

# 自适应瞬变电磁波场反变换方法及其在隧道超前预报中的应用

王 刚<sup>1,2</sup>, 郑 新<sup>1</sup>, 张书博<sup>1</sup>, 范克睿<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:**瞬变电磁法(TEM)是一种感知地下含水层, 圈定隧道含水层范围的有效方法。从瞬变电磁信号中准确提取虚拟波场是刻画含水层形态边界的关键。为提取准确可靠的虚拟波场, 需要解决核函数动态范围大、波场反变换方程高度病态和实现自适应求解等问题。本研究基于精细积分方法, 结合缩短波场反变换数值积分区间的经验公式, 提出优化的自适应波场反变换方法。结果表明, 在对均匀半空间的数值模型计算中, 对正演数据的拟合误差低于 0.5%; 在对 H 型地电断面的数值模型计算中, 提取的虚拟波场具有合理准确的运动学特征; 在对全空间 HKH 型模型的数值计算中, 提取的虚拟波场突出不同深度的含水层边界, 在整个观测时间段拟合程度高; 对于隧道实测数据, 虚拟反射波在富水区边界和电性界面附近响应明显, 拟合误差低于 5%, 虚拟波场记录圈定的含水层与视电阻率分布规律相互印证且与钻井试验吻合, 证实了该方法的有效性和可靠性。

**关键词:**瞬变电磁法; 波场反变换; 自适应; 超前预报

中图分类号:U452.1

文献标志码:A

## A self-adaptive inverse wavefield of transient electromagnetic method and its application in advanced forecast in tunnels

WANG Gang<sup>1,2</sup>, ZHENG Xin<sup>1,2</sup>, ZHANG Shubo<sup>1,2</sup>, FAN Kerui<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The transient electromagnetic method (TEM) is an effective method to detect and highlight water-bearing zones of tunnels. Accurate extraction of the pseudo-wavefield from the TEM signals is the key to characterizing the structure and boundary of water-bearing zones. To provide accurate and reliable pseudo-wavefield, the pseudo-wavefield extraction should tackle the large dynamic range of the kernel function, ill-posed inverse transform function, and self-adaptive solving. In this paper, an optimized self-adaptive method based on the precise integral method was proposed, which combined with the empirical formula to shorten the solving interval of the inverse wavefield transform. In the calculations of the half-space numerical model, the error of fitting with the forward data was less than 0.5%. In the calculations of the type-H geoelectric model, the extracted pseudo-wavefield had reasonable kinematical characteristics. In the calculations of the whole-space type-HKH model, the extracted

收稿日期:2022-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52079077);山东省自然科学基金青年基金项目(ZR2022QE242)

作者简介:王 刚(1976—),男,山东阳谷人,教授,博士生导师,主要从事岩石力学与工程、超前地质预报等方面的研究。

E-mail:wanggang1110@gmail.com

范克睿(1992—),男,山东泰安人,讲师,博士,主要从事瞬变电磁超前地质预报等方面的研究。

E-mail:fankerui@sudust.edu.cn

pseudo-wavefield highlighted the boundary of the water-bearing zones of different depths and fitted well over the whole observation period. For the field data measured in a constructing tunnel, the pseudo reflective waves had apparent responses around the water rich boundary and the electrical interfaces, with a fitting error of less than 5%. The water-bearing zones highlighted by the pseudo-wavefield and the distribution laws of the apparent resistivity corroborated each other and were consistent with the results of the drilling test, verifying the effectiveness and reliability of the proposed method.

**Key words:** transient electromagnetic method; inverse wavefield transform; self-adaptive; advanced forecast

突水是威胁隧道安全高效施工的最严重危害之一,为了防止工程地质灾害的发生,有必要在开挖前应用超前地质探测技术刻画定位隧道含水区<sup>[1-2]</sup>。瞬变电磁法(transient electromagnetic method, TEM)是隧道超前地质勘探的有效方法之一<sup>[3]</sup>。与其他电法和电磁法探测一样,TEM 探测的地质目标是电导率相对较高的含水区。然而由于瞬变电磁场扩散性质的限制,对含水区的边界和结构信息刻画模糊<sup>[4]</sup>。为了利用瞬变电磁数据对含水区进行准确成像,应在瞬变电磁数据处理中引入波场反射机制,以便根据波场的传播时间确定含水区的边界<sup>[5]</sup>。因此,从瞬变电磁数据中提取“波场”信号是增强瞬变电磁成像的关键之一。

通过波场反变换这一数学转换方式,可以从扩散方程形式的瞬变电磁信号中提取波动方程控制的虚拟波场<sup>[6]</sup>。波场反变换是通过求解第一类 Fredholm 型积分方程<sup>[7]</sup>实现的,需要使用精确的求解方法克服其病态性与不适定性。针对这一问题,自 Lee 等<sup>[8]</sup>首次对时间域电磁信号提取虚拟波场以来,如何准确高效地进行波场反变换方程的求解成为重要的研究方向。Gershenson<sup>[9]</sup>使用直接时域变换、反褶积和拉氏正弦变换提取虚拟波场,并对比了三种方法的优劣。近些年,李貅等<sup>[10]</sup>将正则化算法应用于波场反变换中,取得较好的效果。戚志鹏等<sup>[11]</sup>采用预条件正则化共轭梯度法降低了波场反变换方程的不适定性,实现了从扩散方程到波动方程的全时域虚拟波场反变换算法。智庆全<sup>[12]</sup>提出一种扫时波场变换算法,进一步提高了波场反变换的稳定性。Li 等<sup>[13]</sup>提出一种相关叠加法,与奇异值分解法和预处理正则化共轭梯度法相比计算结果更加准确和稳定。鲁凯亮等<sup>[14]</sup>将求解动力学计算问题的精细积分方法引入波场反变换方程的求解问题中,降低了求解病态波场反变换方程的难度。虽然以上方法都取得了长足的发展,但是由于波场反变换的病态性,求解精度严重失真的问题依然存在。在前人的研究中,对于波场反变换方程求解的迭代,往往需要手动调停或固定次数来控制迭代的终止,过分依赖经验选择且存在迭代不足或者迭代过度的情况,缺乏客观的判定标准。因此,考虑到快速准确提取虚拟波场的工程需求与工程实测数据的复杂多变,亟需进一步优化波场反变换方程的求解方法。

针对以上问题,本研究基于精细积分方法,利用优化的经验公式限制波场反变换数值积分区间,通过设置合理的迭代终止条件,提出一种自适应瞬变电磁波场反变换方法。通过三类模型的数值模拟,对不同电性结构地层的虚拟波场提取特征与本研究方法的优势进行分析。最后,通过进一步分析从隧道实测数据中提取的虚拟波场特征与数据拟合质量,验证了该方法的有效性与结果的可靠性。

## 1 自适应波场反变换方法

### 1.1 波场变换方法原理

在均匀各向同性且无磁性的导电大地中,瞬变电磁场满足扩散方程。时域电磁场  $D(r, t)$  与满足波动方程的虚拟波场  $U(r, q)$  之间具有如下波场变换关系<sup>[5,15]</sup>:

$$D(r, t) = \int_0^{+\infty} U(r, q) \frac{q\sqrt{\alpha}}{2\sqrt{\pi t^3}} \exp(-\frac{\alpha q^2}{4t}) dq \quad (1)$$

核函数表达式为:

$$K(q, t) = \frac{q\sqrt{\alpha}}{2\sqrt{\pi t^3}} \exp(-\frac{\alpha q^2}{4t}) \quad (2)$$

