基于形态梯度的大地电磁成像处理研究

徐志敏[1,2],李 晋[3]

(1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学),湖南 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院,湖南 长沙 410083;
3. 湖南师范大学 信息科学与工程学院 智能计算与语言信息处理湖南省重点实验室,湖南 长沙 410081)

摘 要:数学形态学在大地电磁数据噪声压制领域有着较好的应用效果,然而在大地电磁成像处理领域还处于空白阶段。其基于改变图像中的目标物的空间分布形式或结构达到提取目标物的目的,在大地电磁成像处理中达到提取有用地质信息的目的。文中首先采用形态膨胀-收缩梯度和形态闭-开梯度算法对 TM 和 TE 模式正演成像进行处理,有效改善了正演图像所反映的目标异常体轮廓。然后,选取陕西省铜川市某地实测大地电磁数据反演成像结果进行形态梯度处理。结果表明,形态梯度可以有效减少随机误差,达到提取目标异常体的目的。

关键词:大地电磁成像; 形态膨胀-收缩梯度; 形态闭-开梯度; 目标异常体
中图分类号:P319 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0524002

Research on magnetotelluric imaging processing based on morphological gradient

Xu Zhimin[1,2], Li Jin[3]

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education (Central South University), Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Hunan Provincial Key Laboratory of Intelligent Computing and Language Information Processing, College of Information Science and Engineering, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: Mathematical morphology has a good application effect in the magnetotelluric (MT) data noise suppression. However, it is still in the blank stage of MT imaging processing. It is based on changing the spatial distribution form or structure of the target in the image to achieve the target extraction. The objective is to achieve the extraction of useful geological information in MT imaging processing. Firstly, the morphological expansion-contraction gradient and morphological closed-open gradient algorithm were used to process the TM and TE mode forward imaging, which effectively improved the reflection of the forward image. The target abnormal body contour was selected. Then, the inversion imaging results of the measured MT data in a certain area of Tongchuan city, Shaanxi province were selected for morphological

收稿日期:2018-12-05; **修订日期**:2019-01-03
基金项目:国家自然科学基金(41174105);湖南省自然科学基金(2018JJ2258)
作者简介:徐志敏(1986-),男,博士生,主要从事大地电磁数据处理与干扰噪声方面的研究。Email:xuzhimindx@126.com
通讯作者:李晋(1981-),男,副教授,博士后,主要从事大地电磁数据处理及强干扰压制方面的研究。Email:geologylj@163.com

gradient processing. The results show that the morphological gradient can effectively reduce the random error and achieve the purpose of extracting the target anomaly.

Key words: MT imaging; morphological expansion-shrinkage gradient; morphological closed-open gradient; target abnormal body

0 引 言

大地电磁测深法(Magnetotelluric,MT)是一种重要的地球物理勘探方法,20 世纪 50 年代初由苏联学者吉洪诺夫和法国学者卡尼亚所提出[1]。它是利用大地中广泛分布的天然交变电磁场，基于电磁能量对地层的穿透能力，进行深部构造勘探的一种频率域电磁测深法。该方法不需要人工建立场源、装备轻便、成本低廉、野外施工简单、不受地下高阻层的屏蔽、对低阻分辨能力高、等值范围窄、具有更大的勘探深度,因此该方法在沉积盆地构造的探测、地热田普查、石油与天然气田的普查、矿产普查、研究地壳和上地幔电性结构、监视地下深部岩石电阻率的变化以及地震预报中都有较为广泛的应用。

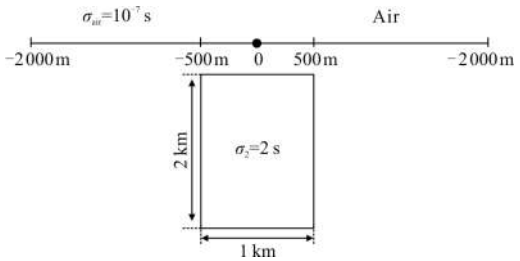
数学形态学基岩信号识别技术，在大地电磁干扰噪声压制领域有着较好的应用效果[2-5]。目标提取及图像处理技术众多[6-7],数学形态学图像处理通过改变图像中目标物的空间分布形式或结构状态达到图像增强的目的,从而有助于图像分析[8],其在大地电磁成像处理应用研究处于空白阶段。文中基于形态梯度算法,对大地电磁成像进行处理,研究其在提取有用地质信息方面的效果。

