

坑道无线电波透视相位层析成像技术

刘志新¹, 刘树才¹, 王东伟^{1,2}

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 徐州 221116; 2. 河南省地矿局第二地质勘查院, 郑州 450000)

摘要: 以麦克斯韦方程组为基础, 推导出平面电磁波的波动方程。电磁波在煤层中传播时, 相位随着电磁波的传播产生一定的滞后。当异常体和煤层的相位系数不同时, 坑道无线电波透视发射点和接收点之间的相位差发生变化, 相位差成为异常体相位参数层析成像的基础。利用时域有限差分算法对含有陷落柱、火成岩侵入区的两种地电模型进行正演模拟。结果表明: 工作面内的异常体改变了发射点和接收点之间的相位差, 相位差的大小随着异常体的规模、电阻率和介电常数的不同而不同。用代数重建法分别对陷落柱和火成岩侵入区进行相位系数反演, 两种异常体的位置与模型中的实际位置相符。异常体的电磁参数不同, 反演的相位系数值也不相同。相位系数层析成像可以用来反演工作面内的地质异常体。

关键词: 无线电波透视; 相位系数; 层析成像; 地质异常体; 电阻率; 介电常数

中图分类号: P631.3

文献标志码: A

Phase tomography technology of tunnel radio wave perspective

LIU Zhi-xin¹, LIU Shu-cai¹, WANG Dong-wei^{1,2}

(1. School of Resource and Earth Science, China University of Mining & Technology,
Xuzhou 221116, China;

2. The Second Geological Exploration Institute of Henan Bureau of Geology, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Based on Maxwell's equations, the wave equation of plane electromagnetic wave was derived. Phase produces a certain lag when electromagnetic waves propagate in coal seam. Phase difference of tunnel radio waves perspective between transmitting and receiving point changes when the phase coefficients of anomalous body and coal seam are different, and it becomes the foundation of phase parameter tomography of anomalies. FDTD algorithm was calculated for two geoelectric model forward modeling containing collapse column and igneous intrusions. The results show that the anomalous body in coal seam changes the phase difference between the launch point and the receiving point and the effect of phase difference varies with abnormal body size, resistivity and dielectric constant. The inversion of phase coefficient of collapse column and igneous intrusions was calculated using algebraic reconstruction technique and the geological abnormal body position matches the actual location of the model. The phase coefficients are different because the electromagnetic parameters of the abnormal are different. The phase coefficient tomography can be used to inverse the geological anomaly within the face body.

Key words: radio waves perspective; phase coefficient; tomography; geological anomaly; resistivity; dielectric constant

坑道无线电波透视法是研究煤层、各种岩石及地质构造对透射电磁波传播的影响(包括吸收、反射、二次辐射等作用)所造成的一系列异常, 从而进行地质推断

解释的一种物探方法。对于采煤工作面内的隐伏地质构造, 包括断层、陷落柱、煤层变薄区等, 无线电波透视技术效果明显^[1-3]。但其多采用电磁波振幅参数进

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2013BAK06B01); 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2013CB227900)

收稿日期: 2013-05-16; 修订日期: 2013-06-30

通信作者: 刘志新, 副教授, 博士; 电话: 13852150838; E-mail: liuzhx@cumt.edu.cn

行数据处理, 单一的振幅衰减参数增加了多解性和不确定性。因此, 研究电磁波相位参数在透射过程中的变化规律, 引入电磁波相位参数反演煤层地质构造^[4-6], 对提高无线电波透视的资料解释精度具有重要意义。

1 煤层中电磁波传播的基本方程

煤层中电磁波的传播特性服从麦克斯韦方程。在时间域中, 其微分形式为

$$\nabla \times \mathbf{H} = J + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (4)$$

式中: \mathbf{H} 为磁场强度, A/m; \mathbf{B} 为磁感应强度, Wb/m²; \mathbf{E} 为电场强度, V/m; \mathbf{D} 为电位移矢量, C/m²; J 为传导电流密度, A/m²; q 为自由电荷密度, C/m²。

在无源区域($J=0, q=0$)中, 表征媒质电磁特性的方程组为

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

式中: ϵ 为介电常数, F/m; μ 为磁导率, H/m; σ 为电导率, S/m。

式(1)~(7)可以转化为

$$\nabla^2 \mathbf{H} + K^2 \mathbf{H} = 0 \quad (8)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} + K^2 \mathbf{E} = 0 \quad (9)$$

