

物 理 勘 探

有耗介质中脉冲响应的研究

沈 飙* 于东海 孙忠良

(东南大学毫米波国家重点实验室)

摘要

沈飚, 于东海, 孙忠良. 有耗介质中脉冲响应的研究. 石油地球物理勘探, 1996, 31(4): 529~534

本文详细论述了一维有耗介质中脉冲响应的正演理论及其模拟技术, 深入研究了导电率、介电常数对脉冲响应的影响, 并以平面脉冲电磁波在一维介质中传播的理论为基础编制了脉冲响应的仿真模拟软件, 最后用实际模型验证了该模拟技术的正确性和可靠性。

主题词 电磁波 脉冲响应 有耗介质 正演模拟

ABSTRACT

Shen Biao, Yu Donghai and Sun Zhongliang. A research on pulse responses in loss medium. OGP, 1996, 31(4): 529~534

Forward theory and modeling of pulse responses in one-dimension loss medium is described detailedly. The influence of conductivity and dielectric constant upon pulse response is analysed in detail. On the basis of propagation theory of plane pulse electromagnetic wave in one-dimension medium, we have developed the simulation softwares of pulse responses. Model proves this simulation technique correct and feasible.

Subject heading: electromagnetic wave, pulse response, loss medium, forward modeling

引言

电磁脉冲测量对地下介质的地电特性和地下结构具有较强的垂向和横向分辨率。因此, 它已广泛应用于各类工程勘探中。但由于测量深度和图象剖面质量受介质导电率的影响, 使电磁脉冲测量技术的应用受到一定范围的限制。为此, 深入研究有耗介质中脉冲电磁波的传播特性以及正演模拟技术, 对于正确利用电磁脉冲测量技术和合理解释脉冲电磁数据显得十分重要。以往, 对电磁脉冲的正演模拟技术的研究只局限于在低耗或无耗介质中讨论电磁波的动力学特性, 这对于一般工程勘探的数据分析和解释起到了有益的指导作用。但在许多实际

* Shen Biao, Electronic Research Division of Fourth Department, Southeast University, Nanjing City, Jiangsu Province, Postcode: 210096

本文于1995年7月20日收到。

本项目由江苏省自然科学基金资助。

物 质 地 球 物 理 勘 探

工程应用中,研究有耗介质中脉冲电磁波的传播规律及其正演模拟技术更具有实际意义和工程应用价值。

本文以一维有耗介质为模型,研究了平面电磁波脉冲响应的正演模拟技术,并用实际模型验证了该仿真模拟技术的正确性和可靠性。

基 本 理 论

一维介质中电磁波的麦克斯韦尔方程

$$\frac{d^2\mathbf{E}(z)}{dz^2} = -K^2\mathbf{E}(z) \quad (1)$$

式中: \mathbf{E} 为电场矢量; z 是沿传播方向的距离; K 为波数, 其值为

$$K = \omega\mu\epsilon - i\omega\mu\sigma \quad (2)$$

其中: μ 为磁导率; σ 为导电率; ω 是角频率。由式(1)可得

$$\mathbf{E}(z) = \mathbf{E}_0 e^{\pm iKz} \quad (3)$$

这里 \mathbf{E}_0 为 \mathbf{E} 的初始场强。

假设输入振幅为 1 且具有调谐的平面时间函数电磁波, 则式(3)可写成

$$\mathbf{E}(z, t) = \text{Re}[e^{\pm iKz} \mathbf{E}_0 e^{\pm i\omega t}] \quad (4)$$

式中 t 是传播时间。在实际介质中, 介质的介电常数分为实部与虚部两部分, 即

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$$

由式(1)可写成另一形式的麦克斯韦尔方程

$$\frac{d^2\mathbf{E}(z)}{dz^2} = i\omega\mu\sigma_T\mathbf{E}(z)$$

其中: $K^2 = -i\omega\mu\sigma_T$; σ_T 称为复数导电率, 其值为

$$\sigma_T = \sigma + i\omega(\epsilon' - i\epsilon'') = \sigma + \omega\epsilon'' + i\omega\epsilon' \quad (5)$$

