

TEM 虚拟波场三维连续速度分析 及其在隧道超前预报中的应用

范涛

(中国煤炭科工集团 西安研究院, 陕西 西安 710077)

摘要: 针对当前隧道超前地质预报工作中不能对于掌子面前方的水患进行有效预报的情况, 笔者提出一种基于浮动薄板理论的隧道掌子面前方不良地质体的瞬变电磁波场变换延拓成像的超前预报有效方法, 引入比较合适的三维的虚拟速度连续分析方法, 解决了偏移成像中对实测资料的速度提取问题。给出了瞬变电磁方法在隧道中适用的工作方法。对理论模型和应用实例都进行了分析计算, 得到的结果与实际情况相符合, 表明该速度分析方法是切实有效的。

关键词: 瞬变电磁法; 隧道超前预报; 波场变换; 偏移成像; 速度分析

中图分类号: P631.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2011)02-0243-05

中国为多山的国家, 交通的大发展需要修建很多隧道。隧道建设中会遇到较为复杂的地质环境条件。国内外主要的预报手段有: 地质方法^[1-2], 物探方法, 水平钻探法等^[3]。物探方法主要有 TSP^[4-8]、TRT^[9]、TST 技术^[10]、地震负视速度法、地质雷达法^[10]等。受到所研究的特定地质目标体物性的限制, 这些方法无法进行掌子面前方含水地质体的探测。在施工中探测掌子面前方水患, 是待攻克难题。

瞬变电磁法作为一种电磁感应方法, 它具有对低阻充水破碎带反映灵敏的特点, 并且通过波场变换以及延拓成像的手段, 可以清晰有效地对电性界面进行成像, 这给瞬变电磁法勘探应用于隧道超前地质预报展示了美好的发展前景。

目前瞬变电磁法波场变换和偏移成像研究方面比较新的研究成果是 Zhdanov 等人^[11-12]提出的逆时偏移成像研究和陈本池等人^[13]作出的瞬变电磁场拟波动方程偏移成像研究。但是所发表成果仅限于孤立和多个电性异常体的成像结果, 几乎未涉及到对复杂电性界面的成像, 虚拟波场的速度分析问题仍然没有解决, 没有看到令人满意的成像结果。

1 基本理论

从地球物理角度看, 隧道掌子面探测不同于地面瞬变电磁法。因此隧道中的探测方法不能照搬地

面方法, 必须采用全空间条件下的理论和方法。目前在瞬变电磁法中, 等效导电平面法是建立在全空间理论上。另外, 视纵向电导对低阻导电薄层反应灵敏, 有利于探测低阻充水断层。因此, 笔者将等效导电平面法及其发展出的波场变换、以连续速度分析为基础的延拓成像技术引入到隧道的超前预报探测中。

1.1 等效导电平面法基本原理^[14]

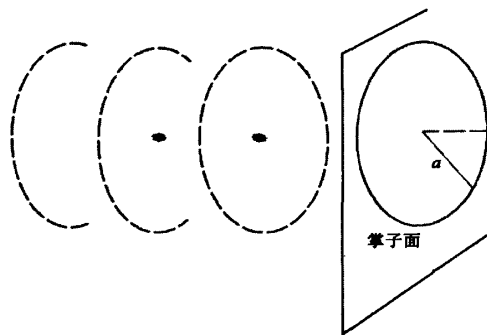


图1 隧道掌子面导电平面示意

设在贴近隧道掌子面处有一通以阶跃电流的直立圆形回线(图1), 并在 $t=0$ 时刻断开电源

$$I(t) = \begin{cases} I, & t < 0; \\ 0, & t \geq 0. \end{cases}$$

当电源断开时, 由于电磁感应, 导电板 a 上产生涡流, 为求出涡流产生的电磁场, 可以在 a 前方置一

收稿日期: 2010-03-28

基金项目: 国家自然科学基金雅砻江水电开发联合基金项目(50539080)

虚源代替导电平板中的涡流,因此只需求出虚源在空间任一点产生的电磁场即可。

该理论建立在全空间的条件下,因此配合向后屏蔽的探头可以不考虑隧道侧方与后方的影响。

1.2 瞬变电磁场的波场变换原理

从麦克斯韦方程出发,可以建立以大回线源为基础的时域瞬变响应扩散场 $H_m(t)$ 与虚拟波场 $U(\tau)$ 的对应关系^[15-16]

$$H_m(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi t^3}} \int_0^\infty \tau e^{-\tau^2/4t} U(\tau) d\tau。$$