式(8)和(9)称为亥姆霍兹方程。

假设煤层中传播的电磁波为谐变的平面电磁波, 波的传播平行于煤层的Z轴方向, 波面与X和Y轴所在的垂直平面平行。电场强度和磁场强度的瞬时值可以表示为

$$\mathbf{E}(z, t) = e_X E_m e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \quad (10)$$

$$\mathbf{H}(z, t) = e_Y \frac{E_m}{\eta_c} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z - \theta) \quad (11)$$

式中: E_m 、 η_c 分别为电场强度的振幅值和煤层的波阻抗, ω 为电磁波的角频率, θ 为磁场强度落后电场强度的相位,

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \omega}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right)} \quad (12a)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \omega}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} + 1 \right)} \quad (12b)$$

式(10)和(11)说明: 电场强度和磁场强度的复振幅因子 $e^{-\alpha z}$ 随着 Z 的增大而减小, 其中 α 为每单位距离电磁场强衰减程度的常数, 也称衰减常数。 β 表示电磁强度每单位距离落后的常数, 也称相位常数。

煤层中电磁波的波长为

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v}{f} \quad (13)$$

式中: v 为电磁波的速度, f 为电磁波的频率。从式(13)可以看出: 均匀平面电磁波在煤层中传播时, 波的相速 v 会变慢, 波长 λ 会变短。

2 相位层析成像技术

2.1 相位层析成像方法

在电磁波传播过程中, 若用 ϕ 表示空间位置某点的相位, r 表示该点距离波源位置的空间长度, 则 ϕ 与时间 t 、空间坐标 r 之间的关系具有以下一般化的形式:

$$\phi(r, t) = (2\pi f * t - \beta r) \quad (14)$$

式中: 角度 ϕ 称为波的相位, rad; f 为波源的频率; β 为电磁波的相位常数。

假设 t 时刻接收巷道某一位置的相位为 $\phi_1(r_1, t) = (2\pi f * t - \beta r_1)$, 则发射点位置的相位为 $\phi_2(r_2, t) = (2\pi f * t - \beta r_2)$, 则发射点与接收点的相位差为

$$\beta * \Delta r = \Delta \phi(\Delta r, t) \quad (15)$$

式中: t 为接收点接收到波源信号的时刻, Δr 为发射点与接收点之间的距离。

将煤层工作面剖分成许多网格, 网格取长宽相等的正方形, 被剖分的每一个网格即为一个图形像素单元, 如果电磁波的某条射线穿过了相位系数分别为 x_1, x_2, \dots, x_n 的不同像素单元, 该条射线在这些像素单元上的截距依次为 $d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in}$, 则在第 i 条射线路径上有

$$\beta * \Delta r = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j \quad (16)$$

利用

$$y_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j \quad (17)$$

由式(15)、(16)和(17)可得第 i 条射线的方程:

$$y_i = \Delta\phi(r_i, t) \quad (18)$$

式中: y_i 表示第 i 条射线上发射点与接收点之间的相位差, r_i 表示第 i 条射线的长度, 即 $r_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}$ 。

坑道无线电波透视井下施工过程中, 在发射巷道中发射点间隔一般为 50 m, 接收巷道中接收间隔为 10 m, 接收点 10~20 个, 然后两条巷道交换发射和接收, 即对每个发射点进行多次接收探测, 确保对煤层工作面的多次覆盖^[20~22]。因此, 得到以下矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad (19)$$

即

$$[\mathbf{D}] \times [\mathbf{R}] = [\mathbf{Y}] \quad (20)$$

式中: $[\mathbf{D}]$ 为 $m \times n$ 阶系数矩阵, 是电磁波射线穿过不同图形像素单元的截距, $[\mathbf{D}]$ 中的 d_{ij} 表示第 i 条射线在第 j 个像素中的截距, m 是射线的总条数(总的探测次数); $[\mathbf{R}]$ 为 $n \times 1$ 阶未知数矩阵, 表示不同图形像素单元的相位系数; $[\mathbf{Y}]$ 为 $m \times 1$ 阶常数矩阵, 是各探测方式下发射点与接收点之间的相位差。