大地电磁二维反演成像是目前最为常用的方法，反演剖面的电性结构反映了地下地质构造的空间分布特征,电性梯度带通常为断裂构造反映,低阻条带或圈闭异常通常为含矿构造或富水区域，常规大地电磁成像往往造成上述地质异常体赋存位置及形态发生变化,与实际地质结构存在差异,采用数学形态学图像处理技术,提取地质异常信息,消除大地电磁反演形成的局部高低阻虚假异常，增强地质异常信息,更好地为地质解译服务。

文中首先正演模拟低阻异常体模型响应，通过正演计算可以清楚地了解各种条件下的大地电磁场的响应特征，采用形态膨胀-收缩梯度和形态闭-开梯度算法对正演模拟图像进行处理，对处理效果进行分析。然后,选取陕西铜川某地实测大地电磁数据进行二维反演,对反演成像进行形态膨胀-收缩梯度和形态闭-开梯度算法,研究对实测大地电磁反演成像处理效果。

1 正演模型建立

在实际野外工作中，经常会遇到地下深部存在低阻地质体,如黄铜矿脉、黄铁矿脉、方铅矿脉等金属硫化矿物及某些氧化矿物,其电阻率较低,具有良好的导电性,但由于其存在地下深部,使用电法勘探所需的电流较大,仪器较为笨重,不利于开展地下大规模矿脉普查,大地电磁法对低阻分辨能力高,野外施工简单，对地下深部岩石电阻率的变化也具有很好的分辨率，所以文中建立一个地球物理模型以便探究地球深部低阻地质体的形态特征，从而得出一些结论并且应用于实际野外工作中。该模型为一个均匀半空间地质模型,其中空气电阻率为 $10^7\,\Omega\cdot m$,地下介质电阻率为 $100\,\Omega\cdot m$，地质体位于坐标原点正下方,电阻率为 $0.5\,\Omega\cdot m$,规格为 1 km×2 km,埋深为 500 m，经非结构化网格正演结果如图 1 所示,图中 TE 模式相比于 TM 模式，有较好的纵向分辨率,准确地呈现了地下电阻地质体的空间位置及电阻率变化情况,但在水平方向上,低阻地质体对 TE 模式的整体数据都有影响，很难精准地确定地下地质体的横向规模,而 TM 模式则有较好的横向分辨率,但由于受到静态位移的影响,TM 极化模式不能更好地确定纵向规模。



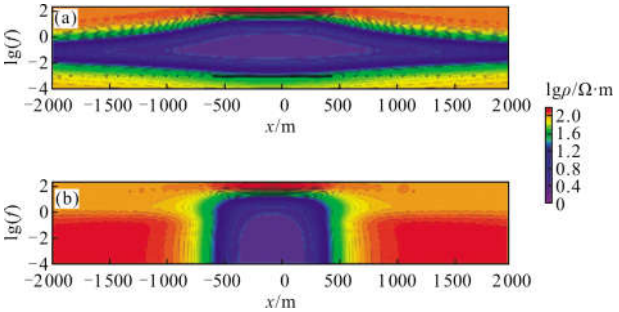


图 1 正演模型原始视电阻率拟断面图(a)TE 模式(b)TM 模式

Fig.1 Proposed model original apparent resistivity pseudo-section of (a) TE mode and (b) TM mode

