_layer(i)[j].x1
        x2 = mesh.get_layer(i)[j].x2
        y1 = mesh.get_layer(i)[j].y1
        y2 = mesh.get_layer(i)[j].y2
        z1 = mesh.get_layer(i)[j].z1
        z2 = mesh.get_layer(i)[j].z2
        den = mesh.get_layer(i)[j].props
        model=[geometry.Prism(x1, x2, y1, y2, z1, z2, {'density': 1000.})]
        field= prism.gz(xp, yp, zp, model)
        kernel.append(field)
        depthz.append((z1+z2)/2.0)
kk=np.array(kernel)
kk=np.transpose(kernel) #kernel matrix for inversion, 500 cells * 400 points
field= np.mat(kk)*np.transpose(np.mat(density.ravel()))
smop.SmoothOperatorO
nz.shape[0]
ny.shape[1]
nx.shape[2]
p=np.eye(nz*ny*nx).reshape(-1,nz,ny,nx)
sx= smop.derivation(p,component= 'dx' ),rshape(nz*ny*nx,-1)
sy= smop.derivation(p,component= 'dy' ),rshape(nz*ny*nx,-1)
sz= smop.derivation(p,component= 'dz' ),rshape(nz*ny*nx,-1)

```

```

#反演参数
am=1.0
ax=1.0
ay=1.0
az=1.0
#1.构建正则方程
sm=np.vstack((am*np.eye(nz*ny*nx),az*szT*sy.T,ax*sx.T))
sm = np.vstack((am*np.eye(nz*ny*nx)*wdepth,
                 az*np.dot(sz.T,wdepth),
                 ay*np.dot(sy.T,wdepth),
                 ax*np.dot(sx.T,wdepth)))
regul2 = Smoothness(sm) #np.eye(nz*ny*nx)
sm1 = np.vstack((az*np.dot(sz.T,wdepth),
                  ay*np.dot(sy.T,wdepth),
                  ax*np.dot(sx.T,wdepth)))
regul3 = Smoothness(sm1)

# L1 norm non-linear
regul4 = TotalVariation(0.0001, sm1)
regul = Smoothness(sm)
datamisfit=inv3d.Density3D(np.array(field.T).ravel0,[xp,yp,zp],mesh)
regul_params=[10**iforiinrange(-10,5,1)]
density3d = LCurve(datamisfit, regul4, regul_params, loglog=False)
_density3d.fit() #开始计算
print(density3d.regulparam)
density3d.plotlcurve0
#2.反演异常和残差
predicted = density3d[0].predicted
residuals=density3d[0].residuals0
#3.反演模型输出部分
Densinv=r"d:\ldeninvbxyz.txt"
Values=np.fromiter(density3d.estimate_.dtype=np.float)
Reordered=np.ravel(np.reshape(valued,mesh.shape),order='F')
np.savetxt(densinv,1000.*reordered,fmt='%.8f')

```

多种约束反演效果如图3-8所示，通过测试得出深度加权和全变分的组合可以取得更好的反演效果。

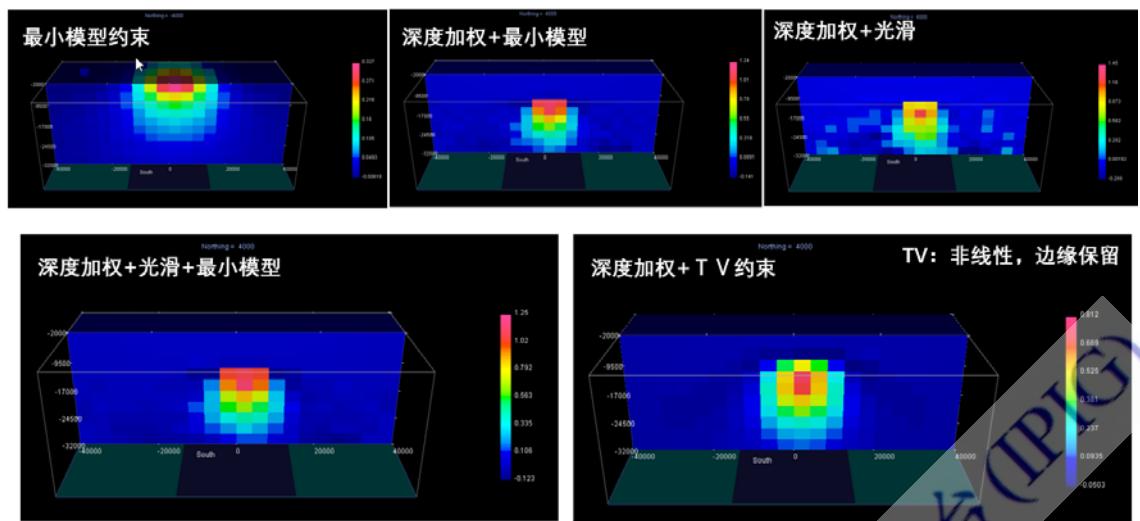


图 3-8 多种约束效果比较

3.3.3.4 重磁联合反演

重磁联合反演结果均是依靠 matlab 中 `contourf`、`slice` 两个函数画出重磁反演结果的切片图。

3.3.3.5 典型矿集区正反演

以湖南坪宝矿区建模及正反演为例说明程序正反演运行。首先，收集湖南坪宝矿区地质认识资料。

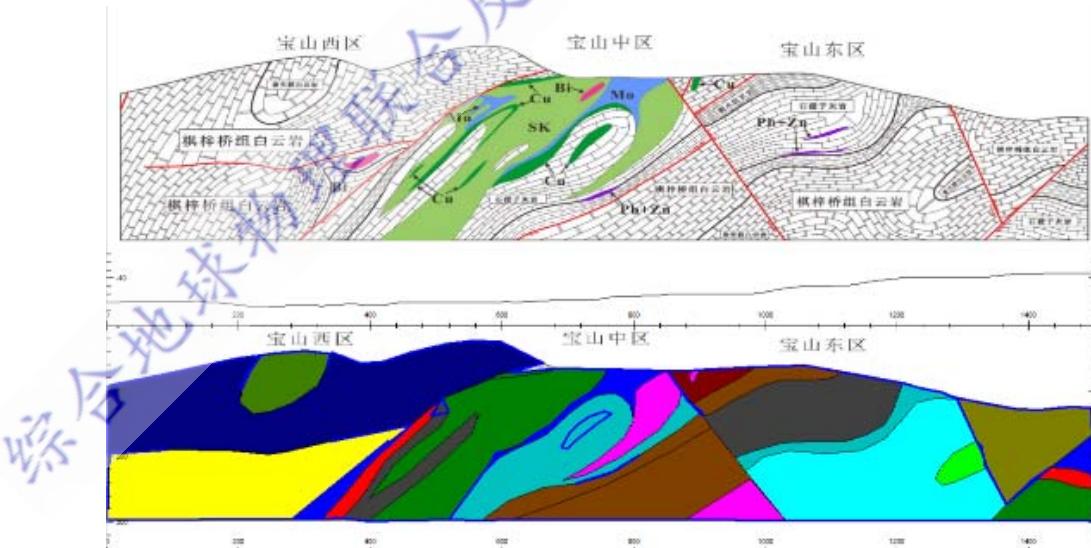


图 3-9 坪宝矿区已有地质认识

完成坪宝矿集区三维矿区地质模型建立

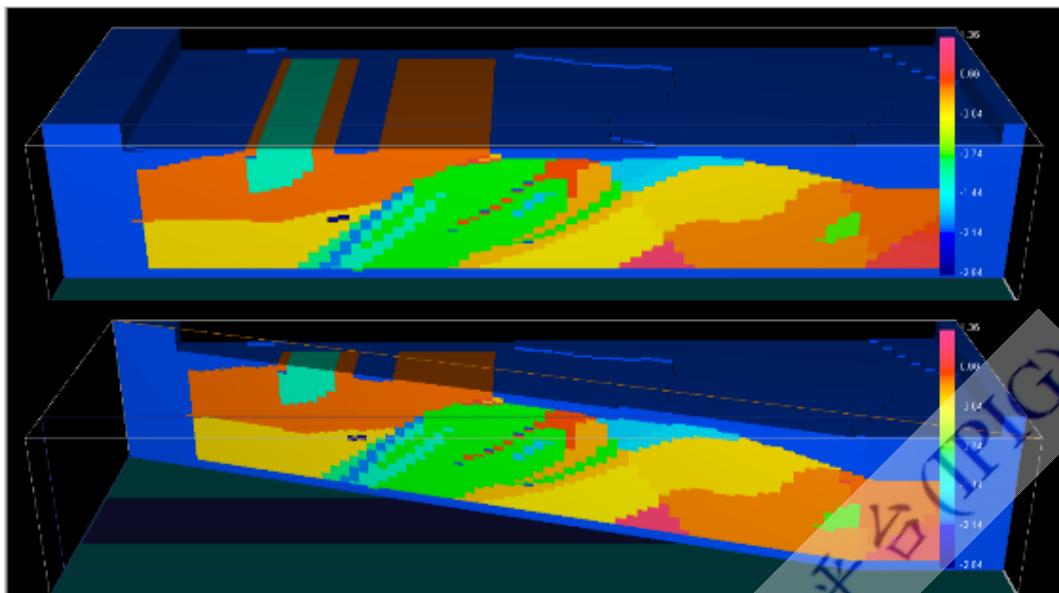


图 3-10 坪宝矿区三维模型建立
模型文件数据说明如表所示

表格 3-10 模型文件

类型	名称	范围 [xmin,xmax;ymin,ymax;zmin,zmax]	格网数 nx×ny×nz	查看方式
格网划分	msh2.txt	[-200,200; -600,600;0,600]	1×120×100	MeshTools3d
密度	den2.txt	[-200,200; -600,600;0,600]	1×120×100	MeshTools3d
磁化率	mag2.txt	[-200,200; -600,600;0,600]	1×120×100	MeshTools3d
密度剖面	rho2.bin	[-600,600;0,600]	1200×600	readmod.m
重采样剖面	rho2.mat	[-600,600;0,600]	120×100	matlab

备注：磁倾角30°,偏角-4°；密度值范围约0-2400kg/m³；磁化率异常值范围约：2-40 nT

正演文件数据说明如表所示

表格 3-11 坪宝矿区正演数据文件

类型	名称	范围 [xmin,xmax;ymin,ymax]	格网数 nx×ny	噪声水平	查看方式
重力	gra2.dat	[-500,500; -1000,1000]	20×40	-	gm-data-viewer
重力	gra2n.dat	[-500,500; -1000,1000]	20×40	+%5 高斯	gm-data-viewer

磁力	mag2.dat	[-500,500; -1000,1000]	20×40	-	gm-data-viewer
磁力	mag2n.dat	[-500,500; -1000,1000]	20×40	+%5 高斯	gm-data-viewer

根据正演数据参数及文件，通过代码实现矿区仿真模型正演

表格 3-12 典型矿区建模及正演程序应用示范

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from geoist import gridded
from geoist.inversion import geometry
from geoist.pfm import prism, giutils
from geoist.inversion.mesh import PrismMesh
from geoist.vis import giplt
fname1 = "~~\重磁重点研发公共模型\模型\rho1.mat"
data1=sio.loadmat(fname1)
rho10 = data1['data_dens']
rho1 = rho10[::7,::10]
maglist = [12.0, 5.0, 2.0, 6.0]
mag1 = rho1.copy()
for i, di in enumerate(set(rho1.ravel())):
    print(di, maglist[i])
    mag1[rho1 == di] = maglist[i]
plt.figure()
plt.imshow(rho1)
plt.figure()
plt.imshow(mag1)
meshfile = r"d:\msh1.txt"
densfile = r"d:\den1.txt"
magfile = r"d:\mag1.txt"
graoutfile = r"d:\gra1.dat"
magoutfile = r"d:\mag1.dat"
graoutfile1 = r"d:\gra1n.dat"
magoutfile1 = r"d:\mag1n.dat"
area = (-100, 100, -750, 750, 0, 700) #x y z
shape = (100, 150, 1) # z y x
mesh = PrismMesh(area, shape)
mesh.addprop('density', 1000.*rho1.ravel()-2529.99997)
mesh.addprop('magnetization', mag1.ravel())
mesh.dump(meshfile, densfile, 'density')
mesh.dump(meshfile, magfile, 'magnetization') #输出网格到磁盘 MeshTools3D 可视化
##生成核矩阵
kernel=[]
narea = (-500, 500, -1000, 1000) #y x
nshape = (20, 40)

```

```

xp, yp, zp = gridded.regular(narea, nshape, z=-1)
prisms=[]
for p in mesh:
    prisms.append(p)
print('kernel')
inc, dec = 30, -4
kernelgz = prism.gz_kernel(xp, yp, zp, prisms)
for i, layer in enumerate(mesh.layers()):
    for j, p in enumerate(layer):
        x1 = mesh.get_layer(i)[j].x1
        x2 = mesh.get_layer(i)[j].x2
        y1 = mesh.get_layer(i)[j].y1
        y2 = mesh.get_layer(i)[j].y2
        z1 = mesh.get_layer(i)[j].z1
        z2 = mesh.get_layer(i)[j].z2
        den = mesh.get_layer(i)[j].props
        model=[geometry.Prism(x1, x2, y1, y2, z1, z2,
                               {'magnetization': giutils.ang2vec(1, inc, dec)}]
        field = prism.tf(xp, yp, zp, model, inc, dec)
        kernel.append(field)

kk=np.transpose(kernel) #kernel matrix for inversion, 500 cells * 400 points
field_mag=np.mat(kk)*np.transpose(np.mat(mag1.ravel()))
field_gra=np.mat(kernelgz)*np.transpose(np.mat(rho1.ravel()))
field_mag1 = giutils.contaminate(np.array(field_mag).ravel(), 0.05, percent = True)
field_gra1 = giutils.contaminate(np.array(field_gra).ravel(), 0.05, percent = True)
#保存正演异常
with open(graoutfile, 'w') as f:
    f.write('! model 1 gravity anomlay (mGal)\n')
    f.write('{}\n'.format(len(field_gra)))
    for i in range(len(field_gra)):
        f.write('{} {} {} {}\n'.format(yp[i],xp[i],zp[i],np.array(field_gra[i]).ravel()[0]))

with open(magoutfile, 'w') as f:
    f.write('! model 1 magtotal-field magnetic anomaly (nT)\n')
    f.write('{}\n'.format(len(field_mag)))
    for i in range(len(field_mag)):
        f.write('{} {} {} {}\n'.format(yp[i],xp[i],zp[i],np.array(field_mag[i]).ravel()[0]))

with open(graoutfile1, 'w') as f:
    f.write('! model 1 gravity anomlay (mGal) with 5% noise\n')
    f.write('{}\n'.format(len(field_gra1)))
    for i in range(len(field_gra1)):
        f.write('{} {} {} {}\n'.format(yp[i],xp[i],zp[i],np.array(field_gra1[i]).ravel()[0]))

```

```

with open(magoutfile1, 'w') as f:
    f.write('! model 1 magtotal-field magnetic anomaly (nT) with 5% noise\n')
    f.write('{}\n'.format(len(field_mag1)))
    for i in range(len(field_mag1)):
        f.write('{} {} {} {}\n'.format(yp[i],xp[i],zp[i],np.array(field_mag1[i]).ravel()[0]))
#画图
plt.figure(figsize=(16, 16))
plt.subplot(2, 2, 1)
plt.axis('scaled')
plt.title('model 1 gravity anomlay (mGal)')
levels = giplt.contourf(yp , xp , field_gra, nshape, 15)
cb = plt.colorbar(orientation='horizontal')
giplt.contour(yp, xp, field_gra,
              levels, clabel=False, linewidth=0.1)
plt.subplot(2, 2, 2)
plt.axis('scaled')
plt.title('model 1 magtotal-field magnetic anomaly (nT)')
levels = giplt.contourf(yp , xp , field_mag, nshape, 15)
cb = plt.colorbar(orientation='horizontal')
giplt.contour(yp, xp, field_mag,
              levels, clabel=False, linewidth=0.1)
plt.subplot(2, 2, 3)
plt.axis('scaled')
plt.title('model 1 gravity anomlay (mGal) with 5% noise')
levels = giplt.contourf(yp , xp , field_gra1, nshape, 15)
cb = plt.colorbar(orientation='horizontal')
giplt.contour(yp, xp, field_gra1,
              levels, clabel=False, linewidth=0.1)
plt.subplot(2, 2, 4)
plt.axis('scaled')
plt.title('model 1 magtotal-field magnetic anomaly (nT) with 5% noise')
levels = giplt.contourf(yp , xp , field_mag1, nshape, 15)
cb = plt.colorbar(orientation='horizontal')
giplt.contour(yp, xp, field_mag1,
              levels, clabel=False, linewidth=0.1)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

正演获得的重力及磁异常可由gm-data-viewe软件查看，数据排列格式按照ZXY顺序排列。

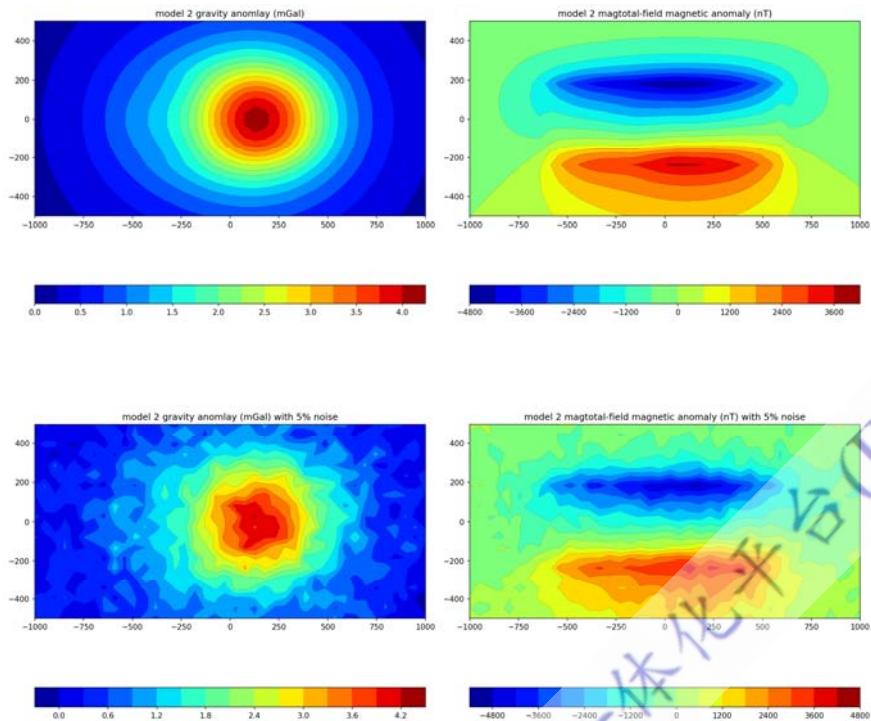


图 3-11 沃溪金锑钨矿矿区模型正演重磁异常

接着，对上述加入噪声的正演数据进行多约束正则化反演，实现代码如表 10所示，通过代码，可以看出我们的程序模块可以很好的实现反演参数优化（图 3-12）、多约束反演（图3-13）及反演结果评价（图 3-14）。

表格 3-13 典型矿区建模及反演及结果评价程序应用示范

