

时空阵列混场源电磁法在深埋隧道勘察的应用

杨磊

(中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北武汉 430063)

[摘要] 利用时空阵列混场源电磁法,对宜涪铁路孟家垭深埋隧道进行地质勘察。该方法整合了天然场及人工场源电磁勘探的优点,使用统一的理论模型和观测设备,一次布置可以采集远参考大地电磁、可控源大地电磁和广域大地电磁法三类勘探数据,极大地提高了野外工作效率及勘探精度。使用针对强干扰区所设计的抗干扰算法进行精细去噪工作,最终采用非线性共轭梯度法(NLCG)和横向约束拟二维(LCI)方法进行反演,得到了与地质资料吻合的反演成果。同时结合既有地质资料,推断孟家垭隧道的浅部地层为层状、低电阻率的二叠系栖霞组灰岩夹煤质地层;深部地层为灰岩、页岩和石英砂岩;在测段中部(地表里程CK172+875段)存在1处断层,周围岩体较破碎。该勘探成果对促进隧道下一步安全施工具有重要意义。

[关键词] 时空阵列 隧道 电磁法 信号去噪 NLCG反演 LCI反演

[中图分类号] P631 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2025)02-0395-12

Yang Lei. Application of space-time array hybrid source electromagnetic method in deep-buried tunnel exploration[J]. Geology and Exploration, 2025,61(2): 0395-0406.

0 引言

根据地下勘探深度的要求,目前常采用的电磁勘探方法有:大地电磁法(MT)、音频大地电磁测深法(AMT)、可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)、广域电磁法(WFEM)等(汤井田等,2015,2018;何继善等,2010,2020)。AMT法利用天然场源,其观测频带范围约为0.1~100 kHz,具有较大的勘探深度。该方法具有理论简单、外业实施时仪器轻便、易于操作等优势,但其天然场源信号随机且强度弱,抗干扰能力较差。CSAMT法利用人工场源,其观测频带范围约为0.1~10 kHz之间,勘探深度可达2~3 km,采用可控的人工场源信号强度大,因此抗干扰能力强,可以采用多点阵列式同步采集,从而提高工作效率。但该方法人工场源铺设较为复杂,仪器繁重,场源理论计算复杂,相较于AMT法引申出近远区效应、场源阴影效应等干扰。

广域电磁法采用大功率人工源发射 2^n 序列伪

随机信号,同时发送和接收多个频率,提高了发射效率和抗干扰能力,并以电磁场精确表达式定义广域视电阻率,实现了“非远区”测量,极大地扩展了人工源频率域电磁法的勘探范围和深度(李帝铨和胡艳芳,2015;危志峰等,2020;何继善等,2020;谢明宏,2022;肖晓等,2024)。经过近20多年的发展,广域电磁法探测理论逐步完善、发送与接收设备性能得到逐步优化、数据反演解释从一维发展三维、数据采集从密度测点与测线扩展到高密度三维阵列观测(何继善,2019;陈后扬等,2022;高金定等,2019;周印明等,2021;徐锦通和汤井田,2022;齐朝华,2023;柳建新等,2024),已在深部资源及能源勘探、地下水资源、环境及工程勘查等领域取得了优良的地质效果(许广春,2020;张林成等,2022;王丹丹等,2023;朱云起等,2023;He et al., 2018; Yuan et al., 2017; Gu et al., 2024)。

近年来,在天然场源及人工场源方法的基础上,中南大学汤井田教授提出了一种新的电磁勘探

[收稿日期] 2024-08-13; **[改回日期]** 2025-01-07; **[责任编辑]** 陈伟军。

[基金项目] 中铁四院科技研究开发计划“深埋长大隧道上硬下软地层结构勘察评价技术研究”(编号:KY2023078S)资助。

[第一作者] 杨磊(1994年-),男,工程师,2020年毕业于中南大学,地质资源与地质工程专业,硕士,主要从事铁路地质勘察设计研究。
E-mail: 1159745498@qq.com。

方法——时空阵列混场源电磁法(周聪等, 2019, 2020), 其突出优势是利用统一的理论模型和观测设备, 可实现广域电磁法、可控源大地电磁法、大地电磁法等多种响应参数的同步提取与干扰压制, 提高勘探的精度和效率。时空阵列混场源电磁法的核心是搭建了多场源输入-多站道输出的观测系统, 适用于同时存在天然场源、人工场源和人文场源的混场源输入条件, 顺应阵列电磁观测发展方向, 为复杂干扰环境下的电磁勘探提供了途径。

本文工作根据工区勘探任务拟解决的主要地质问题: 受隧道中-浅层 P_2 吴家坪组煤系地层、 P_1 马鞍组炭质灰岩、煤层的水平低阻屏蔽影响, 常规的大地电磁测深信号难以穿透, 无法获取深部的有效信号。综合考虑工区的地质特点和地球物理特征, 本次地球物理勘探选择强信号可探深部、抗干扰能力优的时空阵列混场源电磁法为主要勘探方法。时空阵列混场源电磁法可以同时实现远参考大地电磁和可控源电磁法两种数据方式的数据采集与处理, 并可以实现广域电磁法反演计算。

1 技术方法

依据电磁勘探理论, 平面电磁波的波阻抗定义为在地面正交采集的一组水平电磁场(E_x, H_y)的比值, f 为电磁场变频率。CSAMT法视电阻率由远区的正交电磁场计算得到卡尼亚视电阻率 ρ :

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (1)$$

趋肤深度 δ 可以反映出电磁波在地下传播过程中, 不同穿透深度的电性结构和观测频率之间的关系:

$$\delta \approx 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2)$$

通过趋肤深度的计算, 能初步得到反映地下岩体不同深度的电性分布。

广域视电阻率 ρ_a 可以表示为:

$$\rho_a = K_{E-E_s} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{f_{E-E_s}(ikr)} \quad (3)$$

上述公式即为广域电磁法视电阻率的理论基础, 需要将测量电极的电位差、发送电流、相关几何参数代入公式, 并设置初步迭代的计算视电阻率, 采用计算机迭代求解的办法获取视电阻率的最佳值。由广域视电阻率的定义可知, 在包含“非远区”的范围内, 广域电磁法仅需要观测一个电场分

量即可计算出广域视电阻值。

时空阵列混场源电磁法外业采用可控源大地电磁法和带远参考的大地电磁法两种方法, 勘探示意如图 1。具体的方案如下, 可控源电磁法采用矢量采集方式及阵列处理方式。远参考大地电磁法采取阵列采集方式, 单点采集水平 4 分量, 采集方式如图 2。数据处理采用单点非远参考方式、单点远参考方式以及时空阵列电磁处理三种方式。对比处理结果, 综合对比抗干扰能力和分辨率之后, 优选更接近真实地下电性分布的结果进行反演和解释。

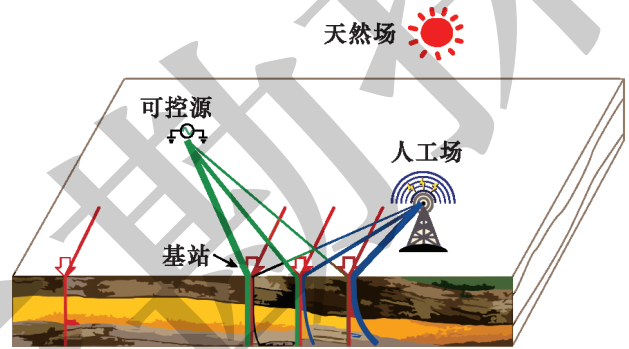


图 1 时空阵列电磁勘探示意(周聪等, 2019)

Fig. 1 Schematic diagram of space-time array electromagnetic exploration (after Zhou et al., 2019)

