

文章编号:1671-251X(2019)04-0077-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019020034

矿井富水区陷落柱成像研究

田丰, 焦翠翠, 韩晓冰

(西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054)



扫码移动阅读

摘要:针对目前矿井富水区超前探测瞬变电磁法常用的时域有限差分(FDTD)方法时间步长选取受限
于 Courant-Friedrich-Lewy 稳定性条件的问题,同时为进一步提高电磁计算效率和富水区成像分辨率,提出
将逆时偏移成像算法和 Crank-Nicolson 时域有限差分(CN-FDTD)方法应用于矿井富水区陷落柱成像研
究。首先介绍了逆时偏移成像算法和 CN-FDTD 方法基本原理;然后建立了矿井富水区陷落柱三维空间模
型,研究了激励源线圈频率和角度对成像分辨率的影响,并得出了矿井富水区陷落柱成像结果;最后分析了
CN-FDTD 方法的计算效率。试验结果表明:当激励源线圈峰值频率为 65 MHz 且激励源线圈平行于 xoz
平面时,富水区陷落柱成像分辨率较高;基于 CN-FDTD 逆时偏移成像算法的矿井富水区陷落柱成像与实际
模型相符;CN-FDTD 方法较传统 FDTD 方法计算效率高,内存占比小。

关键词:矿井突水; 矿井富水区; 富水区超前探测; 陷落柱成像; 瞬变电磁法; Crank-Nicolson 时域有
限差分; 逆时偏移成像

中图分类号:TD745 文献标志码:A

Research on karst collapse pillar imaging of water-rich area in coal mine

TIAN Feng, JIAO Cuicui, HAN Xiaobing

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of
Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract:In order to solve the problem that selection of time step was limited by Courant-Friedrich-Lewy stability condition in current finite-difference time-domain (FDTD) method commonly used in advanced detection transient electromagnetic method of water-rich area in coal mine, and further improve electromagnetic calculation efficiency and imaging resolution of water-rich area, reverse time migration imaging algorithm and Crank-Nicolson finite-difference time-domain(CN-FDTD) method were applied to research of karst collapse pillar(KCP) imaging of water-rich area in coal mine. Firstly, basic principles of reverse time migration imaging algorithm and CN-FDTD method were introduced. Then a three-dimensional KCP model of water-rich area in coal mine was established. Influence of frequency and angle of excitation source coil on imaging resolution was researched, and imaging results of the KCP were obtained. Finally, computational efficiency of CN-FDTD method was analyzed. The experimental results show that when peak frequency of excitation source coil is 65 MHz and the excitation source coil is parallel to xoz plane, imaging resolution of the KCP is high. The KCP imaging of water-rich area in coal mine based on CN-FDTD reverse time migration imaging method is consistent with the actual model. Compared with traditional FDTD method, CN-FDTD method has higher computational efficiency and smaller memory

收稿日期:2019-02-22;修回日期:2019-03-25;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51804248);陕西省科技计划项目(2018GY-151)。

作者简介:田丰(1978—),男,甘肃陇西人,副教授,博士研究生,主要研究方向为矿山物联网、矿山信息化采集与融合、大数据及云计算技术,
E-mail:tianfeng@xust.edu.cn。

引用格式:田丰,焦翠翠,韩晓冰. 矿井富水区陷落柱成像研究[J]. 工矿自动化,2019,45(4):77-82.

TIAN Feng,JIAO Cuicui,HAN Xiaobing. Research on karst collapse pillar imaging of water-rich area in coal mine[J]. Industry and Mine Automation,2019,45(4):77-82.

proportion.