```

smop = SmoothOperator()
nz = shape[0]
ny = shape[1]
nx = shape[2]
p = np.eye(nz*ny*nx).reshape(-1,nz,ny,nx)
sx = smop.derivation(p, component = 'dx').reshape(nz*ny*nx,-1)
sy = smop.derivation(p, component = 'dy').reshape(nz*ny*nx,-1)
sz = smop.derivation(p, component = 'dz').reshape(nz*ny*nx,-1)
am = 1000.0
ax = 300.0
ay = 300.0
az = 300.0
z0 = 10000
beta = 1.0 #1.0
regul0 = Damping(nz*ny*nx)

wdepth = np.diag(1./np.array(depthz)+z0)**beta
sm0 = am*np.eye(nz*ny*nx)*wdepth
regul1 = Smoothness(sm0)

```

```

sm = np.vstack((am*np.eye(nz*ny*nx)*wdepth,
                 az*np.dot(sz.T,wdepth),
                 ay*np.dot(sy.T,wdepth),
                 ax*np.dot(sx.T,wdepth)))
regul2 = Smoothness(sm) #np.eye(nz*ny*nx)

sm1 = np.vstack((az*np.dot(sz.T,wdepth),
                  ay*np.dot(sy.T,wdepth),
                  ax*np.dot(sx.T,wdepth)))
regul3 = Smoothness(sm1)
# L1 norm non-linear
regul4 = TotalVariation(0.0001, sm1)

#regul = Damping(nz*ny*nx)
datamisfit = inv3d.Density3D(np.array(field.T).ravel(), [xp, yp, zp], mesh
                             , movemean = False)
# 观测数据权
#weights = np.ones(datamisfit.nparams)
#datamisfit.set_weights(weights)
regul_params = [10**i for i in range(-5, 2, 1)]
# 目标函数
density3d = LCurve(datamisfit, regul4, regul_params, loglog=False)

initial = np.zeros(nz*ny*nx) #np.ones(datamisfit.nparams)
minval = initial
maxval = initial + 1.0
bounds = list(zip(minval, maxval))
x0 = initial + 1.0
#_= density3d.config('tcbound', bounds = bounds, nparams = datamisfit.nparams, x0 =
x0).fit()
#_= density3d.fit()
#solver.config('levmarq', initial=initial).fit()
_= density3d.config('levmarq', initial=np.ones(datamisfit.nparams), maxit=100, maxsteps=100,
tol=10**-4).fit()
print('Hyperparameter Lambda value is {}'.format(density3d.regul_param_))
density3d.plot_lcurve()

#结果评价
predicted = density3d[0].predicted()
residuals = density3d[0].residuals()

```

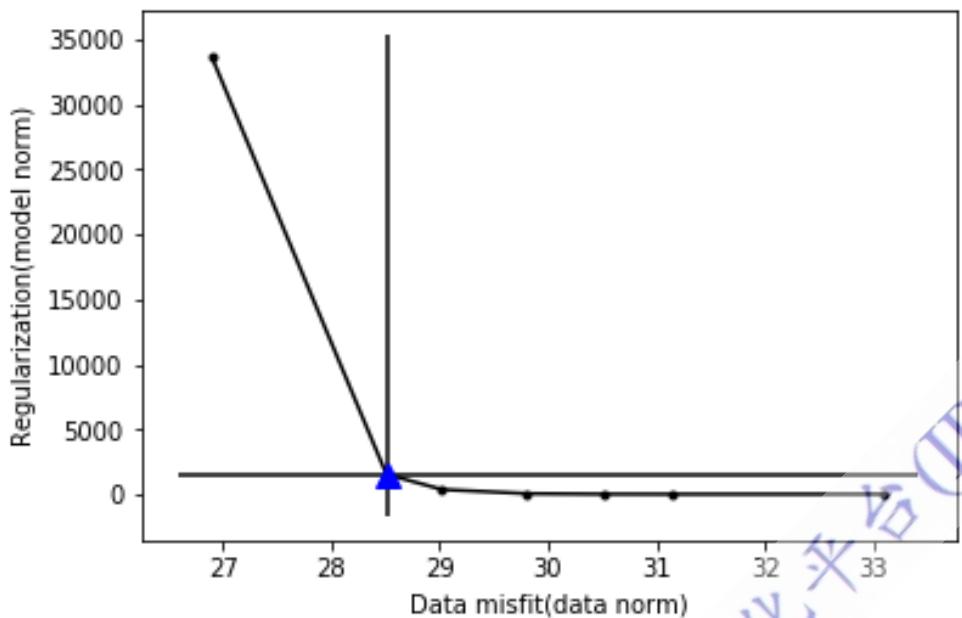


图 3-12 沃溪金锑钨矿区仿真反演 L 曲线

基于上述阻尼系数得到的反演结果如图3-13

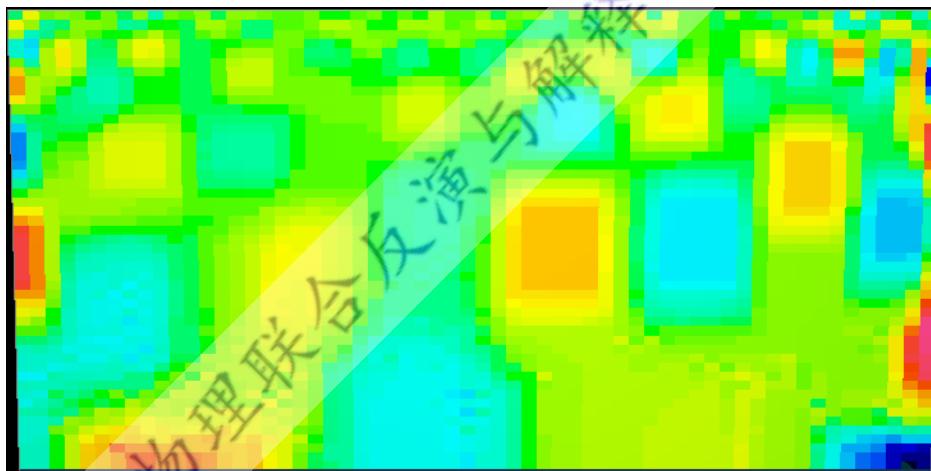


图 3-13 沃溪金锑钨矿区反演结果

反演结果正演理论异常及残差如图 3-14所示。

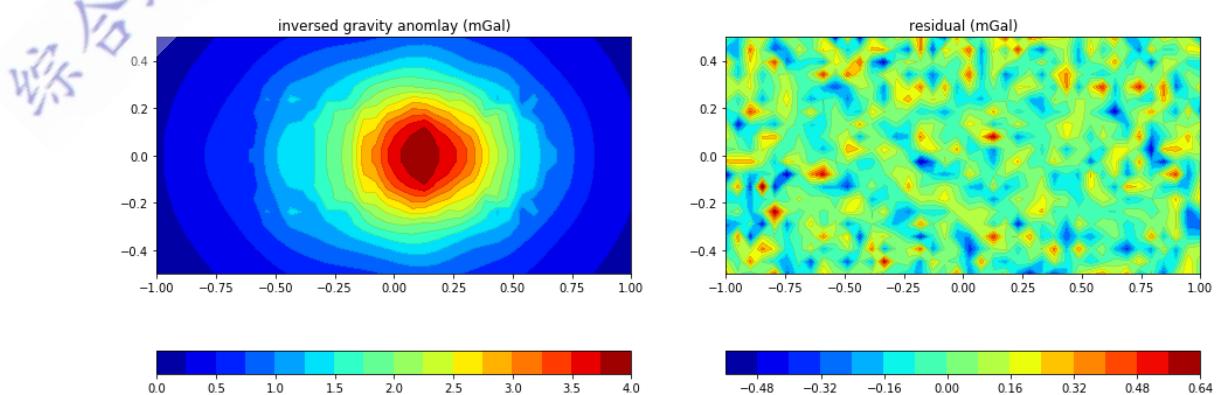


图 3-14 沃溪金锑钨矿区反演结果正演理论异常及残差

3.3.4 运行说明

重磁联合反演部分：

编译命令： pgfortran -acc -mp main_function.f90 （主函数）

执行命令： ./a.out

其中，重磁贝叶斯联合反演部分正在开发：

一般的 Matlab 或 python 编译执行命令即可

第4章 电磁联合反演

4.1 前言

深部找矿技术在近几年迅速发展，人们变得更多的关注地表下面 1000 米至 3000 米范围内的矿体分布，特别是近些年电磁探勘方法的发展和找矿理论的不断完善，为我国深部找矿提供了更加有力的条件，使得深部找矿技术能迅速发展。

电磁探测方法对金属矿体有着较高的响应灵敏度，同时具有探测范围广、深度大的优点，因此成为勘探金属矿体空间分布形态最主要的方法之一。但因不同的电磁类方法具有不同的勘探深度、分辨能力、信噪比及适用范围等技术特征，采用单一电磁类方法难以准确刻画金属矿体的空间形态，同时也难以适用于深度变化范围较大的勘探区域。

针对这些问题，本课题拟开展多尺度、多模态电磁数据的联合反演技术研究。综合利用时间域瞬变电磁法、时间域航空电磁法、频率域可控源电磁法、频率域大地电磁法的优势，建立多参数联合目标函数，共同约束地下地层的电性结构，达到对地层电性结构更准确的测量，以更高的精度刻画金属矿体的空间展布形态。

本模块主要包含多种电磁探测数据频域联合反演方法与技术和时间域与频率域联合反演两部分内容。目前已经打包的镜像主要实现正演功能，其反演程序还在进一步调试优化中。

4.2 镜像说明

4.2.1 多种电磁探测数据频域联合反演方法与技术（正演部分）

软件保存在镜像中的路径：/opt/xmufwd

```
root@044502e8acf2:/opt/xmufwd# ls  
3D_GDR 3D_SEM Model_1 Model_2 Model_3 test
```

路径下共有两个软件：3D_SEM 和 3D_GRD，其中 3D_SEM 为混合谱元法

软件，包含正演计算与后处理软件。3D_GRD 为后处理软件。

三个模型文件夹：Model_1、Model_2 和 Model_3，每个文件夹下有对应的网格剖分文件（.e 结尾的文件）、模型输入文件（.inp 结尾的文件）、观察点数量与位置文件（Receivers.txt）等输入文件，还有软件运行的输出文件：模型输出文件（Output_XX.xx）以及全局结果输出文件（SEM_data_all.bin）以及观察点场输出文件（Receiver_Edata.txt 和 Receiver_Hdata.txt）等。

Test 文件夹下为示例模型，该模型比较小，计算速度快，文件格式与 Model_1 中一致。

4.2.2 时间域与频率域电磁联合反演（正演部分）

本镜像基于 Docker 技术打包正、反演执行程序。目前作为配合系统集成的例子，已经打包了时间域瞬变电磁正演、频率域可控源电磁正演等两种程序。其他反演程序在进一步优化、调试中。为在 Linux 系统下使用本 Docker 镜像，应首先使用下述命令解压并加载镜像：

```
docker load -i xxx.tar
```

其中 xxx 为镜像名。

作为例子，我们给出了三个地质模型的输入文件。需要指出，以 w 为后缀的文件表示包含低阻异常体的异常体模型的相关输入文件和计算输出结果（如 mod1w.xxx）；而以 wo 为后缀的文件表示不包含低阻异常体的背景模型的相关输入文件和计算输出结果（如 mod1w.xxx）。

4.3 软件的使用说明

4.3.1 输入说明（必要包括参数，网格）

4.3.1.1 基于频率域谱元法/混合谱元法的正演软件

这里我们以模型 1 为例介绍软件输入说明，在 Model_1 文件夹下有三个输入文件，其中模型文件的网格文件 Model_1.e 为采用 CUBIT 软件剖分导出的网格文件，如何使用 CUBIT 剖分网格并导出文件，这里不做介绍。其外还有输入的模型文件 Model_1.inp，以及根据输出需要的观察点数量与位置的文件 Receivers.txt。下面将介绍这两个文件的格式与定义：

(1) 模型文件说明

序号	.inp 模型文件	说明	是否可调与建议
1	// SEM order Nth = 2	谱元法或混合谱元法基函数的阶数	可调范围 (1-11) 同一模型, 阶数越高, 自由度越大
2	// Physical field // H_field or E_field EM_field = H_field	求解的物理场类型, 仅限于采用 SEM 方法上有效, 如果需要需要采用 Mixed_SEM 方法 (即 Flag_Mixed_SEM = true, 下文有参数设置) 需要设置为 H 场, 可在后处理模块中求得 E 场。	可根据需要选择 E_field 或 H_field
3	// Read mesh file // 1. cubit mesh: *.g *.e *.exo // 2. wct mesh: Mesh_filename = WCT Mesh_filename = Model_1.e	读取网格文件, 支持 cubit 剖分的网格和 WCT 输出的网格格式。该文件需要与模型文件放在同一个文件夹中, 支持 2D 和 3D 网格输入, 如果是 2D 网格文件, 软件会根据本表 4 中的设置拉伸为 3D 网格。	不同的模型选择对应的网格文件
4	// Sweep 2D mesh to 3D flag_sweep_mesh = true mesh_sweep_distance = 200 mesh_sweep_elems = 8	把 2D 网格拉伸成 3D 网格, 如果不需要则把 flag_sweep_mesh 设置成 false; mesh_sweep_distance 为需要拉伸的长度, 单位为米; mesh_sweep_elems 为拉伸的长度需要剖分的网格数。	根据需要选择与设置
5	// Mixed SEM method Flag_Mixed_SEM = true	计算方法选择, 如果设置成 true, 则采用混合谱元法(Mixed_SEM); fasle 则为谱元法(SEM)。	可选择 true 或 false
6	// Solve EM field model,if false, then save Matrix A and b Flag_solver = true	是否需要求解, true 则为求解, 如果是 false 则为保存系统矩阵 A	可选择 true 或 false

		和右端项 b	
7	//ture, matrix A is double precision //false, matrix A is single precision Flag_save_double = false	如果 6 中为 false 即不求解保存矩阵 A，则可选择单精度或是双精度保存。	可选择 true 或 false
8	//true, calculate scatter field //false, calculate total field flag_Layer_scatter_model = false	计算总场或是散射场，选择 true 则为计算散射场，否则计算总场	可选择 true 或 false
9	// The number of sources Nsources = 3	发射源数量，以及是否同时工作。如果 Nsources >1, Flag_source_multi_rhs 为 true，则表示不同发射源不同时工作，false 则为同时工作，只有一个右端项。	发射源数量可为任意整数
10	// true, multiple right hand side // false, only one right hand side Flag_source_multi_rhs = true	多源是否同时工作，如果同时工作则选择 false. 不同时工作选择 true	可选择 true 或 false。
11	// source position Src_position_x = 300 200 300 Src_position_y = 75 100 125 Src_position_z = 30 20 30	源的位置，如果有多个源，则直接在后面添加并以空格隔开。比如 9 中设置 3 个源，源的位置需要这样设置。	根据需要设置，但是坐标需要在计算区域内。
12	//Dipole polar direction Polarization_x = 1 1 0 Polarization_y = 1 0 0 Polarization_z = 1 0 1	源的极化方向以及幅值大小，如果有多个源，同源位置一样在后面直接添加并以空格隔开，如有三个源，则需要这样设置。	根据需要可修改。
13	Amplitude = 5 7 8	源的幅值大小，同样多源情况下，需要用空格隔开	根据需要修改。
14	// 0: electric dipole // 1: magnetic dipole Dipole_type = 0	目前本软件只支持偶极子源计算，如果采用混合谱元法，则需要选择电偶极子	选择 0 或 1
15	Freq = 5000.0	频率设置，单位为赫兹，混合谱元法下支持极低频工作	频率大于 0。

16	<pre>// save Efield or Hfield to disk // Note: matlab to read field data flag_save_all_field = true</pre>	保存计算区域内的所有计算结果到硬盘，便于后处理软件 3D_GRD 软件提取计算区域内任何位置感兴趣的电磁场。输出文件名为 SEM_data_all.bin	可选择 true 或 false。
17	<pre>// Boundary condition // BCs: PML, PEC, PMC, ABC flag_xmin_bc = PML flag_xmax_bc = PML flag_ymin_bc = PML flag_ymax_bc = PML flag_zmin_bc = PML flag_zmax_bc = PML</pre>	边界条件设置，支持 PML, PEC, PMC, ABC 等边界条件。混合谱元法下只支持 PML 边界条件。	根据需要选择 PML, PEC, PMC, ABC 等边界条件
18	<pre>// PML elements PML_thickness = 600</pre>	PML 厚度设置，单位米	根据需要设置
19	<pre>PML_elements_xmin = 5 PML_elements_xmax = 5 PML_elements_ymin = 5 PML_elements_ymax = 5 PML_elements_zmin = 5 PML_elements_zmax = 5</pre>	PML 厚度需要剖分的网格数设置	根据需要设置
20	<pre>// PML coefficient PML_polynomial = 1 PML_damping = 5 PML_real_part = 0</pre>	PML 系数设置	根据需要可修改
21	<pre>// The numbers of materials in mesh Nmat = 14</pre>	材料数量设置，即对应 cubit 网格文件里的 block 的数量。	根据实际模型修改。
22	<pre>epsilon_r = 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1</pre>	电磁参数填充，有多少种材料则需要多少行参数 epsilon_r、sigma_e、mu_r 和 sigma_m 分别表示材料的 ϵ 、 σ_e 、 μ 和 σ_m ，每行有个参数，表示张量输入，即支持各项异性材料，参数输入中不支持 table 键输入。	根据实际模型修改。

	1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1	
--	--	--

(2) Receivers.txt 文件说明

第一行为接收点的数量，第二行开始是对应接收点的三维坐标，用逗号或空格隔开，不支持 table 键分隔符。



```

64
0.9,0.9,1.9
0.3,0.9,1.9
-0.3,0.9,1.9
-0.9,0.9,1.9
0.9,0.3,1.9
0.3,0.3,1.9
-0.3,0.3,1.9
-0.9,0.3,1.9
0.9,-0.3,1.9

```

图 4-1 Receivers.txt 格式

(3)3D_GRD 软件的使用说明

3D_GRD 为后处理软件，主要是 3D_SEM 软件的补充，无需重新计算就可以获得其他任意位置的场，同样需要有两个输入参数，分别为路径和接收点信息文件，软件在路径文件夹下获取全区域场数据（SEM_data_all.bin）和接收点文件，接收点文件的文件名可以任意，但是格式必须和上面的（2）一致，并以 txt 为后缀名。软件执行格式如下：

