

doi: 10.11720/wtyht.2022.1494

赵理芳,李爱勇,王导丽,等.基于电阻率测井曲线的大地电磁测深标定[J].物探与化探,2022,46(3):737-742.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1494

Zhao L F, Li A Y, Wang D L, et al. Calibration of magnetotelluric sounding based on resistivity logging curves[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 737-742. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1494

基于电阻率测井曲线的大地电磁测深标定

赵理芳,李爱勇,王导丽,张明鹏,周锡明

(江苏省有色金属华东地质勘查局八一四队,江苏 镇江 212004)

摘 要: 大地电磁测深曲线畸变的校正是大地电磁勘探中的重要问题。通过在 D 盆地的电阻率测井曲线与大地电磁测深平移方式校正前后的反演测深曲线相比较,构造变换函数,实现了测井曲线对大地电磁测深曲线的标定。经过该技术改进的大地电磁反演结果与验证钻孔极为吻合,结合钻井、地震、重力、磁法资料进行综合分析,有效地揭示了 D 盆地的构造特征。

关键词: 测井曲线;大地电磁测深;标定;变换函数

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)03-0737-06

0 引言

相比于地震勘探,大地电磁测深(MT)勘探深度存在精度不高的问题,究其原因,主要是大地电磁测深曲线本身因各种原因会发生畸变,这些畸变都可归为噪声,有影响全频域的,也有的只影响有限频率^[1]。畸变的引起和校正研究一直是大地电磁勘探工作者的一项任务。大地电磁测深勘探中,当地下浅部存在小型不均匀体时,其产生的电荷积累会造成电场变化,不均匀体的尺度一般远小于电磁波的高频波长,而波长随频率降低,波长越来越大^[2],大地电磁测深曲线在视电阻率—频率对数坐标轴上表现为整体平移,这种现象称为静态效应。如用位移后的视电阻率曲线进行反演解释,岩层的电阻率和界面深度可能误差很大,据此推断的地质构造也将面目全非^[3]。除了地表不均匀体引起的视电阻率曲线畸变,当两种电阻率差异比较大的介质相交时,也会在两种介质的分界面上积累过多的剩余电荷和感应电流,使得电流密度在界面两侧发生突变,导致视电阻率畸变^[4]。大地电磁测深曲线不仅反映测点垂直下方的岩层电性变化,同时也反映测点附近一定深度范围内电性层的变化,也就是非一维

构造也会引起视电阻率曲线的畸变^[5]。此外,一些无规律的电磁干扰或近场源的电磁场也会造成视电阻率曲线的畸变。

常用的校正方法有空间滤波法、曲线平移法,以及一些在此基础上的改进方法,如电磁阵列法^[6]、聚类分析校正法^[7-8]、小波变换校正法^[9-10]、TEM 数据校正法^[11]、地表电阻率校正法^[12]、首枝频点求平均静校正法^[13]、实测积累电荷静电场校正法^[14]等。基于原始数据校正的有电场分量校正法^[15]、阻抗张量分解法^[16]、拓扑处理法^[17-18]、高阶谱重构信号技术^[19]、平移、线性插值拟合及基于经验模态分解法^[20]、滤波法^[21]等,还有从场源效应考虑的校正法,主要采用将受场源效应影响的低频段进行截断、长时间观测、测点平均、带场源反演^[22]等方法进行校正。从实际情况来看,各种校正都取得了一定的效果,但由于引起畸变原因的复杂性,校正很难达到较为理想的程度。

基于目前存在的困境,有必要对大地电磁勘探曲线的校正进行研究,尤其是在一些构造复杂地区。如在火山岩盆地,由于火山岩对地震波的屏蔽和对地层的破坏,以及深层断裂较发育,反射地震成像质量较差^[23-24],而大地电磁则有望发挥较好的作用^[25]。本文通过对火山岩发育的 D 盆地进行研究,

收稿日期: 2021-09-03; 修回日期: 2021-12-22

基金项目: 江苏省有色金属华东地质勘查局 2019 年度基础研究专项资金项目(HDYS-KY2019-02)

