

介质含水率与探地雷达信号关系数值模拟

方慧^{1,2}, 魏文博¹, 李玉堂³

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000; 3. 河北省地球物理勘查院, 河北廊坊 065000)

摘要: 采用时间域有限差分技术实现了探地雷达三维正演计算, 并以此对介质含水率与探地雷达信号关系开展了数值模拟研究。物理模型实验与数值模拟计算结果的对比分析证明了数值模拟的有效性。

关键词: 探地雷达; 介质含水率; 数值模拟

中图分类号: P631.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2009)05-0533-03

在实际工作中, 常常需要了解介质含水率随空间或时间变化的情况。如在滑坡等地质灾害的调查、海侵范围和程度调查、公路及机场跑道质量评价、建筑地基状况的评估及种植业管理等方面, 都需要了解不同介质如土壤、岩石、沥青、混凝土等材料的含水状况。由于水既具有较高的介容率, 又是极性分子, 对高频电磁波信号的传播特征影响很大, 使得应用探地雷达技术检测介质含水率具有良好的地球物理前提, 加之探地雷达技术具有非接触、连续测量、效率高等特点, 因此成为近年来探地雷达新的应用方向。

从探地雷达测量资料中反演出介质含水情况, 首先要建立介质含水率的变化与雷达波传播特征间的定量关系, 对此可以采用物理实验与数值模拟相结合的技术路线来实现。物理模型实验是基础, 是检验数值模拟结果是否正确的最可靠标准; 数值模拟技术更加方便灵活。笔者开展了介质含水率与探地雷达信号关系物理模拟和数值模拟研究, 本文是数值模拟研究的初步结果。

自然条件下, 水赋存于介质内部的孔隙中, 而且当非饱和状态下, 一部分孔隙含水, 另一部分孔隙则充填为空气。因此, 开展介质含水率数值模拟时, 要求正演程序能实现均匀介质中随机分布有不同比例的自由水或空气等“杂质”, 而目前常见的正演软件均假设介质是均匀的, 无法模拟介质含水状态, 所以在研究中, 首先采用时间域有限差分法编制了探地雷达三维正演软件, 并通过与物理模型实验数据进行对比分析, 检验了数值模拟结果的可靠性。

1 基本理论

实验表明, 所有的电磁现象都服从麦克斯韦方程, 在时间域中, 麦克斯韦方程有如下形式^[1]

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J};$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho; \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0.$$

在导电介质中, 对于单色电磁波, 利用 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ 的关系及场矢量 $\mathbf{E} = \mathbf{E}(r) e^{-i\omega t}$, $\mathbf{B} = \mathbf{B}(r) e^{-i\omega t}$, 很容易推导出频率域波动方程的解为

$$\begin{cases} \mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-sr} e^{i(kr - \omega t)}, \\ \mathbf{B} = \mathbf{B}_0 e^{-sr} e^{i(kr - \omega t)}. \end{cases}$$

其中 k 和 s 与介质物性参数和电磁波频率有关。值得指出的是, 水分子在交变电场情况下容易被极化, 偶极矩随交变电场不断改变方向。受分子的惯性影响, 偶极子的取向需要一定时间(驰豫时间), 出现极化滞后现象, 即电场和感应偶极矩之间出现了相位差, 这时水的介电常数实际为复数, 即 $\epsilon = \text{Re}(\epsilon) + i \text{Im}(\epsilon)$ 。此时, 上式中 k 和 s 分别为

$$k = \sqrt{\epsilon' \mu \omega} \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\text{Im}(\epsilon)\omega + \sigma}{\text{Re}(\epsilon)\omega}\right)^2} + 1},$$

$$s = \sqrt{\epsilon' \mu \omega} \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\text{Im}(\epsilon)\omega + \sigma}{\text{Re}(\epsilon)\omega}\right)^2} - 1}.$$

因子 s 决定振幅随传播距离的衰减速度, 故称 s 为衰减系数。电磁波在介质中的传播速度 v 由因子 k 决定:

$$v = \frac{\omega}{k} = 1 \left| \sqrt{\epsilon' \mu \omega} \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\text{Im}(\epsilon)\omega + \sigma}{\text{Re}(\epsilon)\omega}\right)^2} + 1} \right|^{-1}.$$

收稿日期: 2009-02-18

基金项目: 国土资源部“百名优秀青年科技人才计划”资助

可以看出,介电常数的实部为介质的固有极化,虚部为介电损耗,并与导电率合并成为介质的有效导电率。实验表明介电常数的实部和虚部还随频率变化,变化规律可以用 Debye 公式^[2]

$$\varepsilon(f) = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) / [1 + i(f/f_{rel})]$$