Key words: water inrush in coal mine; water-rich area in coal mine; advanced detection of water-rich area; karst collapse pillar imaging; transient electromagnetic method; Crank-Nicolson finite-difference time-domain; reverse time migration imaging

0 引言

目前,矿井突水已成为仅次于煤与瓦斯突出的第二大煤矿灾害。矿井富水区超前探测的主要方法为瞬变电磁法。国内外学者针对半空间的瞬变电磁法做了大量研究^[1-4],但对矿井全空间瞬变电磁法的研究很少,主要是将全空间分为上下半空间来计算层状介质的瞬变电磁响应特征^[5-6];针对矿井瞬变电磁法的一维正演、反演计算做了大量的基础理论和实际应用研究,对三维正演有一定的研究,但对三维反演和成像的研究比较少,尚未形成完整的理论体系。时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)方法是目前常用的矿井富水区超前探测瞬变电磁法,其时间步长的选取受限于Courant-Friedrich-Lewy(CFL)稳定性条件,即受限于空间步长。为了确保成像精度,须将成像探测区域剖分成足够密的网格。但网格剖分密度越大, FDTD方法的计算效率越低。Crank-Nicolson时域有限差分(CN-FDTD)方法能够解决传统FDTD方法受限于CFL稳定性条件的问题,其时间步长选择不受空间步长选择的限制,在相同网格剖分密度和成像精度条件下,可明显提高计算效率,节约计算空间^[7-11]。

本文首次将逆时偏移成像算法和CN-FDTD方法引入矿井富水区陷落柱成像研究,建立了矿井富水区陷落柱三维空间模型,分析了激励源线圈频率和角度对成像分辨率的影响,并对富水区陷落柱进行了成像试验。

1 逆时偏移成像算法

逆时偏移成像包括正向延拓、逆时延拓和成像3个步骤:正向延拓是波场沿着时间轴正方向传播到最大时刻;逆时延拓是从接收波场的最终时刻开始,向时间轴的负方向延拓至零时刻;成像为应用成像条件得到矿井富水区异常体的真实构造信息^[12-14]。根据文献^[15-17],通过互相关成像条件可得探测点 (x, y, z) 在矿井富水区的偏移成像结果:

$$I(x, y, z) = \sum_t S(x, y, z, t) R(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中: $S(x, y, z, t)$ 为 t 时刻 (x, y, z) 处的时间域正向延拓波场; $R(x, y, z, t)$ 为 t 时刻 (x, y, z) 处的时间域逆向延拓波场。

$S(x, y, z, t)R(x, y, z, t)$ 为 t 时刻对整个矿井三维空间的波场做一次成像运算并存储,然后将所有成像结果进行求和叠加而获得的最终偏移成像结果。考虑到矿井全空间三维条件下的计算效率和存储空间问题,采用激发时间成像条件进行富水区三维空间成像,可节约大量物理空间和读取时间,具有较好的保幅性^[18-19]。井下富水区激发时间成像条件:

$$I(x, y, z) = \sum_t R(x, y, z, t) f(x, y, z, t) \quad (2)$$

$$f(x, y, z, t) = \begin{cases} 1 & x = x', y = y', z = z', \\ & t = t_d(x', y', z') \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: (x', y', z') 为富水区异常体在逆推过程中某空间位置坐标; $t_d(x', y', z')$ 为激励源到富水区异常体的初至时间。

2 CN-FDTD方法

逆时偏移成像算法的关键在于正演问题,本文首次将CN-FDTD方法作为逆时偏移成像的正推算方法引入矿井富水区探测。CN-FDTD方法用于数值求解热方程和类似的偏微分方程,是一种时间域上的二阶方法。该方法隐含在时间上,可写为隐式Runge-Kutta方法,并且在数值上是稳定的^[20]。

以Maxwell方程组三维FDTD离散形式的电场强度计算为例说明CN-FDTD方法原理。

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_x} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式中: E_x 为矿井全空间介质 x 轴方向的电场强度; ϵ_x 为矿井全空间介质 x 轴方向的介电常数; H_y, H_z 分别为井下全空间介质 y 轴、 z 轴方向的磁场强度。