第一作者: 赵理芳(1973-),男,正高级工程师,主要从事地球物理综合处理解释工作。Email:475399369@qq.com

经测井曲线校正的大地电磁反演断面与实际地层情况较为吻合,证实了方法的实用性。

1 研究区概况

D 盆地工区地形较平坦,高差约为 200 m,是在前白垩纪基底上发展起来的晚中生代残留盆地,多层油气显示表明 D 盆地具有较好的含油气远景^[26]。盆地发育于华力西期岩浆岩褶皱基底之上,形成于白垩纪,早期由于受 NW—SE 向拉伸作用,形成了一系列呈 NNE 向展布的断陷群,并接受了早白垩世沉积。盆地中火山岩发育,60% 以上的区域被火山岩所覆盖,覆盖厚度最大可达 1 500 m,一般在 200~500 m,多为气孔状玄武岩和致密块状玄武岩。

D 盆地主要由火山岩、火山碎屑岩和正常碎屑岩组成,自下而上发育下白垩统龙江组、光华组、九峰山组、甘河组,上白垩统嫩江组、孤山镇组,新近系中新统金山组和第四系。下白垩统基底岩系主要为变质岩,以花岗片麻岩、片岩、板岩类为主,在盆地周边均有出露;同时,在盆地周边华力西期—燕山早期岩体广泛发育。

D 盆地以往实施过地震勘探,但盆地被火山岩覆盖,且在火山岩之下沉积岩与火山岩间互层,导致火山岩下地层地震资料反射比较差^[27],使得至今人们对构造面貌、地层发育状况、烃源岩分布等基本石油地质条件仍认识不清,制约了对盆地的整体认识和有利区的优选。2013 年实施了大地电磁测深及相应的重磁勘探工作,大地电磁点距为 250 m,勘探

资料整体质量良好。

2019 年,D 盆地油气勘探取得重大突破,YX4 井完钻井深 2 284 m,钻遇甘河组及九峰山组五段、三段沉积岩和四段、二段火山岩,获得高产工业油流。虽然在 D 盆地油气取得重大突破,但由于对速度变化以及层位认识存在偏差,地震预测的九峰山组各地层界面深度误差达到 6.6%~31.6%。

2 大地电磁数据处理

相对于 TE 或者 TM 单一模式的反演,联合模式更能反映实际情况^[28-30],因此本次反演采用的是联合模式。

图 1a 为工区内 YC1 井电阻率测井曲线与 MT 反演电阻率曲线,可以看到在浅部(<1 000 m),原始 MT 数据的反演电阻率曲线与测井电阻率曲线对应较好,在深部则相差较大。经平移方式静态校正后,浅部出现偏差,深部(>2 000 m)与测井曲线对应较好(图 1b)。由于浅部对应高频,深部对应低频,推测浅部沉积地层电性各向同性较好,深部地层非各向同性导致反演深度不准确。

采用测井曲线标定 MT 曲线的思路为:高频部分保持原始曲线,低频采用平移方式静态校正后曲线,中频段采取合理的过度,调整大地电磁曲线进行反演,尽量保证 MT 反演曲线与测井曲线从浅至深大致吻合。

选取工区内一口钻探较深、测井资料较全的 YC1 井进行标定,流程如下:

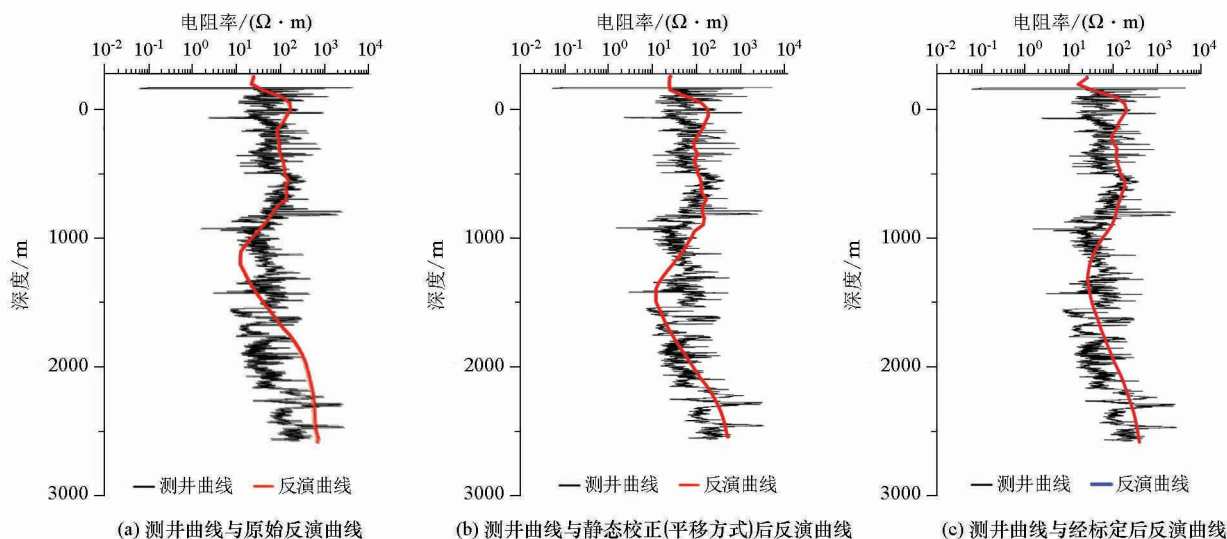


图 1 电阻率测井曲线及 MT 反演曲线
Fig.1 Logging curve and MT inversion curve

- 1) 对大地电磁数据进行正常反演。
- 2) 比较钻井处的测井曲线和反演曲线,依据深部电性特征估算深度比值 $c(c=h_1/h_0=\sqrt{\rho_1/\rho_0})$,再根据深度公式 $(h\approx 356\sqrt{\rho/f})$ 推算出视电阻率比值 $\theta=c^2$;当 $\theta=1$ 时,即电阻率无变化,故取电阻率变化系数 $b=\theta-1=c^2-1$,该方程可变化为 $\theta=b+1$ 。
- 3) 重新反演,比较深部处的测井曲线和反演曲线,如大致吻合,平移系数可确定,如差别较大,修改平移系数,重新反演比较。
- 4) 根据高频曲线保持原始曲线,低频采用平移后的曲线,中间段过渡的原则,构建一个变换函数进行校正。
- 5) 对变换函数参数进行不断调整,使之达到最佳状况。

根据测井曲线与反演曲线的特征,从高频到低频变化的校正函数可以用如图 2 所示的反正切函数来构建。

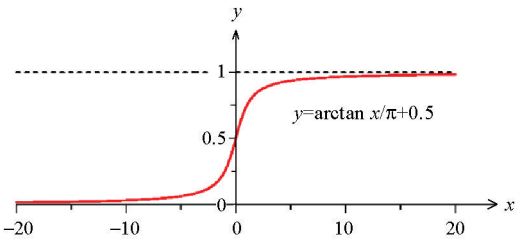


图 2 反正切函数示意

Fig.2 Schematic diagram of arctangent function

为更好地贴近测井曲线,校正函数稍作变化为:

$$\theta(k) = \left(\frac{\arctan(k - k_0) \cdot a}{\pi} + 0.5 \right) \times b + 1, \\ \rho'_k = \theta(k) \cdot \rho_k.$$

式中: k, k_0 分别为第 k 频率和中间频率编号; ρ'_k, ρ_k 分别为第 k 频率的校正后视电阻率和校正前电阻率; $\theta(k)$ 为校正函数; a, b 分别为变化系数,其中 b 相当于平移方式静态校正的系数, a 和 b 用以调节过渡变化的快慢和大小,需根据反演曲线与测井曲线的吻合情况进行适当调整。

中间频率的初始取值可根据勘探深度进行估算

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \delta = 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, f = \rho \left(\frac{356}{H} \right)^2.$$

从图 1 看,1 000 m

以浅反演曲线与测井曲线较为吻合,因此深度 H 取 1 000,电阻率值取 $50 \Omega \cdot \text{m}$,频率为 6.3 Hz。根据频率排序,取 k_0 为 13。 a, b 经反复调试,分别取 0.6 和 0.44。图 3 为根据测井标定选取的参数对某点 MT 曲线校正示意,高于 10 Hz 的反映浅部的高频段保