```
./3D_GRD Model_1 test.txt
```

软件有两个输出文件，分别是接收点的电场数据 Receiver_Edata.txt 和磁场数据 Receiver_Hdata.txt，保存在路径文件夹下。如果有多个右端项，则按右端项顺序依次保存场数据。

(4)三个模型文件夹下网格文件说明

三个模型均是 2D 网格文件，通过软件自带的拉伸功能拉伸为 3D 网格并计算。

① Model_1 下网格文件说明

Model_1 文件夹下包含模型 1 的两个网格文件，分别为 Model_1.e 和

Model_1_ref.e, 两个文件, 尺寸是 700 米* 1500 米, Model_1_ref.e 对模型 1 的细长矿体做了加密处理, 具体见图 4-2 和图 4-3。

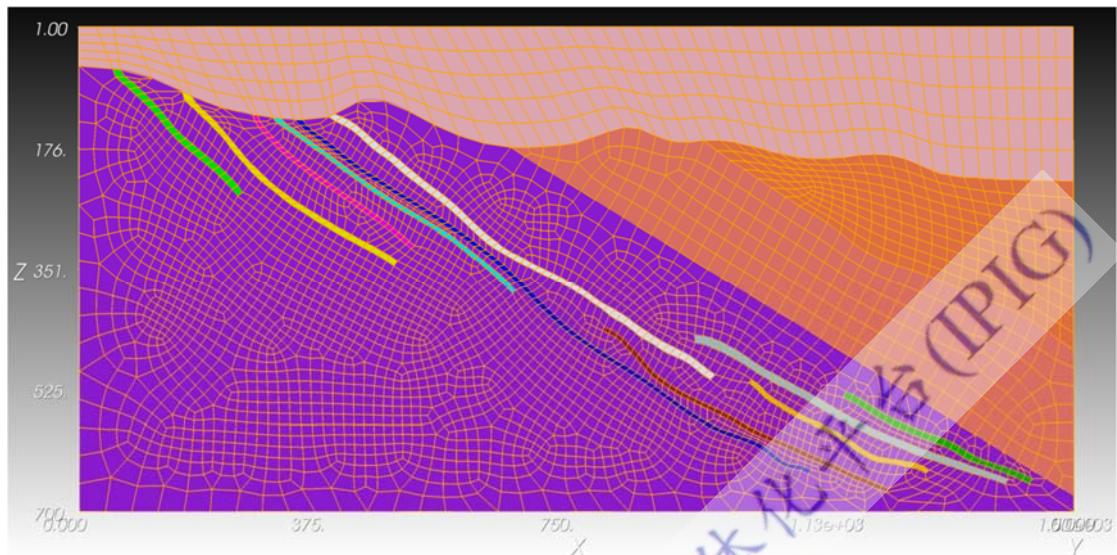


图 4-2 Model_1.e

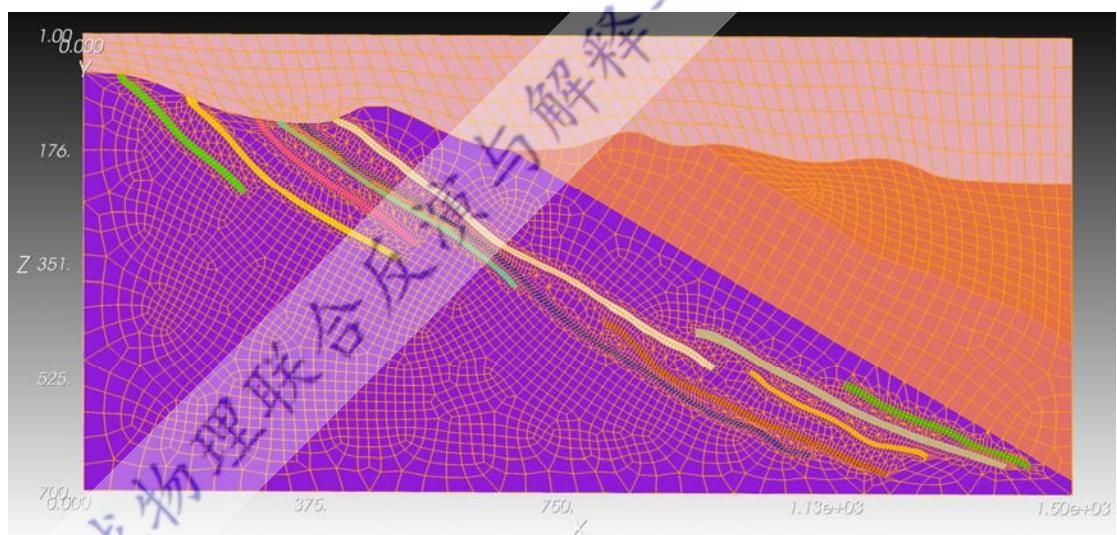


图 4-3 Model_1_ref.e

② Model_2 下网格文件说明

Model_2 文件夹下包含模型 2 的两个网格文件, 分别为 M2S1.e 和 M2S3.e, 两个文件网格一样, 但是尺寸不一样, M2S1.e 的尺寸是 600 米* 1200 米, M2S3.e 是 M2S1.e 尺度放大版本, 尺寸为 1800 米* 3600 米, 具体见图 4-4 和图 4-5。

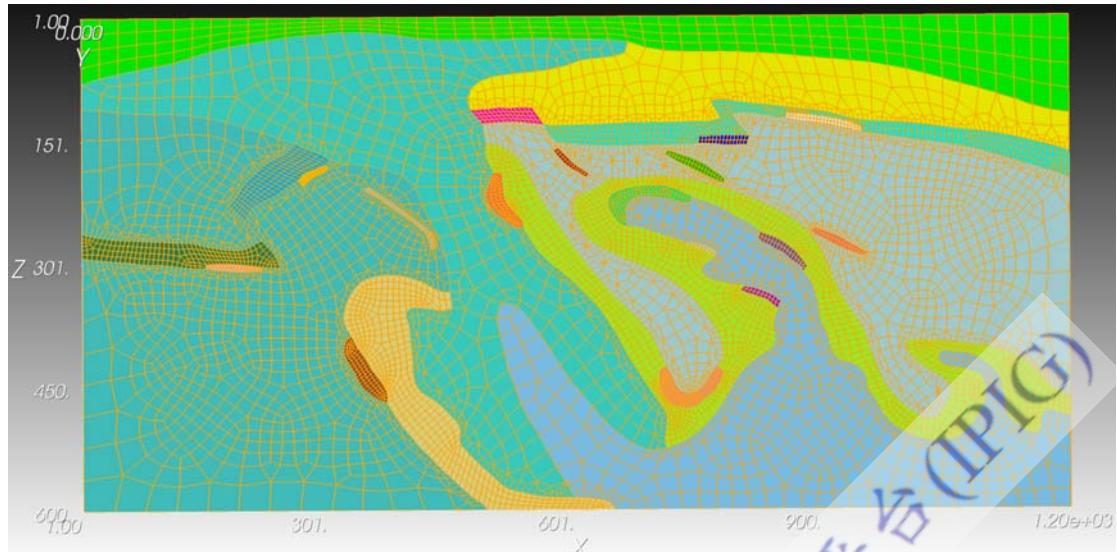


图 4-4 M2S1.e

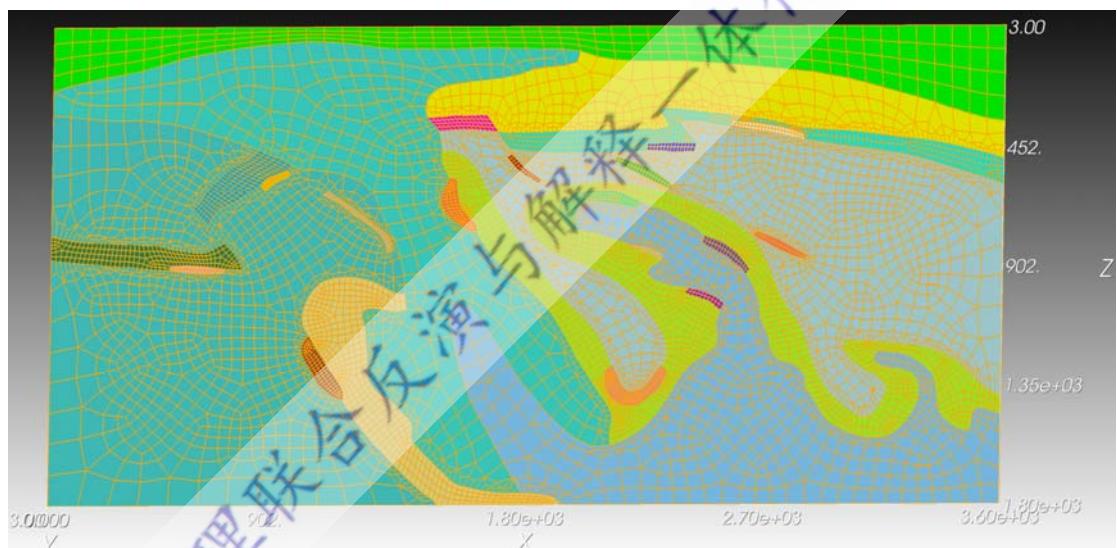


图 4-5 M2S3.e

③ Model_3 下网格文件说明

Model_3 文件夹下包含模型 3 的两个网格文件, 分别为 M3S1.e 和 M3S3.e, 两个文件网格一样, 但是尺寸不一样, M3S1.e 的尺寸是 400 米* 1500 米, M3S3.e 是 M3S1.e 尺度放大版本, 尺寸为 1200 米* 4500 米, 具体见图 4-6 和图 4-7。

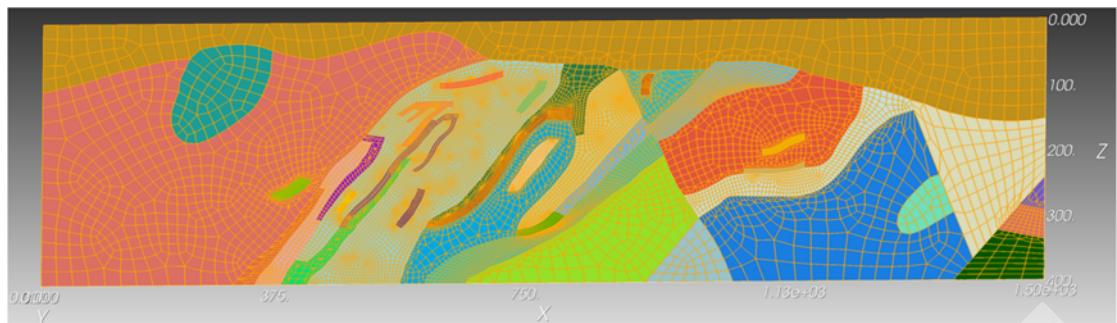


图 4-6 M3S1.e



图 4-7 M3S3.e

4.3.1.2 时间域瞬变电磁法正演

TEM 正演程序所需的必要输入文件包括模型文件（后缀为 geo）、以及控制文件（后缀为 cntl）。两者相互配合，可以有效定义所需模拟的三维地质体，瞬变电磁场源、采集点所在位置，以及数值模拟所使用的计算参数。

(1) 模型文件 (*.geo)

为获得质量良好的计算域剖分效果，本程序使用开源程序 Gmsh 进行非结构四面体网格剖分。关于 Gmsh 的详细使用方法，参见其官方网站 (<https://gmsh.info/>) 及相关说明文档。这里，我们选取第一个地质模型作为例子，介绍该模型输入模型文件 (mod1w.geo) 的定义方法。

.geo 文档内容	说明	是否可以修改及方法
SetFactory("OpenCASCADE");	加载 Gmsh 中的 OpenCASCADE 模块	否
// mesh size Mesh.SaveElementTagType = 2;	指定网格元素保存类型，值=2 即在输出时保存各四面体的物理标签	否
Mesh.CharacteristicLengthMax = 4000;	定义计算区域边界处的最大网格单元大小	是，如需更加稀疏的网格（会导致计算精度下降）

		降，但计算效率提高)，可适当增大该数值；反之可适当减小该数值
Mesh.CharacteristicLengthFromCurvature = 1;	定义是否需要根据模型曲率计算网格单元的大小	是，取 1 为开启该功能，取 0 为关闭该功能
Mesh.MinimumElementsPerTwoPi = 5;	根据模型曲率，定义每一周所剖分的单元数量	是，若上一选项为 1 则该参数起到作用，该数值越大，则会得到更为细分的网格，对大曲率异常体的刻画更为精确
// points //Point(1) = {-750, -750, 0}; Point(2) = {-750, 750, 0,300}; Point(289) = {-750, 675, 655,10}; Point(290) = {-750, 665, 636,10};	根据实际地质模型标定模型参考点	是，请根据需要模拟的二维地质模型给出其锚点
// lines Line(1) = {2, 39}; Line(2) = {4, 39}; Spline(432) = {19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26}; Spline(433) = {26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 3};	将标定好的模型参考点连接成线	是，请根据需要模拟的二维地质模型给出其连线，需要注意的是，任意两个或多个计算区域之间的交点都应将定义的线分割为不同部分，以防止后续面、体的定义出现问题
// Surfaces Curve Loop(3) = {35, 36, 37, 38, 29, 30, 31, 32, 33, 34}; Plane Surface(1) = {3}; Curve Loop(19) = {431, 143, 148, -430, -26}; Plane Surface(15) = {19};	用上述连线围成平面	是，请根据需要模拟的二维地质模型给出其平面定义，这些面也定义了不同的计算区域
// bodies For i In {1:15} vanorm~{i} = Extrude {1500, 0, 0} { Surface{i}; };	将围成的平面沿 x 方向延拓成三维体	是，请根据需要模拟的模型大小定义延拓长

EndFor		度, 这里为 1500; 同时应根据上述定义面的数量修改循环变量的取值范围
Coherence;	删除不同体之间重复定义的点、线和面	否
// source vv=newreg;Box(vv)={-500,-500,-100,1000,1000,300};	本行开始为场源的定义, 首先给定一个立方体, 其 x、y 方向上的边界应该是 TEM 回线场源的投影边界, 而 z 方向上的边界应将地表与空气的边界面包含在内	是, 可以定义不同大小的线框源; 或不同类型, 如圆形的回线源, 此时应换用 Gmsh 中的柱体命令重写此行
ss()= BooleanIntersection {Surface {126,161,162};} {Volume{vv}; Delete;};	计算上述立方体和地-空边界的交线, 即回线场源所在的位置	是, 可根据不同的地表面的面编号计算交线
Delete {Surface{ss(0),ss(1),ss(2)};Curve{745,750};}	删除多余的面和交线	是, 应根据不同的地表面的面编号删除多余的面和交线
Translate {0, 0, -5} { Curve{746,747,748,749,751,752,753,754}; }	沿 x、y、z 轴平移回线场源	是, 可以根据不同的模型设置给定场源所在位置
Physical Line ("lsource1",51) = {747}; Physical Line ("lsource2",52) = {748,749,752}; Physical Line ("lsource3",53) = {753}; Physical Line ("lsource4",54) = {754,751,746};	定义回线源四条边线为物理线段	是, 应根据不同的场源设置进行定义, 需要注意, 场源的物理编号应该始终从 51 开始
Coherence;	删除不同几何体之间重复定义的点、线和面	否
// receivers p1=newp;Point(p1)={-200,-200,150}; p2=newp;Point(p2)={-160,-200,150}; p210=newp;Point(p210)={160,200,165};	定义采集点所在位置, 需要注意, 此处的定义只是为在这些点附近进行网格加密, 如果不需	是

p211=newp;Point(p211)={200,200,165};	要加密则可删除	
// land Box Box (1001) = { -20000,-20000,700,40000,40000,19300 }; Box (1004) = { -20000,-20000,57,40000,19250,643 }; Box (1005) = { -20000,750,221,40000,19250,479 };	在已设定好的小模型周围添加大地和空气边界，使之延展成大模型，这里首先定义大地边界，其中第一个Box体为核心计算区域下侧的延拓体，第二个Box体为核心计算区域左侧的延拓体，第三个Box体为核心计算区域右侧的延拓体	是，可根据具体问题需要延展的到的计算区域边界
Curve Loop(222) = {634, 719, 722, 743, 741, 643, -642, -637}; Plane Surface(195) = {222}; Curve Loop(223) = {635, 720, 723, 744, 742, 666, -665, -638}; Plane Surface(196) = {223}; vbulk1() = Extrude {-19250, 0, 0} { Surface{195}; }; vbulk2() = Extrude {19250, 0, 0} { Surface{196}; };	分别定义大地边界前、后两个面所需延展到的坐标	是，可根据具体问题需要延展的到的计算区域边界
// air Box Box (1011) = { -20000,-20000,-20000,40000,40000,20000 }; Box (1014) = { -20000,-20000,0,40000,19250,57 }; Box (1015) = { -20000,750,0,40000,19250,221 };	分别定义空气边界上、左、右三个面所需延展到的坐标	是，可根据具体问题需要延展的到的计算区域边界
Curve Loop(261) = {714, -716, 634, 719, 722, -724}; Plane Surface(233) = {261}; Curve Loop(263) = {715, -717, 635, 720, 723, -725}; Plane Surface(234) = {263}; vbulk11() = Extrude {-19250, 0, 0} { Surface{233}; }; vbulk12() = Extrude {19250, 0, 0} { Surface{234}; };	分别定义空气边界前、后两个面所需延展到的坐标	是，可根据具体问题需要延展的到的计算区域边界
// Coherence after all volumes, and physical entities Coherence;	删除不同体之间重复定义的点、线和面	否
vv1() = BooleanUnion { Volume{12};Delete; } { Volume{1014,1015,1016,1017,1011};Delete; }; vv2() = BooleanUnion { Volume{15};Delete; } { Volume{1001,1004,1005,1006,1007};Delete; }; Coherence;	分别计算大地体、空气体的并集，	否
Physical Volume("Air", 11) = {vv1(0)}; Physical Volume("Left_1125", 12) = {vv2(0)};	定义物理体	是，应根据所需模拟的具体问

..... Physical Volume("anorm1_768", 19) = {4,6}; Physical Volume("anorm1_364", 20) = {8};		题进行定义，需要注意，物理体的编号应该始终从 11 开始
// source in air Curve { 746,747,748,749,751,752,753,754 } In Volume { 1008};	定义场源在空气中	是，应根据具体的剖分结果调整边的编号
// source field Field[1] = Distance; Field[1].EdgesList = {746,747,748,749,751,752,753,754}; Field[2] = Threshold; Field[2].IField = 1; Field[2].LcMin = 5; Field[2].LcMax = 4000; Field[2].DistMin = 0; Field[2].DistMax = 20000;	从这里开始是场的定义，场规定了模型不同位置处的四面体剖分密度，对计算精度有很大影响；首先是对于场源附近的加密，EdgesList 给定了所需加密的场源棱边编号	是
// receiver field Field[3] = Distance; Field[3].NodesList = { p1,p2,p3,p4,p5,p6, p7,p8,p9,p10,p11, p201,p202,p203,p204,p205, p206,p207,p208,p209,p210,p211}; Field[4] = Threshold; Field[4].IField = 3; Field[4].LcMin = 2; Field[4].LcMax = 4000; Field[4].DistMin = 0; Field[4].DistMax = 20000;	对于采集点附近的四面体剖分加密，其中 LcMin 给定了离这些点 DistMin 距离处的四面体棱边边长，LcMax 给定了离这些点 DistMax 距离处的四面体棱边边长；而在这两者之间棱边边长线性增长	是
Field[5] = Min; Field[5].FieldsList = {2,4}; Background Field = 5;	在剖分区域的每一点取 2、4 号场之间的较小值，以得到更好的剖分结果	否

控制文件 (*.cntl)

控制文件给定了 TEM 数值模拟的场源定义、采集点位置、计算参数设置。这里，我们选取第一个地质模型作为例子，介绍该模型输入模型文件 (mod1w.cntl) 的定义方法。

.cntl 文档内容	说明
receivers: 1 0.0 0.0 170.0	定义采集点所在位置，其中第一行给定了采集点的数量，而后每一行给定了采集点所在的 x、y、z 坐标值。
isotropic: 10	定义计算体的物理属性，其中第一行给定了体的数

11 1.00d-8 1.0 1.0 12 8.89d-4 1.0 1.0 19 1.30d-3 1.0 1.0 20 2.74d-3 1.0 1.0	量, 而后每一行给定了对应体的物理编号、电导率、相对介电常数以及相对磁导率。需要注意, 物理编号应该与.geo 文件所定义的体物理编号一一对应, 并从 11 号开始。
boundary condition: 0	定义边界条件, 其中 0 表示 PEC 边界条件, 1 表示第一类辐射边界条件。通常在计算区域足够大时, 两种边界条件可以给出相近的模拟结果。
source: 4 1 2 1.0e-4 1.0 51 500,-500,150 -500,-500,150 52 -500,-500,150 -500, 500,150 53 -500, 500,150 500, 500,150 54 500, 500,150 500,-500,150	定义场源。其中第一行给定了场源的数量; 第二行第一、二个参数给定了场源属性, 11 表示阶跃脉冲源, 12 表示高斯脉冲源; 第二行第三个参数给定了脉冲宽度; 第二行第四个参数给定了脉冲高度。而后每一组三行定义给定了对应场源的物理编号以及起点、终点坐标。需要注意, 物理编号应该与.geo 文件所定义的源物理编号一一对应, 并从 51 号开始。
! 1-unif newmark step 2-unif euler step 3-adap euler step 4-force multi euler step sp_mthd: 2	定义时间步进算法, 不应修改。
! number to divide t0 sp_division: 50	定义初始时间迭代步长, 其中 t0 为上述 source 定义中的第二行第三个参数, 而初始时间迭代步长由 t0/ sp_division 决定。
time_maximum: 1	定义最大计算时间, 模拟在达到该时间后终止。
! number of step to double % not used for unif step sp_double: 60	定义需要倍增时间步长所需的迭代步数, 给定这一参数可极大程度上缩短 TEM 模拟所需的时间。
sp_dblesize: 2	定义时间步长倍增倍数, 一般不需要修改。
! ex ey ez dx dy dz bx by bz output: 0 0 0 0 0 1 0 0 0	给定需要输出的场值分量, 其中第 1-9 个参数分别表示电场 E 的 x、y、z 分量, 磁场时间导数 dB/dt 的 x、y、z 分量, 以及磁场 B 的 x、y、z 分量。其中 0 表示不输出该场分量, 而 1 表示输出该场分量。
vtkout: 1 0.0003	给定需要输出绘图结果的时间点, 其中第一行给定需要输出的时间点数量, 而后各行给定需要输出的每个时间点。

4.3.1.3 频率域可控源电磁法正演

CSAMT 正演程序所需的必要输入文件包括模型文件 (后缀为 geo)、以及控

制文件（后缀为 `cntl`）。两者相互配合，可以有效定义所需模拟的三维地质体，CSAMT 场源、采集点所在位置，以及数值模拟所使用的计算参数。

(1) 模型文件 (*.geo)

为获得质量良好的计算域剖分效果，本程序使用开源程序 Gmsh 进行非结构四面体网格剖分。关于 Gmsh 的详细使用方法，参见其官方网站(<https://gmsh.info/>)及相关说明文档。这里，我们选取第一个地质模型作为例子，介绍该模型输入模型文件 (`mod1w.geo`) 的定义方法。

.geo 文档内容	说明	是否可以修改及方法
<code>SetFactory("OpenCASCADE");</code>	加载 Gmsh 中的 OpenCASCADE 模块	否
<code>// mesh size Mesh.SaveElementTagType = 2;</code>	指定网格元素保存类型，值=2 即在输出时保存各四面体的物理标签	否
<code>Mesh.CharacteristicLengthMax = 4000;</code>	定义计算区域边界处的最大网格单元大小	是，如需更加稀疏的网格（会导致计算精度下降，但计算效率提高），可适当增大该数值；反之可适当减小该数值
<code>Mesh.CharacteristicLengthFromCurvature = 1;</code>	定义是否需要根据模型曲率计算网格单元的大小	是，取 1 为开启该功能，取 0 为关闭该功能
<code>Mesh.MinimumElementsPerTwoPi = 5;</code>	根据模型曲率，定义每一周所剖分的单元数量	是，若上一选项为 1 则该参数起到作用，该数值越大，则会得到更为细分的网格，对大曲率异常体的刻画更为精确
<code>// points //Point(1) = {-750, -750, 0}; Point(2) = {-750, 750, 0,300}; Point(289) = {-750, 675, 655,10}; Point(290) = {-750, 665, 636,10};</code>	根据实际地质模型标定模型参考点	是，请根据需要模拟的二维地质模型给出其锚点
<code>// lines Line(1) = {2, 39}; Line(2) = {4, 39};</code>	将标定好的模型参考点连接成线	是，请根据需要模拟的二维地质模型给出其连线，需要注意

<pre> Spline(432) = {19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26}; Spline(433) = {26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 3};</pre>		<p>的是，任意两个或多个计算区域之间的交点都应将定义的线分割为不同部分，以防止后续面、体的定义出现问题</p>
<pre> // Surfaces Curve Loop(3) = {35, 36, 37, 38, 29, 30, 31, 32, 33, 34}; Plane Surface(1) = {3}; Curve Loop(19) = {431, 143, 148, -430, -26}; Plane Surface(15) = {19};</pre>	<p>用上述连线围成平面</p>	<p>是，请根据需要模拟的二维地质模型给出其平面定义，这些面也定义了不同的计算区域</p>
<pre> // bodies For i In {1:15} vanorm~{i} = Extrude {1500, 0, 0} { Surface{i}; }; EndFor</pre>	<p>将围成的平面沿x方向延拓成三维体</p>	<p>是，请根据需要模拟的模型大小定义延拓长度，这里为1500；同时应根据上述定义面的数量修改循环变量的取值范围</p>
<p>Coherence;</p>	<p>删除不同体之间重复定义的点、线和面</p>	<p>否</p>
<pre> // land Box Box (1001) = { -20000,-20000,700,40000,40000,19300 }; Box (1004) = { -20000,-20000,57,40000,19250,643 }; Box (1005) = { -20000,750,221,40000,19250,479 };</pre>	<p>在已设定好的小模型周围添加大地和空气边界，使之延展成大模型，这里首先定义大地边界，其中第一个Box体为核心计算区域下侧的延拓体，第二个Box体为核心计算区域左侧的延拓体，第三个Box体为核心计算区域右侧的延拓体</p>	<p>是，可根据具体问题需要延展的到的计算区域边界</p>
<pre> Curve Loop(222) = {634, 719, 722, 743, 741, 643, -642, -637}; Plane Surface(195) = {222}; Curve Loop(223) = {635, 720, 723, 744, 742, 666, -665, -638}; Plane Surface(196) = {223}; vbulk1() = Extrude {-19250, 0, 0} { Surface{195}; }; vbulk2() = Extrude {19250, 0,</pre>	<p>分别定义大地边界前、后两个面所需延展到的坐标</p>	<p>是，可根据具体问题需要延展的到的计算区域边界</p>

0} { Surface{196};};		
// air Box Box (1011)= { -20000,-20000,-20000,40000,40000,20000 }; Box (1014)= { -20000,-20000,0,40000,19250,57 }; Box (1015)= { -20000,750,0,40000,19250,221 };	分别定义空气边界上、左、右三个面所需延展到的坐标	是, 可根据具体问题需要延展的到的计算区域边界
Curve Loop(261) = {714, -716, 634, 719, 722, -724}; Plane Surface(233) = {261}; Curve Loop(263) = {715, -717, 635, 720, 723, -725}; Plane Surface(234) = {263}; vbulk11() = Extrude {-19250, 0, 0} { Surface{233};}; vbulk12() = Extrude {19250, 0, 0} { Surface{234};};	分别定义空气边界前、后两个面所需延展到的坐标	是, 可根据具体问题需要延展的到的计算区域边界
// Coherence after all volumes, and physical entities Coherence;	删除不同体之间重 复定义的点、线和面	否
vv1() = BooleanUnion { Volume{12};Delete; } { Volume{1014,1015,1016,1017,1011};Delete; }; vv2() = BooleanUnion { Volume{15};Delete; } { Volume{1001,1004,1005,1006,1007};Delete; }; Coherence;	分别计算大地体、空 气体的并集,	否
Physical Volume("Air", 11) = {vv1(0)}; Physical Volume("Left_1125", 12) = {vv2(0)}; Physical Volume("anorm1_768", 19) = {4,6}; Physical Volume("anorm1_364", 20) = {8};	定义物理体	是, 应根据所需模拟的具体问题进行定 义, 需要注意, 物理体的编号应该始终 从 11 开始
// line source p501=newp;Point(p501)={0,-5500,65}; p502=newp;Point(p502)={0,-4500,65}; l1=newreg; Line(l1)={p501,p502};	定义 CSAMT 场源 所在位置, 并将其两 端点延伸为一条线 段	是, 可以定义不同长 度、坐标位置、以及 数量的线源
Physical Line ("lsource1",51) = {l1};	定义线源为物理线 段	是, 可以根据场源的 数量定义不同的线 源为不同的物理编 号, 需要注意, 场源 的物理编号应该始 终从 51 开始
Line{l1} In Volume{vv2(0)};	定义场源在几何体 内	否
// receivers	定义采集点所在位	是

p1=newp;Point(p1)={-200,-200,150}; p2=newp;Point(p2)={-160,-200,150}; p210=newp;Point(p210)={160,200,165}; p211=newp;Point(p211)={200,200,165};	置,需要注意,此处的定义只是为在这些点附近进行网格加密,如果不需要加密则可删除	
// source field Field[1] = Distance; Field[1].NodesList = {p501,p502}; Field[1].NNodesByEdge = 100; Field[1].EdgesList = {11}; Field[2] = Threshold; Field[2].IField = 1; Field[2].LcMin = 10; Field[2].LcMax = 4000; Field[2].DistMin = 0; Field[2].DistMax = 20000;	从这里开始是场的定义,场规定了模型不同位置处的四面体剖分密度,对计算精度有很大影响;首先是对于场源附近的加密,EdgesList给定了所需加密的场源棱边编号	是
// receiver field Field[3] = Distance; Field[3].NodesList = { p1,p6,p11,p21,p26,p31,p41, p191,p201,p206,p211}; Field[4] = Threshold; Field[4].IField = 3; Field[4].LcMin = 5; Field[4].LcMax = 4000; Field[4].DistMin = 0; Field[4].DistMax = 20000;	对于采集点附近的四面体剖分加密,其中 LcMin 给定了离这些点 DistMin 距离处的四面体棱边边长,LcMax 给定了离这些点 DistMax 距离处的四面体棱边边长;而在这两者之间棱边边长线性增长	是
Field[5] = Min; Field[5].FieldsList = {2,4}; Background Field = 5;	在剖分区域的每一点取 2、4 号场之间的较小值,以得到更好的剖分结果	否

(2) 控制文件 (*.cntl)

控制文件给定了 CSAMT 数值模拟的场源定义、采集点位置、计算参数等设置。这里,我们选取第一个地质模型作为例子,介绍该模型输入模型文件 (mod1w.cntl) 的定义方法。

.cntl 文档内容	说明
receivers: 1 0.0 -200.0 150.0	定义采集点所在位置,其中第一行给定了采集点的数量,而后每一行给定了采集点所在的 x、y、z 坐标值。
isotropic: 10 11 1.00d-8 1.0 1.0	定义计算体的物理属性,其中第一行给定了体的数量,而后每一行给定了对应体的物理编号、电导率、

12 8.89d-4 1.0 1.0 19 1.30d-3 1.0 1.0 20 2.74d-3 1.0 1.0	相对介电常数以及相对磁导率。需要注意，物理编号应该与.geo 文件所定义的体物理编号一一对应，并从 11 号开始。
freqs: 10 0.1 5000.0	给定计算频点，其中第一行给定频点数量，而后每行给定以 Hz 为单位的频点值。
source: 1 51 1.0 0.0 -5500.0 65.0 0.0 -4500.0 65.0	定义场源。其中第一行给定了场源的数量；而后每行给定了对应场源的定义。第一个参数为场源的物理编号，第二个参数为场源的偶极矩，第 3-8 个参数为起点、终点的 x、y、z 坐标。需要注意，物理编号应该与.geo 文件所定义的源物理编号一一对应，并从 51 号开始。
! trans_index rec_index freq_index list: 0	发射点、接受点和频点索引，值为 0 代表全部参与循环。例如当只要计算第一个频点时，应定义该项为 list: 1 1 1 1
tensors: 0	设置张量测量，值为 0 代表非张量测量，而当该值为 1 时为张量 CSAMT 观测。
! 1-suveyline mode only field 2-depth mode only field ! 3-suveyline mode only impedance 4-depth mode only impedance ! 5-suveyline mode field + impedance 6-depth mode field + impedance outputmode: 6	设置结果输出模式：1 为测线模式仅输出场值，2 为测深模式仅输出场值，3 为测线模式仅输出阻抗，4 为测深模式仅输出阻抗，5 为测线模式输出场值和阻抗，6 为测深模式输出场值和阻抗。
! trans_index freq_index vtkout: 0	给定需要输出绘图结果的发射点编号和频点编号，其中第一行给定需要输出的绘图数量，而后各行给定需要输出的每个发射点编号和频点编号。例如当需要输出 1、2 号频点的绘图结果时，该项应定义为 vtkout: 2 1 1 1 2

4.3.2 输出说明（必要包括数据结果结构说明）

4.3.2.1 基于频率域谱元法/混合谱元法的正演软件

该软件的输出有两种，一种是信息输出，一种是结果输出。信息输出为两个文件分别为：Output_info.txt 和 Output_mesh.e 两个文件，其中 Output_info.txt 文件为模型参数的关键信息输出，而 Output_mesh.e 为计算使用的网格模型输出，可以 CUBIT 软件打开。两个信息输出文件供使用者核对信息使用。结果输出主要包含三个文件，SEM_data_all.bin、Receiver_Edata.txt 和 Receiver_Hdata.txt。SEM_data_all.bin 为全区域场输出结果，为二进制文件，需要使用后处理软件 3D_GRD 来二次加工并获得观察点的物理场输出。因此下面主要介绍 Receiver_Edata.txt 和 Receiver_Hdata.txt。而这两个软件的输出格式一样，因此这里只介绍 Receiver_Edata.txt 中的数据结构。

Nrecvs	nrhs	0	0	0	0	0
101	1	0	0	0	0	0
Ex.real	Ex.imag	Ey.real	Ey.imag	Ez.real	Ez.imag	
-2.245445e-09	-5.795285e-09	-2.039583e-09	-1.155091e-09	1.267004e-08	-2.579797e-08	
-2.670092e-09	-5.786758e-09	-1.892885e-09	-9.917068e-10	-1.302792e-08	-2.598857e-08	
-3.065430e-09	-5.792456e-09	-1.669376e-09	-8.251974e-10	-1.337088e-08	-2.616083e-08	
-3.378766e-09	-5.823922e-09	-1.363905e-09	-6.554735e-10	-1.371839e-08	-2.630928e-08	
-3.312564e-09	-5.876331e-09	-9.843237e-10	-4.834357e-10	1.647323e-08	-2.647154e-08	
-2.582995e-09	-5.892823e-09	-5.445839e-10	-3.073293e-10	-1.210067e-08	-2.658488e-08	

图 4-8 Receiver_Edata.txt 数据结构

文件的第一行为简易定义，Nrecvs 表示观察点的数量，nrhs 表示独立工作的场源组的数量，后面 0 无其他意义。第二行表示具体数据，101 表示有 101 个观察点数量，第二列 1 表示只有 1 组独立源。

第三行为物理场的定义，Ex、Ey、Ez 分别表示电场的 x、y、z 的三个分量。他们的后缀.real 和.imag 分别表示他们的实部和虚部。然后下面 101 行为第三行对应定义的数据。

4.3.2.2 时间域瞬变电磁法正演

计算结果为 xxx.field 文件，其中 xxx 与输入文件的前缀相同。该输出文件的每行第一个数据为时间点，而后按照各电磁场分量-各采集点的顺序进行循环。

4.3.2.3 频率域可控源电磁法正演

计算输出结果为 xxx.field 文件，其中 xxx 与输入文件的前缀相同。其典型格式如下：