将式(4)展开可得

$$\frac{E_x^{n+1} - E_x^n}{dt} = \frac{1}{\epsilon_x} \times \left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) - H_z^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k \right)}{dy} - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) - H_y^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right)}{dz} \right] \quad (5)$$

式中: n 为时间步长指标; $H_y(i, j, k), H_z(i, j, k)$ 分别为矿井全空间介质在点 (i, j, k) 处的 y 轴、 z 轴方向磁场强度。

将式(5)后一时刻形式中前向差分替换为后向差分,且由于 $H_z^n = \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}} + H_z^{n-\frac{1}{2}}}{2}$, 对其取 2 次中心差分可得

$$\begin{aligned} \frac{E_x^{n+1} - E_x^n}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon_x} & \left\{ \left[H_z^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) + \right. \right. \\ & H_z^n \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) - H_z^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k \right) - \\ & \left. H_z^n \left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k \right) \right] / (2\Delta y) - \\ & \left[H_y^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) + H_y^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) - \right. \\ & \left. H_y^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right) - H_y^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right) \right] / \\ & \left. (2\Delta z) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: Δt 为时间步长; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为矿井探测区域沿 x 轴、 y 轴、 z 轴剖分的网格尺寸。

式(6)可改写为

$$\begin{aligned} \frac{E_x^{n+1} - E_x^n}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon_x} & \{ [H_z^{n+1}(i, j+1, k) + H_z^n(i, j+1, k) - \\ & H_z^{n+1}(i, j, k) - H_z^n(i, j, k)] / (2\Delta y) - \\ & [H_y^{n+1}(i, j, k+1) + H_y^n(i, j, k+1) - \\ & H_y^{n+1}(i, j, k) - H_y^n(i, j, k)] / (2\Delta z) \} \end{aligned} \quad (7)$$

矿井全空间介质 y 轴、 z 轴方向的电场强度计算与此类似。

3 矿井富水区陷落柱成像试验

3.1 陷落柱三维空间模型建立

在矿井掘进过程中,富水区陷落柱已造成多次突水事故。陷落柱一般呈圆柱状,在导通水源之后易充水,逐步形成富水区。结合矿井地质结构,建立陷落柱三维空间地球物理模型,采用 CN-FDTD 逆时偏移成像算法探测富水区陷落柱的具体形状、位置和范围。

掘进工作面前方陷落柱三维空间模型如图 1 所示。模型在 y 轴正方向 24 m 处分层。分界面左侧为巷道,其介质为空气,相对介电常数为 1;右侧取相对介电常数为 4.09 的褐煤作为煤质。激励源线圈和接收线圈采用偶极装置,其中激励源线圈为边长 1 m 的正方形,位于分界面左侧 5 m 处,且平行于 xoz 平面,激励源函数采用 Ricker;接收线圈为边长 2 m 的正方形,位于分界面上,且平行于 xoz 平面。陷落柱走向与巷道掘进方向垂直。

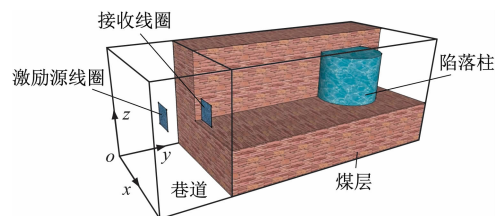


图 1 陷落柱三维空间模型

Fig. 1 Three-dimensional model of karst collapse pillar

3.2 激励源线圈频率选择

通过试验研究激励源线圈频率对矿井富水区陷落柱成像分辨率的影响,并根据试验结果选取合适的激励源线圈频率。分别取峰值频率为 25, 35, 45, 55, 65 MHz 的 Ricker 作为激励源。陷落柱模型尺寸为 $40 \text{ m} \times 80 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ ($x \times y \times z$), x, y, z 方向的网格剖分密度为 200, 300, 200。陷落柱半径设置为 10 m,其中心轴线与分界面相距 28 m。模型其他结构均与图 1 相符。