持了原始曲线,低于 1 Hz 反映深部的低频段校正为通过平移方式静校后的曲线,10 ~ 1 Hz 之间的中频段为曲线过渡区。

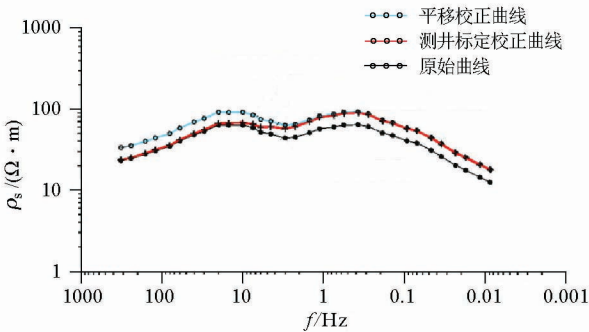


图 3 MT 曲线校正示意

Fig.3 MT curve correction diagram

经校正后,反演曲线与测井电阻率曲线较为一致(图 1c)。以相同的变换函数推广至全区 MT 点的变换,再进行剖面反演。

3 反演剖面综合分析

以获得油气突破的 YX4 井进行验证分析。图 4 为过 YX4 井测线的 MT 反演电阻率局部断面(图 4),从中可以看到本次反演断面与钻井钻遇情况较为吻合,九峰山组三段、五段低阻的沉积岩中夹了九峰山组四段火山岩,显示为一团块状下垂的中阻区域,深度较为吻合,九峰山组二段为逐步呈现中、高阻特征的火山岩。

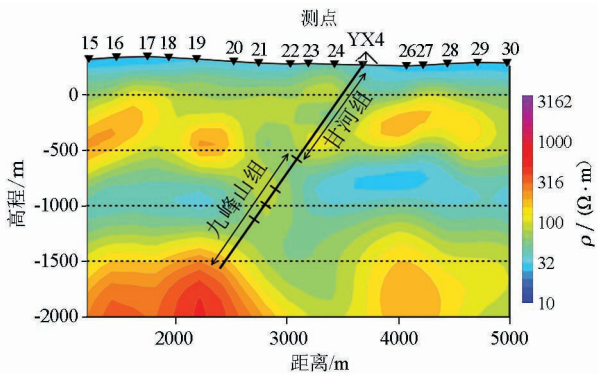


图 4 过 YX4 井测线的 MT 反演电阻率断面(局部)

Fig.4 MT Inversion resistivity section of survey line through well YX4 (partial view)

综合 YX4 钻井、地震、重、磁、岩石物性特征进行分析(图 5):甘河组(K_1g)以火山岩为主,为中—高阻,主要位于海拔-1 000 m 以上;九峰山组(K_1j)沉积岩为低阻,局部存在中阻的火山岩,主要位于海拔-1000 ~ -2000m;龙江组—光华组(K_1l-K_1gn)