介质的损耗角 $\text{tg}\delta$ 定义为 σ_T 的实部与虚部之比, 即

$$\text{tg}\delta = (\sigma + \omega\epsilon'')/\omega\epsilon' \quad (6)$$

由式(2), 波数 K 可写成复数的另一形式

$$K = \beta - i\alpha \quad (7)$$

式中: β 为相位常数; α 为衰减系数。 α , β 的表达式为

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{1}{2} \mu \epsilon' [(1 + \text{tg}^2\delta)^{1/2} - 1] \right\}^{1/2} \quad (8)$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{1}{2} \mu \epsilon' [(1 + \text{tg}^2\delta)^{1/2} + 1] \right\}^{1/2} \quad (9)$$

将式(7)、(8)、(9)代入式(4), 可得用于正演模拟的电磁波传播方程

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{E}_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t \pm \beta z) \quad (10)$$

在正演计算平面电磁脉冲波传播函数时, 由用户输入介质中各层的导电率和相对介电常数, 计算各层的 α 、 β 以及损耗角。需要说明的是, 由于介质中各层的 α 、 β 均与电磁波频率有关, 因此在实际计算时, 由平面脉冲电磁波作为传输的时域子波, 需分解成频域子波, 然后在频域内计算离散频点在介质各层中的 α 和 β 损耗角 $\text{tg}\delta$ 、反射系数、透射系数以及传输函数。最后, 利用反傅氏变换将频域量转换成时域信号, 获得电场的时域脉冲响应。

正演计算实例

为了进一步说明有耗介质中平面脉冲电磁波的传播规律, 并为分析和解释脉冲电磁数据提供理论依据, 下面给出几组地电模型的正演计算实例。

图1示出了相同导电率(从小到大变化)的两层地电模型中, 不同介电常数对平面脉冲电磁波脉冲响应的影响情况。据图1a和图1b, 我们发现在 $t=0\text{s}$ 处均出现反射电磁脉冲, 这是由空气到介质表面的直达波所产生; 第二个反射电磁脉冲均是介质中第一层与第二层界面的反射波, 其反射幅值及其符号主要取决于各层介质的波数 K , 反射系数 $R = (K_1 - K_2) / (K_1 + K_2)$; 最后获得的总场强均是地表面接收到的各界面的反射信号, 图中出现的其它反射电磁脉冲均是多次波。

对比图1a与图1b可以看出: ①图1a中反射波无明显的拖尾部分, 而图1b有较大的拖尾, 这主要与介质的衰减有关, 因为平面脉冲电磁波在有耗介质中传播时, 电磁波以 $e^{-\alpha t}$ 衰减, 而 α 与损耗角以及相对介电常数有关; ②在相同导电率的情况下, 不同介电常数的电磁波衰减特性不同, 介电常数 ϵ 越大 α 越大, 电磁波衰减特征越明显。

下面, 我们来分析图1中的反射时间。众所周知, 电磁波在介质中的传播速度可近似表达为 $V = C / \sqrt{\epsilon'}$ (C 为自由空间中的光速, $C = 3 \times 10^8 \text{m/s}$, ϵ' 为介质的相对介电常数)。由此, 可计算出图1a中第一层介质的电磁波速度为 $1.5 \times 10^8 \text{m/s}$; 图1b中第一层介质的电磁波速度为 $5.5 \times 10^7 \text{m/s}$ 。第一层介质的反射时间应为电磁波在第一层介质中的往返旅行时间, 即图1a中的反射时间为 $1.33 \times 10^{-8} \text{s}$, 图1b中为 $3.7 \times 10^{-8} \text{s}$ 。

