

doi: 10.11720/wyht.2024.1140

郝社锋, 田少兵, 梅荣, 等. 高干扰矿集区大地电磁噪声抑制技术探索[J]. 物探与化探, 2024, 48(1): 162-174. <http://doi.org/10.11720/wyht.2024.1140>Hao S F, Tian S B, Mei R, et al. Exploring electromagnetic noise suppression technologies for magnetotelluric sounding in high-interference ore districts [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 162-174. <http://doi.org/10.11720/wyht.2024.1140>

高干扰矿集区大地电磁噪声抑制技术探索

郝社锋^{1,2}, 田少兵², 梅荣², 彭荣华³, 李兆令⁴

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210049; 3. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074; 4. 山东省第五地质矿产勘查院, 山东泰安 271000)

摘要: 大地电磁测深(MT)在矿产资源勘探方面应用广泛,但强人文电磁干扰严重制约了高质量的原始 MT 数据的获取。本文详细总结了国内常见电磁噪声源的类型,对其产生的电磁噪声特征进行分类分析;对国内外 MT 电磁噪声去噪方法进行对比,结合实际生产需求,总结了一套适用于高干扰矿集区快速有效的 MT 数据去噪施工与处理工艺。研究表明:Robust 处理、远参考道技术和人工挑选是提高 MT 数据采集质量的有效和必要的手段,而通过理论计算,远参考站设置距离不小于 3.56 倍趋肤深度即可;在江苏洪泽盐盆矿集区开展的 MT 试验工作验证了该设定。

关键词: 大地电磁测深;电磁噪声;去噪;远参考道;矿集区

中图分类号: P631.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)01-0162-13

0 引言

随着经济、技术的发展,向地球深部进军已成为战略科技问题。目前,世界先进水平的勘探开采深度已达到 2 500~4 000 m,而我国大多小于 500 m。开展地球深部探测是解决地学重大基础理论问题的需要,也是国家保证能源资源安全、扩展经济社会发展空间的重大需求^[1]。大地电磁测深法(简称 MT)是研究地球电性结构、寻找深部资源的重要方法之一^[2-3]。随着国民经济的快速发展,人文电磁干扰日益严重,如何有效抑制电磁噪声已成为勘探效果好坏的首要因素。传统的大地电磁勘探技术规范,如石油大地电磁法采集技术规程(SY/T 5820—2014),要求测点与干扰源(例如繁忙的公路)的距离不小于 200 m,对于一些高干扰电磁源(如矿山、工厂、电器铁路、电站等)则要求至少避开 2 km 以上。然而,一些急需解决深

部生产需求的矿集区往往不能满足规范要求,因此,如何对高干扰噪声环境中采集的数据进行有效噪声压制,获取有质量保证的 MT 数据,成为 MT 资料采集与处理的核心问题,只有保证采集到最有效的原始数据资料,才能在后期数据处理及反演过程中获取最真实的地质信息。但改变实际的勘探环境往往较为困难,因此考虑在数据采集和处理等方面采取措施来提升数据品质。本文详细总结了以往大地电磁勘探过程中存在的各种噪声特点及处理手段和优缺点,提出了一套有效提升大地电磁测深数据质量的采集与处理工艺,经过试验验证了其应用效果,为今后在类似地区进行天然源大地电磁勘探提供了一套可行的参考方案。

1 现象分析

图 1 为 1963 年在美国加利福尼亚州贝克莱召开的国际地球物理和大地测量联合会上提出的全

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-06-08

基金项目: 江苏省矿地融合试点项目(苏财资环[2022]19号);江苏省地质勘查专项资金项目(苏财建[2018]96号)

第一作者: 郝社锋(1977-),男,正高级工程师,主要从事地质资源与地质工程方向的研究工作。Email:34746594@qq.com

通讯作者: 田少兵(1990-),男,高级工程师,主要从事电磁法勘探与地热资源勘查的研究工作。Email:506006927@qq.com

球电、磁强度平均振幅特征图^[4-5],图中将地磁脉动划分为连续性脉动 Pc 型和不规则脉动 Pi 型。由图中可以看出:在 MT 频带内存在一信号低值区域,主要在 0.05~10 Hz 间,使得采集的 MT 数据

有效信号质量变低,该频带被称为“MT 死频带”,在音频大地电磁测深(AMT)频带内同样存在信号低值区域,主要在 500~4 000 Hz 间,称为“AMT 死频带”。死频带范围也是最易受到干扰的频段。

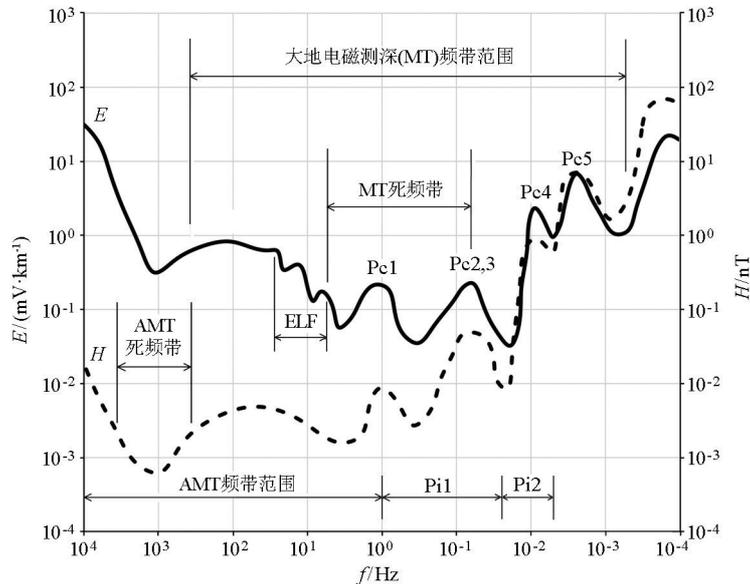


图1 全球电磁场强度平均振幅特征^[4]

Fig. 1 Global average amplitude characteristics of electromagnetic field intensity^[4]

图2为未经过特别处理的不同区域采集到的不同程度干扰下的MT原始视电阻率、相位曲线,采集时长均超过20 h。图2a测点位于新疆北部准噶尔盆地中南部沙漠中,周围100 km内几乎无人活动,数据未受到干扰,电阻率曲线圆滑,相位无跳跃,仅在0.1~0.5 Hz范围内存在极小的电阻率曲线起伏,为MT“死频带”的影响;总体来说,在无人文干扰的情况下可以采集到信噪比极高的原始MT数据。图2b位于沿海地区,测点距村庄约3 km,距城镇超过5 km,图中曲线已滤掉工频谐波;图中可见曲线在0.05~1 Hz范围内存在明显45°下降后上扬,对应相位趋于0,表现出显著的“近源效应”特征,而100 Hz以上出现电阻率下掉现象,较为明显是受到脉冲噪声和周期噪声的影响。图2c的测点地形起伏较大,测点周边500 m以内有零星村落,2 km以外为乡镇中心;结合其他相邻测点信息发现,xy方向视电阻率曲线存在明显的上下位移现象,yx方向视电阻率曲线无明显位移现象,在0.01~5 Hz范围内,xy、yx方向的视电阻率均呈45°上升后急剧下降,说明该测点受静态效应影响较大,使得两种极化模式视电阻率曲线分离,同时又受到充放电、方波等噪声影响,使中低频数据产生严重的近源效应;曲线飞点多、离散程度大,是极差的数据。图2d测点周边200 m附近有

一排发电风车,具有较强的周期噪声和充放电噪声,图中全频段范围内电阻率曲线无明显的形态特征,出现分段的整体偏移现象,无规律可循,需多种手段处理才有可能恢复其形态。

在实际生产中,一个测点受到的干扰往往呈现多种类型,获取的视电阻率、相位曲线是多种影响因素的综合体现,不能仅从曲线形态来判断受何种因素的影响。

MT方法是建立在平面电磁波垂直入射到水平均匀层状介质的理论基础上,当观测区距离场源较远、测区构造的水平非均匀性尺度不是很大以及勘探深度并不是特别深时,平面波假设的正确性还是成立的^[6]。在MT勘探中,将平面电磁波作为有效场源而不满足平面波特征的场源称为噪声,判断一个电磁波场源属于有效场源还是噪声,主要依据其产生的电磁波到达勘查区域时是否满足平面波特征^[7]。经过大量研究发现,MT数据采集中噪声主要可分为观测系统噪声、环境噪声和地质噪声^[8-13]。随着科技水平的不断进步,目前世界上较为先进的采集系统本底噪声已经很小,而地质噪声主要是由勘查区域局部不均匀体产生的静态效应或地势起伏产生的地形影响所造成,因此本文主要讨论由于人类活动而产生的电磁干扰,它们往往能产生较强烈的电磁信号。