1.3 瞬变电磁场拟波动方程三维曲面延拓成像

虚拟波场偏移处理是获取记录的逆过程,设自激自收的上行波为 $G(x, y, z_0, t)$,它是地下反射界面作为源点发射的波场 $g(x, y, z, t)$ 在地面 $z = z_0$ 上的值,波动方程的克希霍夫积分解最终可写为^[15-16]

$$g(x, y, z, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Q_0}} \left\{ \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial n} - \frac{1}{vr} \frac{\partial r}{\partial n} \frac{\partial}{\partial t} \right\} G(\xi, \eta, \zeta_0, t) + \frac{F}{r_0},$$

其中, $G(\xi, \eta, \zeta_0, t + \frac{r}{v})$ 取 $t + \frac{r}{v}$, $F = \mu_0 \delta(t - \sigma^*)$, $Q = Q_0 + Q_1$ 为闭合曲面,如图 2 所示, Q_0 为地面, Q_1 为无限大半圆面。根据该公式,通过边界单元法可求出各延拓值。

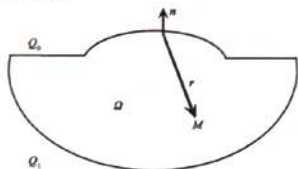


图2 区域与边界示意

1.4 TEM 虚拟波场连续速度分析

虚拟波场的建立,使得拟地震延拓成像方法可以应用于瞬变电磁场中,而要应用拟地震方法,最重要的一点是要给出准确的虚拟波场波速^[17]。

由视纵向电导 $S(H)$ 与电导值 σ_1 的关系^[8]

$$S(H) = \sum_{i=1}^N \sigma_i h_i$$

可以导出

$$\sigma_i = \frac{S_i - S_{i-1}}{H_i - H_{i-1}}。$$

之后,根据公式

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \sigma}}$$

可计算出虚拟速度值 v 。

从实际测量的数据中得到的虚拟速度值 v ,因为实际测量的数据量不可能很大,所以计算得到的速度值在空间分布上也会表现得较为稀少,这样就会给进一步的波场延拓成像工作带来不便。为了解决虚拟速度数据不够丰富的问题,在三维空间使用近点线性插值计算的办法(图3),可以使该数据量在保证正确的基础上得以扩大。

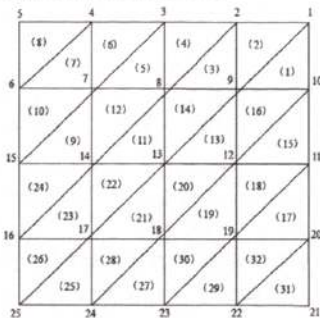


图3 近点线性插值计算网格划分及循环顺序

2 理论模型计算与实际资料处理

2.1 理论模型计算

在地表布置面积工作如图4所示,共布置11条剖面,每条剖面布置11个测点,取发射回线边长为200 m,时窗采样宽度为 $32.5 \mu s \sim 8.7 ms$,对全部121个测点进行正演计算,对所得电磁响应进行波场变换,得到各测点的虚拟波场值,以数据文件的形式输入计算机,计算地电断面上的波场延拓值。

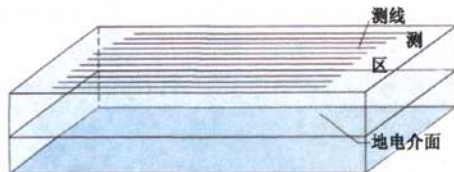


图4 计算模型示意

给出一个瞬变电磁中心回线装置下的三层A型地电模型($\rho_1 = 50 \Omega \cdot m$, $\rho_2 = 500 \Omega \cdot m$, $\rho_3 = 5000 \Omega \cdot m$, $h_1 = 100 m$, $h_2 = 200 m$)。在这个模型条件下,对每个测点进行正演计算,得到电磁响应值,之后进行波场变换,为了清楚起见,只对变换后的波峰进行显示(图5)。