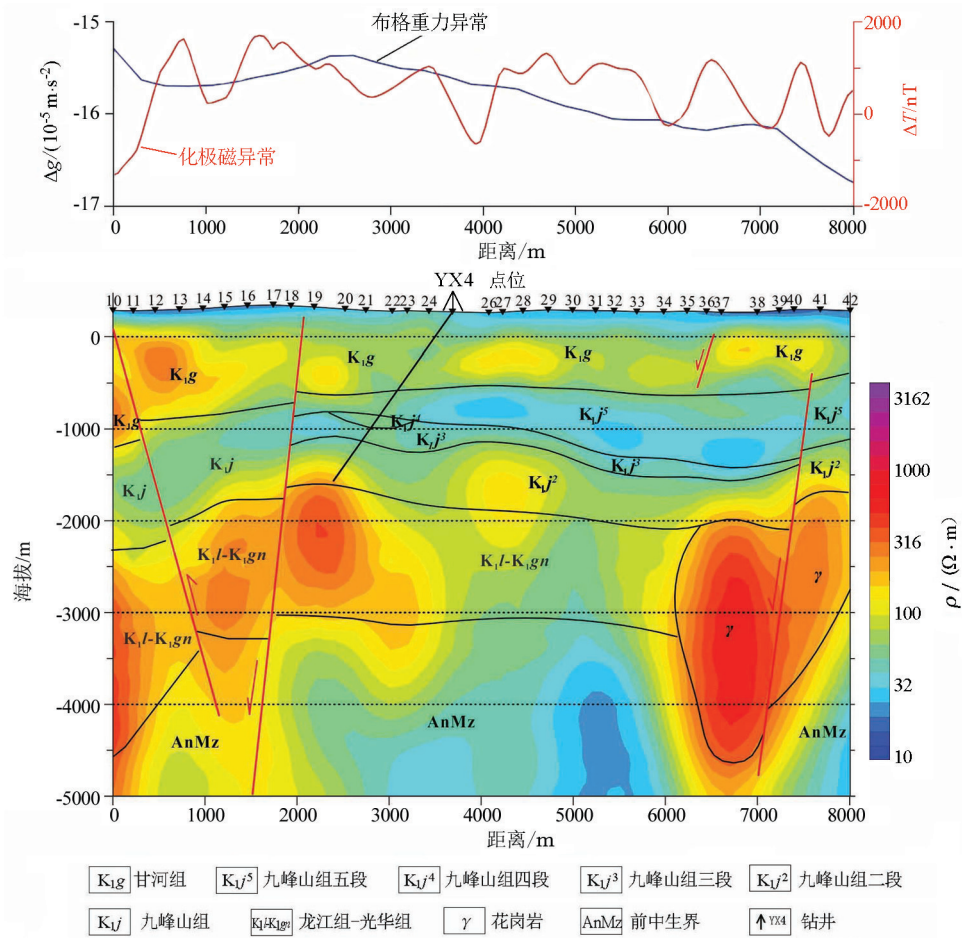


图 5 过 YX4 井测线综合处理解释剖面

Fig.5 Profile of comprehensive processing and interpretation of survey line passing well YX4

以火山岩为主,为高阻、中阻,主要位于海拔-2 000 ~ -3 000 m,在 20 号点附近为一背斜构造,对应重力高值异常;前中生界(AnMz)在本剖面上呈低阻特征,主要位于海拔-3 000 ~ -5 000 m 处;在剖面 35 ~ 42 号段深部还存在一“心”型的高阻异常,被正断层错断,且该处呈重力异常低,推测为低密度的花岗岩。除局部的低密度花岗岩造成重力低值异常外,重力异常曲线整体与龙江组—光华组起伏较为吻合。磁力异常曲线在剖面上较为杂乱,反映浅部的甘河组火山岩广泛分布。

反演断面中 17 ~ 19 号点附近电性结构在横向上出现明显变化,应为区域大断裂的反映,此现象在邻近的地震剖面上也可以看到。除此之外,39 ~ 41 号点等地段也存在较大断层,错断了花岗岩体。

4 结论及讨论

1)通过电阻率测井曲线的标定,校正后的大地电磁曲线能够准确反映地层界面深度和深部电性特

征,同时结合其他资料可以较为清晰地分析地下构造特征,在地震资料品质较差的构造复杂地区能取得较好的效果。通过测井曲线的标定和校正大地电磁测深曲线后进行反演,大地电磁有取得较为精细构造认识的能力,大地电磁测深在勘探部署中应该能发挥更大的作用。

2)如作为标定的电测井为斜井(如 YX4 井),标定前需先将深度投影到垂向,再进行标定。

3)由于本次研究中目标层不在浅部,从文中可以看到,浅部反演曲线与测井曲线吻合度存在一定的偏差。如需进一步研究浅部地层,需构造更加复杂的变换函数。

参考文献(References):

[1] 孙洁,晋光文,白登海,等.大地电磁测深资料的噪声干扰[J].物探与化探,2000,24(2):119-127.
Sun J, Jin G W, Bai D H, et al. The noise interference of magnetotelluric sounding data [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, 24(2): 119-127.
[2] 陈乐寿,王光镠.大地电磁测深法[M].北京:地震出版社,

1987.
Chen L S, Wang G E. Magnetotelluric sounding [M]. Beijing: Seismological Press, 1987.

[3] 王家映.关于大地电磁的静校正问题[J].地质科技情报,1992, 11(1):69-76.
Wang J Y. Problem about static correction in magnetotellurics [J]. Geological Science and Technology Information, 1992, 11(1): 69-76.

[4] 苏发,汤井田,何继善,等.电磁测深中视电阻率假异常现象分析[J].中国有色金属学报,1995,5(4):14-16.
Su F, Tang J T, He J S, et al. Analysis of false anomaly of apparent resistivity in electromagnetic sounding [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5(4): 14-16.