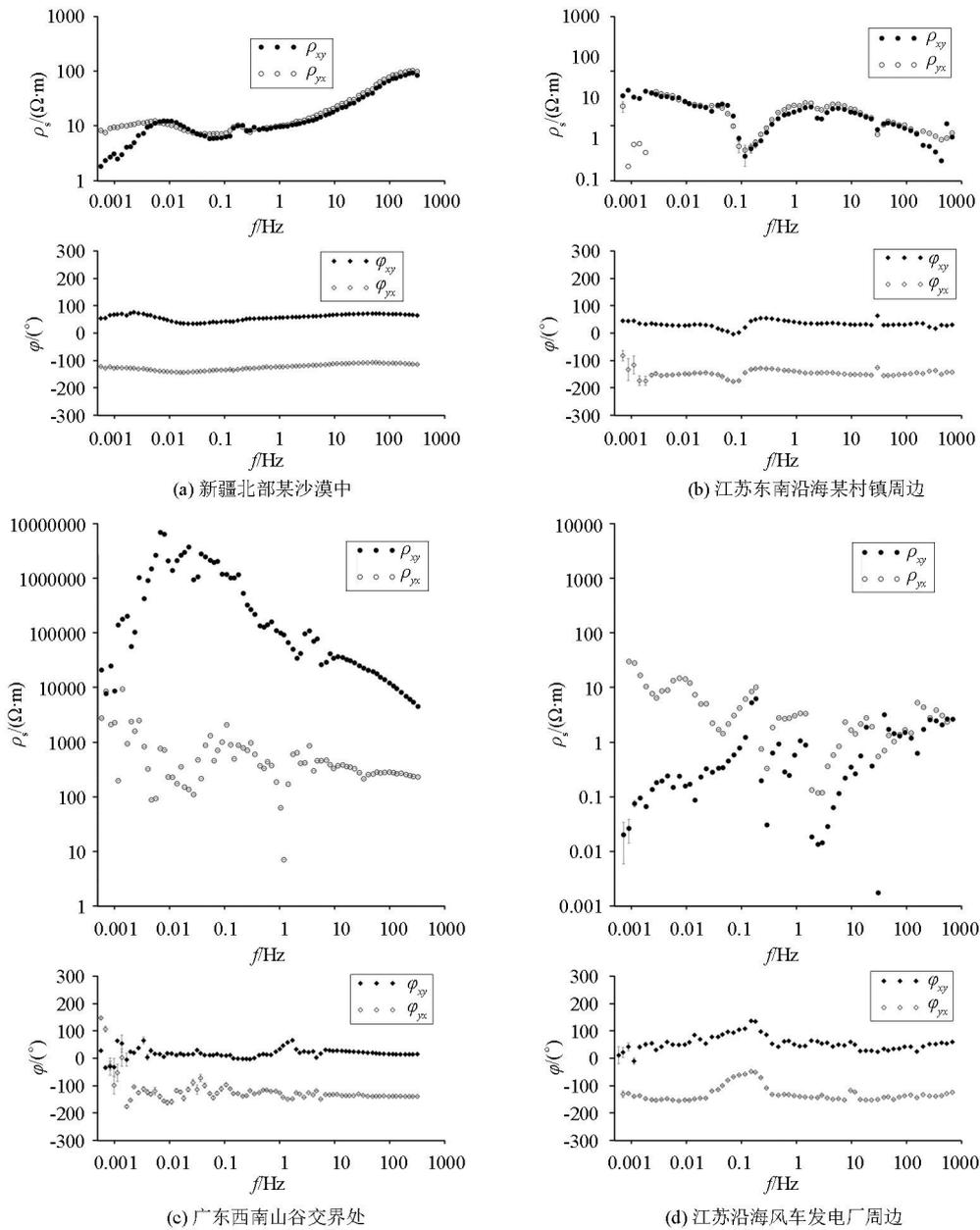


图 2 大地电磁数据在不同干扰情况下的视电阻率、相位曲线

Fig. 2 Resistivity curves and phase curves of MT data under different interference conditions

在飞速发展的现代化社会,人类活动无处不在,即使在荒无人烟的野外,也会存在无线通讯塔、电路输电线等易产生电磁干扰的设备。当一些常见电磁设备靠近勘查区时,其产生的电磁场将不满足平面波特征,而成为 MT 的电磁噪声。常见的电磁干扰噪声主要分为方波噪声、三角波噪声、阶跃噪声、脉冲噪声、充放电噪声、周期噪声等^[11-15],其特征及影响范围如表 1 所示。在实际环境中,往往是多种电磁噪声混合出现,且一种电磁噪声源也可能同时产生多种噪声,因此在 MT 数据采集及处理中,应尽可能地在采集阶段远离干扰或降低其影响。

2 校正方法对比

MT 中的噪声抑制问题是国内外一直关注的课题^[8, 10, 12, 14, 16-24],表 2 列举了自 20 世纪 50 年代 MT 提出至今各种抑制大地电磁噪声方面的研究成果。随着科学技术的不断发展,从最初的互功率谱法和 Robust 法到远参考道技术,人们对大地电磁的输入端噪声进行了有效的研究,很多应用成果也得到了广大学者的认可,但对于噪声干扰严重区域,仍然无法获取有效的原始数据。很多学者从时间域和电磁信号的数学形态入手开展了大量的研究,针对不同

表 1 人文电磁噪声类型及特征

Table 1 Types and characteristics of humanistic electromagnetic noise

| 噪声类型 | 噪声来源 | 影响方式 | 主要特征 | 影响范围 |
|----------|-----------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| 方波 | 电子设备开关瞬间、车辆点火等 | 近源效应 | 对电场数据影响大,对磁场数据影响小 | 100~0.1Hz,影响范围大 |
| 三角波和类三角波 | 电动机调速、阀门控制、车辆活动等 | 近源效应、视电阻率值极小或极大 | 不规则三角波形,常出现在磁道中 | 10 Hz 以下的低频信号 |
| 阶跃 | 机动车点火用电设备开关释放电火花设备等 | 近源效应 | 台阶状信号,常与脉冲噪声同时出现 | 1~0.01Hz 的低频信号 |
| 脉冲 | 机动车点火、用电设备开关、释放电火花设备产生游散电流等 | 数据畸变、飞点 | 频率范围宽,几乎影响整个频率域 | 所有频率,0.1 Hz 最严重 |
| 充放电 | 大功率用电设备、发电厂、产生电火花设备等 | 分段、整体偏移,近源效应 | 持续时间不定,集中出现 | 10~0.01Hz |
| 周期 | 高压输电线、工厂等工业设备 | 高频段无规律跳跃 | 等振幅正弦谐波 | 50 Hz 和 50 Hz 倍数谐波 |

问题均取得了一定的应用效果,但很难得到广泛的推广应用,主要原因之一就是处理者有较高的理论水平和实际经验要求。因此,如何找到一个既能得到较好的应用效果又适用于一般技术人员的处理方法显得尤为重要。

表 2 对大地电磁人文噪声压制方法进行了统计分析,从方法、方式、特征特点及该方法的缺陷和取得效果方面进行了评价。可以看出,针对不同问题,例如不相关噪声、相关噪声、周期性噪声、非线性非平稳信号等,都有针对性的解决方法,但是没有一种方法可以解决所有问题,需要寻求多种方法相互补充,共同来完成对 MT 原始数据质量的提升。因此,组合方式的选取成为一个值得关注的问题。

基于以上需求,根据多年经验,总结了一套在人文干扰强烈区域获取高质量 MT 资料的生产工艺(图 3)。该套工艺存在几个关键点:①在正式数据采集前需进行较为详细的调查与参数试验,主要包括研究区域内噪声类型调查、人文电磁干扰强度试验、远参考距离设置试验,进行对比分析以获取最佳的采集参数及参考站设置;②数据处理过程中对所有数据进行傅里叶变换、Robust 估计处理和工频滤波处理,有效降低周期噪声的干扰和减小曲线离散程度;③根据远参考道技术的原理,选取无干扰或与研究区噪声干扰类型不相关的地区作为远参考站,