其中:  $r$  是空间坐标,  $t$  是时间变量,  $q$  是虚拟波场传播对应的虚拟时间变量,  $\alpha$  是伸缩参数。由式(2)表示的核函数决定波场变换的性质与效果。从表达式中可以看出,自变量  $q$ 、 $t$  和  $\alpha$  均出现在自然常数  $e$  的指数项

中,从而使三者中任意一个变化都会对积分核函数取值产生剧烈影响,这是造成波场反变换问题不适宜性的根本原因<sup>[13]</sup>。为压制波场反变换方程的病态程度,同时保证波场反变换的计算精度与效率,在求解核函数时需要合理选取积分区间 $[q_{\min}, q_{\max}]$ ,缩短变量 $q$ 的取值范围。基于瞬变电磁信号的时间范围 $[t_{\min}, t_{\max}]$ 和 $\alpha$ 值,使用以下经验公式确定虚拟时间 $q$ 的取值范围<sup>[15]</sup>。

$$\begin{cases} \lg q_{\min} = -\frac{\lg \alpha}{2} + \beta, \\ \lg q_{\max} = \frac{\lg t_{\max}}{2} - \frac{\lg \alpha}{2} + \gamma. \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\beta, \gamma$ 是多项式拟合系数。

在确定虚拟时间范围后,可将式(1)离散化并写成下面的矩阵形式:

$$\mathbf{D} = \mathbf{K}\mathbf{U}. \quad (4)$$

其中: $\mathbf{D}$ 是 $M$ 维列向量,对应瞬变电磁响应接收信号 $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ ;  $\mathbf{U}$ 是 $N$ 维列向量,对应虚拟波场 $\mathbf{U}(\mathbf{r}, q)$ ;  $\mathbf{K}$ 对应式(2)的核函数表达式,是 $M \times N$ 维的核函数矩阵,核函数矩阵中第 $m$ 行第 $n$ 列的元素可表示为:

$$\mathbf{K}(q_m, t_n) = \int_{q_{m-1}}^{q_m} \frac{q\sqrt{\alpha}}{\sqrt{4\pi t_n^3}} \exp\left(-\frac{\alpha q^2}{4t_n}\right) dq = -\frac{1}{\sqrt{\pi \alpha t_n}} \exp\left(-\frac{\alpha q^2}{4t_n}\right) \Big|_{q_{m-1}}^{q_m}. \quad (5)$$

对式(1)和式(2)进行数值离散后,即可通过式(4)和式(5)进行波场反变换。

### 1.2 求解波场反变换方程的精细积分法

由于核函数矩阵 $\mathbf{K}$ 是一个病态矩阵,且其条件数随阶数的增加而急剧增大,本研究参考鲁凯亮等<sup>[14]</sup>的成果,使用精细积分法(precise integration method, PIM)<sup>[16]</sup>降低了求解波场反变换方程的难度,进行虚拟波场提取,并将式(4)表示为:

$$\mathbf{K}^T \mathbf{D} = \mathbf{K}^T \mathbf{K} \mathbf{U}. \quad (6)$$

PIM通过将高度病态的线性方程组的求解转换成对积分的求解,压制了波场反变换的不适宜性。对于式(6)的病态线性方程组, $\mathbf{K}^T \mathbf{K}$ 是 $N$ 阶系数矩阵, $\mathbf{K}^T \mathbf{D}$ 是 $N$ 维实向量。该方程组的解可以写成 $\mathbf{U} = \int_0^\infty \exp(-\mathbf{K}^T \mathbf{K} \tau) d\tau \cdot \mathbf{K}^T \mathbf{D}$ ,其中积分项 $\int_0^\infty \exp(-\mathbf{K}^T \mathbf{K} \tau) d\tau$ 的积分步长为 $\xi$ 。该病态线性方程组的解可以通过迭代表达式获得:

$$\begin{cases} \mathbf{U}^{(k)} = \prod_{i=0}^{k-1} (\mathbf{I} + \exp(-2^{k-i-1} \xi \mathbf{K}^T \mathbf{K})) \mathbf{F}(\xi) \mathbf{K}^T \mathbf{D}, \\ \mathbf{U}^{(k+1)} = (\mathbf{I} + \exp(-2^k \xi \mathbf{K}^T \mathbf{K})) \mathbf{U}^{(k)}, k=0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (7)$$

其中: $k$ 为迭代次数, $\mathbf{F}(\xi) = \int_0^\xi \exp(-\mathbf{K}^T \mathbf{K} \tau) d\tau$ ,  $\mathbf{U}^{(0)} = \mathbf{F}(\xi) \cdot \mathbf{K}^T \mathbf{D}$ ,  $\xi = 10^{-25}$ ,  $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

### 1.3 自适应的迭代终止条件

理论上,随着迭代次数的增加,计算解会逐渐趋于精确解。但在使用PIM对系数矩阵呈病态的线性方程组进行求解时,迭代过程中迭代残差先是随着迭代次数的增加而迅速降低,但当迭代达到一定次数时,由于矩阵自乘导致的误差积累,迭代残差反而随着迭代次数的增加而迅速上升直至溢出<sup>[17]</sup>。因此在使用PIM求解波场反变换方程时,应通过添加合理的迭代终止条件进行适当次数的迭代。

在本研究中,为了确保计算精度和效率,在式(6)的求解中添加迭代终止条件<sup>[14]</sup>:  $err^{(k)} / err^{(k-1)} \geq 1$ ,其中 $err^{(k)}$ 代表迭代第 $k$ 次的计算误差,计算误差由第 $k$ 次迭代后的计算解与理论解之间的均方根误差(root mean square error, RMSE)来表示:

$$err^{(k)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{(k)} - \hat{y}_i^{(k)})^2}{N}}. \quad (8)$$

其中: $y_i^{(k)}$ 代表式(6)第 $k$ 次迭代后的左端项 $\mathbf{K}^T \mathbf{D}$ 中的第 $i$ 个元素, $\hat{y}_i^{(k)}$ 代表式(6)第 $k$ 次迭代后的右端项 $\mathbf{K}^T \mathbf{K} \mathbf{U}$ 中的第 $i$ 个元素。

