

探地雷达单轴各向异性介质正演模拟及偏移成像

高 丽¹, 侯 强¹, 王 改 芳², 舒 霖¹

(1. 中国地质大学(武汉) 机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074 2. 中国地质大学(武汉) 计算机学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:针对介质各向异性条件下探地雷达成像分辨率不高的问题,采用各向异性条件下的 FDTD 正演公式,对单轴各向异性介质模型进行正演模拟计算,然后对模型数据进行克希霍夫偏移成像。通过对比偏移处理前后的剖面,采用偏移处理后,剖面中的地下界面、异常特征得到了很好的收敛归位效果,大大提高了探地雷达成像的分辨率,对实测数据的处理结果亦验证了该方法的正确性。

关键词:探地雷达; 介质各向异性; 时域有限差分; 偏移成像

中图分类号: P631

文献标志码: A

探地雷达反射成像是观测地下物质的一种重要方法,已在石油勘探和水利水电工程地质勘探中得到深入研究和广泛应用。在成像解译时多采用地层各向同性假定,但实际地层中广泛存在着各向异性,如果将各向异性地层简化成各向同性地层,进行各向同性条件的成像尤其是精确成像时会导致图像分辨率低,要得到分辨率更高的图像,就应考虑各向异性条件下的成像。地层各向异性的正演模拟是研究各向异性条件下成像的出发点,其中时域有限差分法(FDTD)是一种非常有效的数值模拟方法^[1-2]。时域有限差分以差分原理为基础,直接从描述电磁场普遍规律的麦克斯韦旋度方程出发,将其转化为差分方程组,在一定的体积和一段时间上对连续电磁场的的数据取样,它能直接进行时域计算,并给出丰富的电磁场的时域信息,能清楚地反映一些复杂的物理过程^[3-4]。在各向异性介质成像中,点目标是具有典型意义的成像靶体,因为点目标的特征信号在探地雷达截面(RCS)上的范围远大于目标的尺寸,所以对目标进行成像非常重要,在地下目标勘探中这项技术称为偏移。偏移处理目前已成为探地雷达后处理的重要手段之一,它是用波动方程及其给定的初始条件和边界条件,通过反向外推波场来重建地下地质构造。偏移处理的目的是使地下的界面在雷达截面上真实归位,使地下界面得到真实和明确反

映,从而更有利于探地雷达剖面的地质解释。本文将雷达剖面的正演合成与偏移成像两者结合起来,即在正演模拟的基础上进行偏移处理,以生成地质构造的真实图像。

1 各向异性时域有限差分

1.1 各向异性地层模型

地层的电各向异性主要分为两大类:一类是根据介质电导率张量结构,另一类是从观察角度出发又可分为微观各向异性和宏观各向异性。根据介质电导率张量结构,单轴介质结构的电导率形式如下:

$$\overline{\overline{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_v \end{bmatrix}$$

式中, σ_h 表示水平电导率, σ_v 表示垂直电导率。

它主要表现在水平地层和垂直井眼电各向异性中。由于探地雷达研究的是水平地层,所以本文的研究属于单轴介质结构的电各向异性。

1.2 各向异性时域有限差分原理

麦克斯韦对大量的实验结果及基本概念进行了数学加工和推广,在提出新的假设后归纳出静止的连续

收稿日期:2013-08-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金优秀青年基金(2013199041)

作者简介:高 丽,女,硕士研究生,主要从事雷达信号处理。E-mail: gl_2011_good@163.com

通讯作者:侯 强,男,副教授,硕士生导师,主要从事信号与信息处理的学科教学工作。E-mail: houq2008@126.com

媒质中时变电磁场所满足的一组基本方程(微分形式)为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{J}_m \\ \nabla \times \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, \vec{E} 是电场强度, V/m ; \vec{D} 是电通密度, C/m^2 ; \vec{H} 是磁场强度, A/m ; \vec{B} 是磁通密度, Wb/m^2 ; \vec{J} 是电流密度, A/m^2 ; \vec{J}_m 是磁流密度, V/m^2 。

在二维 TE 波的情况下, 将麦克斯韦方程运用中心差商离散, 得出二维时域有限差分方程, 也就是我们需要的探地雷达正演模拟方程为

$$E_z^{n+1}(i, j, k + \frac{1}{2}) = CA(m) \cdot E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2}) + CB(m) \times \left[\frac{H_y^{n+1}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2})}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})}{\Delta y} \right] \quad (2)$$