从图中可以看出,随着虚拟时间 τ 的增大,虚拟波场出现了两个正的峰值变化,这两个峰值就标识出了这个A型地电模型的两个地下分界面的位置。

利用每个测点的电磁响应值,采用1.4一节中的方法计算出一套初始的虚拟速度值,再进行两次三维空间插值计算,完成速度分析。由图6可以看

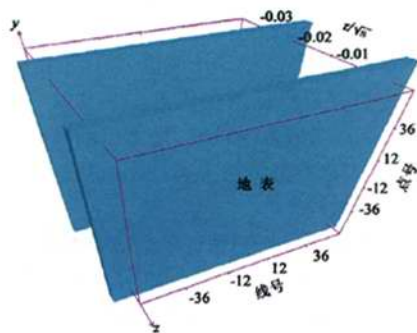


图5 A型地电模型波场变换结果

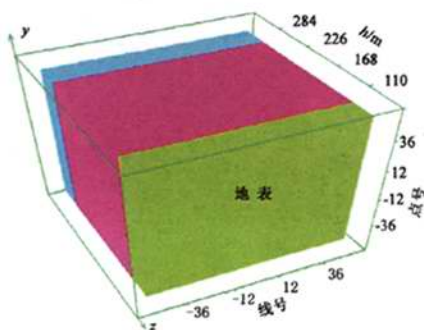


图6 A型地电模型波场速度分析结果

到,虚拟速度的分布明显呈现三层,与模型的电阻率值分布是对应的,这是因为虚拟波场的速度值取决于地下电导的分布,因此,虚拟速度表现出与电阻率一致的三层分布规律。

最后,将三维边界元技术用于克希于霍夫积分计算中,利用速度分析结果实现三维延拓成像,得到图7所示的结果,2个峰值明显表示出了A型地电模型的2个地下分界面的位置。这两个位置所对应的深度也恰好在100~300 m的附近,与模型的参数基本吻合。

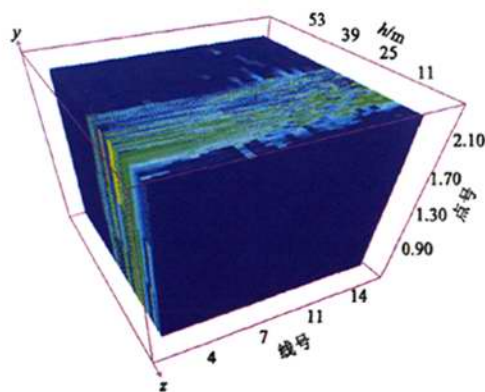


图8 实测资料虚拟波场速度分析结果

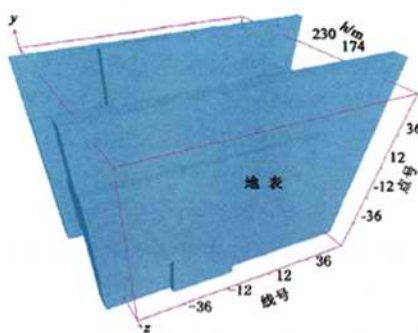


图7 A型地电模型波场延拓成像结果

2.2 实际资料处理

锦屏水电枢纽工程位于四川省冕宁、盐源、木里县境内,由一级、二级两个梯级水电站组成,为满足锦屏一、二级水电站对外交通及锦屏二级水电站长引水隧道地质勘探、科研试验、施工和运行管理的需要,拟修建一条从大水沟至景峰桥的锦屏水电枢纽辅助洞。辅助洞位于拟建的锦屏二级水电站引水隧洞线的南侧,全长约17.5 km,一般埋深为1500~2 000 m,最大埋深达2 375 m,由2条平行的单车道隧道组成,中心距为35 m,纵断面呈“人”字坡。实测资料就来源于该辅助洞7-2号横通道。

首先根据实测的衰减电压值计算出一套初始的虚拟速度值,然后进行2次三维空间插值计算,完成速度分析(图8)。可以看到,虚拟速度的分布大致呈现3层,分别在10、30 m左右的地方出现大的数值变化,与图9对比可以看到,其规律和电阻率分布关系是相对应的。

对采集到的实际数据作波场变换(图10a),其后进行延拓成像,得到图10b所示的结果。图10a上清晰地显示出了视电阻率等值线图(图9)上的2

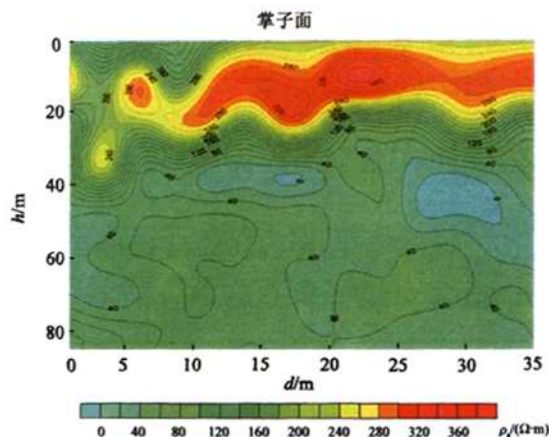


图9 中心测线上的视电阻率等值线断面

个界面:图 10a 中 $0.07\sqrt{s}$ 处的峰值对应图 9 中约 10m 处低阻向高阻过渡的界面,其数值较小,说明此界面相对比较次要;同理,图 10a 上的另一个峰值对应图 9 约 34 m 处出现的高阻向低阻过渡界面,该峰值主要出现在虚拟时间 $0.26\sqrt{s}$ 和 $0.35\sqrt{s}$ 附近,明确反映出第二个界面是不平直的,与图 9 高度吻合。