综上,本研究提出的自适应精细积分波场反变换算法流程如图1所示。

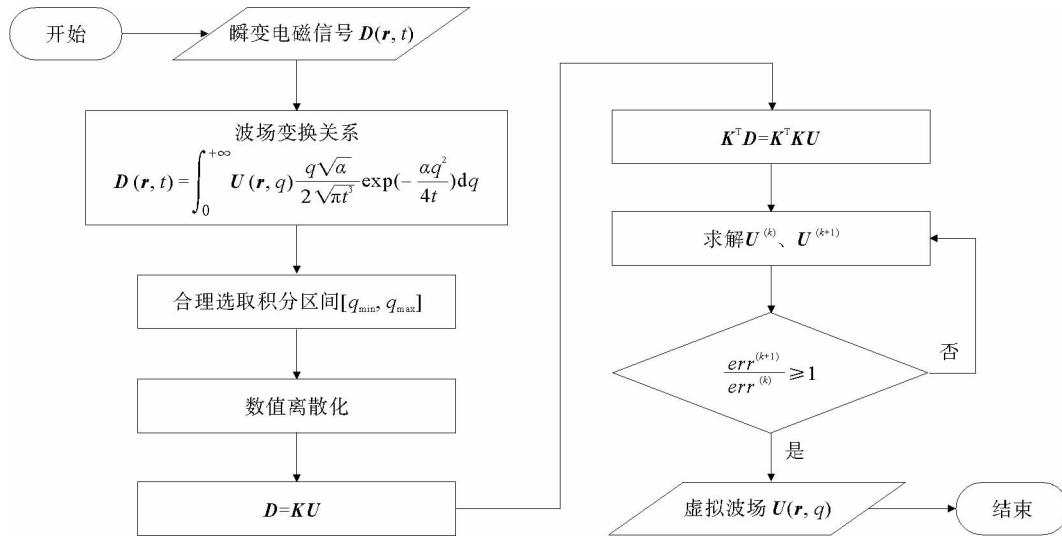


图1 自适应精细积分波场反变换算法流程

Fig. 1 Flow chart of the self-adaptive inverse wavefield transform method

## 2 方法精度与效果分析

### 2.1 方法精度

以均匀半空间模型为例对回线源瞬变电磁响应信号进行正演模拟,通过水平电偶极子叠加方法获取回线源瞬变电磁场垂直分量的响应,并采用平滑正则化方法与自适应精细积分方法分别求解波场反变换方程。

回线源瞬变电磁观测系统与模型如图2所示,在地面设置线圈边长为600 m的回线源,采用负阶跃波作为激发波形,发射电流强度为20 A,瞬变电磁响应信号的输出时间范围为 $10^{-7} \text{ s} < t < 10^{-1} \text{ s}$ 。在回线源中垂线上以10 m的间隔均匀设置121个接收点,其起始和末尾偏移距坐标(接收点和回线源线圈中心间的距离)分别为(0, -200, 0)和(0, 1 000, 0)。均匀半空间地电断面模型中地下电性界面电阻率为 $200 \Omega \cdot \text{m}$ 。以磁感应强度的垂直分量 $B_z(t)$ 为例,令 $\alpha=1, \beta=-3.350, \gamma=0.663$  [15],采用平滑正则化和自适应精细积分方法进行波场反变换方程的求解,对应偏移距为0、200、400和600 m的接收点的正演响应与虚拟波场提取后的拟合数据如图3和图4所示,其中拟合数据是将解向量 $U$ 代入式(4)中得到的数值解 $D$ 。

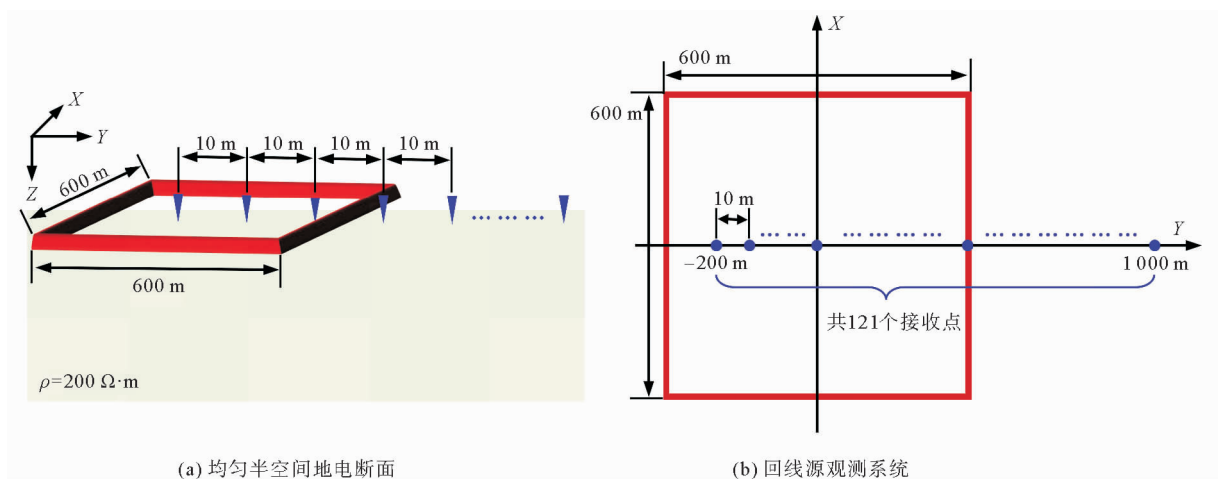
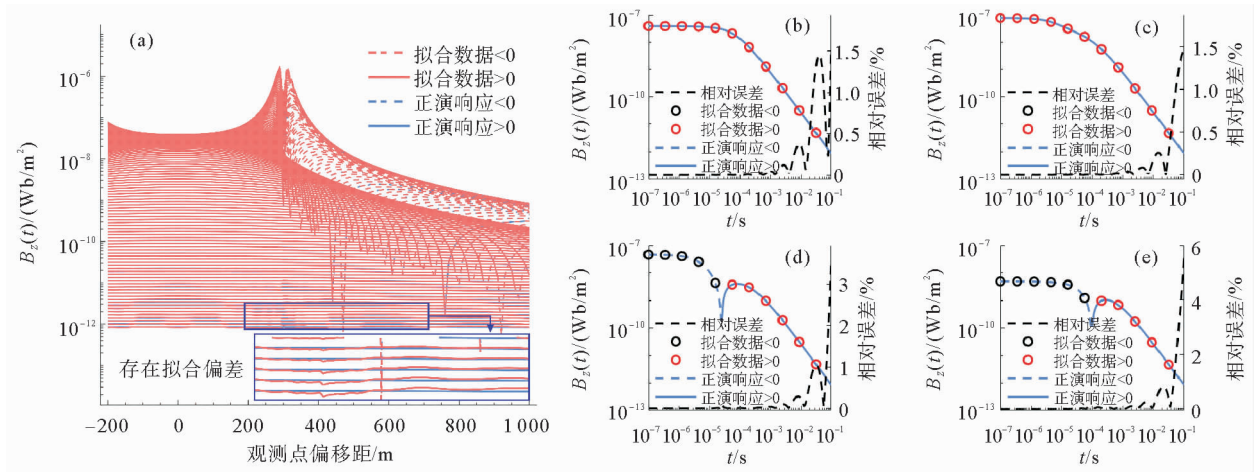


图2 均匀半空间地电断面模型与回线源观测系统示意图

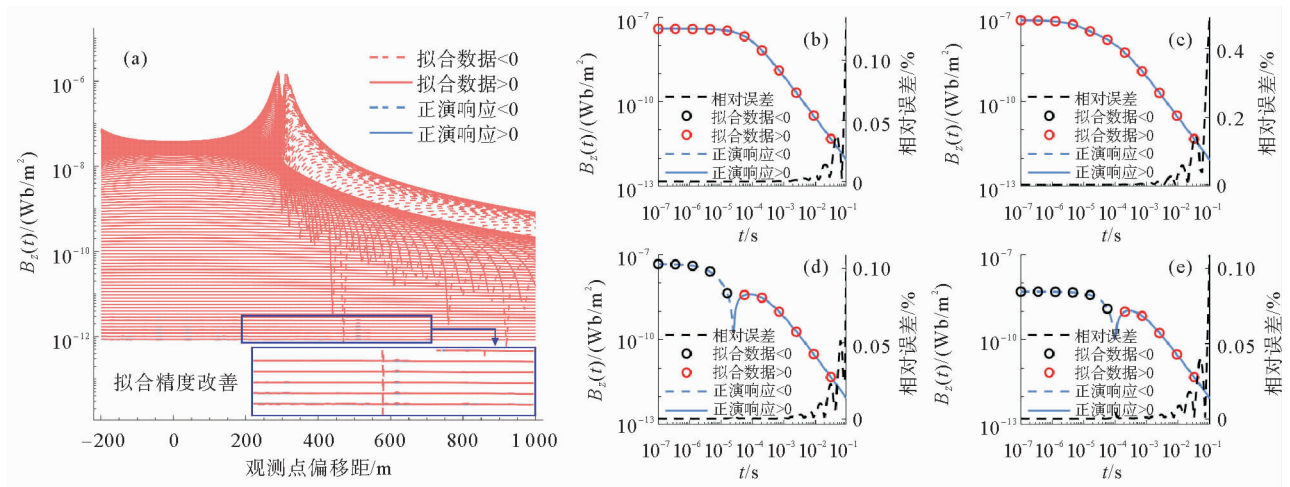
Fig. 2 Half-space model and TEM observation system with loop-source