矿井富水区陷落柱在 xoy 平面的偏移成像如图 2 所示。可看出分界面的位置大约位于 $y = 24 \text{ m}$ 处,能量最强区域即为接收线圈所在区域,为 $y = 19 \sim 24 \text{ m}$,与陷落柱三维空间模型相符。随着 Ricker 峰值频率的增加,激励源线圈左侧波峰的波峰与波谷间距逐渐减小。当激励源线圈发出的电磁波从空气传播至煤层时,其传播方向在分界面处发生改变,进入煤层后遇到富水区陷落柱产生强烈的

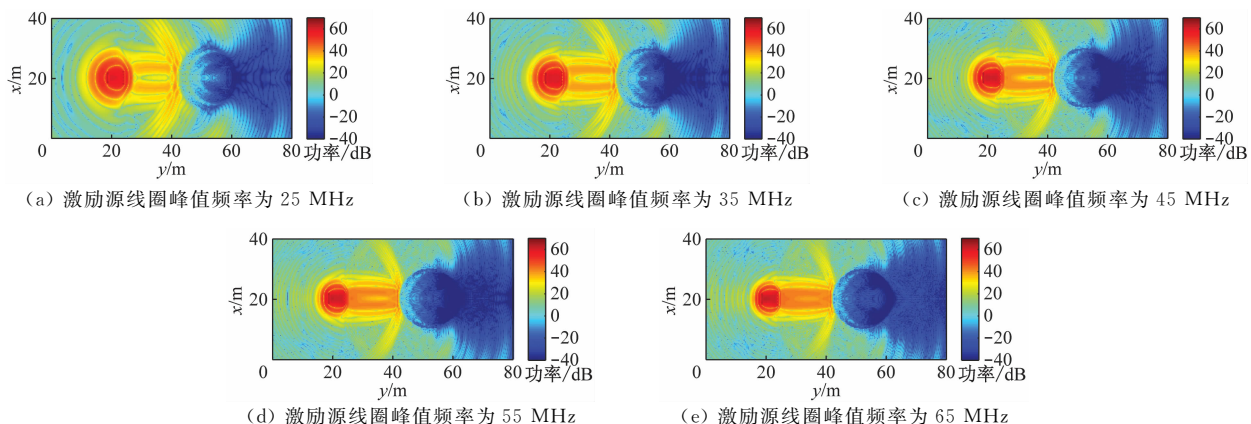


图 2 不同激励源线圈峰值频率下陷落柱 xoy 平面偏移成像

Fig. 2 Migration imaging of karst collapse pillar in xoy plane under different peak frequency of excitation source coil

电磁反射波。随着激励源线圈频率的增大,成像分辨率变高,但探测深度会变小,因此应当选取频率适合的 Ricker 作为激励源。图 2 中,当 Ricker 峰值频率为 65 MHz 时,陷落柱轮廓清晰可见,成像分辨率较高,因此本文选用峰值频率为 65 MHz 的 Ricker 作为激励源。

3.3 激励源线圈角度选择

通过试验研究激励源线圈角度对矿井富水区陷落柱成像分辨率的影响,并根据试验结果选取合适的激励源线圈角度。选取方形激励源线圈,分别垂直于 xoz 平面、与 xoz 平面呈 45° 夹角、平行于 xoz 平面。陷落柱模型尺寸为 $40\text{ m}\times 130\text{ m}\times 40\text{ m}$ ($x\times y\times z$), x, y, z 方向的网格剖分密度为 180, 350, 180, 陷落柱半径设置为 5 m, 其中心轴线与分界面相距 86 m。选取峰值频率为 65 MHz 的 Ricker 作为激励源,模型其他结构与图 1 相符。