通过同样的处理方法得到图 10b,图中同样显示出 2 个明显的峰值:一个在 10 m 处附近,与图 10a 中 $0.09\sqrt{s}$ 处的界面相对应,另一个则散乱分布

在 26 ~ 38 m 范围内,与图 10a 中 $0.26\sqrt{s}$ 、 $0.35\sqrt{s}$ 范围内的界面相对应。这两个峰值表示该实测地点前方的 2 个岩性分界面的位置与图 9 非常一致。图 10b 中第一个峰值范围较窄,是由于前期波的强度比较大,后期随着波的衰减第二个峰值的界面分辨能力降低所造成。

与已知的该实际测量面的前方资料对比,可以确定,经过一系列波场变换、速度分析以及延拓成像后得到的结果与实际出水界面吻合得很好。

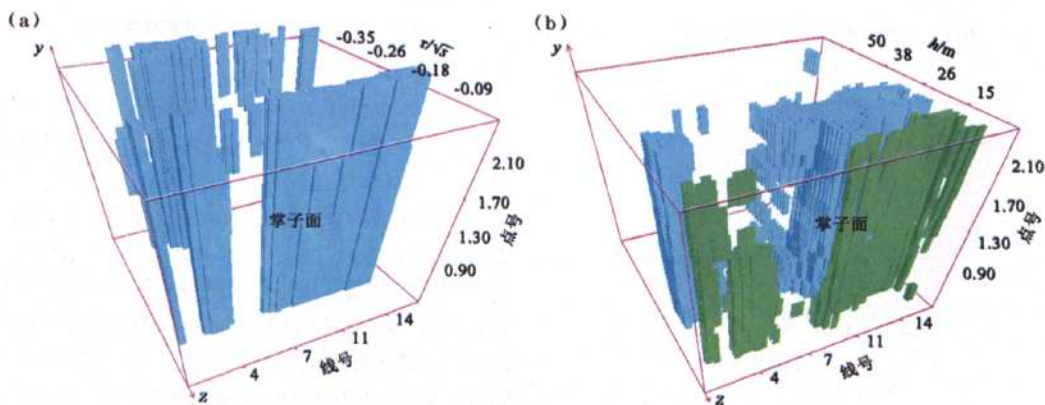


图 10 实测资料波场变换(a)及延拓成像(b)三维结果

3 结论

笔者将适合于隧道地电情况的波场变换后经连续速度分析的延拓成像方法初步用于瞬变电磁隧道超前地质预报中,取得了良好的效果。理论模型计算与实际资料处理表明该方法对电性界面比较敏感,三维连续速度分析技术使得延拓成像对掌子面前方含水构造反映直观清晰。但速度分析的方法仍显粗糙,对实际数据的处理精度还不够,进一步的研究目标应是将速度分析方法精细化,使之更好地把偏移与反演有机结合起来,达到正式应用于实际的隧道超前预报工作中。

感谢导师长安大学李貅教授的精心指导,感谢煤炭科学研究总院西安研究院各位同事的无私帮助!

参考文献:

- [1] 刘志刚. 隧道隧洞施工地质技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 2001.
- [2] 中国科学院地质研究所. 军都山隧道快速掘进超前地质预报[M]. 北京:中国铁道出版社, 1990.
- [3] 刘广志. 钻探掘进从工程技术走向科学[J]. 岩土工程界, 2001, 4(12): 17-20.
- [4] Dickmann T, Sandeter B K. Drive2 concurrent tunnel seismic pre-