图1a和图1b表明, 正演计算结果完全与理论计算吻合, 且很好地反映了平面脉冲电磁波在有耗介质中的传播规律。

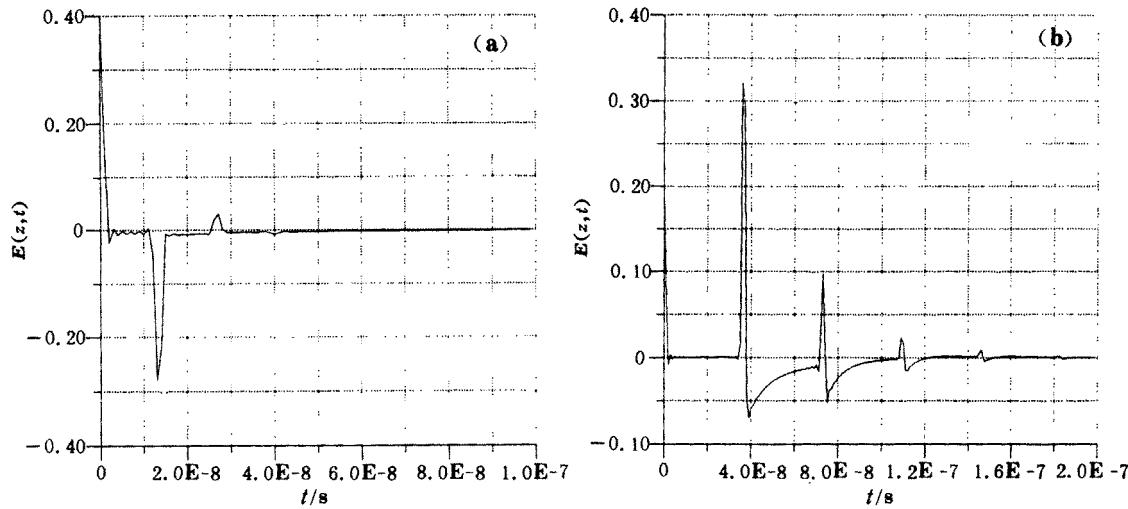


图1 两层地电模型的脉冲响应 I

(a) $\sigma_1 = 0.001$, $\sigma_2 = 0.01$, $\epsilon_1 = 4$, $\epsilon_2 = 30$, $H = 1\text{m}$
 (b) $\sigma_1 = 0.001$, $\sigma_2 = 0.01$, $\epsilon_1 = 30$, $\epsilon_2 = 4$, $H = 1\text{m}$

σ 的单位为 m/s , 下同

物理勘探

图2示出了相同导电率(从大到小变化),不同介电常数的平面电磁脉冲响应。对比图1与图2可以发现,相同的介电常数,良导介质具有较强的电磁波衰减能力,这一计算结果与实际电磁波传播的物理现象相一致。由图2可以看出,图2a中直达波与反射波之间有一段较明显的拖尾部分;图2b中直达波与反射波之间也有一小段拖尾,只是不如图2a明显。这主要是脉冲电磁波在良导介质中传播时的衰减所致。图2的电磁波反射时间几乎与图1相同,这说明导电率对电磁波传播速度影响不大。这一结论对分析和解释脉冲电磁数据提供了重要理论依据。