式(20)是以各个图形像素单元相位系数的叠加为基础的, 当每个图形像素单元的值均用层析图像(灰度图、等值线图)表示时, 相位系数图像就会反映出图形像素单元的不同相位系数的分布, 依此作为地质解释推断的依据^[7~10]。

2.2 图像重建算法

ART(Algebraic reconstruction technique)代数重建算法由 Hounsefield 于 1972 年首次提出, 它是依照每条射线依次修改图像元素的图形向量的一种迭代算法。在 ART 计算过程中, 首先对被重建区域赋一个初始值, 然后将每条射线求得的投影残差依次沿着射线均匀地反投影回去, 同时不断地对重建目标图像进行校正, 直至满足要求^[11~13]。

ART 代数重建算法的具体步骤如下:

1) 首先对各未知数 x_i 赋初值

$$\mathbf{X}^0 = \mathbf{X}_i^0 \quad (i=1, 2, \dots, I) \quad (21)$$

2) 求解 X 的迭代公式为

$$\mathbf{X}^{k+1} = \mathbf{X}^k + \frac{y_j - (\mathbf{r}^j, \mathbf{X}^k)}{\sum_{i=1}^I d_{ji}} \times d_{ji} \quad (22)$$

式中: $i=1, 2, \dots, I$ 为图形像素单元号, $j=1, 2, \dots, J$ 为重建区域中的射线号, \mathbf{r}^j 是 R 的第 j 行向量的转置, d_{ji} 是系数矩阵 $\mathbf{D} = (d_1, d_2, d_3, \dots, d_J)^T$ 的分量, $k=0, 1, \dots$ 为迭代次数。

3) 对求得的 \mathbf{X}^i 值, 用下式判断其收敛程度:

$$|\mathbf{X}^{k+1} - \mathbf{X}^k| \leq \epsilon \quad (23)$$

式中: ϵ 为给定的允许误差。完成一次迭代后, 判断其迭代结果是否满足式(23)的要求, 若不满足要求, 继续进行下一轮迭代, 直至结果达到误差允许范围之内^[14~15]。

3 电磁波相位正演模拟

3.1 时域有限差分的基本方程

在两个巷道之间研究电磁波在煤层中的透射, 可将煤层近似为一个二维模型, 此时空间中的麦克斯韦方程简化为二维形式。在二维场中, 所有物理量与 Z 坐标无关, 并假设计算空间内不含磁性媒质, 于是由式(1)和(2)可得:

TE 波:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} = \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \\ -\frac{\partial H_z}{\partial x} = \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \end{cases} \quad (24)$$

TM 波:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \\ -\frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \end{cases} \quad (25)$$

电磁波在自由空间传播时,由于波阻抗的存在,电场强度和磁场强度在数值上有如下关系: $E = \eta_0 H = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} H$, $\eta_0 \approx 377 \Omega$ 。在计算时可对 E 做归一化处理,以便它们有相同的数量级^[16-17]。

完全匹配层(Perfectly matched layer, PML)首先由BERENGER于1994年提出。它在FDTD计算区域截断边界处设置一种特殊的介质层,使入射波无反射地穿过分界面进入PML层。当PML被设置成有耗且有限厚度时,外向波在其中会迅速衰减^[18-19]。

BERENGER采用PML场分量分裂理论,以TM波为例,在PML介质中,假设将电场分量分裂为 E_{zx} 和 E_{zy} 两个子分量,且 E_z 等于两个子分量之和,当 $\sigma_m \neq 0$ 时,方程(25)可改写成以下形式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma_{m,y} H_x = -\frac{\partial (E_{zx} + E_{zy})}{\partial y} \\ \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_{m,x} H_y = \frac{\partial (E_{zx} + E_{zy})}{\partial x} \\ \epsilon \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \\ \epsilon \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} = -\frac{\partial H_x}{\partial y} \end{array} \right. \quad (26)$$

当 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ 且 $\sigma_{m,x} = \sigma_{m,y} = \sigma_m$ 时, PML介质退化为普通有耗介质;当 $\sigma = 0$ 且 $\sigma_m = 0$ 时,式(26)退化为自由空间中的Maxwell方程。同时,PML介质须满足阻抗匹配条件:

$$\frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{\sigma_m}{\mu_0} \quad (27)$$