- diction (TSP): result from Vereina north tunnel/mega2 project and Priora pilot gallery[J]. Felsbau, 1996, 14(6): 406-411.
- [5] 李忠. 新保纳隧道地质超前预报中 TSP202 探测系统中搜索角研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2002, 21(8): 1249-1252.
- [6] 薛建, 曾昭发, 王者江, 等. 隧道掘进中掌子面前方岩石结构的超前预报[J]. 长春科技大学学报, 2002, 30(1): 87-90.
- [7] Maxwell S C, Yong R P. Seismic imaging of rock mass response to excavation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1996, 33(7): 713-724.
- [8] 戴前伟, 何刚, 冯德山. TSP2203 在隧道超前预报中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 460-464.
- [9] Richard Otto, Edward Button, Helf ried Bretterbner, et al. The application of TRT true reflection tomography at the underworld tunnel[J]. Geophysics, 2002, 2: 51-56.
- [10] 赵永贵. 隧道地质超前预报研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 460-464.
- [11] Zhdanov M S, Li W D. 2D finite-difference time domain electromagnetic migration[C]//67th SEG EM2, 1, 1997, 370-373.
- [12] Zhdanov M S, Portniaguine O. Time-domain electro-magnetic migration in the solution of inverse problems[J]. Geophys J Int, 1997, 131: 293-309.
- [13] 陈本池, 李金铭, 周凤桐. 瞬变电磁场拟波动方程偏移成像[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(5): 546-554.
- [14] 薛国强, 李貅. 瞬变电磁隧道超前预报成像技术[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 894-900.
- [15] 李貅. 隧道施工掌子面前方地质超前预报瞬变电磁法研究[R]. 西安:陕西省交通厅, 2006.

- [16] 李貅. 瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓成像研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- [17] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002, 85-92.

A 3D CONTINUOUS VELOCITY ANALYSIS OF TEM FICTITIOUS WAVE-FIELD AND ITS APPLICATION TO TUNNEL ADVANCED PREDICTION

FAN Tao

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China)

Abstract: In view of the fact that tunnel advanced geological prediction cannot effectively predict the flood in front of the tunnel face, this paper proposes a new method, i. e., transient electromagnetic wave-field transform continuation and imaging, which is based on the theory of floating plate and has proved to be very effective in predicting the unfavorable geological body in front of the tunnel face. With this desirable 3-D virtual velocity continuous analysis method, the problems of velocity extraction of observed data in migration imaging can be well solved. This paper puts forward the suitable working method of transient electromagnetism for the application in tunnel. In addition, the theoretical models and application examples were analyzed and calculated, and the results obtained coincide with the actual situation, showing that this velocity analysis method is feasible and effective.

Key words: transient electromagnetic method; tunnel prediction; wave field transform; migration imaging; velocity analysis

作者简介: 范涛(1983-), 男, 汉族, 陕西安康人, 助理工程师, 硕士, 主要从事地球物理瞬变电磁方法研究, 公开发表学术论文数篇。

上接 242 页

THE EFFECTS OF THE NUMBER OF GEOPHONES IN ARRAY ON NOISE ATTENUATION

WEI Ji-dong

(Geophysical Corporation, Shengli Oil Administration Bureau, Dongying 262400, China)

Abstract: The geophone array in field data acquisition can suppress both the regular interference noise and the scattering interference noise. The regular interference noise is mainly suppressed by directional effect, while the scattering interference noise is mainly suppressed by statistical effect. Relevant theories hold that, when other factors remain fixed, the more geophones are used, the better results are obtained. It seems therefore that more geophones should be used to improve the seismic data quality; nevertheless, the authors' studies have proved that, if the number of geophones in a liner array whose sensitivities are suitably weighted is more than " $\sqrt{3}$ " (where $\sqrt{3}$ = effective-array-length / minimum-wavelength of regular interference noise), no obvious advantage can be seen by using more geophones. On such a basis, by calculating rose diagrams, the suitable number of geophones in an area-geophone-array or smearing can be pointed out, which is more economical. On the other hand, for the purpose of attenuating environmental noise, the more geophones are used in an array, the better result can be obtained under the condition that the effective array length is fixed. However, when the number of geophones reaches a certain level, no obvious improvement can be made. In addition, the authors' study also shows that the number of geophones has no definite relationship with the couple resonance noise. If the number of geophones in array is to be fixed, the geophone pattern should be taken into account. If the geophone pattern is unsuitable, adding geophones will not be beneficial to the noise attenuation. If the geophone sensitivity is not reasonably distributed, it cannot be helpful to the noise attenuation.

Key words: number of geophones in array; capability for suppressing noises; coherent noise; environmental noise; geophone inside noise; couple resonance noise

作者简介: 魏继东(1974-), 男, 山东寿光人, 2007年毕业于中国海洋大学海洋地球物理专业, 获博士学位, 目前在胜利油田博士后工作站物探公司分站从事地震采集方法研究工作, 公开发表学术论文数篇。