表 2 大地电磁噪声压制方法对比

Table 2 Comparison of MT noise suppression methods

| 方法 | 方式 | 特点 | 缺陷 | 效果 | 备注 | 参考文献 |
|------------|-----------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|------------|--|
| 互功率谱法 | 计算阻抗的互功率谱 | 可克服通道之间不相关噪声 | 各道噪声信号大多相关 | 有一定压制作用,不能明显解决问题 | | Goubau ^[24] |
| Robust 处理法 | 根据观察误差对数据进行加权处理 | 注重未受干扰数据,降低飞点权重 | 无法消除相关噪声和输入端噪声 | 可以有效减小曲线分散度 | 普遍应用 | Egbert 等 ^[21] ; Chave 等 ^[22] ; Sutarno 等 ^[23] |
| 远参考道技术 | 远离噪声源布设参考站 | 噪声不相关,信号高相关 | 无法消除死频段数据的近场效应 | 可以有效抑制相关噪声的影响 | 广泛应用 | Gamble 等 ^[16] ; Goubau 等 ^[24] ; Clarke 等 ^[8] ; 陈清礼等 ^[25] ; 杨生等 ^[19] ; Ueharai 等 ^[26] ; 徐志敏等 ^[27] ; 张刚 ^[28] |
| 小波变换去噪法 | 通过伸缩和平移等运算对信号进行细化分析 | 时频局域性多尺度细化分析 | 依赖小波基函数的选取和基函数阈值的设置 | 可解决特性问题,需人为分析基函数与阈值 | 缺乏自适应性 | Mallat ^[29] ; 何兰芳等 ^[30] ; Trad 等 ^[31] ; 凌振等 ^[13] ; Anvari 等 ^[32] ; Cai 等 ^[33] ; 万云霞等 ^[34] |
| H-H 变换 | 经验模态分析和 Hilbert spectrum 分析 | 可处理非线性、非平稳信号 | 算法效率低,易出现模态混叠现象 | 可有效压制基线漂移以及高频噪声、工频干扰等典型噪声 | 无法满足实时性需求 | Huang 等 ^[35] ; Cai ^[36] ; Cai 等 ^[37] ; 陈钧等 ^[38] |
| 稀疏分解法 | 压缩感知和信号的稀疏分解 | 需构建谐波方波、尖峰干扰等干扰数据库 | 耗时较长;算法效率低;易陷入局部最优解 | 可分离信号中的人文干扰,保留有用信号 | 无法完全匹配噪声形态 | Mallat ^[29] ; Donoho ^[39] ; 汤井田等 ^[40] |

(续表)

| 方法 | 方式 | 特点 | 缺陷 | 效果 | 备注 | 参考文献 |
|------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------|---|
| RhoPlus 校正法 | 由高质量数据估算 Rho+模型, 通过模型推算“死频带”数据 | 确保地电维性为 1D 及 2D; 死频带前后具有一定频率高质量数据 | 对原始数据质量的要求较高, 需要有较高的信噪比 | 对 AMT 死频带具有较好效果, 可引入 MT 资料处理中 | 适用于高质量数据死频带校正 | Parker ^[41] ; 周聪等 ^[20] ; 李红领等 ^[42] |
| MT 时间序列同步依赖关系去噪法 | 利用天然电磁场之间相关性建立本地与参考点的依赖关系 | 不改变原始时间序列文件格式 | 确保测站被影响的时间序列有限 | 对死频带范围内处理效果优于远参考法 | 配合远参考道技术综合利用 | 王辉等 ^[14] |
| 人工挑选 | 依据电阻率与相位之间的相关性对数据进行人工挑选 | 可依据测点已知地质情况, 有选择性的挑选数据 | 具有较大的人为因素, 对处理人员专业素质要求高 | 可大幅度提升原始曲线质量 | 应用广泛, 需经验丰富人员 | |

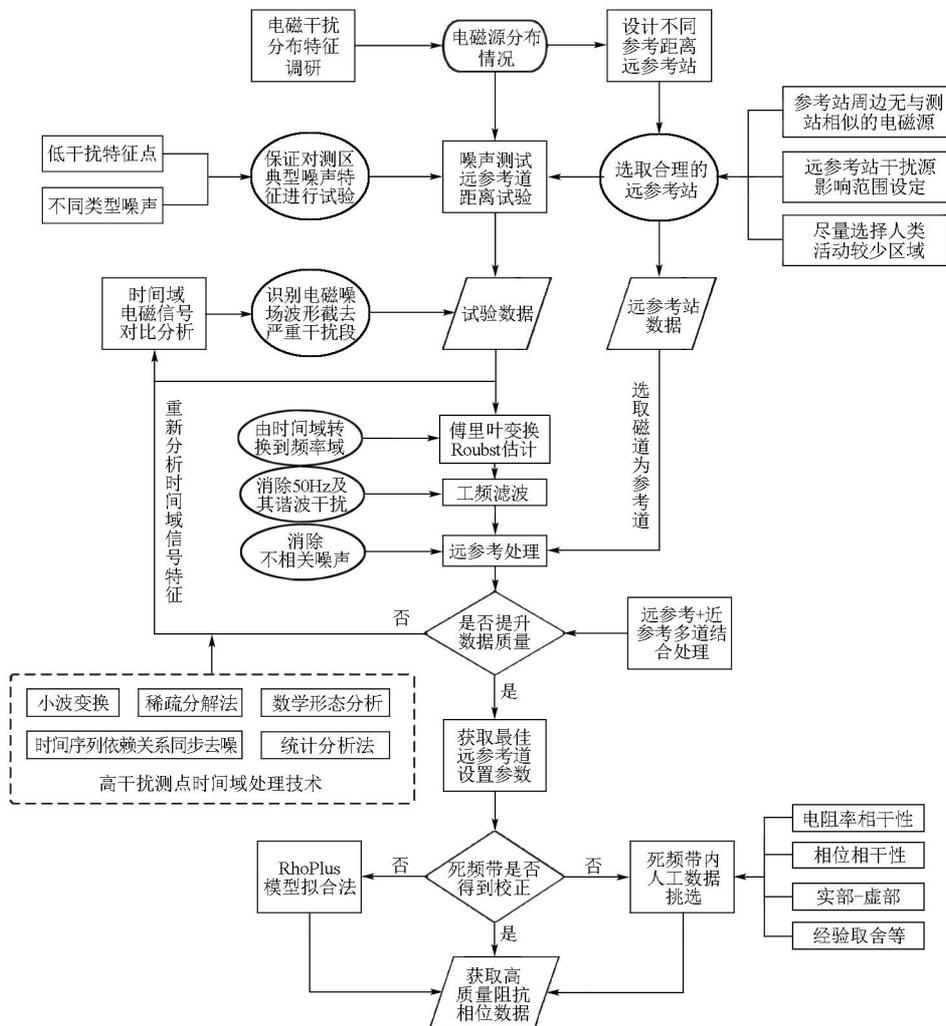


图 3 大地电磁数据噪声抑制施工与处理工艺

Fig. 3 Construction and processing technology of magnetotelluric data noise suppression

有效消除不相关噪声的影响。

经过以上处理后,除 MT“死频带”(0.1 Hz 左右)频段外,获取的大部分数据质量均有极大的提升。这也是本次工艺必须完成的主要程序。对于“死频带”数据处理主要推荐两种方式:一是对数

据进行人工挑选,尽可能地还原曲线特征;二是通过研究区内数据质量较好的曲线特征,在“死频带”频段范围内,应用 RhoPlus 模型拟合法^[38]还原“死频带”范围内的数据。而在现实情况中,经过以上处理后获取的阻抗相位曲线依然存在无法满

足要求的情况,这就涉及到特殊情况特殊对待的问题,可使用时间域处理技术,如小波变换去噪法、H-H 变换、MT 时间序列同步依赖关系去噪法等,针对不同类型噪声特征,针对性地尝试校正。对尝试了各种手段仍无法达到标准要求的测点,则需抛点或重新选位测量。

3 关键技术分析

以上工艺中最为关键的地方在于远参考站的设置问题。自 Gamble 等^[16]和 Clarke 等^[8]提出远参考站处理技术以来,Shalivahan 和 Bhattacharya^[18]认为参考站距离至少在 215 km 以上才能有效提高 30~0.000 55 Hz 频段内的曲线质量;杨生等^[19]通过试验认为参考站距离选择为 14 倍勘探目标层深度时可满足噪声不相关条件;陈清礼等^[25]则认为参考站距离可设置在 1 000 km 以内,且参考站可与测站处在不同的纬度上;徐志敏等^[27, 43]认为磁相关性是影响远参考效果的关键因素;张刚等^[44]认为 40 km 参考站磁相关性很好,处理效果优于常规远参考法;田少兵等^[45]通过试验验证了参考距离并不是越远越好,对于一些高干扰测站,采用远参考加近参考相结合的多站参考,可以对数据质量提升起到意想不到的作用。