不同激励源线圈角度下富水区陷落柱在 xoy 平面的偏移成像如图 3 所示。可看出分界面位置大约在 $y=24\text{ m}$ 处,能量最强区域即为接收线圈所在区域,为 $y=19\sim 24\text{ m}$, 均与陷落柱三维空间模型相符。当激励源线圈发出的电磁波从空气传播至煤层时,其传播方向在分界面处发生改变。当方形激励源线圈与 xoz 平面呈 45° 夹角或平行于 xoz 平面时,电磁波遇到富水区陷落柱时产生强烈的电磁反射波。当激励源线圈垂直于 xoz 平面时,无法看到陷落柱 xoy 平面的偏移成像;当激励源线圈与 xoz 平面呈 45° 夹角时,陷落柱左侧轮廓较清晰,右侧轮廓较模糊;当激励源线圈与 xoz 平面平行时,陷落柱轮廓清晰,与陷落柱三维空间模型相符。因此,本文选择平行于 xoz 平面的方形激励源线圈。

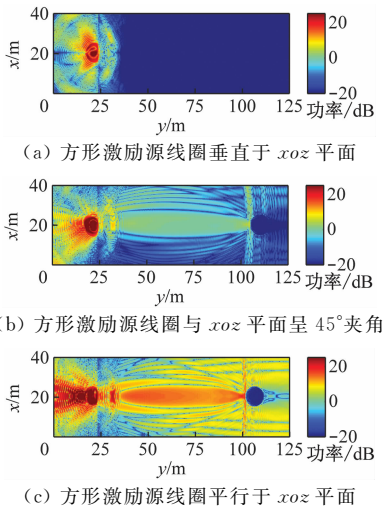


图 3 不同激励源线圈角度下陷落柱 xoy 平面偏移成像
Fig. 3 Migration imaging of karst collapse pillar in xoy plane under different angle of excitation source coil

3.4 富水区陷落柱成像

上述研究表明方形激励源线圈峰值频率为 65 MHz 且平行于 xoz 平面时成像效果最好,因此选取上述参数对富水区陷落柱进行成像试验。陷落柱模型尺寸为 $40\text{ m}\times 80\text{ m}\times 40\text{ m}$ ($x\times y\times z$), x, y, z 方向的网格剖分密度为 200, 300, 200, 陷落柱半径设置为 10 m, 其中心轴线与分界面相距 28 m, 模型其他结构均与图 1 相符。

矿井富水区陷落柱 xoy 平面和 $yo z$ 平面模型如图 4 所示,偏移成像如图 5 所示。从图 5 可看出,分界面位置大约在 $y=24\text{ m}$ 处。当激励源线圈发出的电磁波从空气传播至煤层时,其传播方向在分界面处发生改变。采用 CN-FDTD 逆时偏移成像算法得到的矿井富水区陷落柱成像在 $y=42\text{ m}$ 处出现强烈的电磁反射波,与图 4 相符。陷落柱 xoy 平面和 $yo z$ 平面偏移成像中,其轮廓均与图 4 相符。根据 xoy 平面和 $yo z$ 平面偏移成像可描绘出富水区陷落柱的三维空间模型。

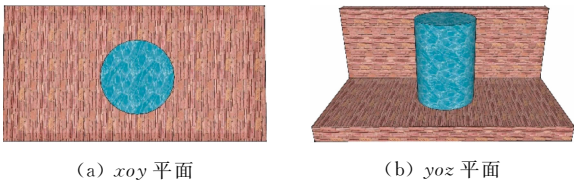


图 4 陷落柱 xoy 平面和 $yo z$ 平面模型
Fig. 4 Karst collapse pillar models in xoy plane and $yo z$ plane

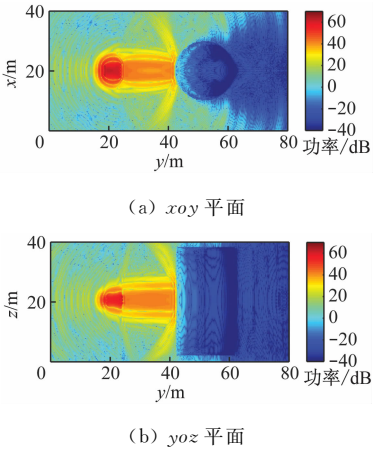


图 5 陷落柱 xoy 平面和 $yo z$ 平面偏移成像
Fig. 5 Migration imaging of karst collapse pillar in xoy plane and $yo z$ plane