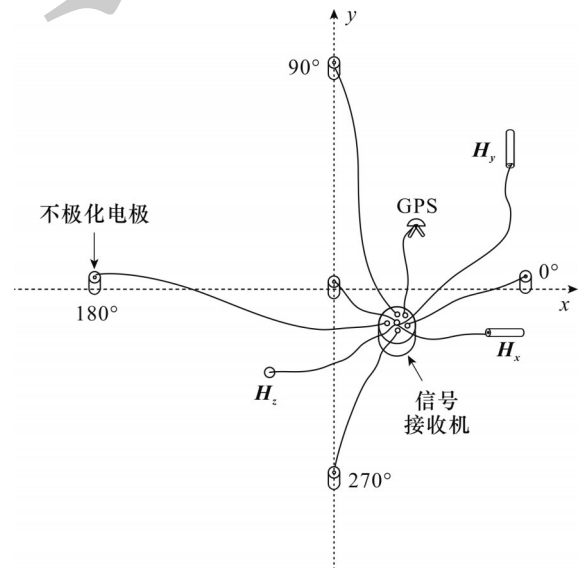


图 2 单点测量方式

Fig. 2 Single-point measurement

时空阵列电磁发射机的信号源为 a^n 序列伪随机信号, 根据勘探任务需要选用多频 39 频波, 频带信号范围为 0.1~8192 Hz, 实现了多频率同时测量, 提升勘探深度。采用大功率发射机, 最大发送功率: 200 kW,

最大发射电压:1000 V,最大发送电流:220 A,提升发送信号强度,保障信号可穿透低阻屏蔽层。

2 工区概况

宜涪铁路是我国中长期铁路网规划中沿江通道的重要组成部分,对构建长江经济带综合立体交通枢纽,带动中西部经济增长具有重要作用。其中孟家垭隧道位于湖北省恩施州建始县境内。全段隧道范围为中高山区构造侵蚀溶蚀台地地貌,隧道地形起伏高差较大,地下岩性分布复杂,断层岩溶

等异常构造发育,是该线路勘察的重难点工区。

宜涪铁路孟家垭隧道工区位于湖北省恩施州建始县雷家村附近,测线全长 2 km,工区范围为中高山区构造侵蚀溶蚀台地地貌;地面高程 1750~1950 m,线路穿越村落、旱地、山丘、林地等,测线附近有公路到达,交通便利。孟家垭隧道工区场源及测线布置如图 3 所示,场源位置在湖北省恩施州建始县雄母村附近,覆盖层较厚,AB 偶极位于农田之中,场源 AB 偶极距 1.4 km,与测线方位大致平行,距离测线约 7.0 km,接地电阻 17 Ω。

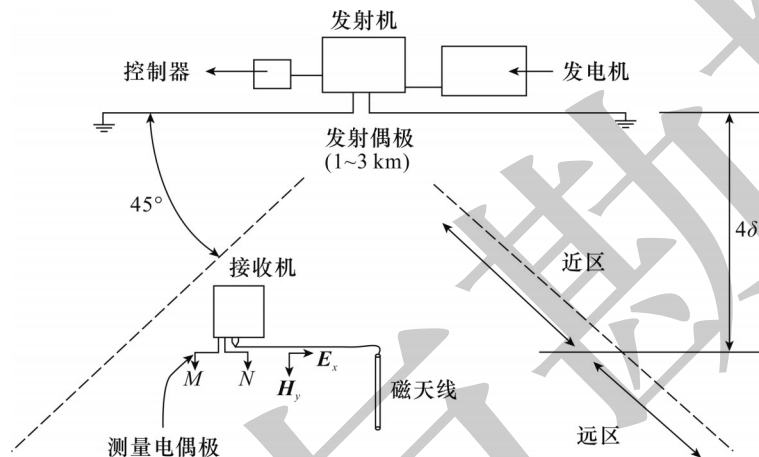


图 3 电磁系统测量布置示意

Fig. 3 Schematic diagram of measuring arrangement of electromagnetic system

根据工程区已有钻探资料,任务段地层近似水平层状,下伏基岩由浅到深依此为:三叠系大冶组(T_1d)薄层泥晶灰岩,岩溶发育;二叠系吴家坪组(P_2w)硅质岩、页岩、煤;二叠系茅口组(P_1m)灰岩;二叠系栖霞组(P_1q)灰岩、马鞍山组炭质页岩、煤层;石炭系黄龙群(C_2hn)灰岩、白云岩;泥盆系 D_{2+3} 石英砂岩、页岩、灰岩;志留系纱帽群(S_3sh)粉砂质页岩、页岩;志留系罗惹坪群(S_2lr)粉砂质页岩夹灰岩。推测隧道洞身位于志留系砂、页岩地层内,埋深约 1000 m。工程区内地层岩体从上而下主要为杂填土、灰岩、页岩、煤层、白云岩、石英砂岩、粉砂岩、页岩等。各地层主要岩土物性参数见表 1。

3 数据采集

3.1 仪器一致性实验

标定和一致性实验是确保仪器正常工作,及时发现仪器问题及故障的必要程序。本次外业测量过程中按规范要求,对所有采集设备进行了标定与一致性试验。需保证 80% 以上频点的测量结果均

表 1 测区主要地层岩土物性参数

Table 1 Rock and soil physical parameters of main strata in the survey area

岩土名称	电阻率 ρ_s ($\Omega \cdot m$)	纵波波速 V_p (km/s)
黏土	$10 \sim n \times 10^3$	1.0~2.0
灰岩	$n \times 10^2 \sim n \times 10^3$	4.5~5.5
白云岩	$n \times 10^2 \sim n \times 10^3$	4.5~5.5
泥质灰岩	$n \times 10 \sim n \times 10^2$	3.5~4.5
炭质岩层	$n \times 10 \sim n \times 10^2$	3.5~4.5
煤	$10^{-1} \sim n \times 10^1$	2.5~3.5
石英砂岩	$n \times 10^2 \sim 10^3$	3.5~4.5
页岩	$n \times 10 \sim 3 \times 10^2$	3.0~4.0
红砂岩	$n \times 10$	2.5~3.0

方相对误差不大于 5%,从而确保仪器工作正常,所有仪器采集的数据可以进行统一阵列处理。图 4 给出了 10 台接收机在孟家垭工区的部分功率谱一致性对比结果。从图 4 可以看出,设备场总均方相对误差、视电阻率总均方相对误差均满足规范要求。这表明仪器在孟家垭隧道工区具有良好的 consistency。

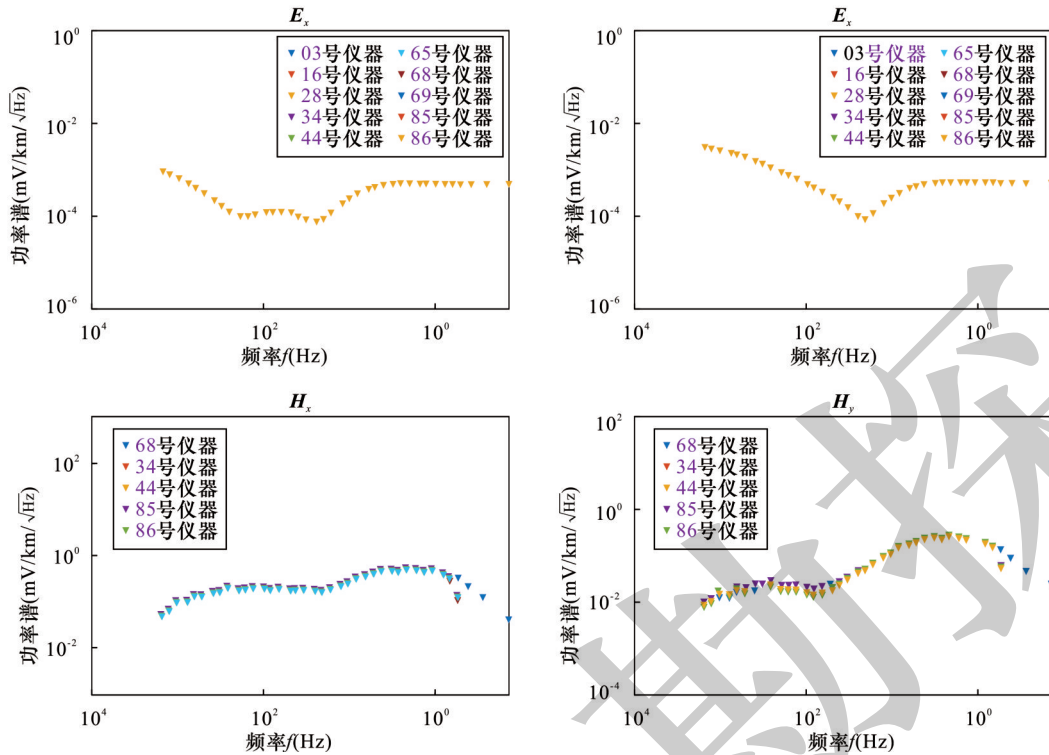


图4 孟家垭隧道工区一致性对比

Fig. 4 Consistency comparison of the Mengjiaya tunnel work area

3.2 采集时长对比试验

项目勘探目标深度为 1 km,最低观测频率为 0.1 Hz(即周期 10 s)即可满足探测需求。理论上,600 s 左右(最低频率信号的记录达 60 个周期)即可获得满足需要的电磁场信号。另一方面,采集时间越长,获得的有效数据越多,通过数据处理压制噪声的效果越好。但超过一定时长后,数据质量即可满足要求,无需无限提升采集时长。