图3是在图2的基础上,增大第一层介质的导电率。由图可以看出,除了直达电磁波外

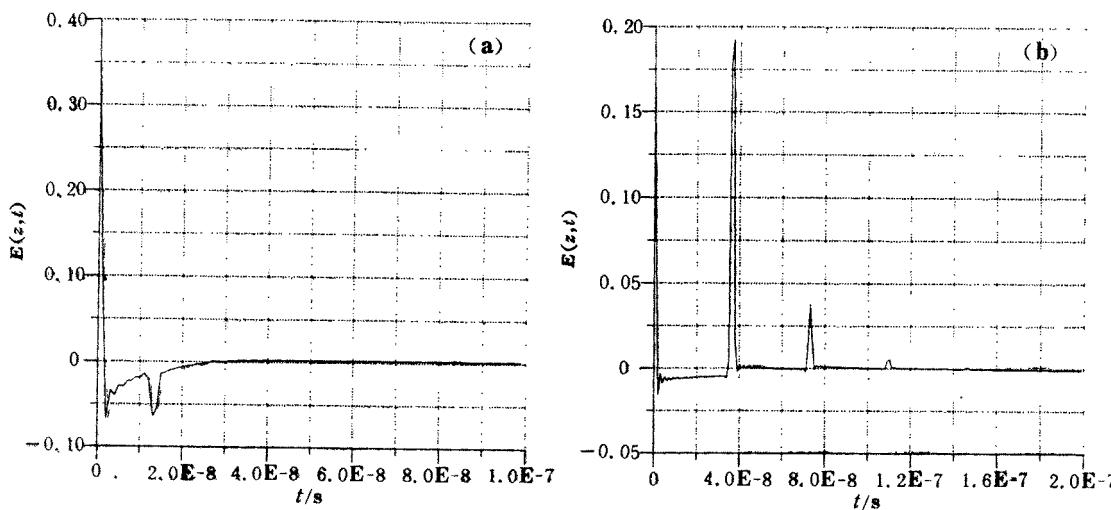


图2 两层地电模型的脉冲响应Ⅱ

- (a) $\sigma_1 = 0.01$, $\sigma_2 = 0.001$, $\epsilon_1 = 4$, $\epsilon_2 = 30$, $H = 1\text{m}$
 (b) $\sigma_1 = 0.01$, $\sigma_2 = 0.001$, $\epsilon_1 = 30$, $\epsilon_2 = 4$, $H = 1\text{m}$

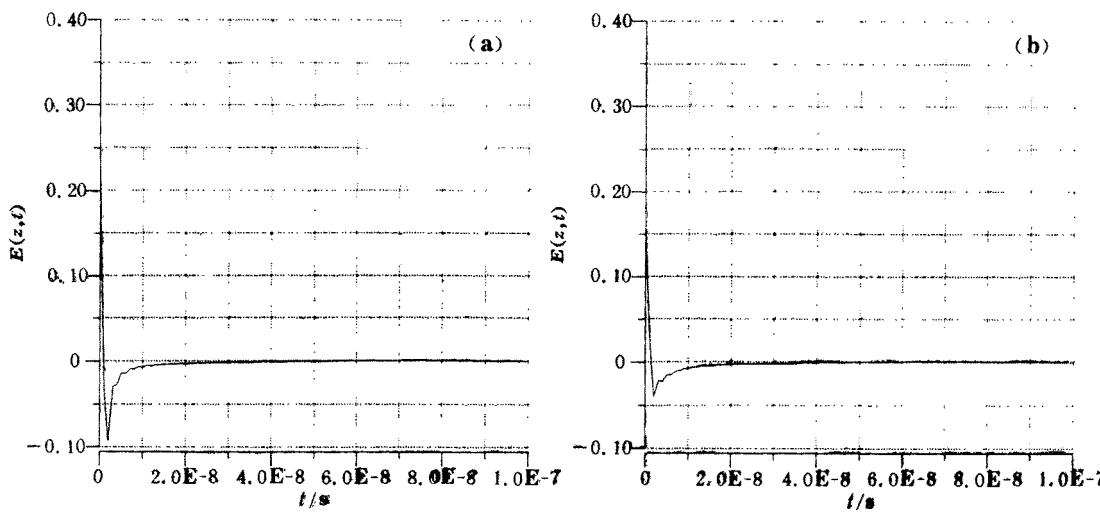


图3 两层地电模型的脉冲响应Ⅲ

- (a) $\sigma_1 = 0.1$, $\sigma_2 = 0.01$, $\epsilon_1 = 4$, $\epsilon_2 = 30$, $H = 1\text{m}$
 (b) $\sigma_1 = 0.1$, $\sigma_2 = 0.01$, $\epsilon_1 = 30$, $\epsilon_2 = 4$, $H = 1\text{m}$

无地电介质界面的任何反射信号。这一正演计算结果表明, 表层良导介质对脉冲电磁波有很强的衰减和吸收能力。这对实际工作和资料解释具有很好的指导作用。

图4示出了三层地电介质的平面脉冲电磁波的正演模型。图4a中, 在反射时间 $t = (1.3E-8)$ s 处, 反射信号是第一层与第二层介质界面对应的反射电磁波; 在 $t = (5E-8)$ s 处, 反射信号是第二层与第三层介质界面对应的反射电磁波; 其余均为介质中的多次反射电磁波。图4b中, 在 $t = (3.7E-8)$ s 处反射信号是第一层与第二层介质界面对应的反射电磁波; 在 $t = (5E-8)$ s 处反射信号是对应第二层与第三层介质界面的反射电磁波; 其余均为介质中的多次反射波。图4b中出现的信号拖尾现象的原因与图1b造成反射信号拖尾的原因一致, 均