式中: ϵ_0 和 μ_0 分别为真空的介电常数和真空的磁导率, σ_m 为介质的导磁率。

3.2 均匀介质中电磁波相位变化特征

假设均匀介质的区域为 300×105 个网格,介质四周设置PML吸收层,层的厚度为5个网格。介质电磁参数 $\sigma=0$,介质为无磁性,相对磁导率 $\mu_r=1$,介质的相对介电常数 $\epsilon_r=4$,选取 $E_i(t)=E_0 \sin(\omega t)$ 作为激励源天线,天线的位置为(150, 100),频率选择为 7.5 MHz。设置单元网格的尺寸为 $\Delta s=1$ m,时间步长为 6.67×10^{-9} s。观察介质的 XoY 面上的相位变化特征。计算结果如图1所示。

电磁波从波源位置出发,经过200个时间步数,经过均匀介质后,尚未到达PML吸收层。从图1中可以看出,在第200个时间步时,介质不同位置的相位值不同,由于电磁波是从波源位置往四周传播,介质中的等相位点组成了一个半圆形,相位值的大

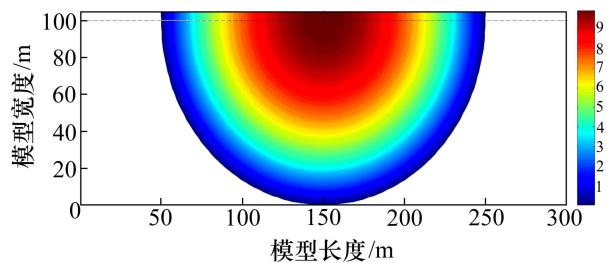


图1 时间步数200时电磁波相位等值线图

Fig. 1 Electromagnetic phase contour map at 200 time step

小从波源位置开始,往四周方向逐渐减小,到达介质对面时刻,相位值为零。在某一时刻,介质中横向连续的位置,它们的相位并不相同,只是它们与波源位置的差值对时间的导数相同。

在图2中,电磁波从波源位置出发的时刻与图1相同,经过300个时间步数后,电磁波到达介质的左右边界,介质中的相位等值线依然是一系列的同心圆。经过300个时间步后,波源位置的相位仍然最大,从波源位置往外逐渐减小,在介质的两端边界处相位值为零。在图2中电磁波经过的区域,区域中与图1相同的各点的相位值已经发生变化,相位值与波源位置的差对时间的导数相同。

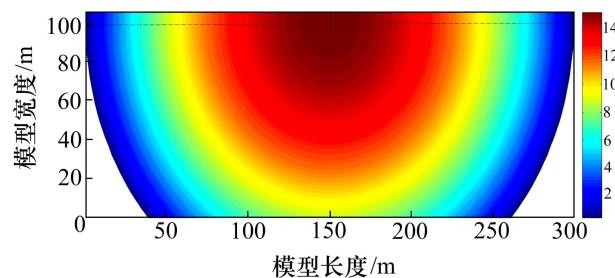


图2 时间步数300时电磁波相位等值线图

Fig. 2 Electromagnetic wave phase contour map at 300 time step

3.3 均匀煤层中电磁波相位变化特征

选定一煤层工作面2101,工作面长300 m,宽105 m,煤层工作面赋存稳定,煤层连续性较好,煤层的相对磁导率 $\mu_r=1$,相对介电常数 $\epsilon_r=4$,电阻率为 $500 \Omega \cdot m$,可视此工作面煤层为均匀煤层。2101工作面的单元网格仍然设置为1 m,工作面四周PML吸收层的厚度为5个单元网格,时间步长为 1×10^{-8} s,天线的频率等参数与上节中的相同,2101工作面的相位等值线如图3所示。

从图3中可以看出,由于设定了时间步长与单元

网格的关系, 电磁波在煤层电介质中经过 300 个时间步长到达了 2101 工作面的两端。在均匀煤层中, 电磁波的相位等值线依然是一系列的同心圆, 不同的是, 与图 2 中的对应位置相比, 电磁波相位的值发生了变化, 相位值较图 2 中对应位置偏大。这说明在导电媒质中, 电磁波的相位常数发生了变化, 相位常数的值要大于其在无耗介质中的值, 同时电磁波的波长变小, 速度也比无耗介质中低。