(a) 正演数据和拟合数据的多测道图;(b) 偏移距为 0;(c) 偏移距 200 m;(d) 偏移距 400 m;(e) 偏移距 600 m

图 3 采用平滑正则化方法提取虚拟波场的数据拟合情况

Fig. 3 Data fitting of pseudo-wavefield extraction using the regularization method



(a) 正演数据和拟合数据的多测道图;(b) 偏移距为 0;(c) 偏移距 200 m;(d) 偏移距 400 m;(e) 偏移距 600 m

图 4 采用自适应精细积分方法提取虚拟波场的数据拟合情况

Fig. 4 Data fitting of pseudo-wavefield extraction using the self-adaptive precise integration method

由图 3 和图 4 可以看出,回线内响应信号在衰减过程中始终为正,而线圈外响应信号在衰减过程中出现变号,且瞬变电磁响应信号和虚拟波场记录的变号时间均随测点偏移距的增大而延迟。对比图 3(a)和图 4(a)可以看出,采用自适应精细积分方法得到的拟合数据对正演数据的吻合程度较采用正则化方法略有提升;由图 3(b)~3(e)和图 4(b)~4(e)可以看出,早期数据的相对误差远小于晚期数据的相对误差;对比图 3(b)~3(e)和图 4(b)~4(e)可以看出,在对应不同接收点上,尽管采用平滑正则化方法计算的相对误差均低于 6%,满足精度要求,但采用自适应精细积分方法计算的相对误差整体更低,均在 0.5% 以下,对虚拟波场的提取精度比平滑正则化方法提高了 3~50 倍,说明采用自适应精细积分方法求解波场反变换方程问题的精度更具优势。

## 2.2 电性界面的分辨效果

以三层典型层状地电断面模型(H 型,含有一个含水层)为例对回线源瞬变电磁响应信号进行正演模拟,并采用平滑正则化与自适应精细积分方法分别求解波场反变换方程。采用与 2.1 节相同的观测系统。地层参数设置为:第一层地层厚度为 100 m、电阻率为 200  $\Omega \cdot \text{m}$ ;第二层(含水层)介质厚度为 50 m、电阻率

为  $50 \Omega \cdot \text{m}$ ; 第三层介质的电阻率为  $500 \Omega \cdot \text{m}$ 。以磁感应强度的垂直分量  $B_z(t)$  为例, 令  $\alpha = 1$ ,  $\beta = -3.350$ ,  $\gamma = 0.663$  [15], 采用平滑正则化和自适应精细积分方法提取得到的虚拟波场记录如图 5(a) 和 5(b) 所示。虚拟波场记录采用地震记录的画法, 且为突出虚拟波场记录中的反射波, 对提取后的虚拟波场数据先后进行道均衡和自动增益控制 (automatic gain control, AGC) 处理。再利用虚拟波速和地层的平均虚拟波速计算对应模型中直达波和反射波到时 (以下简称计算到时), 并用虚线展示在虚拟波场记录中。其中, 层间虚拟波速由式 (9) [18-19] 给出:

$$\begin{cases} v_{av} = \sum_{j=1}^l h_j / \sum_{j=1}^l \frac{h_j}{v_j}, \\ v_j = \sqrt{\frac{\alpha \rho_j}{\mu_0}}. \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $l$  代表地层模型层数,  $v_{av}$  代表地层层间虚拟波速,  $h_j$  代表第  $j$  层地层厚度,  $v_j$  代表第  $j$  层虚拟波速,  $\rho_j$  代表第  $j$  层地层介质电阻率,  $\mu_0$  是真空中磁导率。

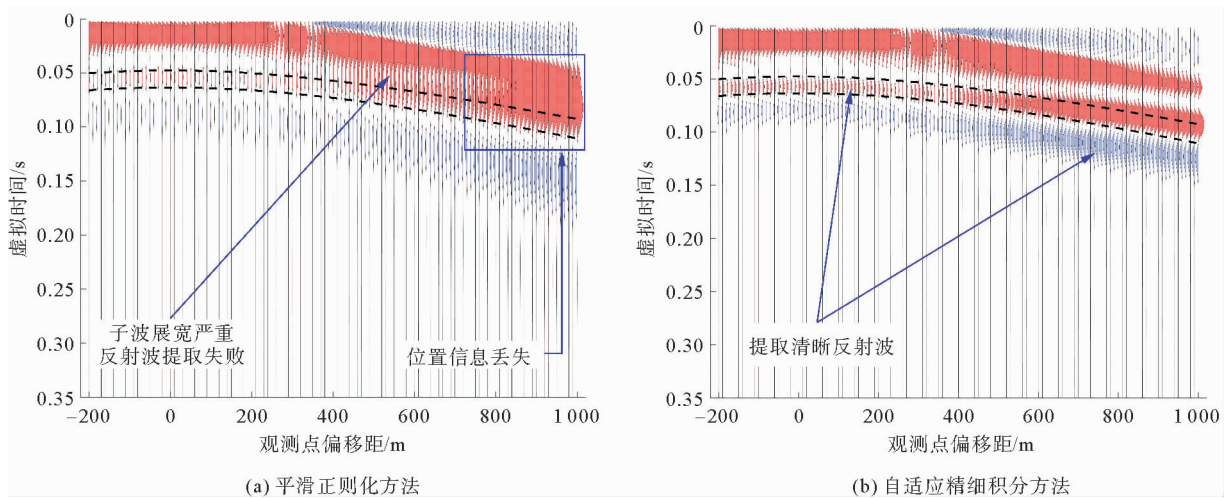


图 5 从 H 型模型的  $B_z(t)$  响应分量中提取的虚拟波场记录

Fig. 5 Pseudo-wavefield extracted from the  $B_z(t)$  component of the type-H model response

由图 5 可以看出, 观测点距离回线中心点的偏移距越大, 虚拟波场到时越晚, 这符合场在传播过程中大地低通滤波效应对信号的影响, 说明了虚拟波场提取结果的合理性。在图 5(a)、5(b) 中均能看到第一列红色波, 其特征与单炮地震记录中的直达波类似, 故在本研究中将其称为“虚拟直达波”。在图 5(b) 中, 采用精细积分方法提取的虚拟波场记录中可清晰地观察到四列正负极性相反的波, 其中红色的第三列波对应地下含水层的上界面、蓝色的第四列波对应地下含水层的下界面, 具有合理准确的运动学特征。而采用平滑正则化方法提取的虚拟波场记录 (见图 5(a)) 整体差于前者, 上述“三列波”的特征不明显, 第三列红色的虚拟反射波在偏移距 800 m 后波形展宽严重, 与虚拟直达波波形重合, 无法明确分辨出含水层的上界面, 位置信息丢失, 且第四列蓝色的虚拟反射波也存在展宽现象, 无法明确分辨含水层的下界面。说明了自适应精细积分方法在求解波场反变换方程问题中的分辨率优势。