```
----- Survey info
// 输出频点
frequencies: 10 // 频点数量
0.100 // 频率值，单位为 Hz
5000.000
```

```

// 信号发射源点
transmitters:    1      // 发射源数量
1.0   0.0   -5500.0   65.0   0.0   -4500.0  65.0 //线源偶极矩; 起点坐标; 终点坐标
// 信号接收点
receivers:    1      //接收点数量
0.0   -200.0   150.0 // 接收点坐标
// 场值分量
----- Field info
transmitter:    1      receiver:    1      // 对应发射源和接收点编号
freq_i: 频点序号
freq: 频率值
Ex_R: Ex 分量实部
Ex_I: Ex 分量虚部
Ex_A: Ex 分量幅值
Ex_P: Ex 分量相位
.....
Bz_R: Bz 分量实部
Bz_I: Bz 分量虚部
Bz_A: Bz 分量幅值
Bz_P: Bz 分量相位
// 阻抗值和电阻率值
----- Impedence info
transmitter:    1      receiver:    1      // 对应发射源和接收点编号


| freq_i | freq  | Zxy         | Zyx         | Rho_a       |
|--------|-------|-------------|-------------|-------------|
| 1      | 0.1   | 5.11851E+00 | 9.72601E-01 | 1.19806E+06 |
| 2      | 0.5   | 5.11818E+00 | 9.72435E-01 | 2.39531E+05 |
| .....  | ..... | .....       | .....       | .....       |


freq_i: 频点序号
freq: 频率值
Zxy: 阻抗反对角分量
Zyx: 阻抗反对角分量
Rho_a: 电阻率

```

4.3.3 绘图文件

4.3.3.1 频率域谱元法/混合谱元法的正演软件

Receiver_Edata.txt 和 Receiver_Hdata.txt 可以用 matlab 的 plot 直接绘制。

4.3.3.2 时间域瞬变电磁法正演

TEM 计算结果绘图文件是后缀为.msh 的的文件, 根据.cntl 输入文件的设置,

可能有一个或多个.msh 文件输出，每一个文件对应一个时间点。该文件可以使用 Gmsh 软件打开，并绘制剖面图、截面图、等值线图等图件。其具体使用方法参见其官方网站（<https://gmsh.info/>）及相关说明文档。

4.3.3.3 频率域可控源电磁法正演

CSAMT 计算结果绘图文件是后缀为.msh 的文件，根据.cntl 输入文件的设置，可能有一个或多个.msh 文件输出，每一个文件对应一个发射偶极子和发射频点。该文件可以使用 Gmsh 软件打开，并绘制剖面图、截面图、等值线图等图件。其具体使用方法参见其官方网站（<https://gmsh.info/>）及相关说明文档。

4.3.4 运行说明

4.3.4.1 频率域谱元法/混合谱元法的正演软件

进入软件保存在镜像中的路径：/opt/xmufwd

3D_SEM 软件进行模型 1 的仿真，则执行命令：