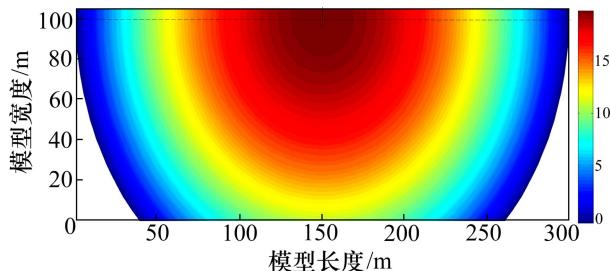


图 3 时间步数 300 时煤层相位等值线图

Fig. 3 Coal phase contour map at 300 time step

4 相位层析成像实例

4.1 陷落柱相位系数层析成像

选定模拟发射天线的中心频率为 5 MHz, 煤层工作面模型的单元网格为 1 m, 工作面四周 PML 吸收层设置 5 个网格, 时间步长为 1×10^{-8} s。工作面长 200 m, 宽 100 m, 煤层的相对磁导率 $\mu_r=1$, 相对介电常数 $\epsilon_r=9$, 电阻率为 500 $\Omega\cdot\text{m}$ 。模型中间发育一相对介电常数 $\epsilon_r=18$, 电阻率为 20 $\Omega\cdot\text{m}$ 的圆形陷落柱。陷落柱位于煤层工作面中间位置, 其形状是直径为 40 m 的圆形, 模型如图 4 所示。

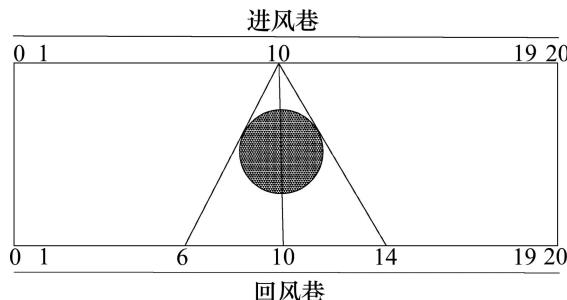


图 4 低阻陷落柱模型

Fig. 4 Low resistance subsided column model

表 1 所列在进风巷 10 号点发射时, 回风巷各个记录号点的相位值与发射点的差值。从表 1 中可以看出, 在 0~6 号点之间, 随着记录点号的增加, 相位差

值逐渐减小, 说明电磁波在传播过程中, 受工作面内陷落柱的影响较小。6 号点首先接收到进风巷发射过来的电磁波, 随着时间的推移, 直至 0 号点接收到进风巷透射过来的电磁波。由于 0 号点接收到电磁波的时间延迟于 6 号点, 因此 0~6 号点电磁波的相位差呈现逐渐减小的趋势。14~20 号点之间的相位差值呈现的趋势与 0~6 号点之间的刚好相反。

表 1 回风巷接收点与进风巷发射点相位差

Table 1 Phase difference between returning airway receiver points and entering airway emission point

Emission point	Reciver point	Phase difference	Emission point	Reciver point	Phase difference
	0	14.14		11	18.90
	1	13.45		12	17.60
	2	12.81		13	16.50
	3	12.21		14	10.78
10	4	11.67	10	15	11.18
	5	11.18		16	11.67
	6	10.78		17	12.21
	7	16.50		18	12.81
	8	17.50		19	13.45
	9	18.90		20	14.14
	10	19.40			

在 7~10 号点之间, 随着记录点号的增加, 相位差值逐渐增大, 说明电磁波在传播过程中, 受工作面内陷落柱的影响越来越严重。由于陷落柱的电磁参数不同于煤层, 陷落柱的相位系数也与煤层工作面的不同, 从而导致接收到进风巷透射过来的电磁波时其相位差值变大。10 号点与进风巷的发射点位置相对, 其相位差值最大。由于两边测点受陷落柱的影响较小, 其相位差值也同时变小。10~13 号点之间的相位差值呈现的趋势与 7~10 号点之间的刚好相反。