其中, $m = (i, j, k + \frac{1}{2})$, $CA(m) = \frac{1 - \frac{\sigma_{zz}(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}}{1 + \frac{\sigma_{zz}(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}}$,

$CB(m) = \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon(m)}}{1 + \frac{\sigma_{zz}(m)\Delta t}{2\varepsilon(m)}}$, ε 为介电常数; $\Delta x, \Delta y, \Delta t$ 分别为差分空间步长和时间步长。

2 克希霍夫积分偏移成像原理

根据波动方程, 围绕观测点 $p(x_p, y_p)$ 取一个闭合曲面, 该闭合曲面上半面取地表观测面 S_1 , 下半面取无限大半球面, 则 p 点的电场强度 $E(x_p, y_p, t)$ 可以表示为

$$E(x_p, y_p, t) = \frac{1}{2\pi g} \iint_{S_1} \left[\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) - \frac{1}{vr} \frac{\partial r}{\partial n} \frac{\partial}{\partial t} \right] \times E[x, y, t - \frac{r}{v}] ds_1 \quad (3)$$

式中, $r = [(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2]^{\frac{1}{2}}$, n 为地表面的法线方向, $\frac{\partial r}{\partial n} = -\frac{\partial r}{\partial z}$ (z 垂直地面向下)。

偏移处理中, 测量数据定义在 $t = 0$ 平面上, 地下

不均匀点(反射或绕射)的电场为带球, 在时间上称 $z = 0$ 平面上记录的波场超前 r/v , 而不是滞后 r/v , 为此必须将 $E[x, y, t - \frac{r}{v}]$ 改写成 $E[x, y, t + \frac{r}{v}]$, 所以式(3)变换为

$$E(x_p, y_p, t) = \frac{1}{2\pi g} \iint_{S_1} \left[\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) - \frac{1}{vr} \frac{\partial r}{\partial n} \frac{\partial}{\partial t} \right] \times E[x, y, t + \frac{r}{v}] ds_1 \quad (4)$$

3 应用实例

3.1 FDTD 正演模拟结果

图 1 为一个两层介质模型, 上下两部分分别为泥岩和砂岩, 电性参数分别为: $\varepsilon_{r1} = 9.0, \sigma_1 = 0, \mu_1 = 1.0$; $\varepsilon_{r2} = 3.0, \sigma_2 = 0, \mu_2 = 1.0$ 。