为了兼顾野外数据采集的质量和效率,在典型测点进行了观测时长实验,分别对比了 39 频波采集 7200 s、3600 s、1800 s 的数据质量,图 5 结果表明,采集时间超过 1 h 后,曲线已非常光滑、连续,满足质量要求,进一步提高采集时长也很难继续提升数据质量。因此,经综合研判,本次野外数据采集 39 频波采集时长为 3600 s。

3.3 数据质量

检查点质量可以映射数据采集的质量,本工区的检查点以可控源检查点为例展示(图 6)。按照规范中的计算方法,对检查点误差进行了统计,统计结果显示本次测量检查质量符合规范和设计要求,所有测点的视电阻率相对误差均在 5% 以下,表明本次电磁测量数据质量是可靠的。

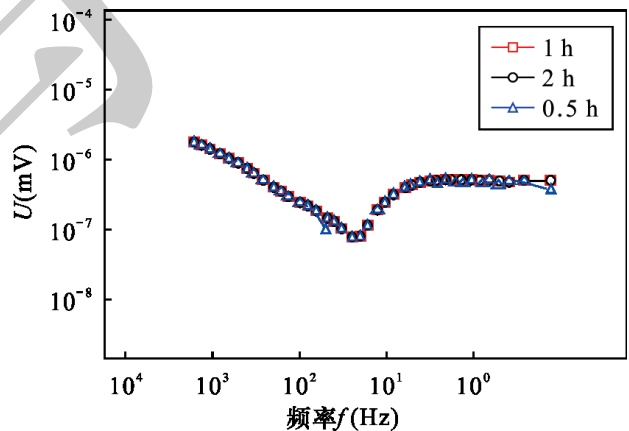


图5 典型测点观测时长对比试验

Fig. 5 Comparative test of observation time of typical measuring points

3.4 远参考点选取

远参考法是大地电磁法时间序列处理中行之有效的的方法之一,基本原理是在远离测区 20~50 km 的区域采集电磁信号,用来压制近场区特殊干扰的一种方法。理论和实践研究表明,远参考站本身的数据质量对参考处理的效果具有决定性影响。远参考站数据质量越高,参考处理的效果越好。因此,选择合理的远参考位置,获取尽可能高质量的远参考数据,对天然场源电磁法数据处理至关

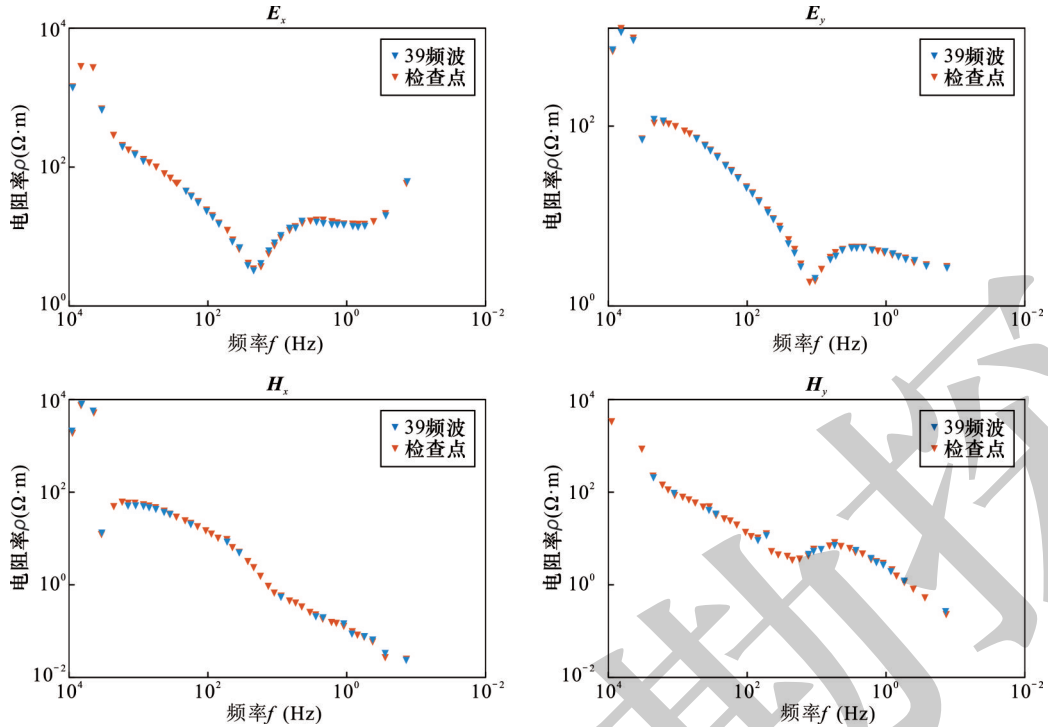


图 6 可控源典型检查点(E_x 、 E_y 、 H_x 、 H_y 分别为广域视电阻率四分量)

Fig. 6 Typical checkpoints of controllable sources (E_x , E_y , H_x and H_y are four components of wide-area apparent resistivity respectively)

重要。

远参考点位于稀疏的树林中,地势平坦,表层有泥土覆盖,周围无明显干扰。距离孟家娅隧道测点约 33 km,从远参考点的视电阻率、相位曲线可以看出,该试验点时间域波形平稳,无明显干扰信号;

试验点视电阻率曲线整体光滑、连续,无明显“飞点”,该结果符合大地电磁数据的基本规律,按相关规范可评价为 1 级点,数据质量可靠。图 7 为远参考点典型时间域波形,图 8 为远参考点视电阻率、相位曲线。