2 形态梯度算法原理

2.1 形态膨胀-收缩梯度

形态膨胀-收缩梯度定义为:信号 f 为通过结构元素 g 为膨胀和收缩运算后的差分,定义如下:

$$\mathrm{Grad}(f)_1=f\oplus g-f\ominus g \tag{1}$$

式中:⊕代表形态膨胀运算;⊖代表形态收缩运算。

2.2 形态闭-开梯度

形态闭-开梯度定义为信号 f 为通过结构元素 g 为闭和开运算后的差分,定义如下:

$$\mathrm{Grad}(f)_2=f\cdot g-f\circ g \tag{2}$$

式中:·代表形态闭运算;∘代表形态开运算。

形态膨胀-收缩梯度和形态闭-开梯度作为图像处理中的边沿检测工具,如果在某一点处的梯度值大,则表明该点处图像的明暗变化迅速,从而可能会有边沿通过。在信号处理中,上述形态梯度算子也是凸显脉冲信息的有力工具,可用来检测并提取出稳态信号上的暂态信息,因此能有效地检测出梯度值较大的位置与形状[9-11]。

3 实验结果分析

由图 2 可知,经形态膨胀-收缩梯度(见图 2(b))和形态闭-开梯度(见图 2(c))处理后的 TE 模式拟断面图较原始拟断面图(见图 2(a))能更好地反映地下阻抗变化特征,并将地下电阻率分布情况更好地描绘出来,突出显示出地下地质体的位置及规模,相比原始断面图,经形态膨胀-收缩梯度处理后的 TE 模式拟断面图的地下电阻率分层更加明显,而经形态闭-开梯度处理后的 TE 极化模式拟断面图则轮廓没有那么明显,却压制了部分由于计算带来的随机误差,对低阻异常体的反映较原断面图低阻面积小,提高了拟断面图的准确性。

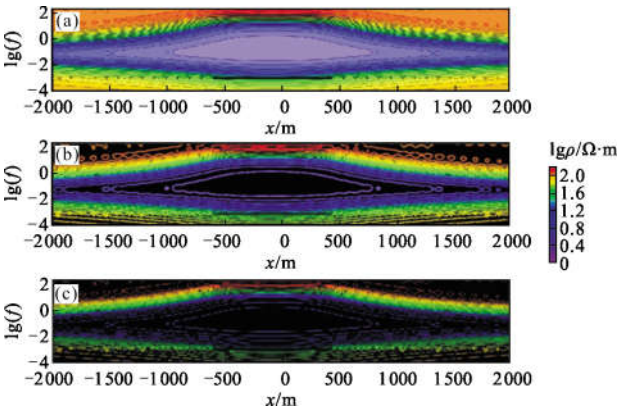


图 2 TE 模式处理结果对比图(a)为 TE 模式原始视电阻率拟断面图;(b)为经形态膨胀-收缩梯度处理后 TE 模式视电阻率拟断面图;(c)为经形态闭-开梯度处理后 TE 模式视电阻率拟断面图

Fig.2 Comparison of TE mode processing results (a) original apparent resistivity pseudo-section of TE mode; (b) TE mode apparent resistivity pseudo-section after morphology expansion-contraction gradient treatment; (c) TE mode apparent resistivity pseudo-section after morphology closed-open gradient treatment

从图 3 可知,经形态膨胀-收缩梯度和形态闭-

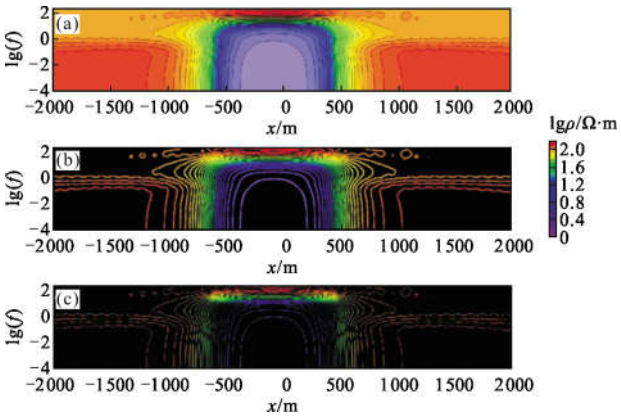


图 3 TM 模式处理结果对比图(a) TM 模式原始视电阻率拟断面图;(b) 经形态膨胀-收缩梯度处理后 TM 模式视电阻率拟断面图;(c) 经形态闭-开梯度处理后 TM 模式视电阻率拟断面图