```
./3D_SEM Model_1 Model_1.inp
```

其中 Model_1 文件夹为模型路径，Model_1.inp 为该路劲下的模型文件

完成 3D_SEM 的正演仿真后，如果需要求其他观察点的场值，则直接执行后处理软件 3D_GRD，而无需重新正演计算，命令如下：

```
./3D_SEM Model_1 Receivers.txt
```

其中 Model_1 为模型路径，软件将再该路径下下载 SEM_all_data.bin 文件并求 Receivers.txt 文件总观察点的场值。

4.3.4.2 时间域瞬变电磁法正演

执行命令：

```
docker run -v ~/tmp:/tmp xxx ./TEM.sh
```

其中 xxx 为解压安装好的镜像名。该命令将新建~/tmp 文件夹，如果该文件夹已经存在，请将其清空，并将模型文件、控制文件拷贝到该目录下，例如 mod1w.geo、mod1w.cntl；并将 mod1_w.geo、mod1w.txt、mod1w.m 的前缀均重命名为 mod，如 mod.geo、mod.cntl；运行结果.field 文件和绘图结果.msh 文件会输出在当前用户目录的~/tmp 文件夹下。

4.3.4.3 频率域可控源电磁法正演

执行命令：

```
docker run -v ~/tmp:/tmp xxx ./CSAMT.sh
```

其中 xxx 为解压安装好的镜像名。该命令将新建~/tmp 文件夹，如果该文件夹已经存在，请将其清空，并将模型文件、控制文件拷贝到该目录下，例如 mod1w.geo、mod1w.cntl；并将 mod1_w.geo、mod1w.txt、mod1w.m 的前缀均重命名为 mod，如 mod.geo、mod.cntl；运行结果.field 文件和绘图结果.msh 文件会输出在当前用户目录的~/tmp 文件夹下。

第 5 章 综合地球物理联合反演

5.1 前言

近年来，利用大地电磁与地震数据的联合反演的研究较多，这些研究主要分为两类：一类主要基于岩石物性关系的联合反演，该方法对先验信息依赖较强，一类主要基于不同物性参数有相似边界的假设，提出了交叉梯度结构耦合法。这种基于结构耦合的方法，在联合反演中运用广泛，已适用于不同的地球物理数据。

已有研究表明在局部熔融或半熔融异常体、含水的裂隙或者断层，以及壳内滑脱层等特殊构造区域，电阻率模型与速度模型在三维结构分布上具有相似性（Newman et al.,2008）。鉴于此，我们利用梯度相减的结构约束方法，实现了大地电磁法与背景噪声法的三维联合反演研究，实现了两种方法的优势互补；通过复杂模型合成数据算例证明了联合反演算法的稳定性和可靠性，并对比单方法的反演结果，展示联合反演的优越性。

5.2 镜像说明

我们将联合反演的程序融合入 docker 为容器的 linux 子系统的平台中，可以便捷的跨平台完成联合反演。联合反演的主程序是使用 matlab 编写的脚本文件，提高了可读性与方便修改，子程序里面调用了两个 fortran 语言写的大地电磁与背景噪声的反演子程序。

在镜像的程序文件中，如图 5-1 所示，main.m 文件为反演程序的主程序，所有的参数修改都在这里面完成，run.sh 的 bash 脚本可以便捷的运行反演程序。文件夹 code 中存放了反演所需的所有子程序。文件夹 MTdata 中存放了大地电磁的反演数据以及初始模型，文件夹 Surfdatal 中存放了背景噪声反演需要的数据以及初始模型。文件 scripts 中的 matlab 脚本可以对反演的输出文件进行绘图。最后 readme.txt 文件是一个简单的反演程序使用说明。

code	2020/8/28 16:15	文件夹
MTdata	2020/8/28 16:15	文件夹
scripts	2020/8/28 16:15	文件夹
Surfdatal	2020/8/28 16:15	文件夹
main.m	2020/8/28 21:39	M 文件
readme	2020/8/11 19:56	文本文档
run.sh	2020/8/26 19:14	SH 文件

图 5-1

5.3 软件的使用说明

5.3.1 输入说明（必要包括参数，网格）

首先在主程序 main.m 中，63 行到 94 行是我们可以修改的反演参数，下面先分别介绍各个反演参数的使用方法。

首先结构体 surfarea 的变量 x_max 和 y_max 用来确定将背景噪声的经纬度坐标转换为直角坐标系的范围，注意，这个扩边范围要大于反演输入模型的大小范围。

结构体 interp 中的变量 minx,miny,maxx,maxy,z_end, 分别用来确定联合反演区域的范围，x 的方向为纬度方向，y 的方向为经度方向，z 代表深度，单位为 km。

center_lon 与 center_lat 为反演网格中心点的经纬度。

damp,mt_tolerare 分别控制了 mt 反演的模型与残差的平衡和反演残差的可接受程度。

iter_num 与 iter_temp 分别控制总的反演次数和联合反演与单独反演的交替迭代。

参数 beta,gama1,gama2 控制着联合反演，beta 为梯度约束的权重，gama1 为电阻率权重，gama2 为速度结构的权重。

在 MTdata 文件夹中，pro_model.ws 文件为大地电磁的初始模型文件，文件的第一行为模型在三个方向的网格数，其中第一个为纬度方向，第二个为经度方向，第三个为深度方向。接着文件的第 2-4 行为各个方向的网格的间隔大小。在实际模型网格点的模型值的排列中，一行中的每一列是随着纬度而变化，总的来说，就是以纬度再经度再深度的顺序来排列。

在 Surfdata 文件夹中，MOD_origin 文件为背景噪声的初始模型文件，文件的第一行为反演网格的垂直方向的深度值，后面的实际模型各个网格点的模型值与 MT 的初始模型网格排列一样。

总的来说，模型文件与数据文件的格式都与程序 ModEM 和 DSurfTomo 的格式保持一致。

5.3.2 输出说明（必要包括数据结果结构说明）

联合反演的输出的模型文件分别存放在 MTdata 文件夹与 Sufdata 文件夹中，其中电阻率模型的结果的文件名为 joint_resultrho0xx.rho(xx 代表反演迭代的次

数),速度模型的结果的文件名为 joint_resultsurf0xx.vel(xx 代表反演迭代的次数)。反演结果的模型文件的格式与输入的初始模型的文件格式保持一致。

在反演文件夹中,还有两个文件输出分别为 Rms_mt.txt 与 Rms_surf.txt,两个分别大地电磁与背景噪声的残差文件。

5.3.3 绘图文件

在文件 scripts 中,脚本 plot_slice_MT.m 与 plot_vel_MT.m 分别可以对电阻率模型的结果画深度切片与垂直切片。

例如,联合反演结束后,选取电阻率反演结果 joint_resultrho008.rho,运行 plot_vel_MT.m 脚本,结果如图 5-2 所示,plot_slice_MT.m 同理。

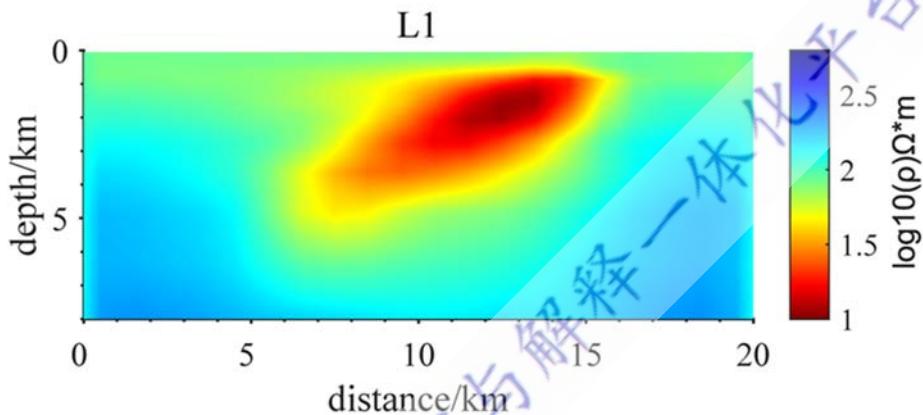


图 5-2

脚本 plot_slice_surf.m 与 plot_vel_surf.m 分别可以对速度模型的结果画深度切片与垂直切片。

例如,联合反演结束后,选取速度结果 joint_resultsurf008.vel,运行 plot_vel_surf.m 脚本后,结果如图 5-3 所示,plot_slice_surf.m 同理。

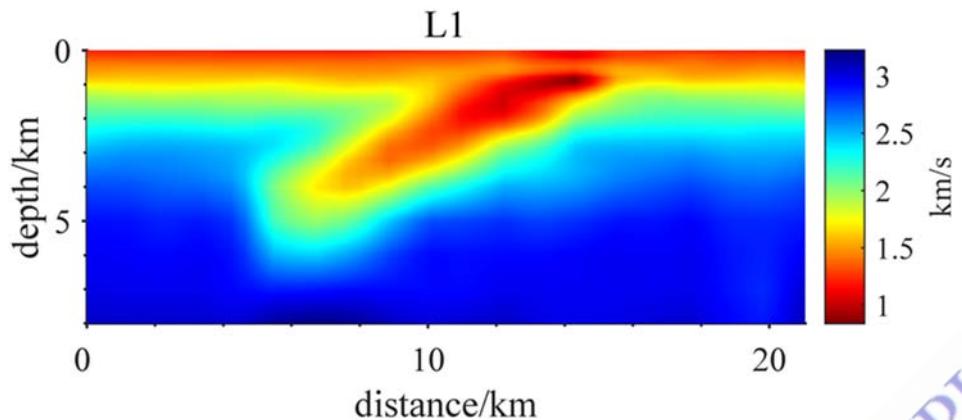


图 5-3

5.3.4 运行说明

当我们把反演参数设置好以后, 输入 bash run.sh 命令, 运行 run.sh 这个 bash 脚本即可。如图 5-4 所示。

```
(base) xinhl@PowerEdge2:/data/xinhl/huangyq/joint_test_tutu/joint_MT_surface_new_v4$ bash run.sh
```

图 5-4

第 6 章 高性能求解器

6.1 前言

线性求解器基于 Trilinos 软件包集成，采用“MPI+Openmp”的并行框架实现，能够在对称多处理机（SMP，多核、共享内存）、大规模并行处理机（MPP，多处理器、分布内存）以及分布式集群等不同硬件架构上运行。

对快速的解决地质问题，设计并且实现工程常用的大规模稀疏矩阵直接解法和并行化的代数多重网格法，已经实现的算法模块如图包括 CG、MINRES、BICGSTAB、GMRES 四类基本求解器，以及包括 Jacobi、Gauss-Seidel、SSOR 超松弛迭代、IC、ILU、ICT 等基本预条件和代数多重网格法 AMG 在内的可扩展预条件算法库，所有的算法正确性已经得到验证。

线性求解器使用 Docker 容器技术进行封装，安装在 /opt/solver 目录下，提供了以下 Trilinos c++ 接口，线性化线性求解器 c++ 接口，集成线性化的求解器 python 接口使用方式，本 docker 参数均可实现修改。

6.2 镜像说明

(1) 下载相应的镜像：

```
sudo docker pull registry.cn-hangzhou.aliyuncs.com/niuhong/hoeniu:yjsHpcSover1.0
```

下载的是 yjsHpcSover1.0 版本的镜像

(2) 运行镜像：

```
sudo docker run -p 8082:8888 --rm -it
registry.cn-hangzhou.aliyuncs.com/niuhong/hoeniu:yjsHpcSover1.0 jupyter-notebook
--ip=0.0.0.0 --allow-root
```

在 jupyter-notebook 的 Docker 中集成线性求解器的主要操作如下：

1) 设置免 token 登陆

生成配置文件 jupyter-notebook --generate -config，执行命令后会有生成的路

径，打开生成的配置文件，找到以#c.NotebookApp.token 开头的一行，改成 c.NotebookApp.token = ''，修改后重启 jupyter 即可。

2) 安装 openblas

```
apt-get install libopenblas-dev
```

3) 安装 lapack

```
apt-get install liblapack-dev
```

4) 安装 cmake

```
apt-get install cmake
```

5) 安装 matplotlib

```
python -m pip install -U pip setuptools
```

```
python -m pip install matplotlib
```

6) 安装 wxGTK3.0

```
apt-get install python-wxgtk3.0
```

7) 编译安装 Trilinos

在 Trilinos 源码包中创建 build 目录，新建 build.sh 文件，内容可以参考 /opt/solver/Trilinos/src/trilinos-12.12.1-Source/build/build.sh，之后 source ./build.sh; make -j10; make install 即可。

8) 开启 jupyter-notebook

```
Jupyter-notebook --ip=0.0.0.0 --allow-root
```

6.3 软件的使用说明

(1) Trilinos C++接口

Docker 镜像中安装了完整的 12.12.1 版本的 Trilinos，因此可以直接调用 Trilinos 提供的 C++接口来进行计算。采用该方法可以利用 Trilinos 提供的完整功能，除线性求解器外，还有非线性求解器、优化求解器等，具体的功能及接口调用方法详见 <https://trilinos.org/> (<https://trilinos.github.io/>)，线性求解器接口的使用方法，也可以参考 /opt/solver/SolverInterface/CppInterface/src 目录下的代码。

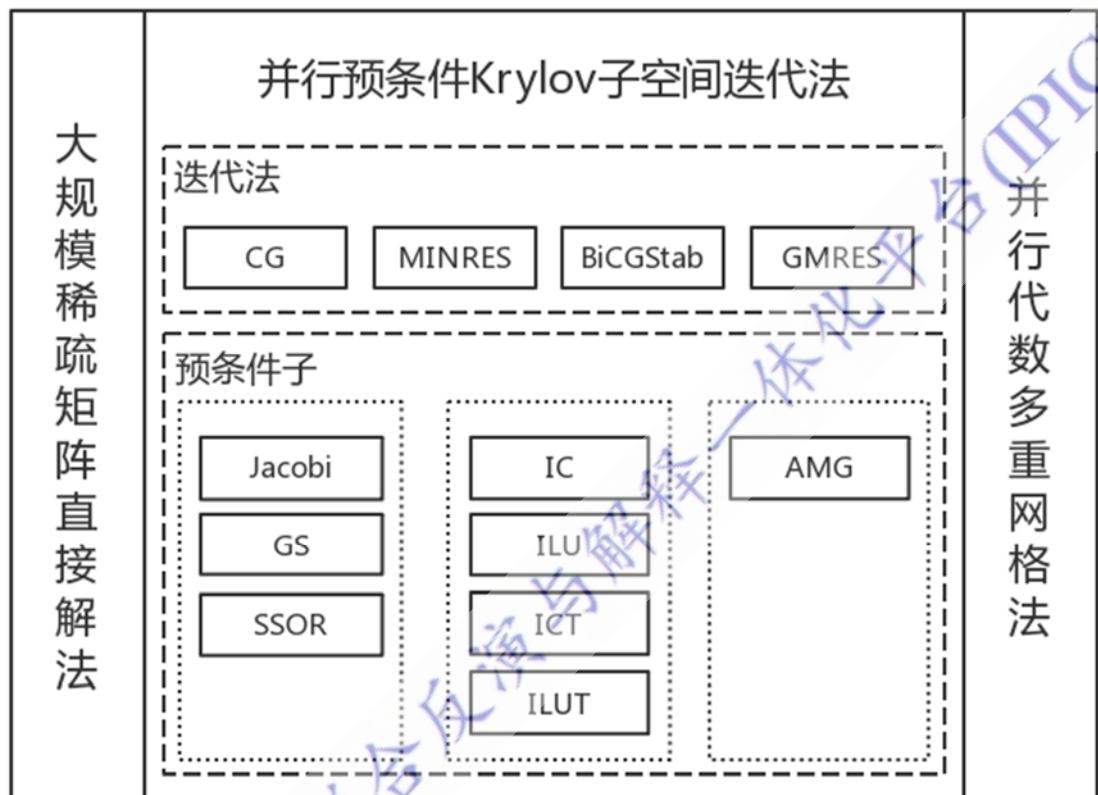
Trilinos 的源代码及编译好的库文件在 /opt/solver/Trilinos 目录下。

(2) 集成化线性求解器 C++接口

Trilinos 自身提供的 C++接口功能全面，但使用方法较为复杂，为方便应用，

在 Docker 镜像中集成了 Trilinos 线性求解器部分的功能，提供了统一的、便于使用的 C++ 接口和 Python 接口

线性求解器集成实现的算法如下图所示，主要包含三类方法：1) 大规模稀疏矩阵直接解法；2) 并行预条件 Krylov 子空间迭代法；3) 并行代数多重网格法。



6.3.1 输入说明（必要包括参数，网格）

C++ 接口的代码在 /opt/solver/SolverInterface/CppInterface/src 目录下，求解器调用接口的定义在 solver.h 中，具体如下：

```
bool call_linear_solver(const string &matrix_file,
                       const string &righthand_file,
                       const string &result_file,
                       const string &log_file,
                       const string &solver_config,
                       const string &preconditioner_config);
```

其中， matrix_file 为矩阵文件名（使用标准的 MatrixMarket 格式）， righthand_file 为右端项文件名（右端项数值依次写入隔开即可）， result_file 为结

果文件名（计算完成后自动存入，格式与右端项文件相同），`log_file` 为计算中间过程日志文件名（计算完成后自动存入，包含迭代残差统计等内容），`solver_config` 为迭代算法参数配置文件名，`preconditioner_config` 为预条件子参数配置文件名。

C++ 接口的调用方法可以参考 `main.cpp`：

```
MPI_Init(&argc, &argv);

string matrix_file(argv[1]);
string righthand_file(argv[2]);
string result_file(argv[3]);
string log_file(argv[4]);
string solver_config(argv[5]);
string preconditioner_config(argv[6]);
bool success = call_linear_solver(matrix_file, righthand_file, result_file, log_file,
solver_config, preconditioner_config);

MPI_Finalize();
```

(1) 配置文件格式

线性求解器所需要的迭代算法参数配置文件（`solver_config`）和预条件子参数配置文件（`preconditioner_config`）两种配置文件均采用：