可以看出,不同学者对于远参考站距离的选择并不统一。参考站位置的优劣直接关系到原始数据质量,基于大地电磁测深勘探及远参考技术原理可知,参考站观测需满足参考站与基站电磁环境相关,也就是在一定范围内地球的磁场是稳定的,而该稳定范围高频磁场小,低频磁场大,因此参考站的选择既要保障噪声信号的不相关,又要保证有效信号的高相关,如何选择合适的参考距离成为关键问题。对于一个电磁源,其对于 MT 点来说即可能为噪声也可能为有效信号。在此引入 CSAMT 理论^[46],将人文活动产生的电磁源视作电偶极子或磁偶极子源。在一维情况下,假设场源为时谐变化的,则根据赫姆霍兹方程可得趋肤深度公式:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} \approx 0.503 \sqrt{\frac{\rho}{f}},$$

式中: δ 为趋肤深度,km; μ 为磁导率; ω 为谐变电流的圆频率; σ 为电导率; f 为谐变电流的频率; ρ 为电阻率。电磁波在介质中传播的振幅衰减幅度 u 为

$$u = 1 - e^{-\frac{1}{\delta^2}z} = 1 - \frac{1}{e^p},$$

式中 $p = z/\delta$,通常称其为“电距离”或“感应数”,其实质是以趋肤深度为单位来表示的观察点到场源的距离。

由振幅衰减与趋肤深度的关系曲线(图 4)可以看出,随着电磁波在介质中传播距离的增大,波的振幅呈指数衰减,当传播距离 $z = 3.56\delta$ 时,波的振幅衰减达到了 97.2%,当 $z = 5\delta$ 时,波的衰减达到了 99% 以上,说明电磁偶极源信号在传播达到 5 倍的趋肤深度时,其波的能量几乎衰减殆尽,若该信号源在研究区为噪声,在该距离上则可认为对测点的影响微乎其微,可忽略不计。设置远参考相对于研究区内电磁干扰源 5δ 作为最近的参考距离,则其与研究区介质电阻率及频率关系如图 5 所示,实际工作中,参考站距离的选择可依据其选取。

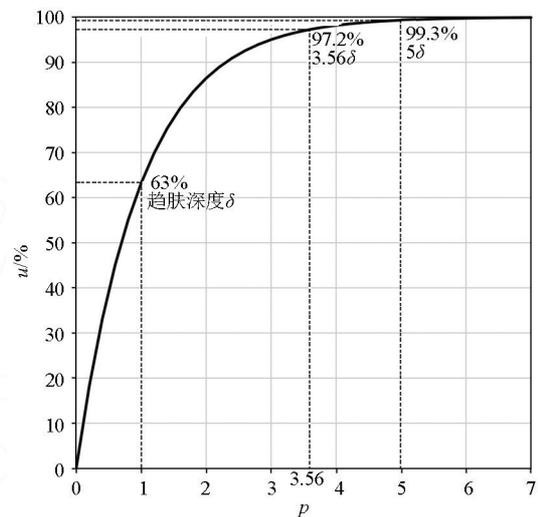


图 4 电磁波振幅衰减与趋肤深度关系

Fig. 4 Graph of amplitude attenuation of electromagnetic wave and skin depth

需要注意的是,在远参考站的选取过程中要尽可能地选取无干扰或低干扰测点,且附近不能有与研究区相似的干扰源,比如民用高压线、城镇居民用电等常见工业设施;距离超高压线至少要 2.6~2.8 km 以上,距离普通高压线至少 1 km 以上^[47]。

4 试验效果对比

依据以上理论及施工工艺,在江苏洪泽盐盆(盐矿)矿集区开展了 MT 试验工作,勘查区卫星影像图如图 6 所示。首先在区域内进行电磁偶极源调查,了解区域内主要电磁干扰类型及其分布特征。

调查发现,研究区内主要干扰源有:居民区及民用输送线、矿井采集设施及开发区、厂房工厂、高压输送线缆、通讯基站以及公路和过往车辆。图 6 中

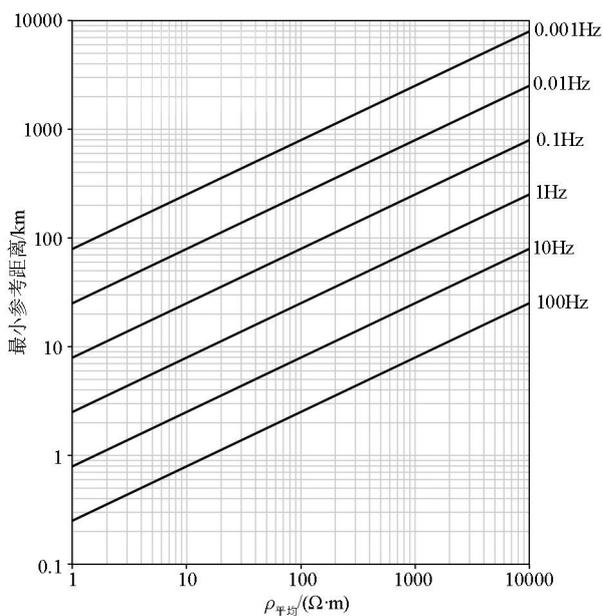


图5 最小参考距离与地下介质电阻率及频率的关系

Fig. 5 Relationship between small reference distance and resistivity and frequency of underground medium



图6 江苏淮安洪泽盐盆勘查区电磁干扰概况

Fig. 6 Summary of electromagnetic interference in Hongze Salt Basin exploration area, Huai'an, Jiangsu Province

标注了部分显而易见的干扰源分布区域,而更多的地下采矿井分布则无法明确标出,属于隐藏式干扰源,其中高压线缆仅标出了试验点附近的分布。总体认为研究区属于矿集区高电磁干扰区域,必须采用有效的电磁去噪技术才能获取合格的原始数据,因此设置远参考站是非常必要的。

依据该矿集区地下开采空间深度,初步确定主要目标深度为1~4 km范围,本次勘探深度设定为

5 km。根据以往电磁法勘探经验可知,本区地下介质平均电阻率约为 $10 \Omega \cdot m$,最低勘探频率为 0.05 Hz,趋肤深度约为 7 km,采集时间保证在 3h 以上,则依据图 5,远参考距离以 35 km 为宜。为了验证该结论的可靠性,分别在研究区内不同噪声类型下设计了 5 个试验测站(SY1~SY5)和 4 个远参考站(YC1~YC4)进行实验,其中 SY1 为对比测站,位于低干扰区,其他 4 个测站布设在区内 4 个典型噪声源附近。基本情况如表 3 所示。

表3 试验区测站与远参考站情况一览

Table 3 List of test stations and remote reference stations in the test area

| 站点 | 周边情况 | 距噪声源距离 | 噪声特征 | 综合评价 |
|-----|--------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| SY1 | 无明显干扰源 | 2~3 km 以上 | 少量脉冲噪声 | 对比点,低干扰 |
| SY2 | 民居、采矿井、工厂、信号塔、公路等 | 100 m 以内 | 周期、阶跃、脉冲、充放电噪声 | 混合型高干扰 |
| SY3 | 采矿生产设备井、民用电线 | 100 m | 三角波、方波、充放电、脉冲噪声 | 有地下未知干扰源,噪声干扰严重 |
| SY4 | 矿区阴极保护站、民房、道路、民用电线 | 100 m 以内 | 周期、充放电、阶跃、三角波噪声 | 矿区接地电流影响严重 |
| SY5 | 西北和南部高压输送线、北边城镇 | 100 m 和 300 m | 周期、脉冲噪声 | 高压输送线影响严重 |
| YC1 | 农田、农户 | 3.56δ, 约 25 km | 脉冲噪声 | 低干扰 |
| YC2 | 200m 民用电线 | 13δ, 约 90 km | 脉冲、周期噪声 | 中低干扰 |
| YC3 | 山中树林 | 27δ, 约 188 km | 脉冲噪声 | 低干扰 |
| YC4 | 湖边荒地 | 5δ, 约 35 km | 脉冲噪声 | 低干扰 |

图 7、图 8 分别给出了 SY2 和 SY3 测站的情况。由图 7b 可以看出,SY2 周边干扰源主要有大型工厂、居民区、采矿井、信号塔、公路等,属于多种干扰源的综合影响。由时间序列特征(图 7a)发现,磁信号强度异常增大,主要能量来自于工业谐波的影响;由功率谱曲线(图 7c)可以看出,信号在 50 Hz 及其倍数频率附近受到了强烈干扰,在 50 Hz 以上频段受到各种不同场源的影响,振幅浮动强烈,在中低频范围内 H_y 功率谱振幅波动较大且明显高于 H_x ;图 7d 显示电阻率曲线形态杂乱无序,特别是 ρ_{xy} 曲线低频段急剧下降,说明受到了强烈干扰。