Fig.3 Comparison of TM mode processing results (a) original apparent resistivity pseudo-section of TM mode; (b) TM mode apparent resistivity pseudo-section after morphology expansion-contraction gradient treatment; (c) TM mode apparent resistivity pseudo-section after morphology closed-open gradient treatment

开梯度处理后的 TM 模式拟断面图较原始拟断面图能更好地反映地下介质的电阻率变化特征，与原图相比，经形态膨胀-收缩梯度处理后的 TM 模式拟断面图加强了电阻率等值线的完整性，突出表现了地下低阻地质体的位置及横向规模，而经过形态闭-开梯度处理后的 TM 极化模式拟断面图等值线轮廓不那么明显，却有效地减少了随机误差，提高了拟断面图的准确性。

4 实测大地电磁数据反演成像形态梯度处理效果分析

4.1 实测大地电磁数据反演

实测大地电磁数据位于陕西省铜川市某区域，该区域地层为沉积构造，地层岩性由上至下依次为三叠系砂岩，奥陶系灰岩，剖面所经地质单元褶皱及断裂构造发育。文中采用先进的非线性共轭梯度二维大地电磁反演算法[12](Nonlinear Conjugate Gradients, NLCG)对实测大地电磁数据进行了反演，反演参数有：正则化因子 τ=3，横纵光滑比 a=1.5，初始模型电阻率为 100 Ω·m 均匀半空间，反演模式采用 TE 和 TM 模式的联合反演，迭代次数为 30 次，最终反演拟合差(RMS)为 3.58。

大地电磁成像通常将反演结果导出.XYZ 文件，采用 Surfer 软件进行绘制成图，地球物理工作者通常采用克里格差值法进行反演数据的网格化处理，该方法是地统计学的主要内容之一，从统计意义上说，是从变量相关性和变异性出发，在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏、最优估计的一种方法；从插值角度讲是对空间分布的数据求线性最优、无偏内插估计的一种方法。克里格法的适用条件是区域化变量存在空间相关性。地球物理反演结果是从响应到模型的过程，反演结果反映的地下电性结构具有数据空间相关性。

如图 4 所示，该剖面电性结构呈层状分布，浅部低阻特征为三叠系砂岩反映，深部高阻特征为奥陶系灰岩反映，局部电性低阻梯度带为断裂构造反映，电性剖面高低错落的电性等值单元反映了背、向斜构造。

地质工作者所关心的是电性剖面所反映出来的异常体位置、规模及产状等要素的特征。文中将图 4 采用形态膨胀-收缩梯度和形态闭-开梯度方法进行形态梯度处理，分析处理效果。

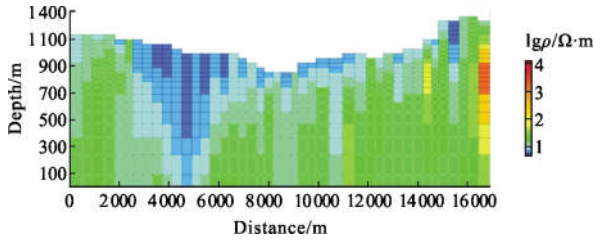


图 4 NLCG 反演结果原始剖面图

Fig.4 Original section of NLCG inversion results

4.2 形态梯度处理效果分析

图 5 为经过形态闭-开梯度处理后的剖面图，相比图 4，低阻异常区底部收敛，轮廓更加清晰，浅部低阻层状结构反映明显，消除了局部由于反演误差造成的高阻体，下伏地层高阻体轮廓反映明显，消除了局部由于浅部低阻体向下延伸造成的影响。图 5 所反映出来的电性结构框架趋于更加合理。