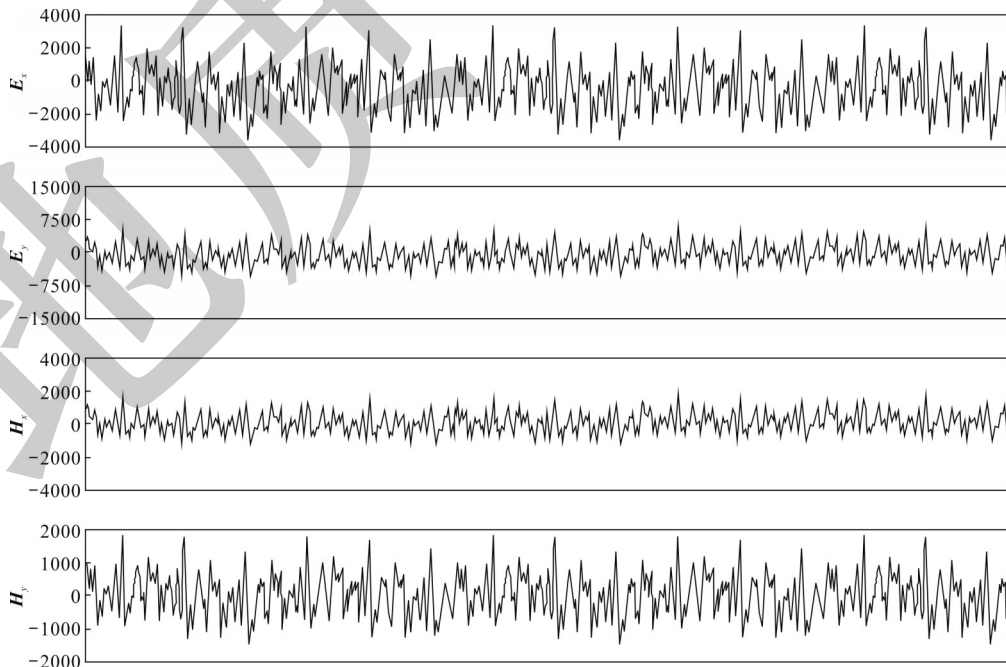


图 7 远参考点典型时间域波形

Fig. 7 Typical time-domain waveforms of remote reference points

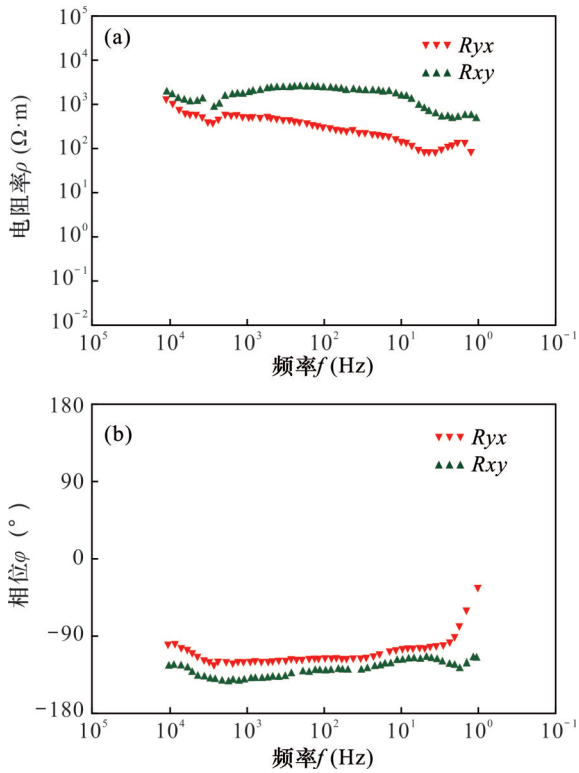


图8 远参考点视电阻率、相位曲线

Fig. 8 Apparent resistivity and phase curves of remote reference points

从以上观测结果可以看出,该试验点具有以下特征:

- (1) 试验点的时间域波形相对随机,无显著干扰信号;
- (2) 试验点功率谱密度曲线相对连续,各频段能量变化较为均匀;
- (3) 试验点视电阻率、相位曲线整体光滑、连续,数据质量高。

经过对比,该试验点满足远参考站选取原则和要求,可以为孟家垭隧道工区内的测点观测提供参考信息。

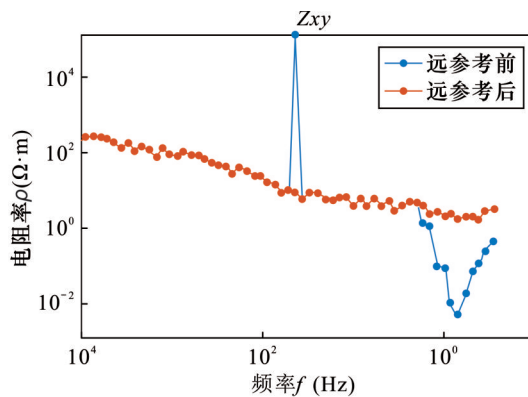
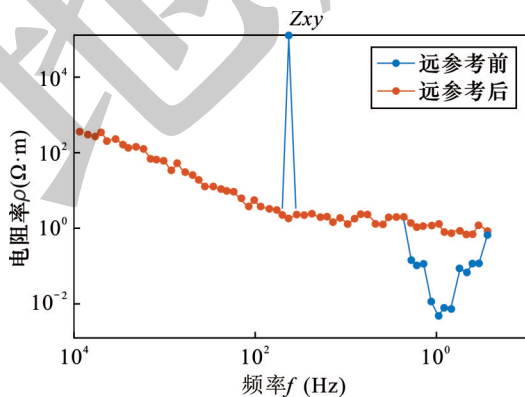


图10 隧道测点CK173+100远参考前后视电阻率对比

Fig. 10 Comparison of apparent resistivity before and after remote reference at tunnel measurement point CK173+100

4 数据处理与解释

4.1 抗干扰精细化处理

针对工作区典型的噪声源特征,项目组开发了一套全新的信号去噪技术方案及流程,大地电磁信号采用远参考处理和 Rhoplus 处理。人工场源数据采用聚类分析进行去噪。具体流程图见图9。所有数据均使用此流程处理,得到最终的反演数据。

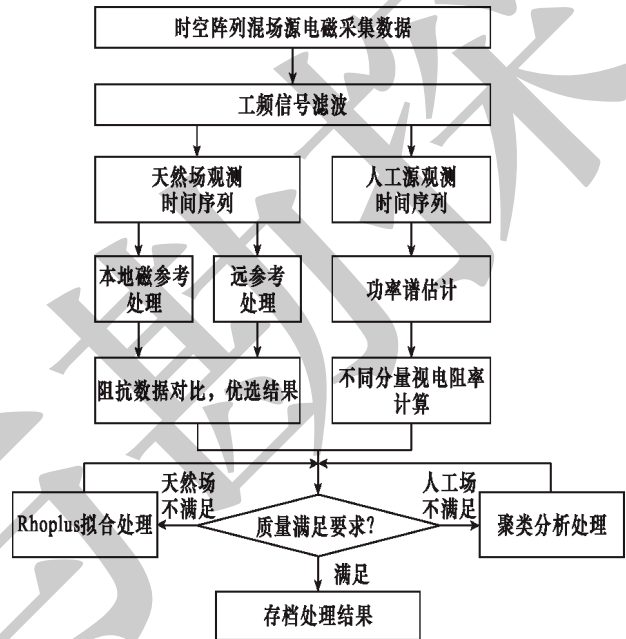


图9 抗干扰精细处理流程

Fig. 9 Anti-interference fine processing flow

以孟家垭隧道测点CK173+100为例,图10给出了远参考前后的大地电磁数据对比。未处理前,50 Hz附近有明显的工频干扰;剔除工频干扰后,再经过远参考处理后,在低频段的凹陷异常消失,1 Hz附近的数据发生了较大的变化,数据质量得到明显改善。

图 11 所示,经过 Rhoplus 处理后曲线更光滑、连续,低频点、死频带的“飞点”均被压制,并且对于工

频干扰也有压制作用,经过 Rhoplus 处理的数据符合电磁数据的一般规律,提高了数据的整体质量。

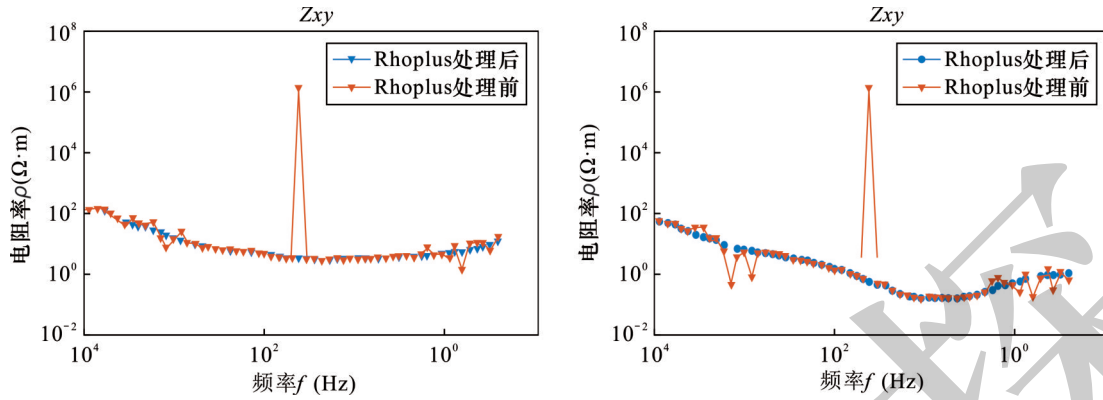


图 11 隧道测点 CK173+150 大地电磁数据 Rhoplus 处理前后对比

Fig. 11 Comparison of Rhoplus processed and unprocessed magnetotelluric data from tunnel measurement point CK173+150