4 CN-FDTD 方法计算效率分析

在相同的模型和网格剖分密度下,对基于 CN-FDTD 方法和传统 FDTD 方法的矿井富水区陷落柱成像的计算效率进行试验对比。陷落柱模型尺寸

为 $40\text{ m}\times 80\text{ m}\times 40\text{ m}(x\times y\times z)$, x,y,z 方向的网格剖分密度为 200,300,200,设置 80 个观测点。陷落柱半径设置为 10 m,其中心轴线与分界面相距 28 m。在分析计算效率时选择与图 1 相同的模型。

CN-FDTD 方法和 FDTD 方法的数值计算特征曲线如图 6 所示。在数值计算过程中,时间步长 Δt 与空间步长 $\Delta x,\Delta y,\Delta z$ 之间必须满足 CFL 稳定性条件。而 CN-FDTD 方法是无条件稳定的,时间步长 Δt 的选取不受空间步长 $\Delta x,\Delta y,\Delta z$ 的限制,且在计算过程中采用多线程模式。CN-FDTD 方法在时间步长取值远大于 CFL 稳定性条件时,其与 FDTD 方法的数值计算特征曲线拟合良好。

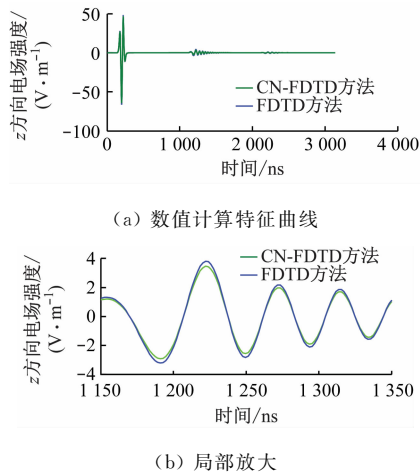


图 6 CN-FDTD 方法与传统 FDTD 方法的数值计算特征曲线

Fig. 6 Numerical calculation characteristic curves of CN-FDTD method and traditional FDTD method

CN-FDTD 方法与传统 FDTD 方法的性能指标对比见表 1。可看出 CN-FDTD 方法的运行时间为传统 FDTD 方法的 1/3,内存消耗约为传统 FDTD 方法的 87%,从而证明 CN-FDTD 方法计算效率高,内存占比小,用于矿井复杂环境时,CN-FDTD 方法具有明显优势。

表 1 CN-FDTD 方法与 FDTD 方法的性能指标对比		
Table 1 Performance index comparison between CN-FDTD method and traditional FDTD method		
方法	运行时间/min	内存消耗/GB
CN-FDTD	6.67	3.9
FDTD	20.01	4.5

5 结语

将逆时偏移成像算法和 CN-FDTD 方法引入矿

井富水区陷落柱三维成像研究中,解决了传统 FDTD 方法受限于 CFL 稳定性条件的问题,提高了矿井瞬变电磁法的计算效率,节省了内存成本。试验表明,CN-FDTD 逆时偏移成像算法可对矿井富水区陷落柱进行高分辨率成像,精确确定其形状、位置和范围。该算法为矿井富水区陷落柱超前探测提供了一种新思路。

参考文献(References):

[1] 张鹏. 中国煤炭矿井物探技术现状及展望[J]. 工矿自动化,2017,43(3):20-23.
ZHANG Peng. Status and prospect of coal mine geophysical exploration technology in China [J]. Industry and Mine Automation,2017,43(3):20-23.