[5] 王永涛,白改先.大地电磁测深曲线的畸变及校正[J].石油物探,1997,36(1):95-106.
Wang Y T, Bai G X. The distortion of magnetotelluric sounding curves and its correction [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1997, 36(1): 95-106.

[6] 罗志琼.用电磁阵列剖面法压制 MT 静态效应影响的研究[J].地球科学,1990,15(S1):13-22.
Luo Z Q. The study of attenuating static effect with electromagnetic array profiling [J]. Earth Science, 1990, 15(S1): 13-22.

[7] 许建荣.平面聚类静态校正法[J].石油地球物理勘探,2004,39(6):720-723.
Xu J R. Plane clustering static correction method [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(6): 720-723.

[8] 杨生.大地电磁测深法环境噪声抑制研究及其应用[D].长沙:中南大学,2004.
Yang S. Study on environmental noise suppression by magnetotelluric sounding and its application [D]. Changsha: Central South University, 2004.

[9] 张翔,胡文宝,严良俊,等.小波变换在大地电磁测深静校正中的应用[J].江汉石油学院学报,2002,24(2):40-41.
Zhang X, Hu W B, Yan L J, et al. Application of wavelet transform in magnetotelluric sounding static correction [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2002, 24(2): 40-41.

[10] 区小毅.利用小波变换压制静态效应的方法[J].物探与化探,2014,38(6):1222-1227.
Qu X Y. The application of wavelet transform to suppressing static effect [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(6): 1222-1227.

[11] 姚治龙,王庆乙,胡玉平,等.利用 TEM 测深校正 MT 静态偏移的技术问题[J].地震地质,2001,23(2):257-263.
Yao Z L, Wang Q Y, Hu Y P, et al. Technical problems of MT static-shift using TEM sounding correction [J]. Seismology and Geology, 2001, 23(2): 257-263.

[12] 陈清礼,胡文宝,李金铭,等.利用地表电阻率校正大地电磁静态偏移[J].物探与化探,1999,23(4):50-56.
Chen Q L, Hu W B, Li J M, et al. The application of surface resistivity to the correction of magnetotelluric static migration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1999, 23(4): 50-56.

[13] 吕琴音,张小博,仇根根,等.大地电磁测深首枝频点统计求平均法在连片静位移区的校正实验研究[J].物探与化探,2020, 44(3):677-684.

Lyu Q Y, Zhang X B, Qiu G G, et al. An experimental study of the correction of the statistical averaging method of frequency points in the first branch of magnetotelluric sounding in the static displacement zone [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3): 677-684.

[14] 李国瑞,席振铎,龙霞.基于实测积累电荷静电场消除静态效应的方法[J].物探与化探,2017,41(4):730-735.
Li G R, Xi Z Z, Long X. Static displacement correction for frequency domain electromagnetic method based on second electrostatic field [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(4): 730-735.

[15] 李爱勇,唐冬春,杨生.直接消除电场分量静态效应的静改方法[J].石油地球物理勘探,2004,39(S1):96-98,169.
Li A Y, Tang D C, Yang S. Static modification method to directly eliminate the static effect of electric field component [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(S1): 96-98,169.

[16] 高红伟,张胜业.阻抗张量分解进行大地电磁静校正的研究[J].地质科技情报,1998,17(1):92-97.
Gao H W, Zhang S Y. Study of correction for static shift: The decomposition of magnetotelluric impedance tensors [J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 17(1): 92-97.

[17] 刘俊昌.大地电磁测深时间域拓扑处理去静态方法研究[D].北京:中国地质大学(北京),2011.
Liu J C. Study on de static method of time domain topological processing of magnetotelluric sounding [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.

[18] 刘桂梅,马为,刘俊昌,等.大地电磁测深静态效应空间域拓扑处理技术研究[J].物探与化探,2018,42(1):118-126.
Liu G M, Ma W, Liu J C, et al. Spatial domain topological processing technique for studying static effect in magnetotelluric sounding [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(1): 118-126.

[19] 化希瑞,席振铎,胡双贵,等.高频大地电磁噪声压制[J].物探与化探,2017,41(2):328-332.
Hua X R, Xi Z Z, Hu S G, et al. Noise suppression of high frequency magnetotelluric method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 328-332.