如图 12 所示,人工场源数据总体质量良好,曲线形态较为平滑,可控源和广域视电阻率在低频段都有明显的数据“抬升”,相对于天然场视电阻率有

明显改善,可控源视电阻率低频段近乎 45° 上升段受近区场源效应影响。总体而言,广域 E_x 视电阻率数据更为可靠。

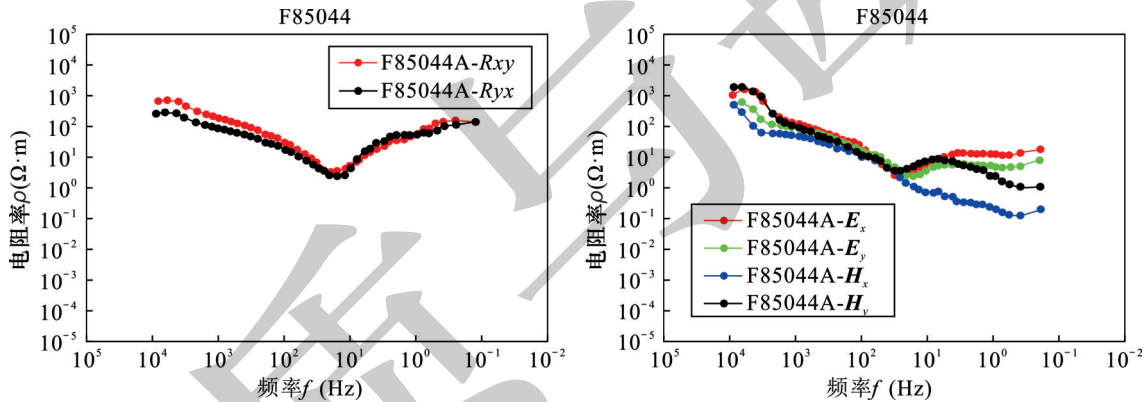


图 12 隧道测点 CK173+100 可控源视电阻率 (a) 和广域四通道视电阻率 (b)

Fig. 12 Apparent resistivity of controllable source (a) and wide area four-channel apparent resistivity (b) at tunnel measurement point CK173+100

从图 13 广域 E_x 视电阻率拟剖面图分析而言,测线纵向广域 E_x 的视电阻率信息表现出明显的分层特征,中高频视电阻率相对较高,低频视电阻率有明显的高电阻率抬升;横向上总体连续,部分区域具有分段特征。

4.2 数据反演

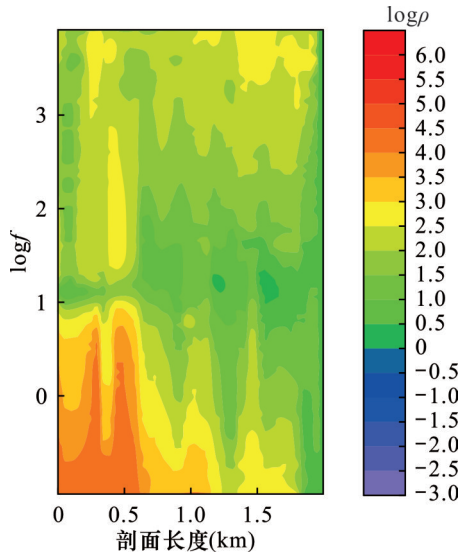
本次数据处理采用的反演方法主要是非线性共轭梯度法 (nonlinear conjugate gradient method, NLCG) (周汝峰等, 2016) 和拟二维横向约束反演方法 (Laterally constrains Inversion, 以下简称 LCI) (蔡晶等, 2014; 张继锋等, 2022)。

非线性共轭梯度法 (NLCG) 是一种常用的优化

算法,可以用于求解这种非线性优化问题。它的基本思想是利用梯度信息来确定搜索方向,使得每一次迭代都能够朝着最优解的方向前进,其通过非线性的方式计算得到的。非线性共轭梯度法在地球物理学反演中的应用具有很大的优势,它运算占用少内存,从而运算速度快,可以快速收敛。该方法为了减少反演多解性,将“正则化”思想引入到目标函数,在目标函数中添加模型项来约束模型的光滑度,模型项公式为:

$$\varphi(m) = \varphi_d + \tau\varphi_m \quad (4)$$

上式中, τ 为正则化参数,调节该参数来约束目标函数中数据项和模型项各自的权重;引入模型光

图13 广域 E_s 视电阻率拟剖面Fig. 13 Profile for wide area E_s apparent resistivity

滑度可以极大降低反演的多解性。

拟二维横向约束反演方法(LCI)也被广泛应用于电磁法测深反演中(Viezzoli et al., 2009)。Auken et al.(2005)提出了一种带横向约束的近似二

维反演方法,称为LCI方法,其主要思想是使用一个横向约束矩阵将所有测点的数据作为一个整体进行反演,相邻测点不同频点的电阻率差异小,稳定性强。LCI方法应用于电磁法勘探中,使用分段反演的方法,以存在先验信息点为分段点,将剖面分为几段单独反演,再利用横向约束将其连接,以此提高反演结果的可靠性。

LCI方法的目标函数可以设为:

$$\phi = \phi_d + \lambda(\phi_r + \phi_l) \quad (5)$$

其中, ϕ_d 为数据拟合项, ϕ_r 为光滑约束项, ϕ_l 为横向约束项, λ 为正则化因子,以平衡模型约束与数据拟合之间的比重。

根据钻孔信息建立了反映大概地层的初始模型(图14),利用两类数据反演手段,得到如图15所示的反演结果。图15a和图15b对比可知,CSAMT数据与广域电磁法数据的反演结果大体一致,都很好反映出了浅部低阻煤系地层的大致位置,由于反演本身的局限性,深部略有差异。天然场数据的LCI反演结果与NLCG反演结果均反映出了低阻层的大致位置。

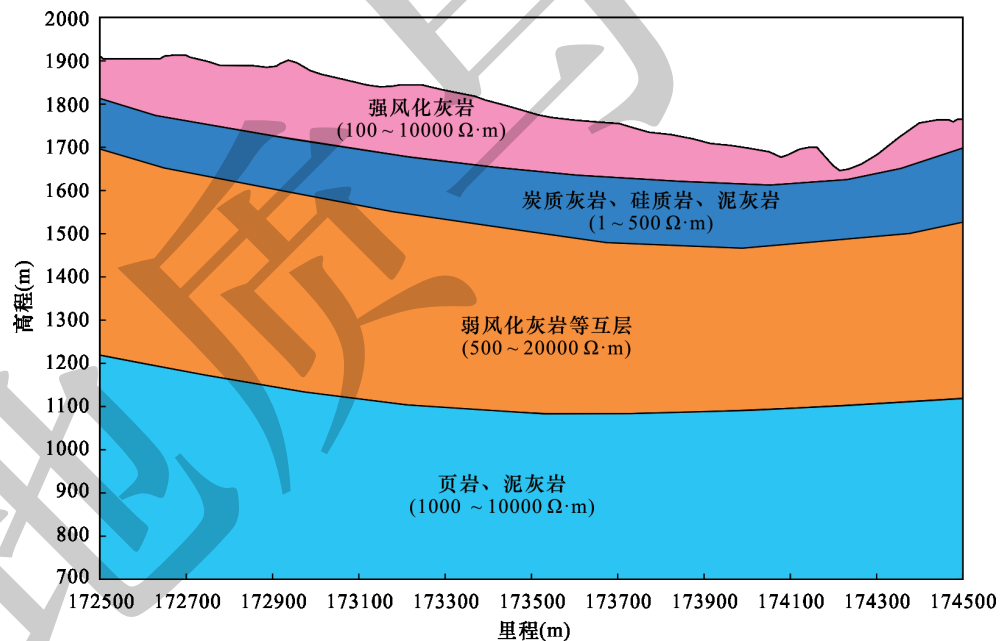


图14 孟家垭隧道测段地质模型及反演初始模型

Fig. 14 Geological model and initial inversion model of the Mengjiaya tunnel

对比远参前后数据的反演结果可知,远参后的反演结果分辨率明显提升,反演结果更加符合常规的地质认知,地质解释也更为合理,这种对比结果明显反映出远参考处理对于数据质量的重要性。对比可控源反演结果来说,天然场数据所受干扰更