来描述,其中, ε_s 、 ε_{∞} 为直流和极高频状态下介质的介电常数, f_{rel} 为弛豫频率。对于 25℃ 条件下的自然水,其 Debye 参数为 $\varepsilon_s = 80.1$, $\varepsilon_{\infty} = 4.2$, $f_{rel} = 17.1$ GHz^[0]。根据 Debye 模型可以计算出,当雷达波频率为 1 GHz 时,由于水分子的弛豫作用产生的附加电导率约为 0.265 s/m,这与自然状态下常见物质的电导率在同一量级或更高一些,因此在介质含水率模型正演计算中,必须考虑水分子所产生的附加电导率的影响。

2 数值模拟的实现

笔者研究采用时间域有限差分法实现探地雷达三维正演计算。时间域有限差分法最早由 Yee 于 1966 年提出,是一种对麦克斯韦方程进行离散化的简单实用技术^[3]。Yee 巧妙地在剖分单元内使电场分量与磁场分量在时间和空间上相互分离,利用中心差商代替微商把连续变量离散化,使含时间变量的麦克斯韦旋度方程离散以后构成显式差分方程,从而可以在时间上迭代求解,而不需要进行矩阵求逆运算。由给定相应电磁问题的初始值,应用时间域有限差分法就可以逐步推进地求得以后各个时刻空间电磁场的分布。下面给出其中 2 个时间域有限差分法方程:

$$E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) = \frac{2\varepsilon(i+1/2, j, k) - \sigma(i+1/2, j, k)\Delta t}{2\varepsilon(i+1/2, j, k) + \sigma(i+1/2, j, k)\Delta t} \cdot E_x^n(i+1/2, j, k) + \frac{2\Delta t}{2\varepsilon(i+1/2, j, k) - \sigma(i+1/2, j, k)\Delta t} \cdot \left[\frac{H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2, k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k-1/2)}{\Delta z} \right],$$

$$H_x^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) = H_x^{n-1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - \frac{\Delta t}{\mu(i, j+1/2, k+1/2)} \cdot \left[\frac{E_z^n(i, j+1, k+1/2) - E_z^n(i, j, k+1/2)}{\Delta y} - \frac{E_y^n(i, j+1/2, k+1) - E_y^n(i, j+1/2, k)}{\Delta z} \right].$$

实际计算中,根据前一时刻的电磁场 (E_x^n 、 E_y^n 、 E_z^n 、 $H_x^{n+1/2}$ 、 $H_y^{n+1/2}$ 和 $H_z^{n+1/2}$), 求出下一时刻的磁场 $H_x^{n+1/2}$ 、 $H_y^{n+1/2}$ 和 $H_z^{n+1/2}$, 根据求得的磁场再计算下

一时刻的电场 E_x^{n+1} 、 E_y^{n+1} 和 E_z^{n+1} 。

3 数值模拟结果分析

为检验数值模拟技术的有效性,特地选择他人完成的物理模型实验结果作为参考模型。法国学者 S. Lauren 为研究混凝土含水率变化与介质等效介电常数及雷达波传播特性的关系进行了物理实验^[4]。实验模型为立方体,长和宽均为 25 cm,高为 7 cm。雷达天线放在模型的上方,天线主频为 1.5 GHz。模型的底面放在一金属板上,以使雷达波产生全反射。实验结果得到了介质等效介电常数、雷达波幅值及传播速度随介质含水率变化的关系曲线。

为了模拟上述物理实验结果,数值模型设计为由相对介电常数 (ε_r)、电导率 (σ) 横向均匀的三层介质组成(图 1)。其中第二层介质的相对介电常数和厚度与物理模型相同,分别取 $\varepsilon_{r2} = 4.2$, $h_2 = 7$ cm,雷达天线主频设计为 1.5 GHz。