利用 ART 图像重建算法对陷落柱相位系数进行层析成像, 相位系数单位采用(rad/m)表示, 图 5 为陷落柱相位系数层析成像图。

从图 5 可以看出, 异常体在煤层工作面的位置与图 2 模型图中陷落柱的位置基本相符, 图 5 中阴影图像即为反演出来的陷落柱相位系数层析成像图。可以看出, 反演出的陷落柱位置与模型中异常体的实际位置吻合得较好, 在陷落柱的边缘位置与实际模型有些许差别。受反演算法的影响, 在陷落柱相位系数层析成像图中, 陷落柱内部的相位系数存在少许差别, 但总体分布较为均匀。陷落柱边缘部分的相位系数与内部差别稍大, 可解释为电磁波在工作面和陷落柱边界处的界面效应引起。

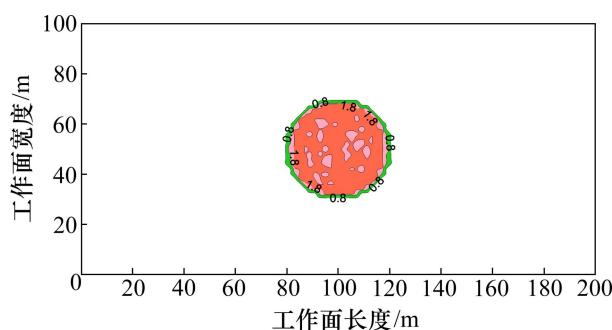


图 5 陷落柱相位系数层析成像

Fig. 5 Collapse column phase coefficient tomography

从陷落柱相位系数层析成像图中可以看出, 相位系数成像方法可以用来反演地质异常体。

4.2 火成岩侵入区相位系数层析成像

选定模拟发射天线的中心频率为 5 MHz, 将煤层工作面模型的单元网格设置为 1 m, 工作面四周 PML 吸收层设置 5 个网格, 时间步长设置为 1×10^{-8} s, 工作面长 200 m, 宽 100 m, 煤层的相对磁导率 $\mu_r=1$, 相对介电常数 $\epsilon_r=9$, 电阻率为 500 $\Omega\cdot\text{m}$ 。模型中间发育一相对介电常数 $\epsilon_r=15$, 电阻率为 3 000 $\Omega\cdot\text{m}$ 的火成岩侵入区。火成岩侵入区的形状近似矩形, 位于煤层工作面中间位置。火成岩侵入区长 60 m, 宽 30 m, 侵入区的形状近似矩形, 火成岩侵入区模型如图 6 所示。

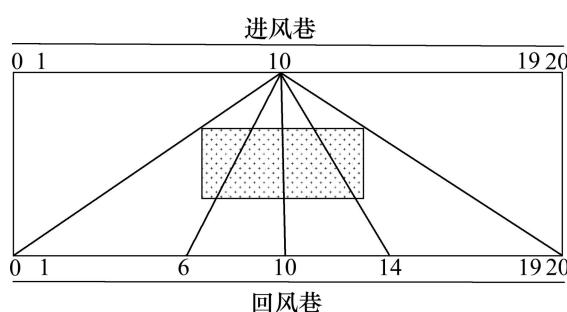


图 6 火成岩侵入区模型

Fig. 6 Igneous intrusion model

表 2 所示为在进风巷 10 号点发射时, 回风巷各个记录号点的相位值与发射点的差值。从表 2 中可以看出, 在 0~4 号点之间, 射线路经的长度逐渐减小, 火成岩侵入区的影响逐渐增加, 相位差值呈现逐渐减小的趋势。由于火成岩的影响, 相位差值比表 2 中相同接收点的值大, 相位差值逐渐减小主要源于射线路径的影响。说明电磁波在透射过程中, 受工作面内火成

岩侵入体的影响, 相位差减小的趋势下降。16~20 号点之间的相位差值呈现的趋势与 0~4 号点之间的刚好相反。

表 2 回风巷接收点与进风巷发射点相位差

Table 2 Phase difference between returning airway receiver points and entering airway emission point

Emission point	Receiver point	Phase difference	Emission point	Receiver point	Phase difference
	0	14.26		11	11.38
	1	13.62		12	11.67
	2	13.14		13	11.84
	3	12.71		14	12.20
10	4	12.47	10	15	12.28
	5	12.28		16	12.47
	6	12.20		17	12.71
	7	11.84		18	13.14
	8	11.57		19	13.62
	9	11.38		20	14.28
	10	11.33			