### 3 典型全空间层状含水模型中瞬变电磁信号的虚拟波场提取

为进一步验证自适应精细积分方法的有效性, 针对与 2.1 节一致的观测系统, 设计了全空间五层典型层状地电断模型 (HKH 型, 含有两个含水层), 通过水平电偶极子叠加方法进行正演模拟, 得到回线源瞬变电磁场垂直分量的响应信号, 回线源瞬变电磁观测系统与模型示意图如图 6 所示, 模型参数如表 1 所示。

由于在回线源中心  $1/3$  范围内可认为瞬变电磁信号的一次激励场为呈均匀分布的垂直磁场, 因此在下

面的虚拟波场提取中,截取线圈范围内偏移距区间为 $[-200, 200]$ 的接收点。令 $\alpha=1$ ,  $\beta=-3.350$ ,  $\gamma=0.663^{[15]}$ ,采用平滑正则化方法与自适应精细积分方法从 HKH 模型的  $B_z(t)$  响应分量中提取的虚拟波场如图 7 和图 8 所示。在图 7(a)和图 8(a)中先后有 5 列波出现,分别是对应  $Z=0$  界面的虚拟直达波、来自第一层含水层上下界面的虚拟反射波以及来自第二层含水层上下界面的虚拟反射波,这说明提取的虚拟波场能够刻画低阻薄层的上下界面。图 7(a)和图 8(a)中黑色虚线标识对应第一层异常体介质的上下界面计算到时,绿色虚线标识对应第二层异常体介质的上下界面计算到时。

在图 7(a)和图 8(a)中,由于地层迅速吸收瞬变电磁信号中的高频成分,导致对应深部异常体上下界面的虚拟反射波宽度增加,与计算到时的吻合程度低于浅部异常体,分辨率降低。对比图 7(a)和图 8(a)可以发现,采用平滑正则化方法时,第一层含水层介质上界面对应的虚拟反射波在黑色虚线标识的计算到时之前开始,第二层含水层介质下界面对应的虚拟反射波在绿色虚线标识的计算到时之后结束,两层异常体的虚拟反射波均出现波形展宽现象,且波形过宽出现了波场重合,对两层异常体的分辨率较差,对含水层轮廓刻画模糊;采用本研究方法时,对虚拟波场波形起到锐化作用,两层异常体的虚拟反射波的同相轴比较明显,两层异常体上下界面对应的虚拟反射波与图中虚线标识的计算到时均基本吻合,提取精度提升,可以更清晰地刻画模型中异常体的位置信息。对比图 7(b)和图 8(b)可以发现,多测道图差异十分明显:采用正则化方法时,多测道曲线早期重合程度较好,而晚期拟合出现明显偏差;采用本研究方法时,多测道曲线在整个观测时间段上均具有很高的拟合精度。通过计算,针对典型 HKH 层状含水模型,采用本研究方法提取的虚拟波场与设计模型相符,可以突出提取的地层结构信息,进一步说明了该方法的优越性和可靠性。

#### 4 现场探测验证

在上文应用模拟算例对本研究方法进行验证的基础上,对陕西省某施工隧道超前预报探测试验<sup>[20]</sup>中采集的回线源瞬变电磁数据进行处理,并采用自适应精细积分方法进行虚拟波场的提取。工区地理位置如图 9(a)所示,隧址区域周围多为 V 字型峡谷地貌:山岭高耸、边坡陡峭、地面起伏度较大,地表最大高程差可达 1 000 m,该预报段落隧道埋深约为 900 m。图 9(c)为拟建隧道的地质纵断面示意图,据地勘报告资料显示,拟预报段落地下水主要由基岩网状裂隙水和部分断层脉状裂隙水组成,施工区域周围岩体的主要含水

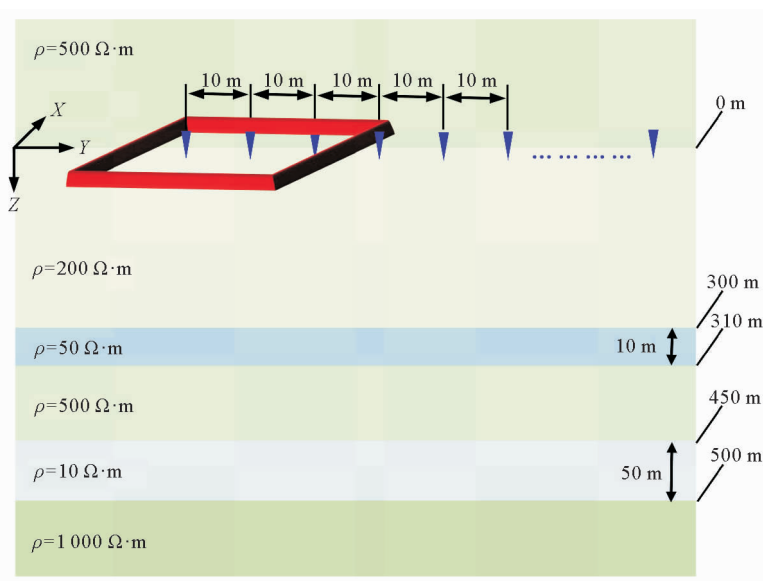


图 6 回线源瞬变电磁观测系统与全空间 HKH 型模型示意图

Fig. 6 TEM observation system with loop-source and type-HKH model

表 1 HKH 型地电断面模型参数

Table 1 Parameters for type-HKH model

| 地层       | 厚度 /m  | 电阻率 /( $\Omega \cdot m$ ) |
|----------|--------|---------------------------|
| 第一层      | 向上无限延伸 | 500                       |
| 第二层      | 300    | 200                       |
| 第三层(含水层) | 50     | 50                        |
| 第四层      | 100    | 500                       |
| 第五层(含水层) | 50     | 10                        |
| 第六层      | 向下无限延伸 | 1 000                     |

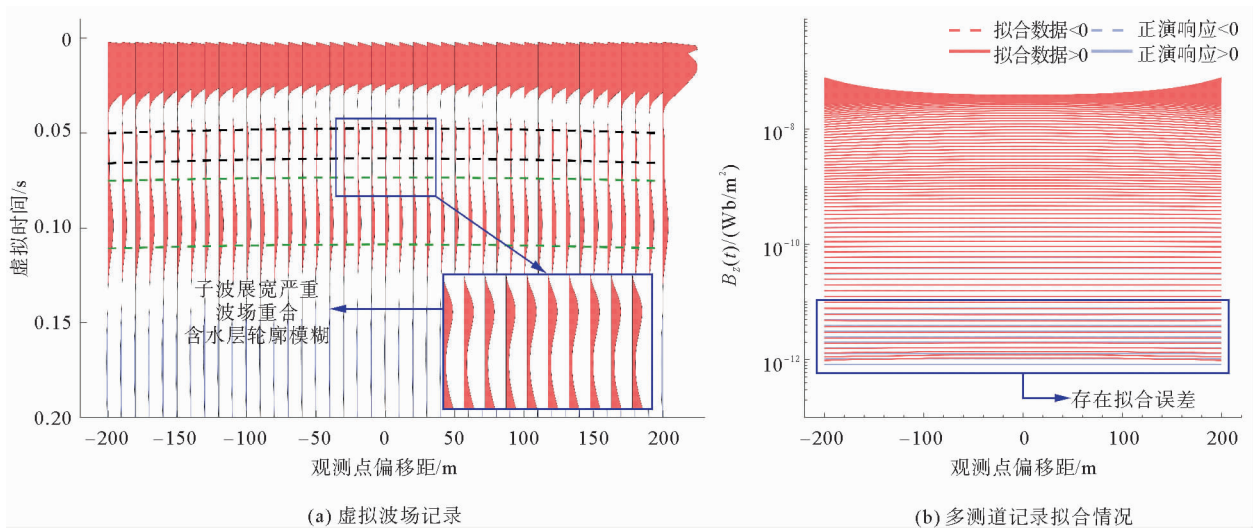


图 7 采用平滑正则化方法从 HKH 模型的  $B_z(t)$  响应分量中提取的虚拟波场与数据拟合情况

Fig. 7 Extracted pseudo-wavefield from the  $B_z(t)$  component of the type- HKH model response using the regularization method and their fitting to the modeled data