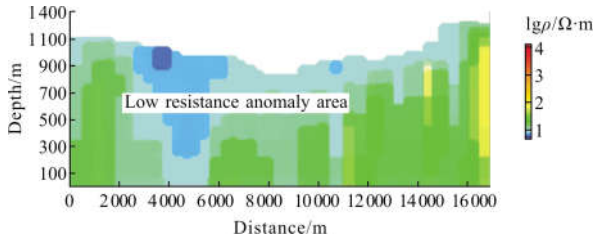


图 5 形态闭-开梯度处理后剖面图

Fig.5 Morphological closed-open gradient processing profile

图 6 为经过形态膨胀-收缩梯度处理后的剖面图，相比图 5，剖面电性梯度带范围有所增加，进一步消除了局部反演误差造成的高低阻体影响，有效地减少了随机误差，提高了剖面图反映地质异常体的准确性。

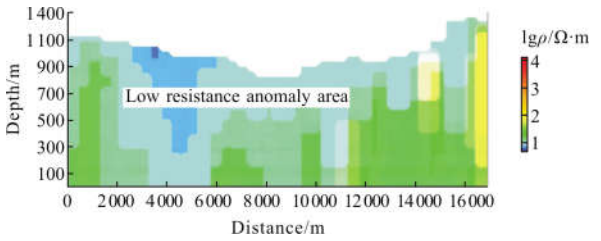


图 6 形态膨胀-收缩梯度处理后剖面图

Fig.6 Morphological expansion- contraction gradient treatment profile

5 结 论

(1) 形态膨胀-收缩梯度和形态闭-开梯度算法

在大地电磁成像处理的应用取得了一定的效果,该方法可以有效地减少随机误差，提高了电性剖面图反映地质异常体的准确性。

(2) 形态膨胀-收缩梯度和形态闭-开梯度算法基于图像处理，不同类型的大地电磁成像图像处理效果需要进一步研究，如何最优化地提取地质异常体信息是下一步工作的重点。

参考文献：

[1] Chen Leshou, Wang Guang′e. Magnetotelluric Sounding Method[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990. (in Chinese)

[2] Tang Jingtian, Li Jin, Xiao Xiao, et al. Mathematical morphology filtering and noise suppression of magnetotelluric sounding data [J]. ***Chinese J Geophys***, 2012, 55(5): 1784-1793. (in Chinese)

[3] Tang Jingtian, Xu Zhimin, Xiao Xiao, et al. Effect rules of strong noise on magnetotelluric (MT) sounding in the Luzong ore cluster area [J]. ***Chinese J Geophys***, 2012, 55 (12): 4147-4159. (in Chinese)

[4] Li Jin, Tang Jingtian, Xu Zhimin, et al. Magnetotelluric noise suppression base on signal-to-noise identification in ore concentration area. [J]. ***Chinese J Geophys***, 2017, 60 (2): 722-737. (in Chinese)

[5] Ye Hua, Tan Guanzheng, Li Guang, et al. De-noising nonstationary signal based on sparse representationand particle swarm optimization [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(6): 0626004. (in Chinese)

[6] Ye Song, Li Yuanzhuang, Sun Yongfeng, et al. Extraction of spatial heterodyne spectroscopy target based on empirical mode decomposition and regression analysis[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(12): 1223001. (in Chinese)

[7] Ye Hua, Tan Guanzheng. Manifold learning of depth label for single image [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(6): 0626004. (in Chinese)

[8] Liu Xinji. Dilaton and erosion for geoscience-data sets [J]. ***Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration***, 1988, 2: 105-113. (in Chinese)

[9] Liu Dongsheng, Li Yuan, Yang Wenbo, et al. Bearing fault diagnosis based on adaptive multi-scale morphological gradient and non-negative matrix factorization[J]. ***Journal of Vibration and Shock***, 2013, 32(19): 106-110. (in Chinese)

[10] Li Bing, Gao Min, Zhang Xuguang, et al. Gear fault diagnosis using morphological gradient method and non-negative matrix factorization [J]. ***Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis***, 2014, 34(2): 295-300. (in Chinese)

[11] Li Peng, Li Hongru, Xu Baohua. Performance degradation feature extraction method based on mathematical morphology gradient spectrum entropy and its application [J]. ***Journal of Vibration and Shock***, 2016, 35(16): 86-90.(in Chinese)

[12] Rodi W, Mackie R L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion [J]. ***Geophysics***, 2001, 66(1): 174-187.