```
<leftvalue1> = <rightvalue1>
<leftvalue2> = <rightvalue2>
.....
<leftvalueN> = <rightvalueN>
```

的格式定义，各行之间的次序可以任意调整，可以在某行的开头用“#”号注释掉这一行。

(2) 求解算法配置文件参数

- 1) `SolverType`: 求解算法类型，目前集成的线性求解器支持“LU”、“CG”、“MINRES”、“BICGSTAB”、“GMRES”、“AMG”六种方法。
- 2) `UseTranspose`: 对直接法有效，默认值为 `false`，此时求解的是 $Ax=b$ ；如果设为 `true`，则实际求解的是 $ATx=b$ 。由于直接法调用的 `Amesos_KLU` 求解器的特性（例如行优先或列优先对内存局部性的影响等因素），求解 $ATx=b$ 通常会比求解 $Ax=b$ 快一些，所以如果 A 为对称矩阵或者输入的矩阵文件就是 AT ，可

以将 UseTranspose 设置为 true。

3) BlockSize: CG 和 GMRES 支持 BlockCG 和 BlockGMRES 迭代, 因此可以设置 BlockSize, 默认值为 1。

4) Tolerance: 迭代收敛阈值, 默认值为 1.0e-5。

5) MaxIteration: 最大迭代步数, 默认值为 1000。

6) MaxSubspace: 对 GMRES 有效, 如果没有设置该项参数, 则采用的是基本的 GMRES; 如果设置了该项参数, 则采用的是带重启动的 GMRES(m), 该参数即为 m 的值。

7) MaxRestarts: 最大重启动次数, 默认值为 20, 对 GMRES 有效, 且只有在设置了 MaxSubspace 时才会生效, MaxIteration 会被自动调整为 MaxSubspace*MaxRestarts。

8) DefaultValues: AMG 的缺省参数设置, 可以设置一组代数多重网格法的参数, 默认为“SA”, 该组参数适用于对称矩阵, 如需处理非对称矩阵, 可以选择“DD”。

9) MaxLevel: 多重网格层数。

10) AggregationType: 插值算子类型, 支持“Uncoupled”、“Uncoupled-MIS”、“METIS”等。

11) SmootherType: 光滑算子类型, 支持“Jacobi”、“Gauss-Seidel”、“symmetric Gauss-Seidel”、“Chebyshev”等。

12) SmootherSweeps: 光滑迭代次数。

13) CoarseType: 粗网格校正算子类型, 目前支持“Jacobi”、“Gauss-Seidel”、“symmetric Gauss-Seidel”、“Chebyshev”, 以及直接解法“Amesos-KLU”等。

14) CoarseSweeps: 粗网格矫正迭代次数, 如果采用直接解法进行粗网格校正则需设为 1, 建议采用直接解法做粗网格校正。

以上参数中, SolverType 为必填项, 其余的如果不设置则采用默认的参数。

(3) 预条件子配置文件参数

1) PreconditionerType: 预条件子类型, 目前集成的求解器支持“IC”、“ICT”、“ILU”、“ILUT”、“Jacobi”、“Gauss-Seidel”、“symmetric Gauss-Seidel”(这三种预条件子均支持设定松弛因子, 因此 symmetric Gauss-Seidel 即 SSOR)、“ML”(使

用 AMG 作为预条件子) 八类预条件方法。

- 2) LevelOffFill: IC、ICT、ILU、ILUT 方法的填充因子, 默认值为 1。
- 3) DropTolerance: ICT、ILUT 方法的忽略阈值, 默认值为 1.0e-9。
- 4) Sweeps: Jacobi、Gauss-Seidel、symmetric Gauss-Seidel 方法的迭代次数。
- 5) DampingFactor: Jacobi、Gauss-Seidel、symmetric Gauss-Seidel 方法的松弛因子。
- 6) DefaultValues: AMG 的缺省参数设置, 可以设置一组代数多重网格法的参数, 默认为“SA”, 该组参数适用于对称矩阵, 如需处理非对称矩阵, 可以选择“DD”。
 - i. MaxLevel: 多重网格层数。
- 8) AggregationType: 插值算子类型, 支持“Uncoupled”、“Uncoupled-MIS”、“METIS”等。
- 9) SmootherType: 光滑算子类型, 支持“Jacobi”、“Gauss-Seidel”、“symmetric Gauss-Seidel”、“Chebyshev”等。
- 10) SmootherSweeps: 光滑迭代次数。
- 11) CoarseType: 粗网格校正算子类型, 目前支持“Jacobi”、“Gauss-Seidel”、“symmetric Gauss-Seidel”、“Chebyshev”, 以及直接解法“Amesos-KLU”等。
- 12) CoarseSweeps: 粗网格矫正迭代次数, 如果采用直接解法进行粗网格矫正则需设为 1, 建议采用直接解法做粗网格矫正。

以上参数中, 如果没有设置 PreconditionerType, 则不做预条件, 其余的如果不设置则采用默认的参数。

solver_config 文件和 preconditioner_config 文件的具体设置方法还可以参考 /opt/solver/SolverInterface/Example 目录下的几个例子。

(3) 集成化线性求解器 Python 接口调用方法

Python 接口的定义在 /opt/solver/SolverInterface/PythonInterface 目录下的 solver.py 中:

```
def LinearSolver(MatrixFile, RightHandFile, ResultFile,\ LogFile, SolverConfig,  
PreconditionerConfig, ProcessNum):
```

前面的参数和 C++ 接口是一样的, 最后多了一项设置并行求解进程数的参数 (使用 C++ 接口时, 并行求解是通过对编译好的可执行程序执行类似于

“mpiexec -n <process_num> <exe_name>”这样的命令来实现的)。注意如果采用直接法进行求解,由于直接法调用的 Amesos_KLU 是一个串行求解器, ProcessNum 需设为 1。具体的调用方法可参考如下例子(以 /opt/solver/SolverInterface/Example 目录下的其他例子):

```
import sys
sys.path.append("/opt/solver/SolverInterface/PythonInterface/")

import solver

MatrixFile = "/opt/solver/SolverInterface/Example/ACTIVSg10K/ACTIVSg10K.mtx"
RightHandFile = "/opt/solver/SolverInterface/Example/ACTIVSg10K/RightHandSide.txt"
ResultFile = "/opt/solver/SolverInterface/Example/ACTIVSg10K/result.txt"
LogFile = "/opt/solver/SolverInterface/Example/ACTIVSg10K/log.txt"
SolverConfig = "/opt/solver/SolverInterface/Example/ACTIVSg10K/solver.config"
PreconditionerConfig = "/opt/solver/SolverInterface/Example/ACTIVSg10K/preconditioner.config"
ProcessNum = 4

solver.LinearSolver(MatrixFile, RightHandFile, ResultFile, LogFile, SolverConfig,
PreconditionerConfig, ProcessNum)
```

除上面的计算接口以外, solver.py 中还提供了画出迭代过程中残差下降曲线的函数接口:

```
def DrawResiduals(ResidualLogFile):
```

如果采用预条件 Krylov 子空间迭代法或者代数多重网格法进行求解, 那之前计算过程中产生的 LogFile 即可以用 ResidualLogFile, 作为该函数的输入文件。

6.3.2 输出说明 (必要包括数据结果结构说明)

为了方便用户对求解器进行试用, 在 Python 接口的基础上, 还开发了基于 Jupyter-Notebook 的可视化交互式界面, 用户可以在网页上直接编写 Python 程序调用求解器、运行程序、查看计算结果, 直接结果输出如下图所示, 结果即为 x 目标值。

```

In [2]: import sys
sys.path.append("./opt/solver/SolverInterface/PythonInterface/")
import solver

Matrixfile = "./opt/solver/SolverInterface/Example/ACTIVSg10K/ACTIVSg10K.mtx"
RightHandfile = "./opt/solver/SolverInterface/Example/ACTIVSg10K/RightHandSide.txt"
Resultfile = "./opt/solver/SolverInterface/Example/ACTIVSg10K/result.txt"
LogFile = "./opt/solver/SolverInterface/Example/ACTIVSg10K/log.txt"
SolverConfig = "./opt/solver/SolverInterface/Example/ACTIVSg10K/solver.config"
PreconditionerConfig = "./opt/solver/SolverInterface/Example/ACTIVSg10K/preconditioner.config"
ProcessNum = 4

solver.LinearSolver(Matrixfile, RightHandfile, Resultfile, LogFile, SolverConfig, PreconditionerConfig, ProcessNum)

Dimension of matrix: 20000
Solver Type: GMRES
Block size used by solver: 1
Maximum number of iterations allowed: 1000
Relative residual tolerance: 1e-05
Preconditioner Type: ILU
Number of iterations performed for this solve: 375
Actual Residuals (normalized)
Problem 0 : 9.78074e-06
SUCCESS: Solver converged!

```

```

zhenh@ECTEC-GPU: ~
0.000015690525246
-0.000011846686816
-0.000007773776945
0.0000010293537121
-0.0000012079728491
-0.00000081837187560
-0.0000005257575757
-0.000001267894620
-0.0000082153796028
0.000001986409620
-0.0000014067537231
-0.0000059077209508
0.0000015547275863
-0.00000147249982009
-0.000000959578392
0.0000004288893123
-0.0000013157474169
-0.0000082106905459
0.0000010870919900
-0.0000015860160524
-0.0000061038756602
0.0000019864103815
-0.0000014067537231
-0.000000959578392
0.0000004791506601
-0.0000016236541624
-0.0000061007987466
0.0000015547280544
-0.00000147249981817
-0.0000039541169597
0.000000959578392
-0.0000016236541624
-0.0000082010130419
0.0000010870924118
-0.0000015860161593
-0.0000039861254460
0.0000003256039449
-0.0000016651236450
-0.0000067915059432
-0.0000016236543814
"result.txt" 264L, 469RC

```

图 6-1 计算结果

输出结构:

待解向量的元素按一竖排排列，类型为浮点型数据。

6.3.3 绘图文件

本项目绘图文件采用 jupyter 自带的绘图软件绘画，能够清晰得看到计算过程的残差结果，能够看到自己的计算过程的收敛情况：如下图 6-2 所示，最终得计算结果显示在本课题中 paraview 进行显示，详情请看第七章。

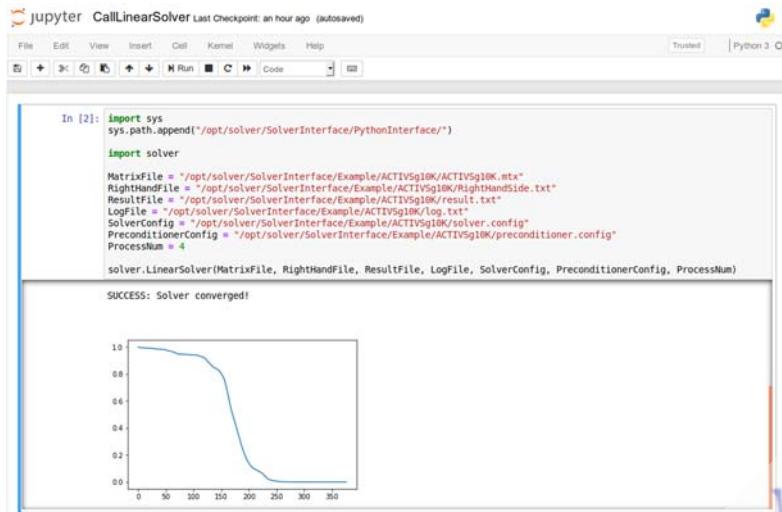


图 6-2 计算残差结果显示

6.3.4 运行说明

针对三种求解器接口，运行方式直接调用集成好的求解器即可。

Zhanghao@ECTEC-GPU: ~					
hyperledger/fabric-peer	latest	lab-fan5d8c2	6 months ago	128MB	
pecl/libcurl	v1	l-w0t59w0bf3x	9 months ago	34MB	
centos	latest	67fa590a97c1c	12 months ago	202MB	
192.168.2.149/zhaowei/trilinos	1.0	9da823597fe64	14 months ago	2.96GB	
jupyter-notebookk1.0	1.0	5929bf737680	16 months ago	1.07GB	
earth/web/mysql3.0	mysql3	4529fc0ed718	20 months ago	372MB	
registry.192.168.2.149/zhaojuncs.com/niuuhong/hoeniu	7.4	06461cd31e80	23 months ago	3.28GB	
zenth19ECTEC-GPU: ~ sudo docker ps					
CONTAINER ID	IMAGE	COMMAND	CREATED	STATUS	PORTS
CONTAINER ID	IMAGE	COMMAND	CREATED	STATUS	PORTS
CONTAINER ID	IMAGE	COMMAND	CREATED	STATUS	PORTS
04faeaae2da2	bd9c13e53bb3	/bin/bash	27 hours ago	Exited (130) 27 hours ago	
f9852466ac1a	cranky-notnouts	"docker-entrypoint.s..."	7 weeks ago	Exited (0) 7 weeks ago	
2d7305c4dec6	mysql-5.7.17-test	"docker-entrypoint.s..."	7 weeks ago	Exited (0) 7 weeks ago	
c09095ec7ce5	mysql	/bin/bash	2 months ago	Exited (0) 7 weeks ago	
	joyval/golberg	/bin/bash			
zenth19ECTEC-GPU: ~ sudo docker run -it fda8235697f64 /bin/bash					
root@77093e5fb47a: ~#					
bin boot bin boot dev etc home lib lib64 media mnt opt proc root run sbin srv sys tmp usr var					
root@77093e5fb47a: ~# cd /opt/					
root@77093e5fb47a: ~# cd /opt/					
solver					
root@77093e5fb47a: ~# cd solver/					
root@77093e5fb47a: ~# cd /opt/solver/					
ls					
SolverInterface Trilinos					
root@77093e5fb47a: ~# cd /opt/solver/					
cd SolverInterface/					
root@77093e5fb47a: ~# /opt/solver/SolverInterface# ls					
SolverInterface Document Example PythonInterface					
root@77093e5fb47a: ~# /opt/solver/SolverInterface# cd Example/					
root@77093e5fb47a: ~# /opt/solver/SolverInterface/Example# ls					
ACTIVStoK ACTIVStoK Stiff StiffSlow					
root@77093e5fb47a: ~# /opt/solver/SolverInterface/Example# cd Stiff					
root@77093e5fb47a: ~# cd /opt/solver/SolverInterface/Example/Stiff# ls					
CallLinearizarSolver.ipynb force.txt preconditioner.config					
CallLinearizarSolver.py log.txt result.txt stiff.mtx					
root@77093e5fb47a: ~# /opt/solver/SolverInterface/Example/Stiff# stiff.mtx					
root@77093e5fb47a: ~# /opt/solver/SolverInterface/Example/Stiff# stiff.py					
root@77093e5fb47a: ~# /opt/solver/SolverInterface/Example/Stiff# stiff#					

- (1) 采用 c++库方式进行调用求解器

需要进行编译 g++ *.c -o exe 程序

./exe 进行计算即可

- (2) 采用 python 进行调用

python exe.py

第 7 章 人工智能地球物理

7.1 前言

多元、多源(重、磁、电、震)、多属性综合地球物理数据具有典型的大数据特征，作为项目的特色，将研究大数据分析技术，通过大数据技术挖掘物性之间隐蔽的相关关系，特别是人工智能处理手段在综合地球物理上的实现。

本模块具体开发以下几个方面：

7.1.1 综合地球物理数据特征提取

重点开发基于 Python 语言的 Keras 人工神经网络库，进行地震数据特征的分类、聚类分析等提取。通过深度神经网络机器学习算法(比如 VGG16)，提取出不同地球物理场响应的特征，如与小尺度地质异常体相关的地震绕射信息、重力密度信息、磁化率信息以及电磁场极化信息等，并用于重、磁、电、震综合地球物理数据的处理与解释。

7.1.2 深度学习方法

深度学习是人工智能领域的研究热点，该方法目前成功应用于模式识别、机器翻译和计算机视觉等方面，但在地球物理领域的应用还不够深入。深度学习采用深层神经网络模型，具有强大的表达能力，能够取得比传统机器学习方法更好的特征提取效果。深度学习利用模型中的隐藏层，通过特征组合的方式，逐层将原始综合地球物理数据输入转化为神经网络模型的“浅层特征、中层特征、深层特征”，通过建立数学模型和研究优化算法，逐步迭代直至最终的任务目标。

7.2 镜像说明

Docker 镜像名称为：Deepo_ai_interp:ai_interp_v1.0

7.3 软件的使用说明

7.3.1 输入说明（必要包括参数，网格）

7.3.1.1 模型样本生成模块的输入参数

输入参数包括：

1、几何参数：

nx: x 方向采样点个数 (default value: 400)

nz: z 方向采样点个数 (default value: 1500)

input_vfile: 初始速度模型，格式为：vp3.bin (user input)

input_rhofile: 初始密度模型，格式为：rho3.bin (user input)

2、子波参数：

wvlt_cfreq: 主频 (default value: 30.0)

3、输出参数

output_syn_zo: 输出合成样本记录，格式为syn_zo3data (user input)

3、主程序可读取上述定义的参数文件，比如，格式如下：

文件名配置：**parameters_ai_interp1.conf**，内含例如下述参数

```
parameters_ai_interp1.conf
nx=400;           %nx: x 方向采样点个数 (default value: 400)
nz=1500;          %nz: z 方向采样点个数 (default value: 1500)
vfile= vp3.bin    %vp1: 初始速度模型，格式为：vp1.bin (user input)
rhofile=rho3.bin  %rho1: 初始密度模型，格式为：rho1.bin (user input)
wvlt_cfreq= 30.0  %wvlt_cfreq: 主频 (default value: 30.0)
output_syn_zo=syn_zo3data % output_syn_zo: 输出，格式为 syn_zo3data (user input)
```

说明：本模块的输入参数附有缺省值，用户需要根据实际问题，修改输入参数值。

7.3.1.2 VGG16 深度网络识别地质体模块的输入参数

1、文件参数：

seismicfile: 输入标准 SEG-Y 地震数据文件名称，格式为：F3.sgy (user input)

ninline: inline 道数 (user input)

nxline: xline 道数 (user input)

ntime: 时间采样点数 (user input)

outpufile: 输出 SEG-Y 格式的地质体识别结果, 格式为:F3out.sgy (user input)

2、 VGG16 神经网络参数:

labeled_data: 迁移学习的有监督训练样本的输入数据 (user input)

labels:迁移学习的有监督训练样本的输出数据, 格式 :classification.ixz (user input)

weightsfile:VGG16 网络的预训练权文件, 如果为空则重新训练权, 格式:
vgg_model.h5 (user input)

3、 主程序可读取上述定义的参数文件, 比如, 格式如下:

文件名配置: **parameters_ai_interp2.conf**, 内含例如下述参数