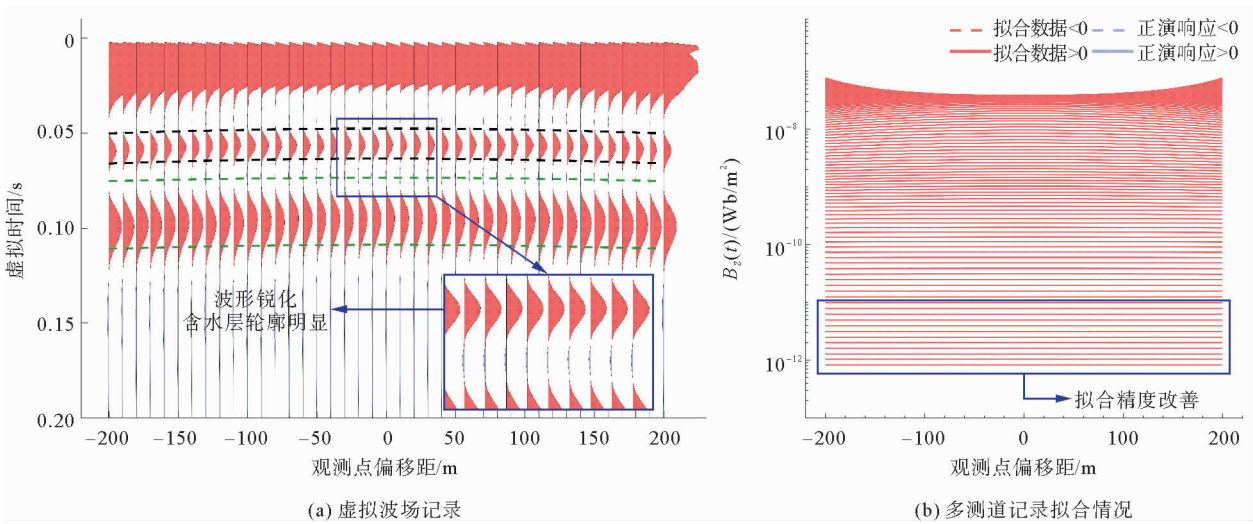


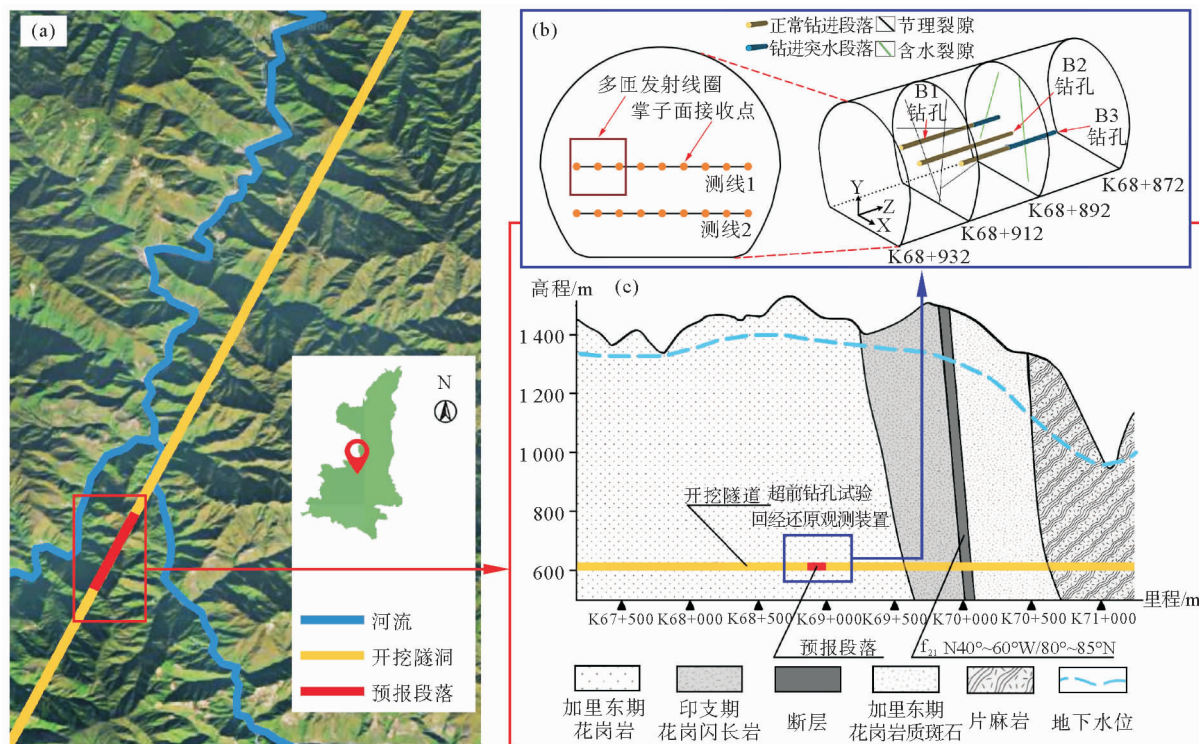
图 8 采用自适应精细积分方法从 HKH 模型的  $B_z(t)$  响应分量中提取的虚拟波场与数据拟合情况

Fig. 8 Extracted pseudo-wavefield from the  $B_z(t)$  component of the type-HKH model response using the self-adaptive precise integration method and their fitting to the modeled data

构造为较发育且充填性较好的节理和裂隙。探测试验中心回线观测装置如图 9(b)所示,试验探测采用加拿大 Geonics 公司的 Protem-47 系统,发射回线为 64 匝方形回线,激发脉冲采用基频为 25 Hz、占空比为 50% 的矩形波脉冲,激发电流强度为 1 A。试验共记录了 0.088 ~ 6.978 ms 内 20 个时间道上的响应信号。隧道开挖过程中,在 K68+913 掌子面左中右部位依次施作 B-1、B-2 和 B-3 三个超前钻孔,三个钻孔深度均为 21 m,钻孔记录如图 9(b)所示。

对洞内探测所采集的  $dB_z(t)/dt$  响应信号,经过手动平滑、五点平滑和插值加密后的数据如图 10 所示,含水异常明显。将探测数据积分后得到  $B_z(t)$  响应分量,令  $\alpha=1, \beta=-3.350, \gamma=0.663$  [15],应用精细积分方法求解波场反变换方程,提取虚拟波场,结果如图 11 所示。