两层介质中各埋设一个理想金属管, 采用时域有限差分算法正演方程, 结合吸收边界条件, 对图 1 所示的模型进行正演数值模拟。

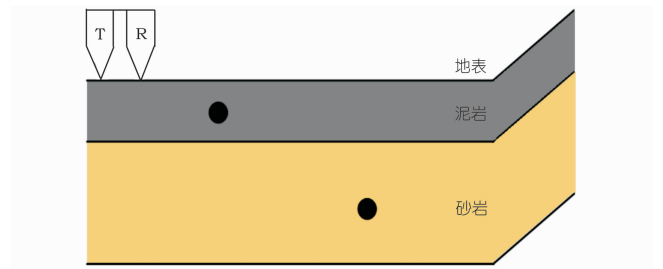


图 1 各向异性介质模型

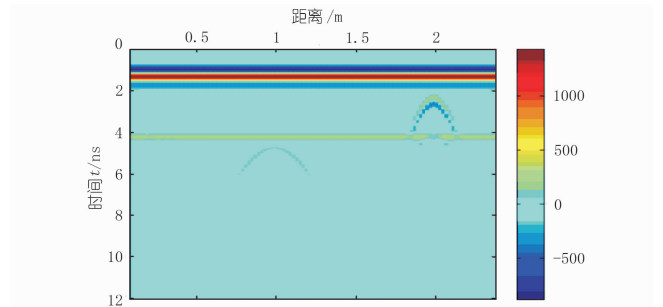


图 2 模型正演结果图像

正演结果如图 2 所示, 道间隔为 0.02 m, 共有 115 道, 采样时间间隔为 5×10^{-3} ns, 激励源为 900 MHz 雷克子波。

3.2 正演偏移结果

对正演计算得到的剖面进行克希霍夫积分偏移, 金属管形成的绕射波得到了很好的归位, 图 3 为克希霍夫积分偏移成像结果。

3.3 实测探地雷达数据

图 4 为一段探地雷达实测数据, 剖面长度为 18 m, 道间距 0.2 m, 一共有 91 道数据, 每道采样点数

401 个,每道时长 12 ns,探地雷达的频率为 60 MHz 到 8.06 GHz。从图 4 可以看出,实测探地雷达激励为雷克子波的时谐激励源。

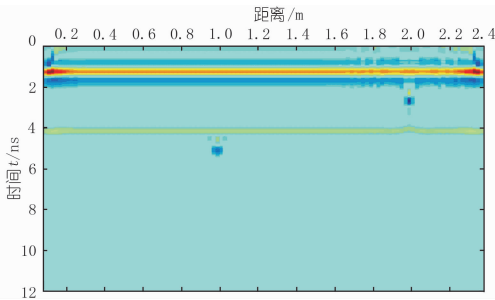


图 3 克希霍夫积分偏移成像结果

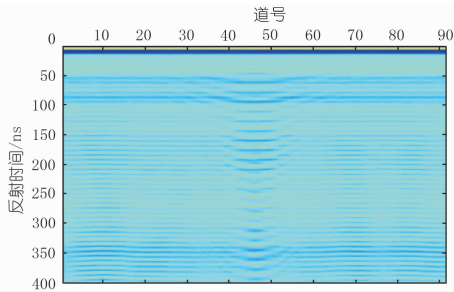


图 4 探地雷达实测数据

经过背景去噪、去直流、信号饱和度和校正、增益恢复、反褶积、带通滤波器、静校正等预处理后,虽然异常特征得到了增强,但是空间聚焦较差,见图 5。

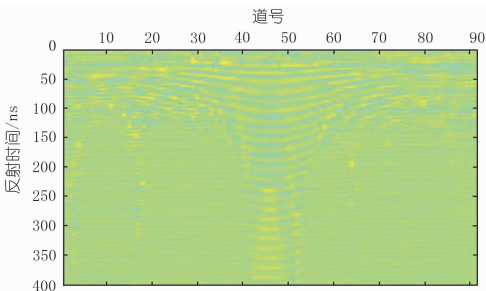


图 5 带通滤波后探地雷达数据剖面

对预处理后的剖面进行克希霍夫偏移成像处理,得到的成像结果如图 6 所示,从中可以看出,异常空间的聚焦效果得到了很大程度的提高,双曲线都归位到 43 道到 47 道,与预埋的异常体位置吻合。

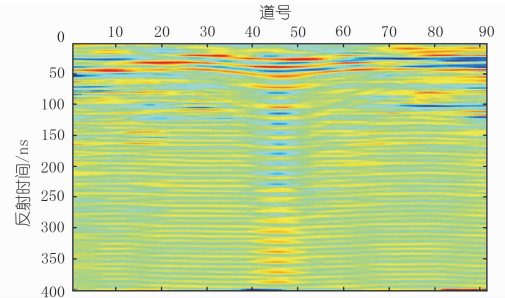


图 6 实测数据的克希霍夫积分偏移成像结果

4 结语

本文对有限差分正演模型及实测探地雷达资料进行了克希霍夫偏移成像试验,证明了偏移处理能将雷达波能量归位到其空间实际位置,获取地下真实地层结构图像,更加精确地反映异常的真实位置、大小,有利于进行探地雷达剖面的地质解释。

参考文献:

- [1] 王道平,况晓静,范程华,等.探地雷达的时域仿真方法研究[J].合肥师范学院学报,2012,30(6):32-34.
- [2] 肖加奇,张国艳,洪德成,杨善德.层状各向异性地层中三维感应测井响应快速计算及资料处理[J].地球物理学报,2013,56(2):696-706.
- [3] Young S S. A collection formulation of wave equation migration[J]. Computer Aided Seismic Analysis and Discrimination, 1981, 11(19):47-53.
- [4] Goldman D. Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology[J]. Geophysics, 1994, 59(2):224-232

(编辑:赵凤超)

Forward simulation and inversion imaging of uniaxial anisotropic media using ground penetrating radar

GAO Li¹, HOU Qiang¹, WANG Gaifang², SHU Lin¹

(1. Faculty of Mechanical & Electronic Information, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China; 2. College of Computer Science, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China)

Abstract: For obtaining accurate imaging of ground penetration radar under condition of uniaxial anisotropic media, on the basis of FDTD forward formula under uniaxial anisotropy, the forward simulation of uniaxial anisotropic media is carried out, and then the model data is processed by Kirchhoff migration imaging. Through comparing section plane before and after migration treatment, it is discovered that the underground interface in section and abnormal points are treated with satisfactory convergence effect by using migration image and the resolution ratio of ground penetrating radar imaging is improved greatly. The treatment effect for practical project also proved the effectiveness of the proposed method.

Key words: ground penetrating radar; anisotropic media; finite difference on time domain; relative migration imaging