多,抗干扰能力更弱,故而反演结果在横向上的连续性较差。

4.3 地质解译

CSAMT数据LCI反演结果与广域电磁法数据类似,但广域 E_s 数据反演成果细节信息更突出。如

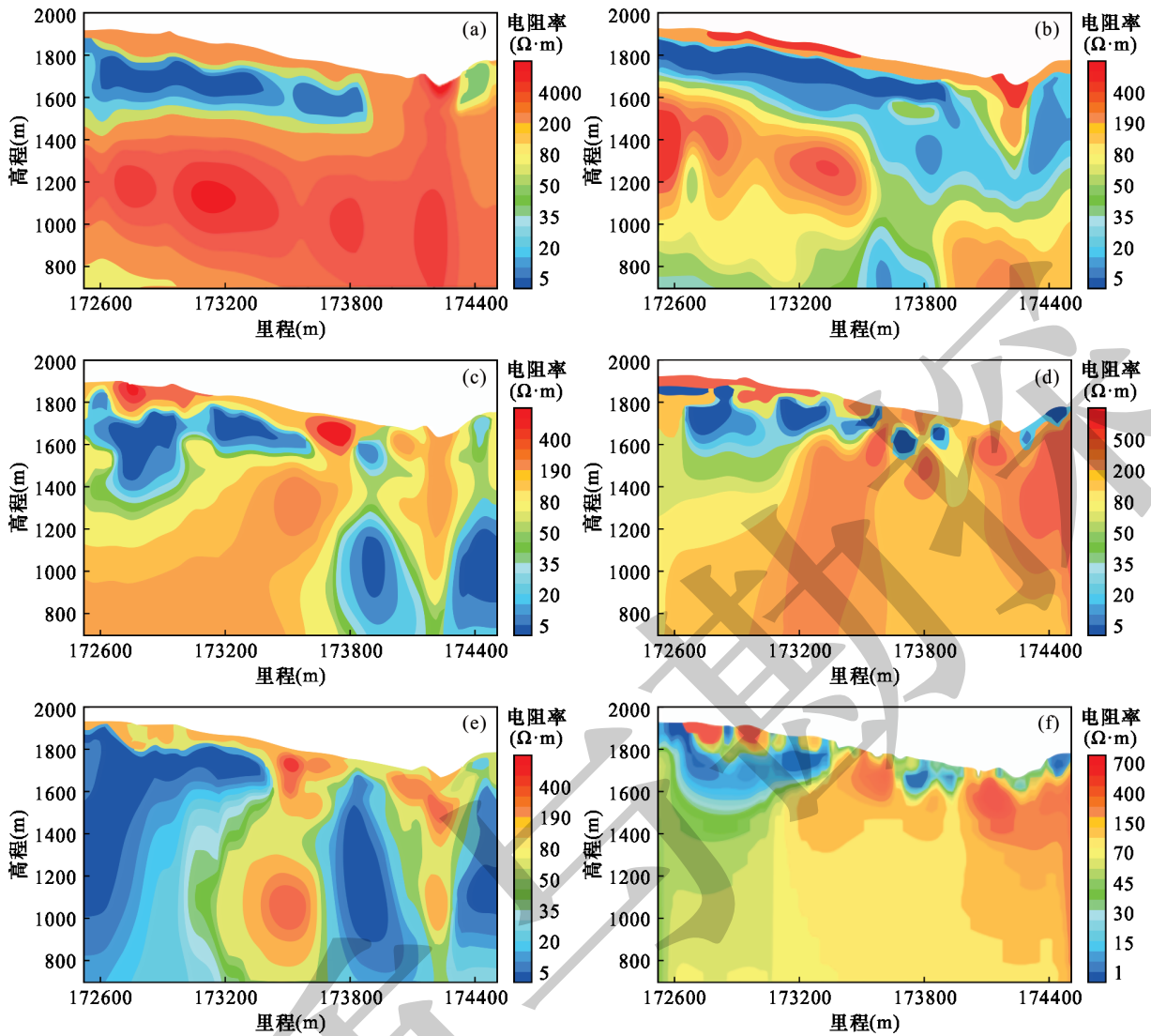


图 15 孟家垭隧道反演结果对比

Fig. 15 Comparison of inversion results of the Mengjiaya tunnel

a-CSAMT 数据 LCI 反演结果; b-广域 E_x 数据 LCI 反演结果; c-远参后天然场数据 LCI 反演结果; d-远参后天然场数据 NLGC 反演结果; e-远参前天然场数据 LCI 反演结果; f-远参前天然场数据 NLGC 反演结果

a-LCI inversion results for CSAMT data; b-LCI inversion results for wide-area E_x data; c-LCI inversion results of natural field data after remote reference; d-NLGC inversion results of natural field data after remote reference; e-LCI inversion results of natural field data before remote reference; f-NLGC inversion results of natural field data before remote reference

图 16 所示, 推测该测段主要岩性为灰岩、页岩、石英砂岩, 浅部存在二叠系煤层。背景视电阻率呈层状, 由浅及深表现为低-高阻特征。局部低阻异常的存在, 结合物探成果电性结构特征, 可辨识出 2 处溶蚀异常带、2 处裂隙发育区、1 处断层和 3 处地质界线。具体分析如下:

里程范围 CK173+525~CK173+600、CK174+350~CK174+500 存在明显低阻异常, 推测为岩溶发育区, 岩体较破碎; 里程范围 CK172+575~CK172+625、CK172+875~CK172+950 存在明显低阻凹陷异常, 推测为裂隙发育区, 岩体较破碎; 里程 CK172+

875 段隧道洞身围岩电阻率整体较低, 等值线呈低阻凹陷, 推测存在断层, 向大里程倾斜, 倾角 50° , 推测洞身围岩破碎。高程约 1500~1850 m 之间围岩电阻率整体较低, 推测为煤层, 含灰岩与炭质页岩; 高程约 950~1500 m 之间围岩电阻率整体较高, 推测为灰岩; 高程约 950 m 以下围岩电阻率整体较低, 推测为灰岩、粉砂质页岩、石英砂岩。

综上所述, 通过综合分析广域电磁法、CSAMT、远参考后天然场数据 LCI 和 NLGC 反演结果, 可以初步推断孟家垭隧道工区的浅部低阻煤系地层分布、主要岩性、地质结构和可能的地质问题。这些