(a) 隧道工区地理位置;(b) 回线源观测装置与开挖钻孔;(c) 隧道地质纵断面

图 9 隧道地质纵断面与探测试验方案<sup>[20]</sup>

Fig. 9 Geologic profile of the tunnel and detection test scheme

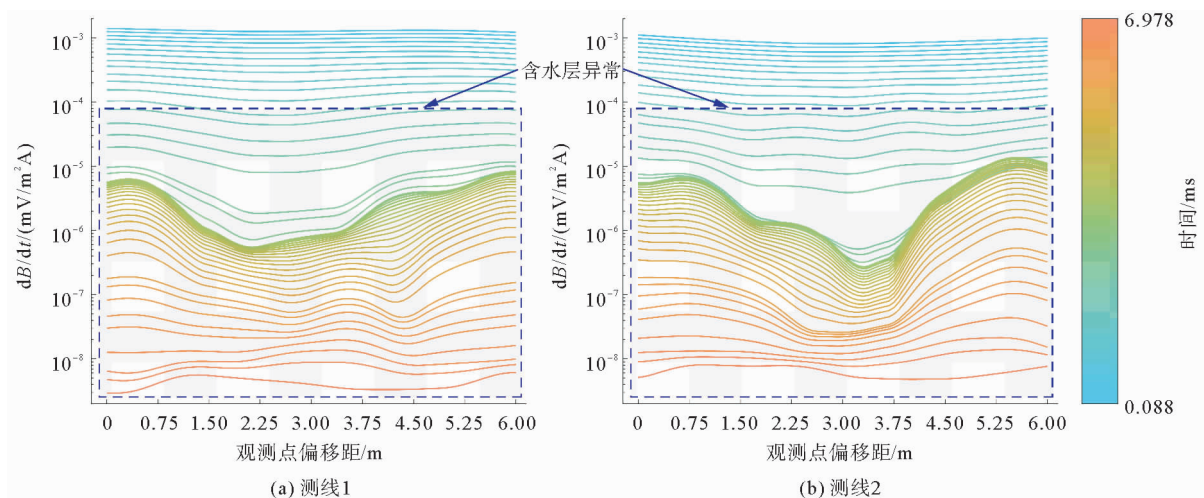


图 10 预处理后的洞内探测数据的多测道图

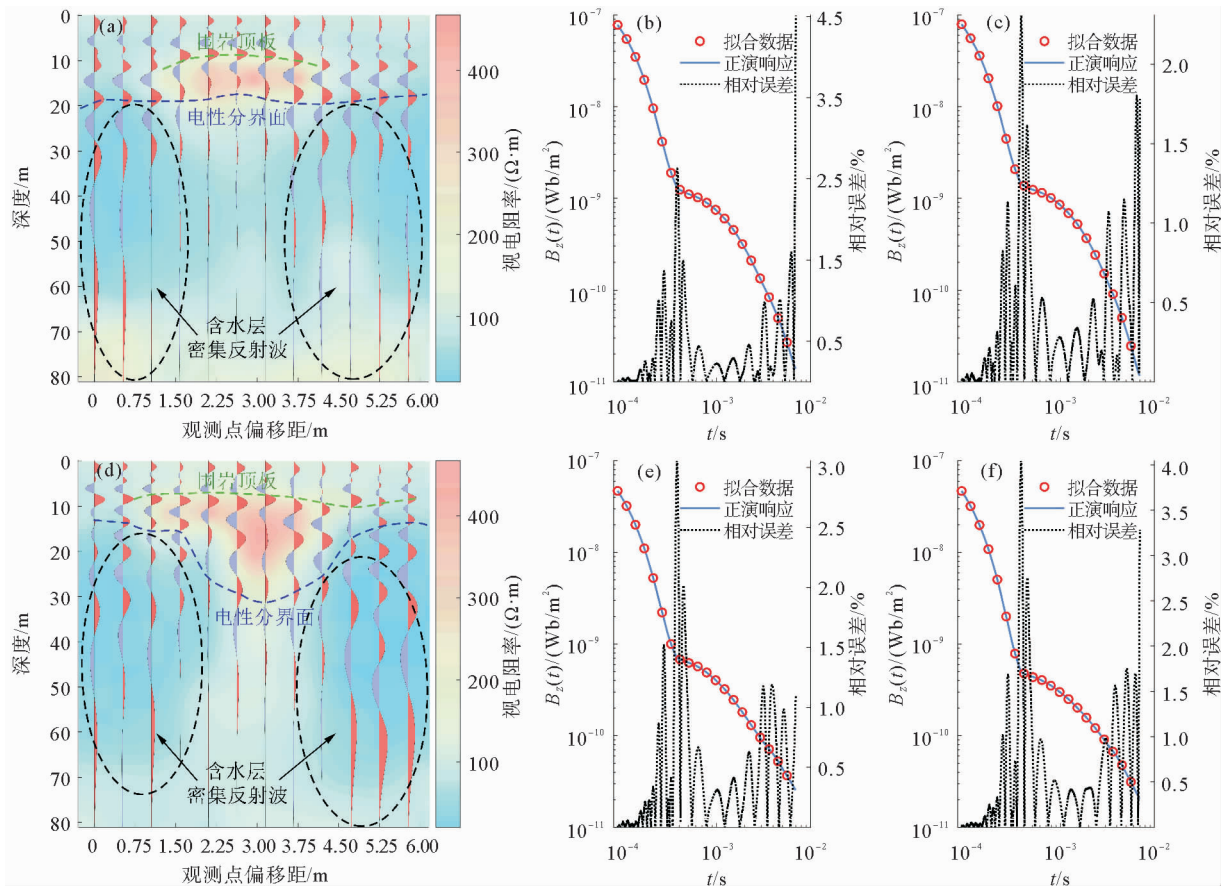
Fig. 10 Multichannel map of pre-processed in-tunnel detection data

由图 11(b)、11(c)、11(e)、11(f)可以看出:测线 1 和测线 2 中偏移距为 3 和 3.75 m 的观测点对正演数据的拟合误差均在 5% 以下,两条测线数据拟合情况良好,均满足精度要求。图 11(a) 和 11(d)展示了掌子面前方电性分布的视电阻率成像<sup>[20]</sup>与提取虚拟波场对比的综合剖面结果。由图 11 可以看出,每条测线对应的虚拟波场记录中各出现 11 处明显的反射,提供了大量地下电性界面信息,两条测线的虚拟波场的反射波到时彼此对应,呈较好的连续性。正负反射波出现在视电阻率明显变化的边界处。

视电阻率成像结果显示掌子面前方的左右两侧存在低阻异常体,这与已知的钻孔资料吻合。图 11(a)

和11(d)中,在掌子面前方探测深度0~10 m的范围内视电阻率较低,为100~200 Ω·m;在掌子面前方探测深度20~65 m、偏移距0~1.5 m和3.75~6.00 m的两侧视电阻率低于100 Ω·m。图11(a)中,掌子面前方探测深度10~20 m、偏移距1.50~3.75 m处视电阻率近500 Ω·m。图11(d)中,掌子面前方探测深度10~30 m、偏移距1.50~3.5 m的倒“L”型范围内视电阻率高于400 Ω·m。