由图 8b 可以看出,SY3 试验点附近主要干扰源

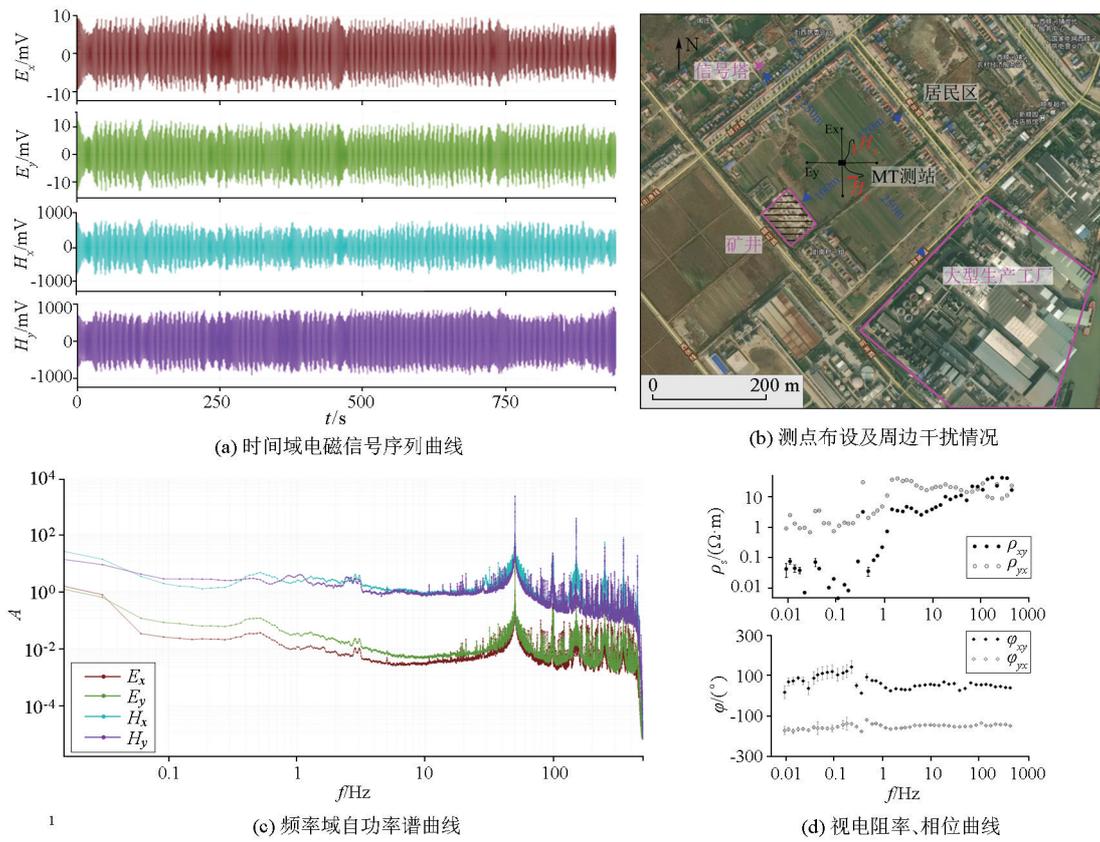


图 7 SY2 试验点基本情况一览
Fig. 7 Summary of basic situation of SY2 test site

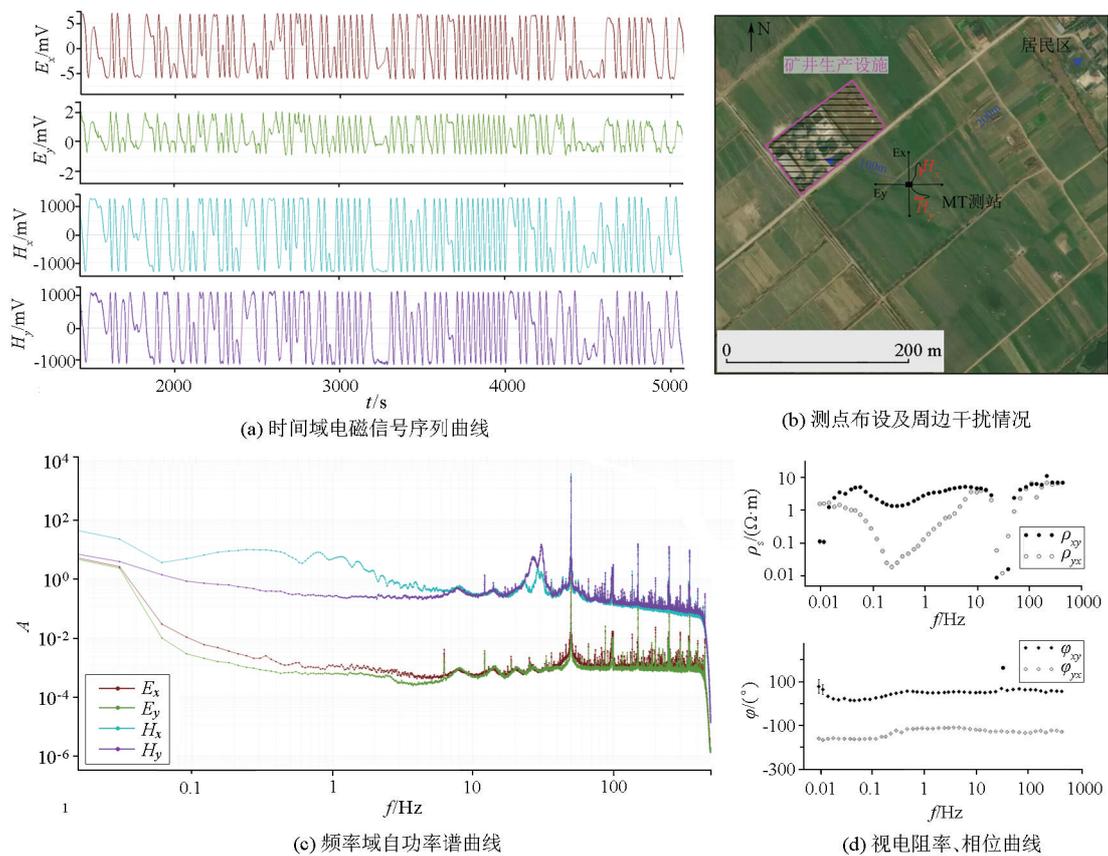


图 8 SY3 试验点基本情况一览
Fig. 8 Summary of basic situation of SY3 test site

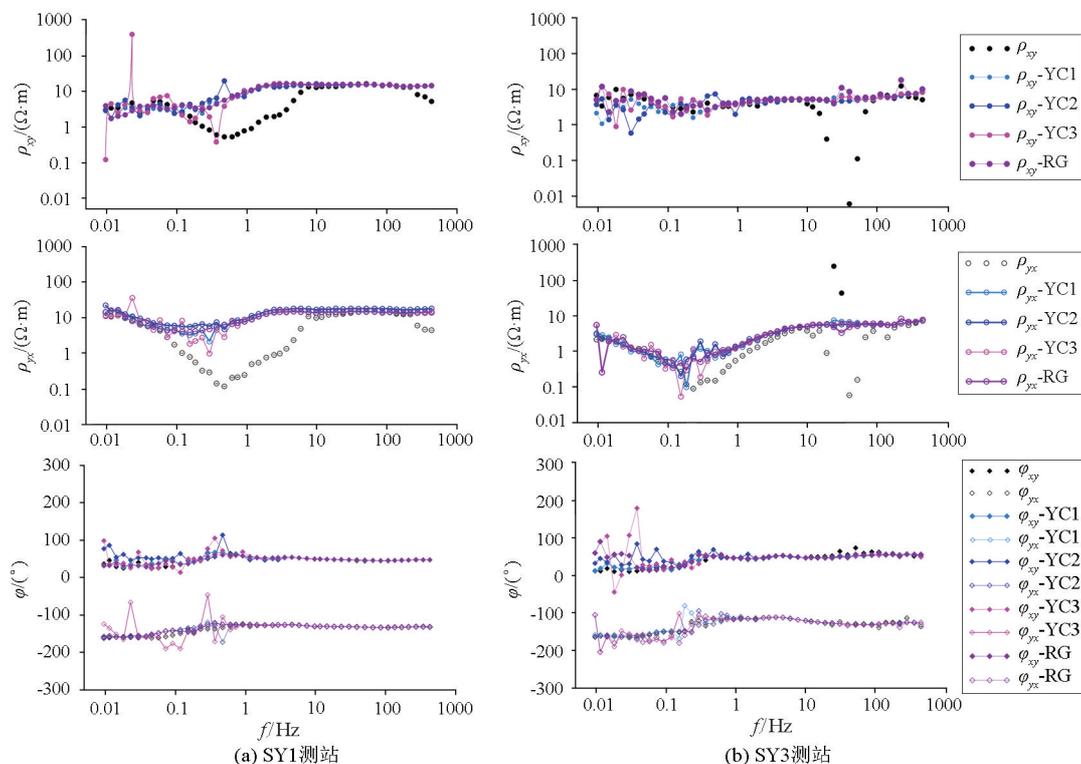
为矿井生产设施和居民区,而居民区相距测点达到 200 m 以上,认为此处主要干扰源为区域内矿井生产设备,为单一主要干扰源。由图 8a 可以看出 SY3 测站时间序列呈不规则阶跃型曲线,应是受到阶跃噪声、脉冲和周期噪声的影响;从功率谱特征(图 8c)来看,高频部分仅在 50 Hz 及其倍数频段受到较强烈干扰,在 20~40 Hz 范围内磁场受到了较明显的影响,在低频段 H_x 功率谱幅值出现了明显的异常增大,这一点在视电阻率、相位曲线上也反映显著(图 8d), ρ_{yx} 电阻率曲线在低频段呈现异常下凹现象,20~40 Hz 段曲线出现明显的“飞点”。