```
parameters_ai_interp2.conf
seismicfile =F3.sgy;          %seismicfile: 输入标准 SEG-Y 地震数据文件名称(user
                                input)
ninline =651;                 %ninline: inline 道数 (user input)
nxline = 951                  %nxline: xline 道数 (user input)
ntime =462                     %ntime: 时间采样点数 (user input)
outpufile = 'F3out.sgy'        %outpufile: 输出 SEG-Y 格式的地质体识别结果(user
                                input)
labeled_data =339              %labeled_data: 迁移学习的有监督训练样本的输入数据
                                (user input)
labels ='classification.ixz'   %labels: 迁移学习的有监督训练样本的输出数据(user
                                input)
weightsfile = 'vgg_model.h5'    %weightsfile: VGG16 网络的预训练权文件, 如果为空则重
                                新训练权(user input)
```

说明:本模块的输入参数附有缺省值, 用户可以根据实际问题, 修改输入参数值。

7.3.2 输出说明（必要包括数据结果结构说明）

7.3.2.1 模型样本生成模块的输出

输出为 Python 中 npy 二进制格式文件

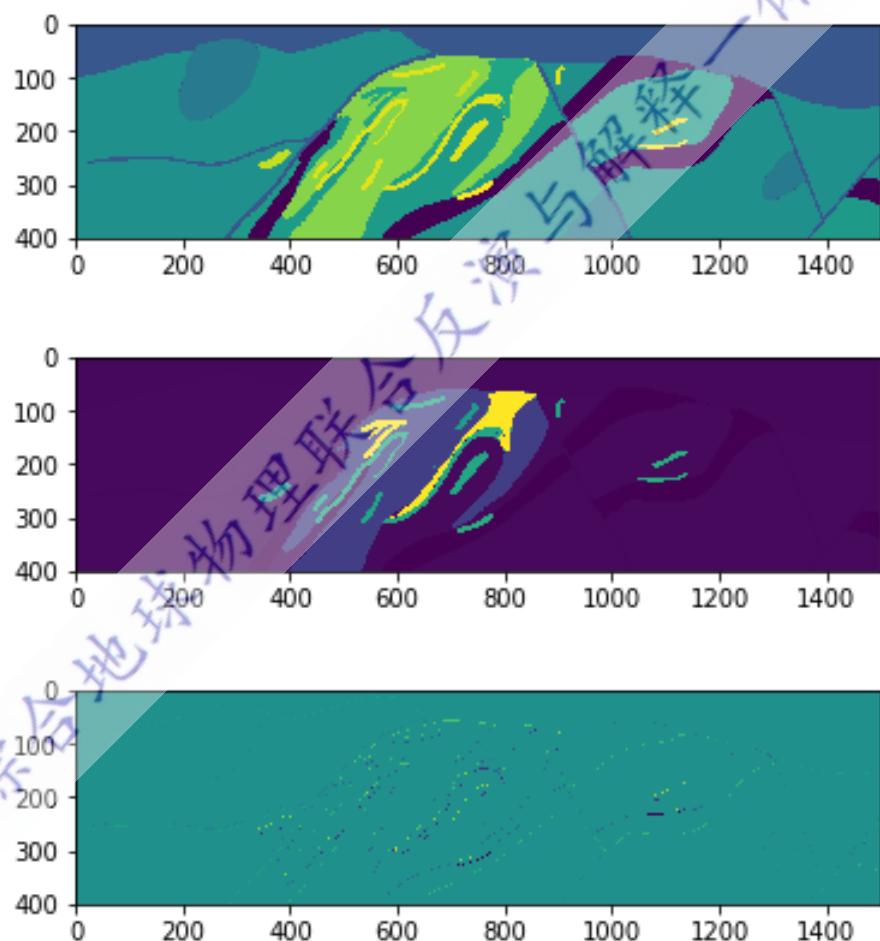
7.3.2.2 VGG16 深度网络识别地质体模块的输出

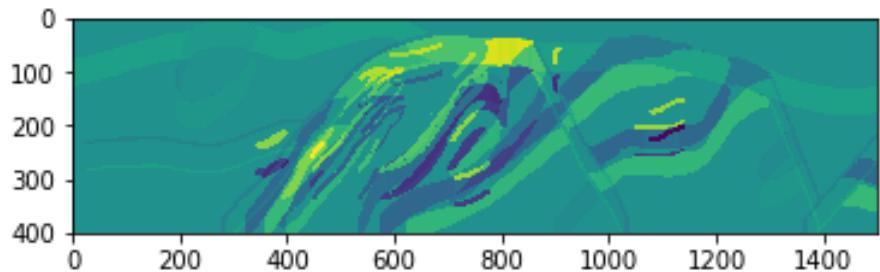
输出为标准 SEG-Y 二进制格式文件

7.3.3 绘图文件

7.3.3.1 模型样本生成模块的绘图

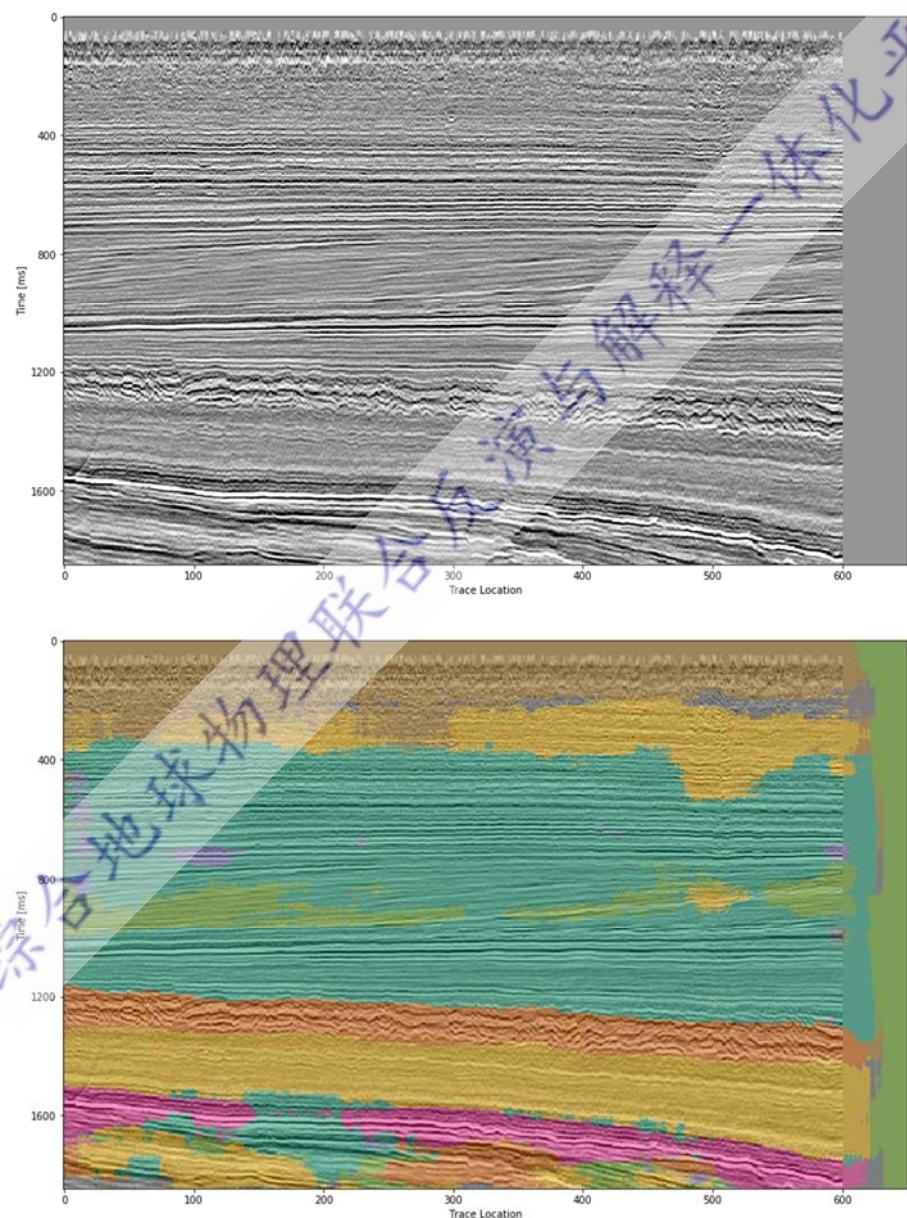
系统统一绘图，绘图文件效果如图





7.3.3.2 VGG16 深度网络识别地质体模块的绘图

系统统一绘图，绘图文件效果如图



7.3.4 运行说明

7.3.4.1 模型样本生成模块的运行

Docker 镜像启动: sudo docker run --runtime=nvidia -it -v /home/zgwang:/opt Deepo_ai_interp:ai_interp_v1.0 /bin/bash

启动 Docker 镜像后，在 bash 中输入如下命令运行。

命令: ipython /home/zgdata/models1_3/models2data.py

7.3.4.2 VGG16 深度网络识别地质体模块的运行

Docker 镜像启动: sudo docker run --runtime=nvidia -it -v /home/zgwang:/opt Deepo_ai_interp:ai_interp_v1.0 /bin/bash

启动 Docker 镜像后，在 bash 中输入如下命令运行。

命令: ipython /home/zgdata/ai_interp/seismicVGG16load.py

第 8 章 可视化

8.1 前言

开发三维建模与可视化模块: 基于 Paraview 与 VTK 的三维 渲染模块开发。主要分为三维建模与三维可视化两大模块: 三维建模模块主要涉及与地质三维建模软件的接口以及简单的参数化体网格 属性建模, 及模型解释与预测; 并行可视化主要基于 Paraview 与 VTK 实现分布式图形渲染显示。

本课题涉及的三维地质建模主要是与本课题软件格式的对接, 将编制对接国际主流地质建模软件 Petrel、GoCAD 等的数据格式转换程序, 实现成熟模型在 Paraview 中的显示, 以及与 VTK 图形库的显示接口。此外, 也包含了简单的参数化三维体网格的属性建模, 或称为属性赋值。在已有网格数据基础上进行插值与投影计算, 将参数化属性信息赋予数值模型, 提供简单的三维数值模拟或反演初始模型的部分前处理功能。

本课题产品为 ParaViewWeb, 一个 JavaScript 库, 包括 Web 框架, 用来在 Web 浏览器里构建交互式的科学可视化的应用程序。这些应用可以利用 VTK 或者 ParaView 作为后端, 进行大量的数据处理和渲染, 还可以在静态的 Web 服务器, 如 Apache 或者 Nginx 上使用。甚至可以构建本地命令行工具并使用浏览器与应用程序进行交互。

全新的 ParaViewWeb 已经采用了下一代的 JavaScript 规范, 允许跨项目间更好的代码重用, 而不会在开发者的应用程序中强制代码庞大。这个功能允许 ParaViewWeb(JavaScript 库)可以收集所有专业的以 ParaViewWeb 中的基于 Web 的科学可视化的以组件 UI 数据处理和算法的形式的知识, 而不会给利用库的最终应用带来不必要的成本。开发者通过科学可视化快速构建下一代基于 Web 的应用程序, 仅仅需要提取需要的功能和特性, 并抛弃多余部分, 本产品可以实现动态参数化显示, 最终打包成 docker 进行统一平台的集成。

8.2 镜像说明

镜像包括 paraviewweb，能够实现 web paraview 进行显示。

只需要通过 docker 启动我们的服务，即可在当前硬件上为 ParaViewWeb 应用程序提供服务。在以下命令中，需要更改某些字段以匹配用户需求。这是用户必须提供的字段列表。

- \${SERVER_NAME}: 这是可用于访问服务器的主机。完整的字符集应替换为有效的东西，例如 www.kitware.com 或 **pvw.company.com**。
- \${PROTOCOL}: 如果您使用 **http://** 进行连接，则该值应为 **ws**，而如果您设置 Apache 或其他通过 **https://** 提供安全连接的内容，则该值应为 **wss**
- \${DATA}: 这是系统上存储数据文件的本地路径，以便 Web 应用程序可以访问和加载它们。
- \${PORT}: 您要在其上运行 docker 映像的端口。对于 Apache 虚拟主机配置，我们假设值为 9000。

因此命令行应如下所示：

```
PORT=9000  
DATA=/mnt/data  
sudo docker run --gpus all  
    -p 0.0.0.0:${PORT}:80  
    -v ${DATA}:/data  
    -e "SERVER_NAME=pvw.company.com"  
    -e "PROTOCOL=ws"  
    --restart unless-stopped  
    -dti kitware/paraviewweb:pvw-egl-demo-v5.6.0
```

可以通过将浏览器指向来访问它 **https://\${SERVER_NAME}/**，并假设您使用 Apache 作为 HTTPS 的前端。如果要停止服务，可以使用 `sudo docker ps` 命令行查找容器 ID 然后，可以使用另一个命令停止它 `sudo docker stop ${CONTAINER_ID}`。另外，如果您只想在本地运行它以进行演示 `ctrl+c`，可以

使用杀死它，则可以使用以下命令行。

```
sudo docker run \
-p 0.0.0.0:9000:80 \
-v ~/data \
-e "SERVER_NAME=localhost:9000" \
-e "PROTOCOL=ws" \
-ti kitware/paraviewweb:pvw-egl-demo-v5.6.0
```

可以通过将浏览器指向 `http://localhost:9000` 请注意，在上述命令中，构建会话 URL 根所需的信息是如何作为环境变量提供给 `docker run` 命令的。以相同的方式，您可以提供额外的参数以传递给启动的 `pvython` 实例：只需使用名为的环境变量 `EXTRA_PVTHON_ARGS`，如以下示例所示：