对比图11测线上的视电阻率与虚拟波场分布可以发现,虚拟波场的同相轴与视电阻率的趋势基本一致,整体均呈中间高两侧低特征。在图11(a)和11(d)中掌子面前方20~70 m、偏移距0~1.50 m和3.75~6.00 m的两侧,即黑色虚线标示的范围内,由于含水区的存在,在虚拟波场记录图上表现出横向不连续、间断跳跃的特征;在绿色虚线标示的围岩顶板和蓝色虚线标示的电性分界面处,由于视电阻率发生明显变化,正负反射波密集出现,较好地刻画了含水区的范围和边界。本研究计算结果与视电阻率分布规律相互印证,虚拟反射波在富水区域边界和电性界面附近响应明显,说明本研究方法可以较好地识别含水层异常体电性界面,具有可靠性和实用性。



(a) 测线1中提取的虚拟波场与视电阻率综合剖面;(b) 测线1中偏移距为3.25 m时数据的拟合情况;(c) 测线1中4 m观测点上数据的拟合情况;  
(d) 测线2中提取的虚拟波场与视电阻率综合剖面;(e) 测线2中偏移距为3.25 m时数据的拟合情况;(f) 测线2中偏移距为4 m时数据的拟合情况

图11 从洞内采集信号中提取的虚拟波场与视电阻率综合剖面及不同偏移距的观测点对正演数据的拟合情况

Fig. 11 Fitting of pseudo-wavefield and apparent resistivity comprehensive profile extracted from the signals collected in tunnel and the fitted data on different receiving points

### 5 结论

本研究提出的自适应瞬变电磁波场反变换方法可根据瞬变电磁信号的自身特征自动判定精细积分迭代过程终止,避免迭代不足或迭代过度情况的发生。

在对本研究方法精度与电性界面分辨效果的分析中,通过对均匀半空间模型的计算,验证了该方法具有

较好的精度(对正演数据的拟合误差在 0.5% 以下),与平滑正则化方法相比精度明显提升。在对 H 型地电断面模型的计算中,提取的虚拟波场具有合理准确的运动学特征,体现了本研究相对于平滑正则化方法在分辨电性界面方面的优势。在对典型全空间 HKH 型层状含水模型的计算中,虚拟波场可较好地分辨浅部异常体,当异常体深度增加时,瞬变电磁信号的高频成分被地层迅速吸收,虚拟反射波宽度增加,分辨率降低。而相对于平滑正则化方法,本研究对正演数据的拟合程度提高,在虚拟波场提取中可以对虚拟波形起到锐化作用,异常体对应的虚拟反射波的同相轴更加明显,有利于刻画模型中异常体的位置信息。

最后在对隧道实测瞬变电磁数据进行虚拟波场的提取中,对正演数据的拟合误差低于 5%,满足精度要求,且虚拟波场记录结果圈定的三处富水区与视电阻率分布规律相互印证,虚拟反射波在富水区域边界和电性界面附近响应明显,体现了本研究方法的可靠性和实用性,为后续的瞬变电磁成像提供前提保障。

### 参考文献:

- [1] 李利平,成帅,张延欢,等.地下工程安全建设面临的机遇与挑战[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(4):1-13.  
LI Liping, CHENG Shuai, ZHANG Yanhuan, et al. Opportunities and challenges of construction safety in underground engineering projects[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(4): 1-13.
- [2] LI S C, LIU B, XU X J, et al. An overview of ahead geological prospecting in tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63: 69-94.
- [3] 陈玲霞,张利民,王志荣,等.瞬变电磁法在岩溶隧道超前地质预报中的应用:以七家营隧道为例[J].山东科技大学学报(自然科学版),2014,33(3):20-24.  
CHEN Lingxia, ZHANG Limin, WANG Zhirong, et al. The application of transient electromagnetic method in karst tunnel geological prediction: Taking Qijiaying tunnel as an example[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 33(3): 20-24.
- [4] QI Z P, LI X, LU X S, et al. Inverse transformation algorithm of transient electromagnetic field and its high-resolution continuous imaging interpretation method[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2015, 12(2): 242-252.
- [5] 赵彬,马勇,袁汝庆,等.利用瞬变电磁法探测程楼断层含(富)水性[J].山东科技大学学报(自然科学版),2015,34(1):9-15.  
ZHAO Bin, MA Yong, YUAN Ruqing, et al. Transient electromagnetic method in search of processing the aquosity (water yield property) of Chenglou fault[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 34(1): 9-15.
- [6] LEE K H, LIU G, MORRISON H F. A new approach to modeling the electromagnetic response of conductive media[J]. Geophysics, 1989, 54(9): 1180-1192.
- [7] 李貅,薛国强.瞬变电磁法拟地震偏移成像研究[M].北京:科学出版社,2013.
- [8] LEE K H, XIE G. A new approach to imaging with low-frequency electromagnetic fields[J]. Geophysics, 1993, 58(6): 780-796.
- [9] GERSHENSON M. Simple interpretation of time-domain electromagnetic sounding using similarities between wave and diffusion propagation[J]. Geophysics, 1997, 62(3): 763-774.
- [10] 李貅,薛国强,宋建平,等.从瞬变电磁场到波场的优化算法[J].地球物理学报,2005,48(5):1185-1190.  
LI Xiu, XUE Guoqiang, SONG Jianping, et al. An optimize method for transient electromagnetic field-wave field conversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(5): 1185-1190.
- [11] 戚志鹏,李貅,吴琼,等.从瞬变电磁扩散场到拟地震波场的全时域反变换算法[J].地球物理学报,2013,56(10):3581-3595.  
QI Zhipeng, LI Xiu, WU Qiong, et al. A new algorithm for full-time-domain wave-field transformation based on transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(10): 3581-3595.
- [12] 智庆全. MTEM 波场变换与偏移成像方法研究[D].西安:长安大学,2015.  
ZHI Qingquan. Study on wave field transformation and migration imaging of MTEM data[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [13] LI X, XUE G Q, ZHI Q Q, et al. TEM pseudo-wave field extractions using a modified algorithm[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2018, 23(1): 33-45.

- [14] 鲁凯亮,李貅,戚志鹏,等.瞬变电磁扩散场到虚拟波场的精细积分变换算法[J].地球物理学报,2021,64(9):3379-3390.  
LU Kailiang, LI Xiu, QI Zhipeng, et al. A precise integration transform algorithm for transformation from the transient electromagnetic diffusion field into the pseudo wave field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9): 3379-3390.
- [15] 范克睿.地下工程含水构造瞬变电磁波场变换与多分辨成像方法[D].济南:山东大学,2021.  
FAN Kerui. Wavefield transform and multi-resolution imaging of transient electromagnetic method for the water-bearing structures in underground engineering[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [16] ZHONG W X. On precise integration method[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2004, 163(1): 59-78.
- [17] 富明慧,李勇息,张文志.求解病态线性方程的一种精细格式及迭代终止准则[J].应用力学学报,2018,35(2):346-350.  
FU Minghui, LI Yongxi, ZHANG Wenzhi. A precise form for solving ill-conditioned algebraic equations and its iteration stopping criterion[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(2): 346-350.
- [18] 陆基孟.地震勘探原理[M].东营:石油大学出版社,1993.
- [19] DE HOOP A T. A general correspondence principle for time-domain electromagnetic wave and diffusion fields[J]. Geophysical Journal International, 1996, 127(3): 757-761.
- [20] LIU B, FAN K R, NIE L C, et al. Mapping water-abundant zones using transient electromagnetic and seismic methods when tunneling through fractured granite in Qinling Mountains, China[J/OL]. Geophysics, 2020, 85(4): B147-B159. DOI: 10.1190/geo2019-0067.1.

(责任编辑:高丽华)