[20] 王大勇,宋威,范翠松,等.矿集区大地电磁噪声处理方法及其应用[J].物探与化探,2015,39(4):823-829.
Wang D Y, Zhu W, Fan C S, et al. Noise processing methods and application study of MT in the ore concentration area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(4): 823-829.

[21] 郭振宇.大地电磁测深时间域标定、阻抗估计及去噪技术研究[D].长春:吉林大学,2020.
Guo Z Y. Research on time domain calibration, impedance estimation and denoising technology of magnetotelluric sounding [D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[22] 罗威,王绪本,王鹏,等.大地电磁场源效应特征分析及其校正研究[J].地球物理学报,2021,64(8):2952-2964.
Luo W, Wang X B, Wang K P, et al. Study on the characteristics of magnetotelluric source effects and its correction [J]. Chinese

Journal of Geophysics, 2021, 64(8): 2952–2964.

[23] 彭炎, 张小博, 张健, 等. 大地电磁测深法在滨北西部斜坡带油气地质调查评价中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(3): 656–664.

Peng Y, Zhang X B, Zhang J, et al. The application of magnetotelluric sounding method to oil-gas geological survey and evaluation of the western slope area of Binbei [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3): 656–664.

[24] 许艳萍, 肖立云, 孙长赞, 等. 大杨树盆地近地表火山岩覆盖区地震资料处理技术及应用[J]. 天然气工业, 2007, 27(S1): 147–149.

Xu Y P, Xiao L Y, Sun C Z, et al. Seismic data processing technology and application in the near surface volcanic rock coverage area of Dayangshu Basin [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(S1): 147–149.

[25] 张晓东, 汪在君, 徐庆霞. 火山岩覆盖盆地三维 CEMP 电法勘探效果分析——以大杨树盆地为例[C]//2019 年油气地球物理学术年会论文集. 2019: 154–161.

Zhang X D, Wang Z J, Xu Q X. Analysis of three-dimensional CEMP electrical exploration effect in volcanic covered Basins: Taking Dayangshu basin as an example [C]//Proceedings of 2019 academic annual meeting on oil and gas geophysics. 2019: 154–161.

[26] 吴河勇. 大杨树盆地成藏条件及含油气系统研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2003.

Wu H Y. Research of pool-forming condition and pe-troleum system in Dayangshu Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2003.

[27] 金成志. 大杨树盆地含油气远景综合评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.

Jin C Z. Comprehensive evaluation of the oil and gas exploration prospect in Dayangshu Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing). 2007.

[28] 胡祖志, 胡祥云, 何展翔. 三维大地电磁数据的二维反演解释[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(3): 353–359.

Hu Z Z, Hu X Y, He Z X. Using 2-D inversion for interpretation of 3-D MT data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(3): 353–359.

[29] 冯德山, 王珣. 大地电磁双二次插值 FEM 正演及最小二乘正则化联合反演[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2524–2531.

Feng D S, Wang X. Magnetotelluric finite element method forward based on biquadratic interpolation and least squares regularization joint inversion [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2524–2531.

[30] 仇根根, 张小博, 裴发根, 等. 大地电磁测深反演技术有效性对比试验[J]. 物探与化探, 2015, 39(1): 118–124.

Qiu G G, Zhang X B, Pei F G, et al. Effectiveness of magnetotelluric sounding inversion technique [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1): 118–124.

Calibration of magnetotelluric sounding based on resistivity logging curves

ZHAO Li-Fang, LI Ai-Yong, WANG Dao-Li, ZHANG Ming-Peng, ZHOU Xi-Ming

(No. 814 Team, East China Mineral Exploration and Development Bureau for Non-ferrous Metals of Jiangsu Province, Zhenjiang 212004, China)

Abstract: The distortion correction of magnetotelluric sounding curves is critical to magnetotelluric exploration. Based on the comparison between the resistivity logging curves of basin D and the basin’s inversed sounding curves before and after being corrected through magnetotelluric sounding translation, this study constructed a transformation function and calibrated magnetotelluric sounding curves using logging curves. The magnetotelluric inversion results improved using the calibration technology proposed in this study are highly consistent with the verification boreholes. Finally, this study effectively revealed the structural characteristics of basin D by combining drilling, seismic, gravitational, and magnetic data.

Key words: logging curve; magnetotelluric sounding; calibration; transformation function

(本文编辑: 沈效群)