分别对 SY1、SY2 和 SY3 采用 3.56 δ (YC1)、13 δ (YC2)和 27 δ (YC3)3 种不同距离参考站进行实验对比,并采用 Robust 估计处理和工频滤波处理,对比结果后,认为远参考站设置达到 3.56 δ 即已获取较好的效果,因此后期分别对 SY2、SY4 和 SY5 进行了 5 δ (YC4)远参考实验,并在相对较好的处理结果中进行人工挑选。实验结果见图 9~图 11。

由图 9a 可以看出,SY1 属于测区内低干扰测点,其视电阻率、相位曲线整体连续圆滑,无明显的“飞点”和阶跃现象。但在 0.1~10 Hz 范围内,存在较为明显的电阻率曲线下凹现象,高频段存在电阻

率下掉的现象,认为其下掉的主要原因是:①该频段为 MT“死频带”范围内,有效信号弱,无法压制干扰;②周边不同距离的电磁波信号传播到该测站时,磁场强度远大于电场强度。通过不同远参考处理,在该频段电阻率下凹和高频段下掉的现象得到明显改善,在 YC2 和 YC3 参考后在小于 1 Hz 频段存在个别较为明显的“飞点”,局部存在曲线不连续现象,但是整体偏差不大,经过人工挑选后,可以获得圆滑连续的曲线。综合认为 YC1 即可满足远参考需求,且效果优于 YC2 和 YC3。

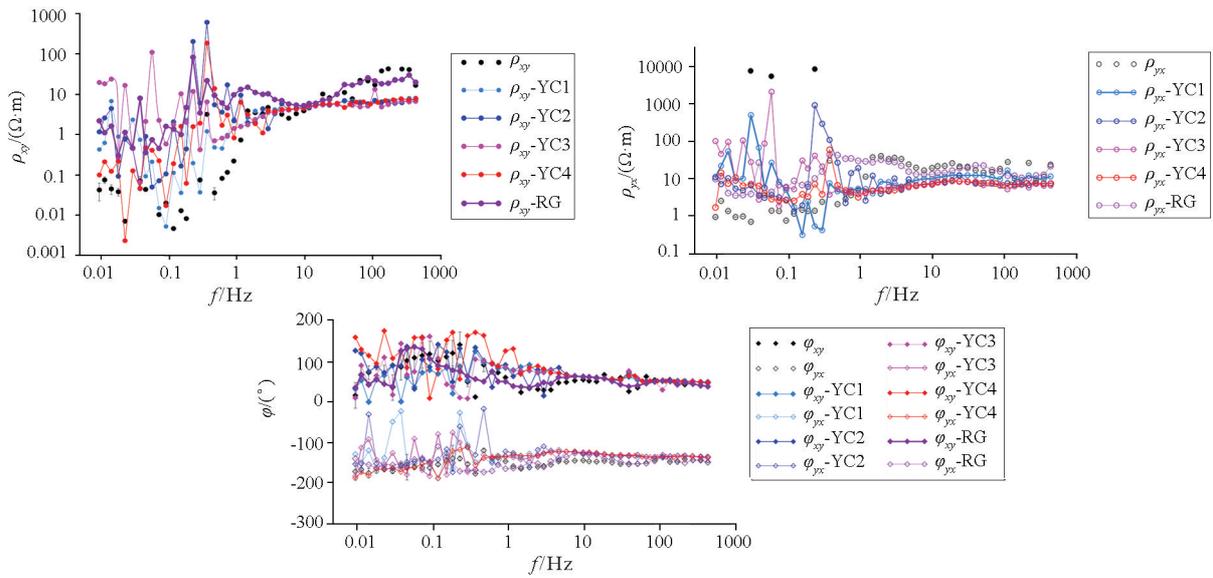
由图 9b 可以看出,SY3 主要受到矿区内单一噪声源影响,视电阻率、相位曲线在 10~100 Hz 范围内存在明显的“下掉”现象,在 0.05~10 Hz 频段范围内, yx 方向存在明显的电阻率向下凹陷,相位变低的现象, xy 方向该现象相对不明显,认为其为矿区内干扰源的主要影响。经过不同参考距参考后,可以看出,在 10~100 Hz 频段范围内该现象得到了较好的改善,在 0.05~10 Hz 频段, yx 方向电阻率下凹现象得到了一定的提升,但是由于 YC2 参考道本身受到一定的噪声影响,故其在低频段参考效果较差。YC3 参考效果在低频段出现了明显的跳跃和“飞点”现象,虽然总体趋势较 YC1 一致,但参考效



-YC1、-YC2、-YC3 分别表示使用 YC1、YC2、YC3 远参考站处理后的结果;-RG 表示远参考站处理后又经过人工挑选的结果

图 9 SY1 测站与 SY3 测站不同参考距实验结果对比

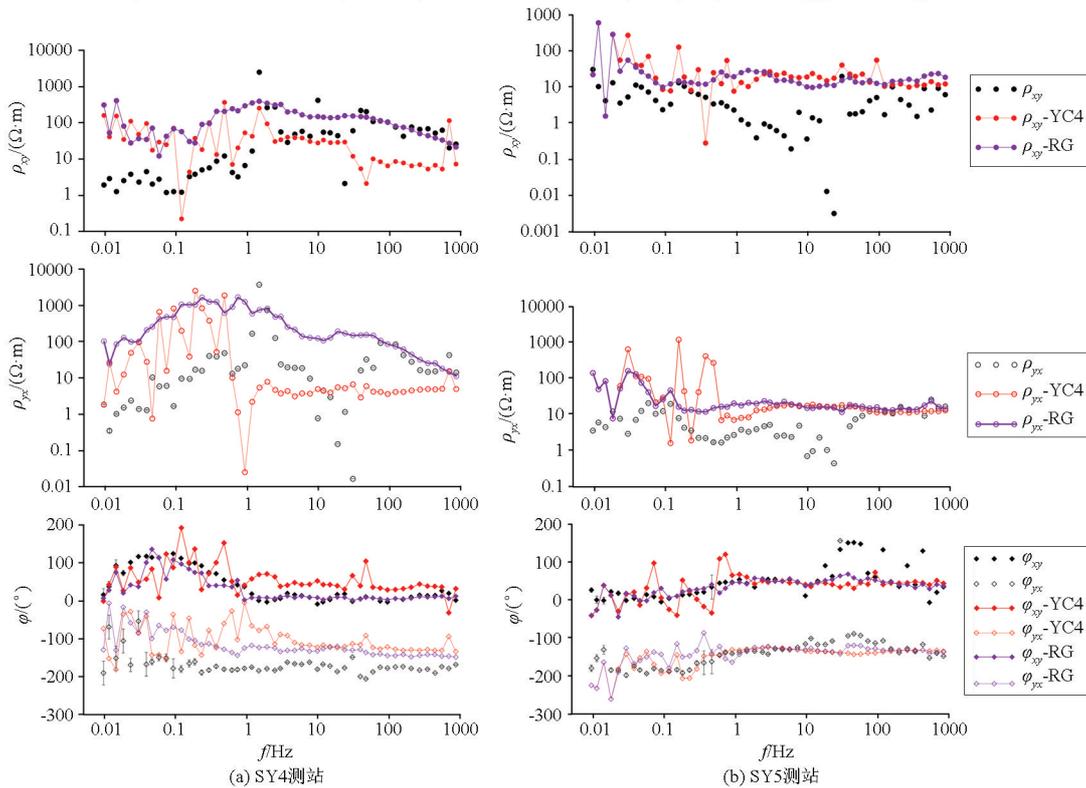
Fig. 9 Comparison of resistivity and phase curves of SY1 and SY3 base stations with different reference distances and manual selection