在 5~10 号点之间, 随着记录点号的增加, 相位差值也呈现逐渐减小的趋势。电磁波在透射过程中, 受火成岩侵入体的影响越来越大, 各接收点的相位差值减小的趋势变缓, 趋势小于 0~4 号点之间各接收点的。

10~15 号点之间的相位差值呈现的趋势与 5~10 号点之间的刚好相反。

利用 ART 图像重建算法对火成岩侵入区相位系数进行层析成像, 相位系数单位采用(rad/m)表示, 图 7 所示为火成岩侵入区相位系数层析成像图。

从图 7 可以看出, 火成岩侵入体在煤层工作面的位置与图 6 中的位置基本相符, 图中的阴影图像即为

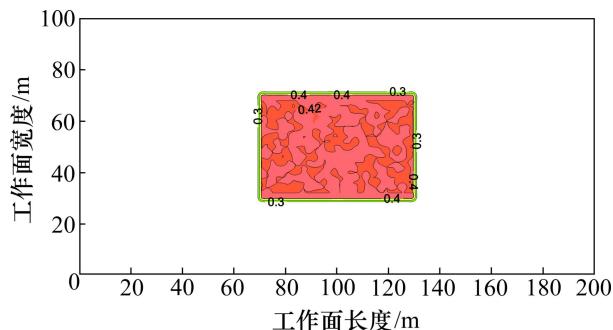


图 7 火成岩侵入区相位系数层析成像

Fig. 7 Igneous intrusions area phase coefficient tomography

反演出来的火成岩侵入区相位系数层析成像图。可以看出, 反演出的火成岩侵入区位置与模型中火成岩侵入区的实际位置吻合的较好。图中阴影区域内部的相位系数分布整体偏高, 高于阴影区域边缘部分的相位系数。由于工作面被离散成长宽相等的矩形, 与火成岩侵入体的形状相似, 阴影区域的边缘部分较为平滑。受网格插值的影响, 阴影区域内部的相位系数分布不是很均匀, 但差别较小。火成岩侵入体为高阻异常体, 反演出来的相位系数较小, 小于低阻陷落柱的相位系数。侵入体边缘部分的相位系数与内部的有些许差别, 可解释为电磁波在工作面和侵入体之间的界面效应引起。由于火成岩侵入体的相位系数变小, 其边缘部分的值同样小于断层和陷落柱边缘的相位系数。

从火成岩侵入体相位系数层析成像图中可以看出, 受火成岩侵入体的电阻率和介电常数的影响, 相位系数的分辨率随之降低, 但层析成像依然可以反映出侵入体在工作面内的位置。

4 结论

1) 坑道两边的发射点和接收点之间存在一定的相位差, 由于异常体和煤层的相位系数不同, 导致接收点与发射点之间的相位差发生变化, 使之成为相位系数层析成像的基础。利用代数重建算法可以重建煤层中异常体的相位系数层析成像图。

2) 煤层工作面内的地质异常体会对巷道内各接收点的时间造成一定的延迟, 其影响随着异常体的规模、电阻率和介电常数的不同有所差异, 进而影响两条巷道内发射点和接收点之间的相位差。射线路经和异常体大小对相位差值的影响在斜率上有所不同, 电阻率的高低对相位差值的影响较大。

3) 陷落柱和火成岩侵入区相位系数层析成像图在工作面内的位置与模型中的实际位置基本相符, 由于两种异常体的介电常数和电阻率不同, 计算出来的相位系数也不相同, 受电磁波在媒质分界面的影响, 异常体边缘部分的相位系数与异常体内部不再相同。由计算结果知, 相位系数层析成像可以用来反演煤层工作面内的地质异常体。