[2] 周金,程久龙,温来福. 矿井瞬变电磁法反演方法研究进展与展望[J]. 煤矿安全,2017,48(4):180-183.
ZHOU Jin, CHENG Jiulong, WEN Laifu. Research progress and prospect on inversion methods of mine transient electromagnetic method[J]. Safety in Coal Mines,2017,48(4):180-183.

[3] 孟强华,窦文武. 瞬变电磁探测在煤矿采空区积水边界探测中的应用[J]. 煤炭技术,2018,37(2):123-125.
MENG Qianghua, DOU Wenwu. Application of transient electromagnetic detection in goaf water boundary detection in coal mine[J]. Coal Technology, 2018,37(2):123-125.

[4] 王鹏. 厚煤层露天矿地下水瞬变电磁法探测[J]. 煤矿安全,2019,50(1):153-156.
WANG Peng. Detection of groundwater in thick coal seam open pit by TEM[J]. Safety in Coal Mines, 2019,50(1):153-156.

[5] ROY K K, VERMA S K, MALLICK K. Deep electromagnetic exploration [M]. Berlin: Springer, 1999.

[6] KRIVOCHIEVA S, CHOUTEAU M. Whole-space modeling of a layered earth in time-domain electromagnetic measurements[J]. Journal of Applied Geophysics,2002,50(4):375-391.

[7] 常江浩. 煤矿富水区矿井瞬变电磁响应三维数值模拟及应用[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.

[8] 张广博. 掘进工作面富水区瞬变电磁法多分量探测物理模拟及应用[D]. 徐州:中国矿业大学,2016.

[9] 许新刚. 矿井含水构造瞬变电磁场响应及透视技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.

[10] 于景邨,常江浩,苏本玉,等. 老空水全空间瞬变电磁法探测三维数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术,2015,

43(1):95-99.

YU Jingcun, CHANG Jianghao, SU Benyu, et al. Study on whole space transient electromagnetic method prospect three dimensional numerical modeling of gob water [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1):95-99.

[11] 刘尧. 基于有限差分的瞬变电磁三维数值模拟[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2015.

[12] 徐兴荣, 王西文, 王宇超, 等. 基于波场分离理论的逆时偏移成像条件研究及应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(5):2084-2090.

XU Xingrong, WANG Xiwen, WANG Yuchao, et al. Study and application of imaging condition for reverse-time migration based on wave-fields separation[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(5): 2084-2090.

[13] 朱尉强, 黄清华. 探地雷达衰减补偿逆时偏移成像方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10):3909-3916.

ZHU Weiqiang, HUANG Qinghua. Attenuation compensated reverse time migration method of ground penetrating radar signals [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(10):3909-3916.

[14] 刘学建, 刘伊克. 表面多次波最小二乘逆时偏移成像[J]. 地球物理学报, 2016, 59(9):3354-3365.

LIU Xuejian, LIU Yike. Least-squares reverse-time migration of surface-related multiples [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(9):3354-3365.

[15] 鲁兴林, 钱荣毅. 地质雷达有限差分逆时偏移方法研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2):885-890.

LU Xinglin, QIAN Rongyi. Ground-penetrating radar finite-difference reverse time migration[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(2):885-890.

[16] LU Xinglin, SONG Ao, QIAN Rongyi, et al. Anisotropic reverse-time migration of ground-penetrating radar data collected on the sand dunes in the Badain Jaran Desert[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(2):647-654.

[17] 程飞. 多井井间三维波场数值模拟与逆时偏移成像研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2015.

[18] 王京. 隧道空间有限元地震波场模拟与逆时偏移成像[D]. 武汉:中国地质大学, 2017.

[19] YANG Y. The three-dimensional unconditionally stable FDTD algorithm based on Crank-Nicolson method[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Albuquerque, 2006:81-84.

[20] WANG Zhiyong, DING Hao, LU Guijin, et al. Reverse-time migration based optical imaging [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2016, 35(1): 273-281.