-YC1、...-YC4 分别表示使用 YC1、...-YC4 远参考站处理后的结果;-RG 表示远参考站处理后又经过人工挑选的结果

图 10 SY2 测站不同参考距实验结果对比

Fig. 10 Comparison of resistivity and phase curves of SY2 with different reference distances and manual selection



-YC4 表示使用 YC4 远参考站处理后的结果;-RG 表示远参考站处理后又经过人工挑选的结果

图 11 SY4 测站与 SY5 测站不同参考距实验结果对比

Fig. 11 Comparison of resistivity and phase curves of SY4 and SY5 base stations with different reference distances and manual selection

果均不如 YC1,经过人工挑选后,可以获取优良的阻抗相位数据。

SY2 受到测区内多种电磁噪声源近距离干扰,属于混合干扰,其所受到的电磁影响由原始电阻率、相位曲线可见一斑(图 10),曲线在小于 1 Hz 频段

呈上下阶跃性跳动,无明显的走向趋势,高频段同样呈较大浮动,连续性较差。经过不同参考距的实验结果可以看出:在 0.5 Hz 至高频段,曲线形态得到明显改善,且不同距离参考站参考效果具有较好的一致性;在 0.5 Hz 至低频段,电阻率、相位曲线仍表

现为较大的浮动跳跃现象,无明显趋势,认为无法达到合格要求,经过人工挑选的数据虽然圆滑性有所提升,但其曲线形态仍无法得到明显改善。分析认为,高频段信号经过远参考处理后得到提升,而低频段数据无法通过远参考道方法和人工挑选的方法得到改善。对于此种多干扰源混合干扰测点,需尝试使用时间域处理技术进行单独分析处理,若仍无法达到要求,应尽量远离干扰源布设测点,重新采集或者作抛点处理。

经过 SY1、SY2 和 SY3 的试验对比分析,与距离较远的 YC2 和 YC3 相比, YC1 参考站即已获得较好的参考效果,因此对 SY4 和 SY5 采用 YC4(参考距接近于 YC1)进行远参考试验,结果见图 11。可以看出, SY4 分别受到矿区阴极保护站、道路、居民区等影响,原始曲线呈不连续跳跃状,小于 1 Hz 频段的电阻率急剧下降,相位曲线升高,说明该频段受到更为明显的影响。经过 YC4 参考后, 1 Hz 以上频段得到了明显提升,而低于 1 Hz 的信号呈阶跃状跳动现象;经人工挑选后,曲线形态连续性得到明显改善,但其数值与远参考处理结果存在较为明显的差异,有待进一步与相邻测点进行对比分析后,再判断其可靠性。

SY5 主要受到高压线缆和居民区的影响,在整个频段均受到不同程度的影响,尤其在中高频段 1~100 Hz 范围内影响最为严重。经过 YC4 参考后, 1 Hz 以上频段的曲线形态得到了明显改善, 1 Hz 以下频段也得到了一定的提升。经过人工挑选后,整体曲线形态得到了明显改善,可认为达到了合格水平。

5 结论与建议

通过理论分析与实际工作经验总结,对后工业时代天然源大地电磁勘探的主要噪声源及特征、噪声抑制技术及施工特点进行了详细分析,主要结论如下:

1) 我国境内主要电磁场产生源可分为 12 种,其产生的主要噪声分为 6 类。在现实环境中,一种噪声源可产生多种噪声信号,应在数据采集阶段尽早远离或降低其影响。

2) 针对大地电磁测深噪声抑制问题,认为 Robust 处理、远参考道技术和人工筛选是较为系统和必要的方法,其他方法亦有各自针对的问题,各有千秋。

3) 根据多年工作经验,总结了一套适用于高干扰地区的、简易有效的大地电磁数据采集及处理工艺,认为远参考站设置至少大于 3.56 倍 δ (趋肤深

度),最佳参考距离为 5 倍 δ 。在洪泽盐盆矿集区开展的试验结果证实了该方法的有效性。

基于实际情况及本次研究,在生产过程中需注意以下几个方面:

1) 现实电磁噪声环境比理论情况复杂得多,往往是多种电磁干扰源的综合影响,因此在正式施工前需尽可能多地了解工作区概况,优化观测方案,针对高干扰、多噪声区域,设置多种方案。

2) 针对个别远参考站效果一般的测点,可尝试远参考加近参考(区内低干扰测点)多站参考的方式进行处理,有可能获得更好的参考效果。

3) 针对特殊测点,常规处理手段无法校正的情况下,在时间域采用小波变换、H-H 变换等处理方法,有可能得到更好的效果。

4) 采用多种技术手段仍无法达到要求的测点,该测点不能参与到后续数据反演工作中,避免产生假异常。

参考文献(References):

- [1] 姜建军. 实施“三深一土”国土资源科技创新发展战略的思考[J]. 国土资源科技管理, 2017, 34(3): 1-8.
Jiang J J. Thoughts on implementing the strategy of “three depths and one soil” for scientific and technological innovation and development of land and resources [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2017, 34(3): 1-8.
- [2] 杨长福,徐世浙. 国外大地电磁研究现状[J]. 物探与化探, 2005, 29(3): 243-247.
Yang C F, Xu S Z. The present situation of magnetotelluric researches abroad [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(3): 243-247.
- [3] 陈乐寿. 大地电磁测深——探测地球深部电性和物质状态的一种有效手段[J]. 自然杂志, 2009, 31(1): 39-46.
Chen L S. Magnetotelluric sounding: An effective approach to survey electrical property and state of matter in the deep earth [J]. Chinese Journal of Nature, 2009, 31(1): 39-46.
- [4] 陈乐寿,王光镗. 大地电磁测深法[M]. 北京:地质出版社, 1990.
Chen L S, Wang G E. Magnetotelluric sounding method [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [5] Fischer G. The magnetotelluric sounding method [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1982, 63(29): 578.
- [6] 张全胜,杨生. 大地电磁测深资料去噪方法应用研究[J]. 石油物探, 2002, 41(4): 493-499.
Zhang Q S, Yang S. An application study of noise elimination for magnetotelluric sounding data [J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2002, 41(4): 493-499.
- [7] 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. The study of restraining environmental noise and its application in magnetotelluric sounding [D]. Changsha: Central South