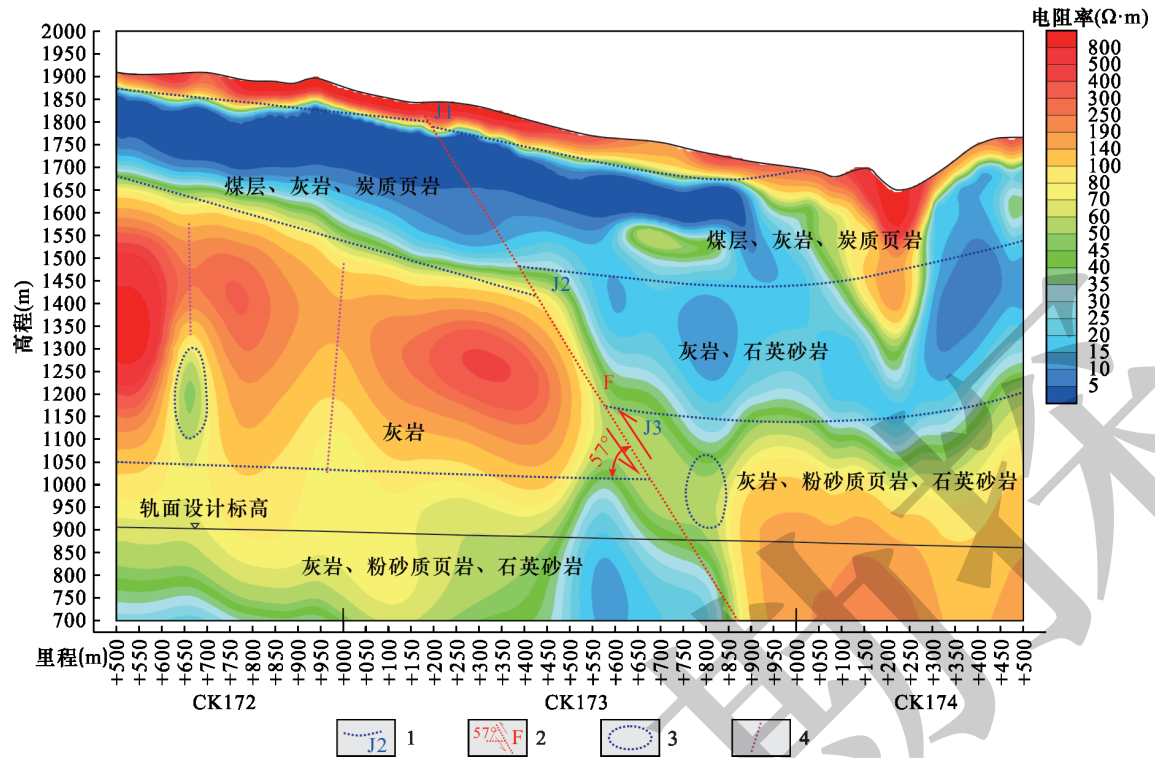


图 16 孟家垭隧道成果资料分析

Fig. 16 Data analysis of the Mengjiaya tunnel

1-推测岩层分界线;2-推测断层F倾角;3-推测岩溶异常;4-推测岩体裂隙发育

1-inferred lithological boundary; 2-inferred dip angle of fault F; 3- inferred karst anomaly; 4-inferred rock mass fracture

推断为隧道施工提供了重要的地质依据,有助于预防和应对可能的工程风险。

5 结论

(1)通过在宜涪铁路孟家垭隧道工区外业工作前进行了多种参数试验工作,使用抗干扰精细去噪算法进行数据处理工作,最大限度地保证了外业数据采集工作的有效性及可靠性。

(2)利用时空阵列混场源法观测系统进行数据采集工作,一次布置可以采集到广域电磁法、可控源大地电磁法、大地电磁法等多类电磁勘探响应,通过对不同类型数据的反演测试比对,为隧道工区地质解译提供了更加全面的资料。

(3)通过对比NLGC及LCI方法反演成果,多类反演资料相互补充验证。结果显示,广域 E_x LCI反演结果细节信息更突出,更贴合实际地质背景。最终判识出该深度隧道2处溶蚀异常带、2处裂隙发育区、1处断层和3处地质界线。说明该方法一定程度上解决了强电磁吸收地层的信号提取及干扰压制难题,为该特殊地层隧道安全施工提供了重要的地质参考资料。

[References]

- Auken E, Christiansen A V, Bo H J, Foged N, Srensen K I. 2005. Piecewise 1D laterally constrained inversion of resistivity data[J]. *Geophysical Prospecting*, 53(4): 497-506.
- Cai Jing, Qi Yanfu, Yin Changchun. 2014. Weighted lateral constraint inversion of frequency domain airborne electromagnetic data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(3): 953-960(in Chinese with English abstract).
- Chen Houyang, Li Diqian, Ling Fan, Wu Xiquan, Wei Zhifeng, Zhang Bin, Tian Hongjun, You Wenbing. 2022. Deep exploration of Zhuxi tungsten-copper mine by wide-area electromagnetic method[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 32(10): 3227-3243(in Chinese with English abstract).
- Gao Jinding, Jiang Qiyun, Pei Jing. 2019. Real-time implementation of FFT of digital signals in wide-area electromagnetic receivers[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(10): 3819-3826(in Chinese with English abstract).
- Gu Zhiwen, Li Yuegang, Yu changheng, Zou Zhongping, Hu Aiguo, Yin Xuebo, Wang Qiang, Ye Heng, Tan Zhangkun. 2024. Electrical structure identification of deep shale gas reservoir in complex structural area using wide field electromagnetic method[J]. *Applied Geophysics*, 21(3):564-578.
- He Jishan. 2010. Research on wide area electromagnetic sounding method[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 41(3): 1065-1072(in Chinese with English abstract).

- He Jishan. 2018. Combined application of wide-field electromagnetic method and flow field fitting method for high-resolution exploration: A case study of the Anjialing No. 1 coal mine [J]. *Engineering*, 4(5): 667-675.
- He Jishan. 2019. Theory and technology of high-precision wide-area electromagnetic exploration at great depth [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 29(9): 1809-1816 (in Chinese with English abstract).
- He Jishan. 2020. New progress in the theory and application of wide-area electromagnetic method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(5): 985-990 (in Chinese with English abstract).
- Li Diqian, Hu Yanfang. 2015. Comparison of wide area electromagnetic method and CSAMT detection effects in strong interference mining areas [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 39 (5): 967-972 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianxin, Li Chenglong, Guo Rongwen, Jiang Qiyun. 2024. Key technologies of pseudo-random wide area electromagnetic automatic acquisition system [J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 34 (9): 3178-3192 (in Chinese with English abstract).
- Peng Ronghua, Hu Xiangyun, Li Jianhui, Hu Zuzhi, Yang Hui. 2018. Finite volume three-dimensional forward calculation of wide-area electromagnetic method based on quadratic coupling potential [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61 (10): 4160-4170 (in Chinese with English abstract).
- Qi Chaohua. 2023. Application of wide-area electromagnetic method in hydrogeological exploration under thick low-resistance layer: A case study of a coal mine in Huainan, Anhui Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 47 (3): 700-706 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jingtian, Ren Zhengyong, Zhou Cong, Zhang Lincheng, Yuan Yuan, Xiao Xiao. 2015. Review of shallow frequency domain electromagnetic exploration methods [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58 (8): 2681-2705 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jingtian, Zhang Lincheng, Wang Xianying, Ren Zhengyong, Zhou Cong, Zhao Wenguang, Wu Mingan. 2018. AMT three-dimensional inversion and geological structure interpretation in the Fanshan-Jiangjunmiao area of the Lusong ore cluster [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61 (4): 1576-1587 (in Chinese with English abstract).
- Viezzoli A, Auken E, Munday T. 2009. Spatially constrained inversion for quasi 3D modeling of airborne electromagnetic data- An application for environmental assessment in the Lower Murray Region of South Australia [J]. *Exploration Geophysics*, 40(2): 173-183.
- Wang Dandan, Zhang Jiaodong, Liu Xufeng, Shao Changsheng, Zeng Qiunan, Zhang Wenhao, Liu Zhao. 2023. Application of wide-area electromagnetic method in Paleozoic oil and gas exploration in Jiuyan sag, western Henan [J]. *Geology and Exploration*, 59(2): 328-336 (in Chinese with English abstract).
- Wei Zhifeng, Chen Houyang, Wu Xiquan. 2020. Application of wide area electromagnetic method in geothermal exploration in a certain area of Yichun [J]. *Geophysical and Chemical Exploration*, 44 (5): 1009-1018 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Xiao, Li Yinhang, Tang Jingtian, Liu Jiren, Xu Jintong, Yang Zhi, Yang Liang, Zhou Cong. 2024. Application of wide area electromagnetic method in deep mineral exploration: A case study of Dongguashan copper mine in Tongling [J]. *Mineral Exploration*, 15 (9): 1593-1606 (in Chinese with English abstract).
- Xie Minghong. 2022. Experimental comparison between CSAMT and wide area electromagnetic method in the exploration of sandstone type uranium deposits in the low resistance area of the northern Songliao Basin [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration Calculation Techniques*, 44 (3): 344-352 (in Chinese with English abstract).
- Xu Guangchun. 2020. Application of wide area electromagnetic method in deep buried tunnel survey [J]. *Journal of Railway Engineering*, 37 (2): 5-16 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jintong, Tang Jingtian. 2022. Three-dimensional forward modeling of wide-area electromagnetic method based on spectral element method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(4): 1461-1471 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Bo, Li Diqian, Richard C B. 2017. Wide field electromagnetic method for shale gas exploration in southern China: A case study [J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 22(3): 279-289.
- Zhang Jifeng, Zhou Guangyu, Liu Zuiliang, Sun Naiquan, Zhang Fuxiang, Wang Zhongsheng. 2022. Lateral constrained inversion using E-Ex wide-area electromagnetic method [J]. *Journal of China Coal Society*, 47(7): 2698-2707 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lincheng, Zhou Cong, Tang Jingtian, Yuan Yuan, Jiang Qiyun, Li Guang, Huang Fenglin, Li Guangchang. 2022. Application of dual-component wide-area electromagnetic method in deep tunnel engineering investigation [J]. *Geology and Exploration*, 58(4): 857-864 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Cong, Tang Jingtian, Pang Cheng, Hu Shuanggui. 2019. Theoretical and simulation study of space-time array mixed-field source electromagnetic method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(10): 3827-3842 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Cong, Tang Jingtian, Yuanyuan, Lan Xueyi, Guo Dong. 2020. A spatiotemporal array electromagnetic data processing model [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 51(12): 3444-3453 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Rufeng, Wang Xuben, Qin Ce, Xu Yucong, Zhang Juntao, Wang Rui. 2016. Comprehensive application of magnetotelluric NLCG and OCCAM two-dimensional inversion [J]. *Progress in Geophysics*, 31(5): 2306-2312 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yiming, Wang Jinhai, Hu Xiaoying, He Zhanxiang, Xiong Bin. 2021. Three-dimensional finite element numerical simulation of wide-area electromagnetic method based on vector potential and scalar potential [J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 56(1): 181-189 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yunqi, Li Diqian, Liu Zuoliang, Zhang Xin. 2023. Wide area electromagnetic processing of CSAMT data in coal mines [J]. *Coalfield Geology and Exploration*, 51 (4): 133-142 (in Chinese with English abstract).