```
sudo docker run \
-p 0.0.0.0:9000:80 \
-v ~/data \
-e SERVER_NAME="localhost:9000" \
-e PROTOCOL="ws" \
-e EXTRA_PVTHON_ARGS="-dr,--mesa-swr" \
-ti kitware/paraviewweb:pvw-egl-demo-v5.6.0
```

通过环境变量以这种方式传递时，多余的 `pvython args` 以逗号分隔，并且不插入任何多余的空格

8.3 软件的使用说明

- i. 根据 7.2 章节的说明，运行起来 docker，然后通过浏览器打开访问软件，可以看到地址为 <http://192.168.2.134:9090/>

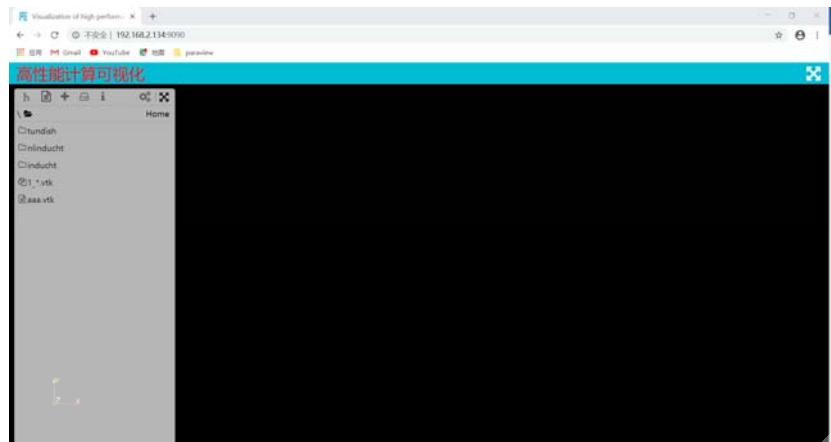


图 8-1 软件打开页面

- ii. 打开自己的模型，根据下图蓝色框提示，进行单点击进行操作，根据提示即可上传自己的可视化模型，上传成功，结果即可进行显示。



图 8-2 软件打开页面

- iii. 找到自己的模型并且调整自己的色标参数



图 8-3 课题四非线性求解器算法计算显示

8.3.1 输入说明（必要包括参数，网格）

Paraview 显示主要需要输入数据，Paraview 作为显示工具支持的格式如下格式，其中最通用的是 vtk 格式，并且包括如下的文件格式。vtk 文件格式详解请

看附件：

.csv .txt .CSV .TXT	满足格式的文本文档
.vtk	Vtk 格式（二进制及文本）
.case	EnSight 文件格式
.cas	Ansys fluent 文件格式
.foam	Openfoam 文件格式
.xyz	Plot3d 文件格式

包括如上文本文件格式，即可使用。

第9章 地质解释与应用示范

9.1 前言

金属矿勘查经常使用的重、磁、电法在深部分辨率低，无法有效找矿。高分辨率地震波探测方法能够精细地刻画金属矿的控矿构造，追踪含矿层，甚至可直接发现深部矿体。因此，地震波探测技术将成为深部找矿的核心技术。为了更清楚的了解矿体的分布构造和空间展布，将通过相空间变换（谱分解）的方法实现对较小规模的矿体的空间展布进行刻画，对断裂、裂隙及矿体边界清晰成像刻画。

1) 三参数小波

针对薄互层地震信号含有快速变化的振幅和频率分量的特点，高静怀等（2006）提出了三参数小波。由于三参数小波具有三个参数，通过调节三个参数，可以灵活地调整其形状，将其应用于层序检测和高精度地震资料分辨中都取得了很好的效果。三参数小波的定义为：

$$\psi(t; \sigma, \tau, \beta) = e^{-\tau(t-\beta)^2} \{ p(\sigma, \tau, \beta) [\cos(\sigma t) - k(\sigma, \tau, \beta)] + iq(\sigma, \tau, \beta) \sin(\sigma t) \},$$

其中， τ 为能量衰减因子， β 为能量延迟时间， σ 为分析小波调制频率，可简写为：

$$\psi(t; \Lambda) = e^{-\tau(t-\beta)^2} \{ p(\Lambda) [\cos(\sigma t) - k(\Lambda)] + iq(\Lambda) \sin(\sigma t) \},$$

其中，

$$k(\Lambda) = e^{-\frac{\sigma^2}{4\tau}} \left[\cos(\beta\sigma) + i \frac{q(\Lambda)}{p(\Lambda)} \sin(\beta\sigma) \right],$$
$$p(\Lambda) = \left(\frac{2\tau}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \left[4(e^{-\frac{\sigma^2}{2\tau}} - e^{-\frac{3\sigma^2}{8\tau}}) \times \cos^2(\beta\sigma) + 1 - e^{-\frac{\sigma^2}{2\tau}} \right]^{\frac{1}{2}},$$
$$q(\Lambda) = \left(\frac{2\tau}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \left[4(e^{-\frac{\sigma^2}{2\tau}} - e^{-\frac{3\sigma^2}{8\tau}}) \times \sin^2(\beta\sigma) + 1 - e^{-\frac{\sigma^2}{2\tau}} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

2) 计算重排准则（瞬时频率）

信号 $s(t)$ 关于三参数小波 $\psi(t; \Lambda)$ 的小波变换结果为：

$$W_s(a,b) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{s}(\omega) \bar{\psi}(a\omega; \Lambda) e^{i\omega b} d\omega$$

$$= \frac{A}{2\pi} [\bar{\psi}(a\omega_0; \Lambda) e^{i\omega_0 b} + \bar{\psi}(-a\omega_0; \Lambda) e^{-i\omega_0 b}]$$

上式可以简化为：

$$W_s(a,b) = \frac{A}{2\pi} \bar{\psi}(a\omega_0; \Lambda) e^{i\omega_0 b}$$

假如三参数小波 $\psi(t; \Lambda)$ 的峰值频率为 ξ_M ，则小波变换的结果将在尺度 $a = \xi_M / \omega_0$ 处取到最大值，并以这个能量最大的尺度为中心形成一个尺度带，造成能量的扩散，为了得到更集中的时频分布，首先参考 Daubechies 等在研究 EMD 时，提出信号 $s(t)$ 的重排准则（瞬时频率）定义为：

$$\omega_s(a,b) = \frac{\partial_b W_s(a,b)}{2\pi i W_s(a,b)},$$

其中， $W_s(a,b) \neq 0$ 。

9.2 镜像说明

- 1) 本程序放置 */opt/work/STTA
- 2) 进入到*/opt/work/STTA 文件下，执行 STTA 即可

9.3 软件的使用说明

- 1) 首先执行以编译好的可执行文件
- 2) 输入需要处理的数据文件名
- 3) 输入输出数据的文件名
- 4) 输入三参数小波变换的参数
- 5) 输入需要数据的频率值
- 6) 执行可执行的文件 . /XXXX

9.3.1 输入说明（必要包括参数，网格）

输入的数据为 SEGY 的标准 IBM 格式或者微机格式，程序执行前需要的需要输

数据的文件名和计算结果输出数据的文件，输入需要计算的参数。

以下参数可以根据不同的数据资料选择合适的参数

Sigma 小波的调制频率

Tau 控制衰减快慢

Beta 控制相位

F 输出数据的频率

9.3.2 输出说明（必要包括数据结果结构说明）

输出文件与输入文件格式一致均为 SEGY 数据，输入数据为时间域信号，输出数据为单频数据，数据为二维数据和三维数据均可。

9.3.3 绘图文件

9.3.4 运行说明

根据提示输入文件名和参数后程序开始执行，并显示进程，直到计算结束，程序自动保存数据。

参考文献

- [1] Bao-Hua Huang, Chang-Feng Ma, Convergent conditions of the generalized Newton method for absolute value equation over second order cones, *Applied Mathematics Letters*, 92: 151-157, 2019. (SCI-I 唯一标注)
- [2] Bao-Hua Huang, Chang-Feng Ma, Iterative criteria for identifying strong H-tensors, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 352: 93–109, 2019. (SCI-II 第一标注)
- [3] Bao-Hua Huang, Chang-Feng Ma, Some iterative algorithms for positive definite solution to nonlinear matrix equations, *Journal of Applied Analysis and Computation*, 9(2), 526–546, 2019. (SCI-III 第一标注)
- [4] Bing Zhang, Shuanggen Jin, Cai Liu, Zhiqi Guo, Xiwu Liu, 2020, Prediction of shear wave velocity based on a statistical rock-physics model and Bayesian theory. *journal of petroleum science and engineering* (reviewing).
- [5] Cai-Rong Chen, Chang-Feng Ma, An accelerated cyclic-reduction-based solvent method for solving quadratic eigenvalue problem of gyroscopic systems, *Computers and Mathematics with Applications*, 77: 2585-2595, 2019. (SCI-III 第一标注)
- [6] Chaolong Jiang, Wenjun Cai, Yushun Wang, A linear-implicit and local energy-preserving scheme for the sine-Gordon equation based on the invariant energy quadratization approach, *Journal of Scientific Computing*, 28(2019):1629-1655. (JCR 2 区, 第二标注)
- [7] Cheng Chang, Gang Luo(*), Mingwen Wang, Yunqiang Sun, 2020, Near-salt perturbations of stresses and pore fluid pressures, and their impacts on wellbore stability in Kuqa depression of Tarim Basin, China, *Interpretation*, <https://doi.org/10.1190/int-2019-0168.1>. SCI
- [8] Cheng-Liang Li, Chang-Feng Ma, Convergence properties of the single-step preconditioned HSS method for non-Hermitian positive semidefinite linear systems, *Mediterranean Journal of Mathematics*, 16: 23, 2019. (SCI-III 第一)

标注)

- [9] Cheng-Liang Li, Chang-Feng Ma, Xiaofang Xu, A class of efficient parameterized shift-splitting preconditioners for block two-by-two linear systems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2020, 369: 124815. (SCI-II 第三标注)
- [10] G T Chen, Y F Wang, Z L Wang and S Y Zhang, Dispersion-relationship-preserving seismic modelling using the cross-rhombus stencil with the finite-difference coefficients solved by an over-determined linear system, Geophysical Prospecting, 68, 1771-1792, 2020.
- [11] Gang Luo, Mian Liu. Stressing rates and seismicity on the major faults in eastern Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2018, 123(12), 10,968-10,986. <https://doi.org/10.1029/2018JB015532>, SCI-2 区(TOP), 第二标注
- [12] Gao Z, Pan Z, Zuo C, et al. An Optimized Deep Network Representation of Multimutation Differential Evolution and Its Application in Seismic Inversion[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(7): 4720-4734.
- [13] Gao, J., Zhang, H., Zhang, S., Xin, H., Li, Z., Tian, W., Bao, F., Cheng, Z., Jia, X., & Fu, L. (2020), Magma recharging beneath the Weishan volcano of the intraplate Wudalianchi volcanic field, northeast China, implied from 3-D magnetotelluric imaging. Geology, v. 48, doi: <https://doi.org/10.1130/G47531.1>.
- [14] Hu Z, Gao J, Liu N. Separation of Blended Seismic Data Using the Synchrosqueezed Curvelet Transform[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(4): 711-715.
- [15] Jianbing Duan, Yazhou Fu, Zhengwei Zhang, Jiafei Xiao, Chengquan Wu. Genesis of the Dounan manganese deposit of southeast Yunnan, China: Constraints from the mineralogy and geochemistry of micronodules[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020, 214, 106541.
- [16] Jin Cui, Wenjun Cai, Chaolong Jiang, Yushun Wang, A new linear and conservative finite difference scheme for the Gross-Pitaevskii equation with angular momentum rotation. The Australian & New Zealand Industrial and

Applied Mathematics Journal, 2(2019):204-232 (JCR 3 区, 第二标注)

- [17] Jing-Tao Li, Chang-Feng Ma, PAHSS-PTS alternating splitting iterative methods for nonsingular saddle point problems, Journal of Applied Analysis and Computation, 9(3): 829-839, 2019. (SCI-III 第一标注)
- [18] Lei, Yu, Liguo Jiao, and Huaran Chen. "Possible correlation between the vertical component of lithospheric magnetic field and continental seismicity." Earth, Planets and Space 70.1 (2018): 179. (SCI)
- [19] Li C, Gao J, Gao Z, Wang R, and Yang T. Periodic plane-wave least-squares reverse time migration for diffractions[J]. Geophysics, 2020, 85(4): S185-S198.
- [20] Li C, Gao J, Wang R, and Gao Z. Enhancing Subsurface Scatters Using Reflection-Damped Plane-Wave Least-Squares Reverse Time Migration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(4):706-710.
- [21] Li F, Gao J, Gao Z, et al. A causal imaging condition for reverse time migration using the Discrete Hilbert transform and its efficient implementation on GPU[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2019, 16(5): 894-912.
- [22] Li H, Lin J, Liu N, et al. Seismic Reservoir Delineation via Hankel Transform Based Enhanced Empirical Wavelet Transform[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(8): 1411-1414.
- [23] Li Yin, Gang Luo. The spatiotemporal strain partitioning across the Longmen Shan fault zone during seismic cycles: Implications for deformation mechanisms and seismicity in eastern Tibet. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 173(15), 189-203. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.01.022>, SCI-3 区, 第三标注
- [24] Li Z, Gao J, Li H, et al. Synchroextracting transform: The theory analysis and comparisons with the synchrosqueezing transform[J]. Signal Processing, 2020, 166: 107243.
- [25] Li Z, Gao J, Wang Z. A Time-Synchroextracting Transform for the Time-Frequency Analysis of Seismic Data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 17(5): 864-868.
- [26] Lin-Jie Chen, Chang-Feng Ma, Developing CRS iterative methods for periodic Sylvester matrix equation, Advances in Difference Equations, 2019, 2019(1): 87.

- [27] Liu N, Gao J, Zhang B, et al. Self-Adaptive Generalized S-Transform and Its Application in Seismic Time–Frequency Analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(10): 7849-7859.
- [28] Liu N, Li Z, Sun F, et al. The Improved Empirical Wavelet Transform and Applications to Seismic Reflection Data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(12): 1939-1943.
- [29] Liu N, Zhang B, Gao J, et al. Seismic anelastic attenuation estimation using prestack seismic gathers[J]. Geophysics, 2019, 84(6): M37-M49.
- [30] Liu, S., and S.G. Jin (2020), 3-D gravity anomaly inversion based on improved guided fuzzy c-means clustering algorithm, Pur. Appl. Geophys., 177(2), 1005-1027, doi: 10.1007/s00024-019-02306-0.
- [31] Liu,S., S. Jin, Robert, Tenzer., and Q, Chen., Three-dimensional gravity inversion based on optimization processing from edge detection,(reviewing).
- [32] magnetic susceptibility using full magnetic gradient data, Computational Mathematics and Mathematical Physics, 60(6): 1000-1007, 2020.
- [33] Mingwen Wang, Yunqiang Sun, Gang Luo(*), and Rui Zhang, 2019, Stress perturbations around the deep salt structure of Kuqa depression in the Tarim Basin, Interpretation, Vol. 7, Iss. 3, <https://doi.org/10.1190/INT-2018-0177.1>. SCI
- [34] Q L He and Y F Wang, Reparameterized full waveform inversion under the framework of deep neural networks, Geophysics, 2020.
- [35] S Sun and Y F Wang, Gravity-magnetic cross-gradient joint inversion by the cyclic gradient method, Optimization Methods and Software, DOI: 10.1080/10556788.2020.1786565, 2020.
- [36] Sun F, Gao J, Liu N. The approximate constant Q and linearized reflection coefficients based on the generalized fractional wave equation. [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145 (1): 243-253 .
- [37] Sun, M., S. Jin, and P. Yu, Elastic full waveform inversion based on acoustic-elastic coupled equation for ocean bottom four-component data, (reviewing).
- [38] Tong Kang, Ran Wang, Huai Zhang, Fully discrete finite element method to

solve a nonlinear induction hardening problem, Numer. Meth. Part. D.E., accepted. (SCI 中科院二区)

[39] Tong Kang, Ran Wang, Huai Zhang, Potential field formulation based on decomposition of the electric field for a nonlinear induction hardening model, Communications in Applied Mathematics and Computational Science, Vol.14, No.2, 2019, 175-205. (SCI 中科院二区)

[40] Wang, Zhiguo, Bing Zhang, Jinghuai Gao, How to transform the seismic time series to a graph, 89th SEG Annual International Meeting, San Antonio, 2019.9.18, Expanded Abstracts

[41] Wenjun Cai, Chaolong Jiang, Yushun Wang, Yongzhong Song, Structure-preserving algorithms for the two-dimensional sine-Gordon equation with Neumann boundary conditions, Journal of Computational Physics, 395(2019):166-185. (JCR 2 区, 第二标注)

[42] Xianying Wang, Cong Guo, David A. Yuen, Gang Luo(*), 2020, GeoVReality: A computational interactive virtual reality visualization framework and workflow for geophysical research, Physics of the Earth and Planetary Interiors, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.106312>. SCI-3

[43] Xianying Wang, Cong Guo, David A. Yuen, Gang Luo(*), 2020, GeoVReality: A computational interactive virtual reality visualization framework and workflow for geophysical research, Physics of the Earth and Planetary Interiors, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.106312>. SCI-3 区

[44] Xuan, S., S.G. Jin, and Y. Chen (2020), Determination of the isostatic and gravity Moho in the East China Sea and its implications. Journal of Asian Earth Sciences, 187, 104098, doi: 10.1016/j.jseaes.2019.104098.

[45] Xuan, S., S.G. Jin, Y. Chen, and J. Wang (2019). Insight into the preparation of the 2016 Ms6.4 Menyuan earthquake from terrestrial gravimetry-derived crustal density changes. Scientific Reports, 9, 18227, doi:10.1038/s41598-019-54581-5.

[46] Y F Wang and W Q Liang, Chapter: “Optimized Finite-difference Methods for Seismic Acoustic Waves Modeling” of the book “Computational and Experimental Studies of Acoustic Waves”, DOI:

<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.71647>, 2018.

- [47] Y F Wang, A S Leonov, D V Lukyanenko and A G Yagola, General Tikhonov Regularization with Applications in Geoscience (Review Article), *CSIAM Trans. Appl. Math.*, 1: 53-85, 2020.
- [48] Y F Wang, D V Lukyanenko and A G Yagola, Magnetic parameters inversion method with full tensor gradient data, *Inverse Problems and Imaging*, 13(4): 745-754, 2019.
- [49] Y F Wang, I I Kolofov, D V Lukyanenko and A G Yagola, Reconstruction of
- [50] Y F Wang, L L Rong, L Q Qiu, D V Lukyanenko and A G Yagola, Magnetic susceptibility inversion method with full tensor gradient data using low temperature SQUIDs, *Petroleum Science*, 16(4): 794-807, 2019.
- [51] Y P Zhang and Y F Wang, Three-dimensional gravity-magnetic cross-gradient joint inversion based on structural coupling and a fast gradient method, *Journal of Computational Mathematics*, 37(6): 758-777, 2019.
- [52] Yajing Gao, Gang Luo(*), Yunqiang Sun, 2020, Seismicity, Fault Slip Rates, and Fault Interactions in a Fault System, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2019JB017379, <https://doi.org/10.1029/2019JB017379>. SCI-2 ✎ (Top)
- [53] Yan K, Gao J, Zhang B, et al. Seismic Attenuation Estimation Using the Centroid Frequency Shift and Divergence[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(12): 1924-1928.
- [54] Yang L, Gao J, Liu N, et al. A Coherence Algorithm for 3-D Seismic Data Analysis Based on the Mutual Information[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(6): 967-971.
- [55] Yang, Yang, Jinghuai Gao, Zhiguo Wang and Zhen Li, Seismic Absorption Qualitative Indicator via Sparse Group-Lasso-Based Time-Frequency Representation, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, online, doi: 10.1109/LGRS.2020.3006340.
- [56] Yaxing Li, Yunqiang Sun, Xiaofeng Jia(*) and Gang Luo(*), 2019, How do stress perturbations near salt bodies induce difficulty in salt imaging? Insights from a

geomechanical model and salt imaging, Petroleum Geoscience, V.25. p. 273-281,
<https://doi.org/10.1144/petgeo2018-092>. SCI

[57]Yayun Fu, Yongzhong Song, Yushun Wang, Maximum-norm error analysis of a conservative scheme for the damped nonlinear fractional Schrödinger equation, Mathematics and Computers in Simulation, 166(2019):206-223. (JCR 3 区, 第二标注)

[58]Yi-Fen Ke, Chang-Feng Ma, Huai Zhang, The relaxation modulus-based matrix splitting iteration methods for circular cone nonlinear complementarity problems, Computational and Applied Mathematics, 37: 6795-6820, 2018. (SCI-III 第三标注)

[59]Z Geng and Y F Wang, Automated design of a convolutional neural network with multi-scale filters for cost-efficient seismic data classification. Nature Communications, 11: 3311, 2020.

[60]Zhang Y, Gao J. Tutorial: Source simulation for 3D poroelastic wave equations[J]. Geophysics, 2019, 84(6): W33-W45.

[61]Zheng Zengji, Jin Shuanggen, Fan Lihong. Co-seismic deformation following the 2007 Bengkulu earthquake constrained by GRACE and GPS observations[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2018, 280: 20-31, doi: 10.1016/j.pepi.2018.04.009.

[62]贝叶斯同化重力反演方法构建龙门山地壳密度模型”, 地球物理学报, 2020 (SCI)

[63]董超, 张怀, 石耀霖, 地磁场发电机数值模拟综述, 中国科学院大学, 36(2):145-154, 2019. (国内核心 第二标注)

[64]胡阿香, 彭建堂. 湖南渣滓溪锑钨矿床流体包裹体特征及其意义.大地构造与成矿学, 2020,44(3):431-446.

[65]李红蕾, and 陈石. "川滇地区地壳密度变化与强震孕育关系."地震学报 5 (2019).

[66]彭建堂. 2019. 湖南杏枫山金矿区首次发现高品位的钨矿体. 地质论评, 65 (3): 664-670

- [67] 沈长明, 等. 湖南水口山矿田综合物探方法有效性研究与资料二次开发. 湖南科学技术出版社, 2020. (书号: ISBN 978-7-5710-0570-2)
- [68] 田丰, 冷成彪, 张兴春等. 2019. 短波红外光谱技术在矿床勘查中的应用. 矿物岩石地球化学通报, 38:1-10.
- [69] 王然, 张怀, 康彤, 《求解带有非线性边界条件的涡流方程的解耦有限元格式》, 计算数学, in press.
- [70] 王彦飞, V T 沃尔科夫, A G 亚格拉, 《反问题基本理论 反问题基本理论---积分方程: 变分分析及在地球科学中的应用》, 科学出版社, 2020.
- [71] 王彦飞, 反问题中的优化方法, 第 23 章: 《中国学科发展战略·数优化》(袁亚湘 主编) 科学出版社, 科学出版社, 2020.
- [72] 闫熙, 马昌凤, 求解矩阵方程 $AXB+CXD=F$ 参数迭代法的最优参数分析, 计算数学, 41: 37-51, 2019. (国内核心 唯一标注)
- [73] 张龙升, 彭建堂, 林芳梅. 湘西大溶溪钨矿床矽卡岩矿物的矿物学、地球化学特征及其形成机制[J]. 地质论评, 2020, 66, 1:113-139.
- [74] 郑增记, 金双根, 范丽红. 利用 GRACE 重力和重力梯度变化估计 2012 年苏门答腊地震断层参数 [J]. 地球物理学报, 62(11): 4129-4141, doi: 10.6038/cjg2019M0600.

专利文献

- [1] 刘鹏, 王彦飞, 一种基于卷积稀疏编码的高斯束偏移方法, 专利号: ZL201910443810.7, 授权: 中华人民共和国国家知识产权局, 2020.
- [2] 于彩霞, 王彦飞, 地震波速度反演方法和装置, 专利号: ZL201710168052.3, 授权: 中华人民共和国国家知识产权局, 2019.
- [3] 杨涛;高静怀;高照奇;张兵, 一种基于信息散度的地震数据属性提取方法, CN201910126690.8, 2019.05.21
- [4] 杨涛;高静怀;孙逢圆;高照奇;张兵;王治国;李闯, 一种基于核相关的地震数据属性提取方法, CN201910325237.X, 2019.07.05
- [5] 孙敏傲, 金双根, 一种基于声波算子的空间互相关弹性波反射波形反演方法, 专利号: CN 110764146 B, 授权: 中华人民共和国国家知识产权局, 2020.
- [6] 孙敏傲, 金双根, 一种基于声-弹耦合方程的弹性波最小二乘逆时偏移方法, 专利号: CN 110687600 B, 授权: 中华人民共和国国家知识产权局, 2020.
- [7] 张冰, 金双根, 一种基于统计岩石物理模型的横波速度预测方法, 专利号: 201910481440.6, 授权: 中华人民共和国国家知识产权局, 2020.

软件著作权文献

- [1] 王彦飞, 张心宇, 人工智能辅助地震解释软件 (AIASI) V1.01, 2020SR0668502, 授权: 中华人民共和国国家版权局, 2020.
- [2] 郑增记, 时变重力卫星 GRACE 数据预处理软件, V1.0, 2019SR0681852, 授权: 中华人民共和国国家版权局, 2020.
- [3] 重磁位场数据处理与解释系统-数据处理系统, V1.0, 2020SR0752096, 授权: 中华人民共和国国家版权局, 2020.
- [4] 重磁位场数据处理与解释系统-三维建模与正演计算软件, V1.0, 2020SR0752089, 授权: 中华人民共和国国家版权局, 2020.
- [5] 重磁位场数据处理与解释系统-位场反演与解释系统, V1.0, 2020SR0752103, 授权: 中华人民共和国国家版权局, 2020.