- University, 2004.
- [8] Clarke J, Gamble T D, Goubau W M, et al. Remote-reference magnetotellurics: Equipment and procedures [J]. *Geophysical Prospecting*, 1983, 31(1): 149-170.
- [9] 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.
- [10] 凌振宝, 王沛元, 万云霞, 等. 强人文干扰环境的电磁数据小波去噪方法研究 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59(9): 3436-3447.
Ling Z B, Wang P Y, Wan Y X, et al. A combined wavelet transform algorithm used for de-noising magnetotellurics data in the strong human noise [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(9): 3436-3447.
- [11] 朱威, 范翠松, 姚大为, 等. 矿集区大地电磁噪声场源分析及噪声特点 [J]. *物探与化探*, 2011, 35(5): 658-662.
Zhu W, Fan C S, Yao D W, et al. Noise source analysis and noise characteristics study of mt in an ore concentration area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35(5): 658-662.
- [12] 徐志敏, 汤井田, 强建科. 矿集区大地电磁强干扰类型分析 [J]. *物探与化探*, 2012, 36(2): 214-219.
Xu Z M, Tang J T, Qiang J K. An analysis of the magnetotelluric strong interference types in ore concentration areas [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36(2): 214-219.
- [13] 葛双超, 李斌. 大地电磁法人文噪声干扰特点及处理方法综述 [J]. *物探化探计算技术*, 2021, 43(5): 609-619.
Ge S C, Li B. Review of the characteristics and processing methods of human noise interference in magnetotelluric [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 43(5): 609-619.
- [14] 王辉, 程久龙, 腾星智, 等. 矿区近场源噪声对大地电磁测深数据的影响及其压制方法 [J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(3): 1358-1366.
Wang H, Cheng J L, Teng X Z, et al. Source effect on magnetotelluric data due to mining area and its suppression [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(3): 1358-1366.
- [15] 周聪, 汤井田, 原源, 等. 强干扰区含噪电磁场的时空分布特征 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2020, 50(6): 1870-1886.
Zhou C, Tang J T, Yuan Y, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of electromagnetic fields in strong noise area [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2020, 50(6): 1870-1886.
- [16] Gamble T D, Goubau W M, Clarke J. Magnetotellurics with a remote magnetic reference [J]. *Geophysics*, 1979, 44(1): 53-68.
- [17] Ritter O, Junge A, Dawes G J K. New equipment and processing for magnetotelluric remote reference observations [J]. *Geophysical Journal International*, 1998, 132(3): 535-548.
- [18] Shalivahan, Bhattacharya B B. How remote can the far remote reference site for magnetotelluric measurements be? [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 2002, 107(B6): 1-7.
- [19] 杨生, 鲍光淑, 张全胜. 远参考大地电磁测深法应用研究 [J]. *物探与化探*, 2002, 26(1): 27-31, 49.
Yang S, Bao G S, Zhang Q S. A study on the application of remote reference magnetotelluric sounding technique [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2002, 26(1): 27-31, 49.
- [20] 周聪, 汤井田, 任政勇, 等. 音频大地电磁法“死频带”畸变数据的 Rhoplus 校正 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(12): 4648-4660.
Zhou C, Tang J T, Ren Z Y, et al. Application of the Rhoplus method to audio magnetotelluric dead band distortion data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(12): 4648-4660.
- [21] Egbert G D, Booker J R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions [J]. *Geophysical Journal International*, 1986, 87(1): 173-194.
- [22] Chave A D, Thomson D J, Ander M E. On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 1987, 92(B1): 633-648.
- [23] Sutarno D, Vozoff K. Robust M-estimation of magnetotelluric impedance tensors [J]. *Exploration Geophysics*, 1989, 20(3): 383-398.
- [24] Goubau W M, Gamble T D, Clarke J. Magnetotelluric data analysis: Removal of bias [J]. *Geophysics*, 1978, 43(6): 1157-1166.
- [25] 陈清礼, 胡文宝, 苏朱刘, 等. 长距离远参考大地电磁测深试验研究 [J]. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(2): 145-148, 200.
Chen Q L, Hu W B, Su Z L, et al. Study for long-distant and far-referential MT [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2002, 37(2): 145-148, 200.
- [26] Ueharai D, Ishimaru T, Tanase A, et al. Effectiveness of far remote reference method on magnetotelluric (MT) survey and deep resistivity structure in the southern region of the kii peninsula, southwest Japan [J]. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, 2003, 44(3): 164-174.
- [27] 徐志敏, 辛会翠, 吕扶君. 庐枞矿集区大地电磁法的远参考效果研究 [J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(4): 1822-1830.
Xu Z M, Xin H C, Lyu F J. Ore cluster area of Luzong magnetotelluric (MT) method of remote reference research [J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(4): 1822-1830.
- [28] 张刚. 长周期大地电磁数据处理方法研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
Zhang G. Research on long-period magnetotelluric data processing [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [29] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693.
- [30] 何兰芳, 王绪本, 王成祥. 应用小波分析提高 MT 资料信噪比 [J]. *成都理工学院学报*, 1999, 26(3): 299-302.
He L F, Wang X B, Wang C X. Improving the s/n ratio of mt data by wavelet analysis [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1999, 26(3): 299-302.
- [31] Trad D O, Travassos J M. Wavelet filtering of magnetotelluric data [J]. *Geophysics*, 2000, 65(2): 482-491.
- [32] Anvari R, Nazari Siahars M A, Gholthashi S, et al. Seismic random noise attenuation using synchrosqueezed wavelet transform and low-rank signal matrix approximation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(11): 6574-6581.

- [33] Cai J H, Xiao Y L. Impulse interference processing for MT data based on a new adaptive wavelet threshold de-noising method[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(18):407.
- [34] 万云霞,王力鑫,张宏伟,等. 基于小波变换的 MT 数据人文噪声抑制方法[J]. *吉林大学学报:信息科学版*, 2021, 39(6):624-629.
Wan Y X, Wang L X, Zhang H W, et al. Research on human noise suppression of MT data based on wavelet transform[J]. *Journal of Jilin University: Information Science Edition*, 2021, 39(6):624-629.
- [35] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1999, 31:417-457.
- [36] Cai J H. A combinatorial filtering method for magnetotelluric time-series based on Hilbert - Huang transform[J]. *Exploration Geophysics*, 2014, 45(2):63-73.
- [37] Cai J H. A combinatorial filtering method for magnetotelluric data series with strong interference[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(13):628.
- [38] 陈钧,严良俊,周磊. 基于 Hilbert-Huang 变换的大地电磁去噪研究[J]. *物探与化探*, 2021, 45(6):1462-1468.
Chen J, Yan L J, Zhou L. Denoising of magnetotelluric data based on Hilbert-Huang transform[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(6):1462-1468.
- [39] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4):1289-1306.
- [40] 汤井田,李广,肖晓,等. 基于压缩感知重构算法的大地电磁强干扰分离[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(9):3642-3654.
Tang J T, Li G, Xiao X, et al. Strong noise separation for magnetotelluric data based on a signal reconstruction algorithm of compressive sensing[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(9):3642-3654.
- [41] Parker R L. The inverse problem of electromagnetic induction: Existence and construction of solutions based on incomplete data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1980, 85(B8):4421-4428.
- [42] 李红领,王光杰,杨磊,等. 基于蒙古东戈壁 AMT 数据的“死频带”分析[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(6):2153-2158.
Li H L, Wang G J, Yang L, et al. Dead band analysis based on Mongolian East Gobi AMT data[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(6):2153-2158.
- [43] 徐志敏,辛会翠,谭新平,等. 强电磁干扰区大地电磁远参考技术试验效果分析[J]. *物探与化探*, 2018, 42(3):560-568.
Xu Z M, Xin H C, Tan X P, et al. An analysis of the experimental result of MT remote reference technique in strong electromagnetic interference region[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(3):560-568.
- [44] 张刚,庾先国,王绪本,等. 磁场相关性在远参考大地电磁数据处理中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2017, 52(6):1333-1343, 1125-1126.
Zhang G, Tuo X G, Wang X B, et al. Application of magnetic field correlation in remote reference magnetotelluric data processing[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2017, 52(6):1333-1343, 1125-1126.
- [45] 田少兵,刘必良,梅荣,等. 东部沿海低阻区大地电磁测深远参考试验研究[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(1):430-442.
Tian S B, Liu B L, Mei R, et al. Study on the application of remote reference magnetotelluric sounding technique in low resistance area of east coast of China[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(1):430-442.
- [46] 汤井田,何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙:中南大学出版社, 2005.
Tang J T, He J S. *Controlled source audio magnetotelluric method and its application*[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [47] 张良怀,李征西,张京辉,等. 50 万伏超高压输电线的电磁场时空分布特征及其实验研究[J]. *东北地震研究*, 1998(1):17-30.
Zhang L H, Li Z X, Zhang J H, et al. Experimental research of electromagnetic field distribution around 500kv supervoltage power line[J]. *Seismological Research of Northeast China*, 1998(1):17-30.

Exploring electromagnetic noise suppression technologies for magnetotelluric sounding in high-interference ore districts

HAO She-Feng^{1,2}, TIAN Shao-Bing², MEI Rong², PENG Rong-Hua³, LI Zhao-Ling⁴

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210049, China; 3. School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. 5th Exploration Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Tai'an 271000, China)

Abstract: Magnetotelluric sounding (MT) has been extensively applied in mineral resource exploration. However, strong anthropogenic electromagnetic interference severely constrains the acquisition of high-quality original MT data. This study provided a detailed summary of the common types of electromagnetic noise sources in China and analyzed the characteristics of electromagnetic noise they produced. By comparing the methods for MT electromagnetic noise reduction at home and abroad, this study developed a rapid and effective construction and processing technology for MT data denoising in high-interference ore districts based on actual production demands. The results indicate that Robust processing, remote reference technique, and manual selection are effective and necessary in enhancing MT data quality. Besides, theoretical calculations suggest that the distance between the remote reference stations should be set at 3.56-fold skin depth or above, as verified by the MT experiments in the ore district of the Hongze salt basin, Jiangsu Province.

Key words: magnetotelluric sounding (MT); electromagnetic noise; denoising; remote reference method; ore concentration area