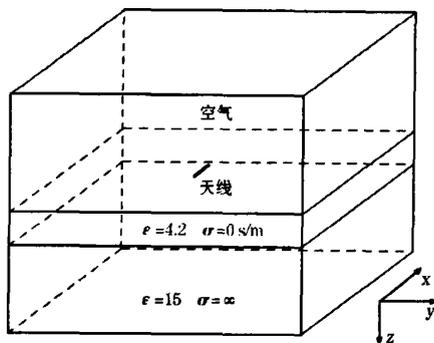


图 1 模型示意

为研究介质孔隙度及含水率变化对雷达信号传播的影响,在第二层均匀介质中加入呈随机分布的异常单元,异常单元所占模型剖分单元的体积百分比为 14%。异常单元中一部分充填水,另一部分充填空气,二者在空间上均为随机分布。填水单元所占模型剖分单元的体积百分比分别为 0, 2%, 4%, ..., 14%, 同时,充填空气的异常单元所占模型剖分单元的体积百分比分别为 14%, 12%, ..., 2%, 0。依据 Debye 模型,在天线主频为 1.5 GHz 的条件下,添水单元的物性参数取为: $\varepsilon_r = 80.1$, $\sigma = 0.1$ s/m; 弛豫作用产生的附加电导率 $\text{Im}(\sigma) = 0.6$ s/m,并假设这些物性参数在雷达波主频附近的小范围内不随频率而改变。

图 2 为反射信号幅值随介质含水率变化情况,图 3 为介质等效介电常数随介质含水率变化情况。可以看出,无论是反射信号幅值,还是根据速度换算

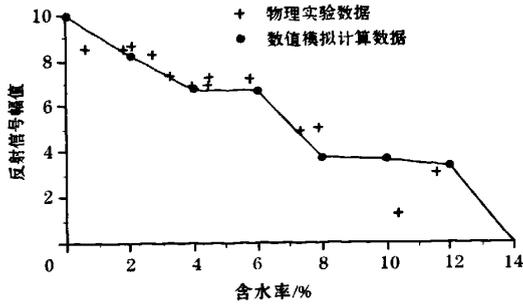


图2 反射信号幅值随含水率变化曲线

出的介质等效介电常数,其数值模拟结果与物理实验数据均吻合较好,说明数值模拟技术能较好地计算出反射信号幅值的相对变化情况。

4 结语

利用时间域有限差分技术实现了探地雷达三维正演计算,通过三维数值模拟计算研究了介质含水率变化对雷达波传播特性的影响规律,得出主要结论如下。

(1) 含水率模型数值模拟结果与物理模型实验结果十分接近,证明了数值模拟方法的可行性和有效性。数值模拟计算技术可以作为研究介质含水率对电磁波传播特性影响规律的有效手段。

(2) 介质中含水率变化会使介质的等效介电常

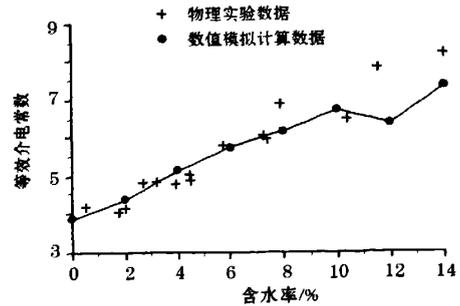


图3 等效介电常数随含水率变化曲线

数、雷达波的传播速度和幅值均发生明显改变。

(3) 在利用数值模拟方法计算含水模型中电磁波信号传播规律时,必须考虑由于水分子的弛豫作用产生的附加电导率的影响。

参考文献:

- [1] 米萨克 N 纳比吉安. 勘查地球物理——电磁法: 第一卷[M]. 赵经祥, 等, 译. 北京: 地质出版社, 1992.
- [2] Daniels D J. Surface Penetrating Radar[M]. Short Run Press Ltd, 1988.
- [3] 葛德标, 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, 2001.
- [4] Laurens S, Balayssac J P, Rhazi J, et al. Non destructive evaluation of concrete moisture by GPR technique: experimental study and direct modeling, International symposium; Non-destructive testing in civil engineering, 2003.

THE NUMERICAL SIMULATION STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN WATER CONTENT OF MEDIA AND GROUND-PENETRATING RADAR SIGNAL

FANG Hui^{1,2}, WEI Wen-bo¹, LI Yu-tang³

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China; 3. Hebei Academy of Geophysical Exploration, Langfang 065000, China)

Abstract: The time domain finite difference technology was adopted to implement the 3D forward computation of the ground-penetrating radar and carry out the numerical simulation of the relationship between the water content of the media and the signal of the ground-penetrating radar. A comparison between the physical model test and the numerical simulation result has proved the effectiveness of the numerical simulation.

Key words: ground-penetrating radar; water content of media; numerical simulation

作者简介: 方慧(1965-),男,博士,教授级高级工程师,主要从事电磁法方法技术研究。