[附中文参考文献]

- 蔡晶, 齐彦福, 殷长春. 2014. 频率域航空电磁数据的加权横向约束反演[J]. 地球物理学报, 57(3): 953-960.
- 陈后扬, 李帝铨, 凌帆, 吴西全, 危志峰, 张斌, 田红军, 游文兵, 邹其峰, 刘献满. 2022. 朱溪钨铜矿的广域电磁法深部探测[J]. 中国有色金属学报, 32(10): 3227-3243.
- 高金定, 蒋奇云, 裴婧. 2019. 广域电磁法接收机数字信号FFT实时实现技术[J]. 地球物理学报, 62(10): 3819-3826.
- 何继善. 2010. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 41(3): 1065-1072.
- 何继善. 2019. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术[J]. 中国有色金属学报, 29(9): 1809-1816.
- 何继善. 2020. 广域电磁法理论及应用研究的新进展[J]. 物探与化探, 44(5): 985-990.
- 胡斌辉. 2023. 电磁法在深部找矿中的应用现状及展望[J]. 世界有色金属, (18): 232-234.
- 李帝铨, 胡艳芳. 2015. 强干扰矿区中广域电磁法与CSAMT探测效果对比[J]. 物探与化探, 39(5): 967-972.
- 柳建新, 李成龙, 郭荣文, 蒋奇云. 2024. 伪随机广域电磁法自动采集系统关键技术[J]. 中国有色金属学报, 34(9): 3178-3192.
- 彭荣华, 胡祥云, 李建慧, 胡祖志, 杨辉. 2018. 等. 基于二次耦合势的广域电磁法有限体积三维正演计算[J]. 地球物理学报, 61(10): 4160-4170.
- 齐朝华. 2023. 广域电磁法在巨厚低阻层下水文地质勘探中的应用——以安徽淮南某煤矿为例[J]. 物探与化探, 47(3): 700-706.
- 汤井田, 任政勇, 周聪, 张林成, 原源, 肖晓. 2015. 浅部频率域电磁勘探方法综述[J]. 地球物理学报, 58(8): 2681-2705.
- 汤井田, 张林成, 王显莹, 任政勇, 周聪, 赵文广, 吴明安. 2018. 庐枞矿集区矾山—将军庙地区AMT三维反演及地质结构解释[J]. 地球物理学报, 61(4): 1576-1587.
- 王丹丹, 张交东, 刘旭锋, 邵昌盛, 曾秋楠, 张文浩, 刘钊. 2023. 广域电磁法在豫西地区济源凹陷古生界油气勘探中的应用[J]. 地质与勘探, 59(2): 328-336.
- 危志峰, 陈后扬, 吴西全. 2020. 广域电磁法在宜春某地地热勘查中的应用[J]. 物探与化探, 44(5): 1009-1018.
- 肖晓, 李银航, 汤井田, 刘寄仁, 徐锦通, 杨智, 杨亮, 周聪. 2024. 广域电磁法在深部矿产勘查中的应用——以铜陵冬瓜山铜矿为例[J]. 矿产勘查, 15(9): 1593-1606.
- 谢明宏. 2022. CSAMT与广域电磁法在松辽盆地北部低阻区砂岩型铀矿勘查中的试验对比[J]. 物探化探计算技术, 44(3): 344-352.
- 徐锦通, 汤井田. 2022. 基于谱元法的广域电磁法三维正演模拟[J]. 地球物理学报, 65(4): 1461-1471.
- 许广春. 2020. 广域电磁法在深埋隧道勘察中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 37(2): 5-16.
- 张继锋, 周光裕, 刘最亮, 孙乃泉, 张富翔, 王中圣. 2022. E-Ex广域电磁法横向约束反演[J]. 煤炭学报, 47(7): 2698-2707.
- 张林成, 周聪, 汤井田, 原源, 蒋奇云, 李广, 黄凤林, 李广场. 2022. 双分量广域电磁法在深埋隧洞工程勘察中的应用[J]. 地质与勘探, 58(4): 857-864.
- 周聪, 汤井田, 庞成, 胡双贵. 2019. 时空阵列混场源电磁法理论及模拟研究[J]. 地球物理学报, 62(10): 3827-3842.
- 周聪, 汤井田, 原源, 兰学毅, 郭冬. 2020. 一种时空阵列电磁数据处理模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 51(12): 3444-3453.
- 周汝峰, 王绪本, 秦策, 徐玉聪, 张君涛, 王瑞. 2016. 大地电磁NLCC与OCCAM二维反演的综合利用[J]. 地球物理学进展, 31(5): 2306-2312.
- 周印明, 王金海, 胡晓颖, 何展翔, 熊彬. 2021. 基于矢量位和标量位的广域电磁法三维有限元数值模拟[J]. 石油地球物理勘探, 56(1): 181-189.
- 朱云起, 李帝铨, 刘最亮, 张新. 2023. 煤矿CSAMT数据的广域电磁法处理[J]. 煤田地质与勘探, 51(4): 133-142.

Application of Space-Time Array Hybrid Source Electromagnetic Method in Deep-Buried Tunnel Exploration

YANG Lei

(China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063)

Abstract: The geological survey of Mengjiaya deep-buried tunnel of Yifu railway was carried out by using the space-time array hybrid source electromagnetic method. This method integrates the advantages of natural and artificial field source electromagnetic exploration, and uses a unified theoretical model and observation equipment. It can collect three types of exploration data: remote reference magnetotelluric, controlled source magnetotelluric and wide-area magnetotelluric data in one arrangement, which will greatly improve field work efficiency and exploration accuracy. The anti-interference algorithm designed for the strong interference area was used for fine denoising, and finally the nonlinear conjugate gradient method (NLCC) and the lateral constrained quasi-two-dimensional (LCI) method were used for inversion. The inversion results were consistent with the geological data. At the same time, combined with the existing geological data, it is inferred that the shallow strata of the Mengjiaya tunnel are layered, low-resistivity Permian Qixia Formation limestone intercalated with coal strata. The deep strata are limestone, shale and quartz sandstone. There is a fault in the middle of the survey section (surface mileage CK172+875 section), and the surrounding rock mass is relatively broken. The exploration results are of great significance in guiding the next step of safe construction of the tunnel.

Key words: space-time array, tunnel, electromagnetic method, signal de-noising, NLCC inversion, LCI inversion