REFERENCES

- [1] 车树成, 张荣伟. 煤矿地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
CHE Shu-cheng, ZHANG Rong-wei. Coal mine geology [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2006.
- [2] 储绍良. 矿井物探应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
CHU Shao-liang. Mine geophysical applications [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1995.
- [3] 刘天放, 李志聃. 矿井地球物理勘探[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
LIU Tian-fang, LI Zhi-dan. Mine geophysical [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1993.
- [4] ZHOU C G, LIU L B, LANE J W. Nonlinear inversion of borehole radar tomography data to reconstruct velocity and attenuation distribution in earth materials [J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 47(3/4): 271–284.
- [5] YU L, CHOUTEAU M, BOERNEA D E, WANG J. On the imaging of radio-frequency electromagnetic data for cross-borehole mineral exploration [J]. Geophys J Int, 1998, 135: 523–541.
- [6] JOHNSON T C, ROUTH P S, KNOLL M D. Fresnel volume georadar attenuation-difference tomography [J]. Geophys J Int, 2005, 162: 9–24.
- [7] 董守华, 王琦. 层析成像在巷道无线电波透视法中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(5): 579–582.
DONG Shou-hua, WANG Qi. Application of tomography in radio wave tunnels perspective [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003(5): 579–582.
- [8] 刘鑫明, 刘树才, 姜志海, 李秀晗. 有耗媒质中任意入射角电磁波传播衰减特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(6): 96–99, 103.
LIU Xin-ming, LI Shu-cai, JIANG Zhi-hai, LI Xiu-han. Study on propagation attenuation features of random incidence angle electromagnetic wave in lossy medium [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(6): 96–99, 103.
- [9] 宋雷, 刘天放, 黄家会, 李海鹏. 介质随机扰动条件下的层析反演算法[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(3): 1098–1103.
SONG Lei, LIU Tian-fang, HUANG Jia-hui, LI Hai-peng. Tomography inversion arithmetic for stochastic disturbance in media [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(3): 1098–1103.
- [10] 杨曦, 潘和平. 井间电磁场时域有限差分数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 573–582.
YANG Xi, PAN He-ping. The simulation of cross-hole electromagnetic fields using FDTD method [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(2): 573–582.
- [11] 郭继如. 无线电波坑透数据处理系统的设计[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 24(3): 50–54.
GUO Ji-ru. Radio wave perspective data processing system design [J]. Progress in Geophysics, Coal Geology & Exploration, 1999, 24(3): 50–54.
- [12] 朱希安, 尹尚先, 范守成. 无线电波透视法及其应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(5): 563–566.
ZHU Xi-an, YIN Shang-xian, YUAN S C. Radio wave

- penetration method and application [J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2002, 21(5): 563–566.
- [13] 阎海珠, 戚春前, 赵胜利. 复杂条件下无线电波透视技术的应用[J]. *中国煤田地质*, 2004, 16(6): 58–60.
- YAM Hai-zhu, QI Chun-qian, ZHAO Sheng-li. Radio Under complex conditions perspective technology of radio waves [J]. *China Coal Geology*, 2004, 16(6): 58–60.
- [14] 刘广亮, 于师建. 基于质心频移的无线电波透视层析成像[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(2): 583–587.
- LIU Guang-liang, YU Shi-jian. Radio wave penetration tomography based on the centroid frequency downshift [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(2): 83–587.
- [15] 曹俊兴. 双频电磁波电导率层析成像反演[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(Z1): 199–205.
- CAO Jun-xing. Conductivity tomography using dual frequency EM data [J]. *Chinese J Geophys*, 2001, 44(Z1): 199–205.
- [16] 冯恩信. 电磁场与波[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
- FENG En-xin. Electromagnetic fields and waves [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1999.
- [17] 候杰昌. 电磁波传播原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1991.
- HOU Jie-chang. Principle of electromagnetic wave propagation [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1991.
- [18] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- YANG Wen-cai. *Geophysical inversion theory and method* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.
- [19] 于业斌. 高阻煤层电磁波传播特性及成像方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- YU Ye-bin. Study on the characteristics and tomography of electromagnetic wave propagate in high resistivity coal seam [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.
- [20] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- GE De-biao, YAN Yu-bo. Electromagnetic finite difference time domain method [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2005.
- [21] 贾元真. 各向异性媒质中电磁波传播规律研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2008.
- JIA Yuan-zhen. Research on propagation of electromagnetic waves in anisotropic media [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2008.
- [22] 汤井田, 周 聰, 肖 晓. 复杂介质条件下CSAMT最小发收距的选择[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(6): 1681–1693.
- TANG Jing-tian, ZHOU Cong, XIAO xiao. Selection of minimum transmit-receive distance of CSAMT on complicated media [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(6): 1681–1693.

(编辑 彭超群)