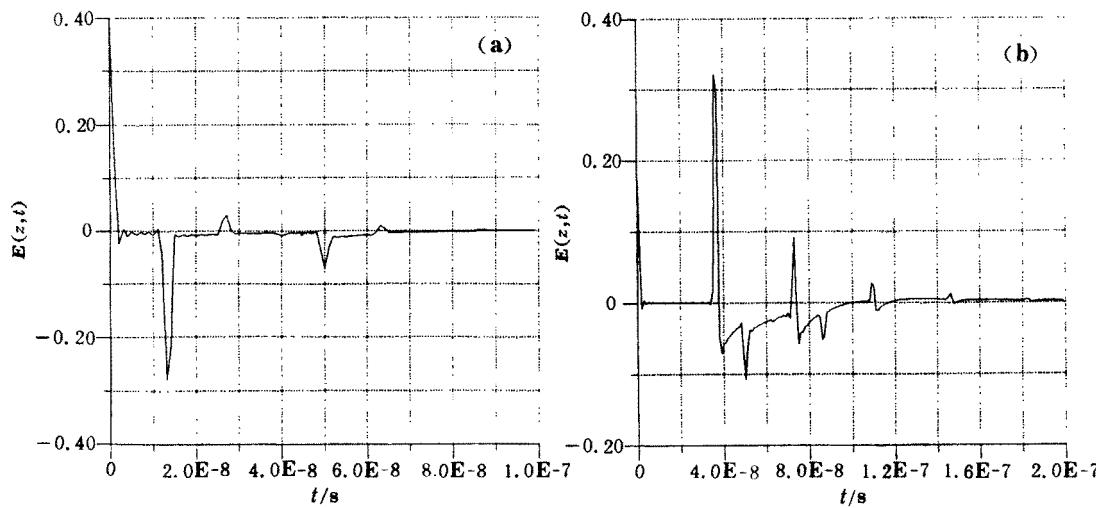


图4 三层数电模型的脉冲响应Ⅰ

- (a) $\sigma_1 = 0.001$, $\sigma_2 = 0.01$, $\sigma_3 = 0.1$, $\epsilon_1 = 4$, $\epsilon_2 = 30$, $\epsilon_3 = 80$, $H = 1m$, $H_2 = 1m$
 (b) $\sigma_1 = 0.001$, $\sigma_2 = 0.01$, $\sigma_3 = 0.1$, $\epsilon_1 = 30$, $\epsilon_2 = 4$, $\epsilon_3 = 80$, $H_1 = 1m$, $H_2 = 1m$

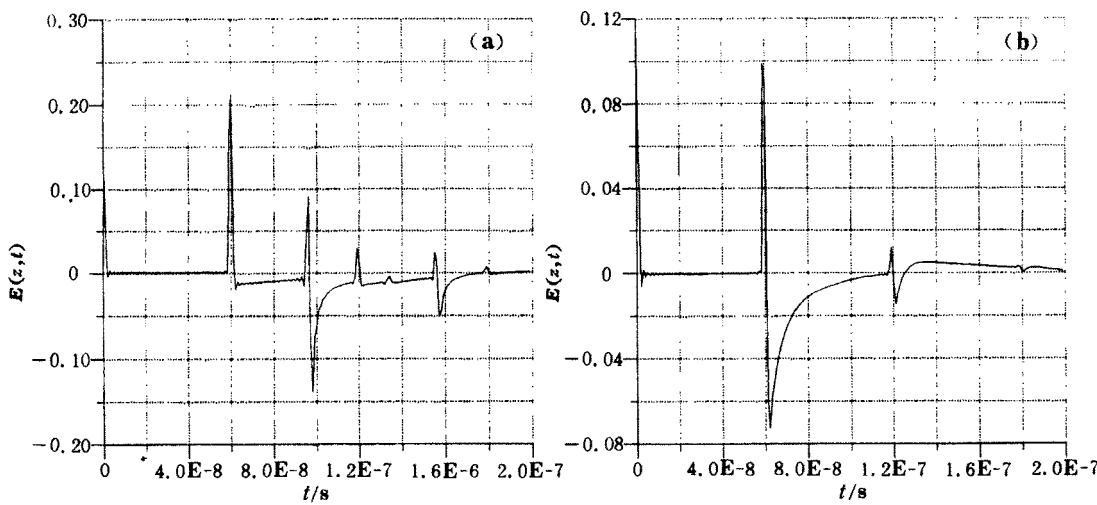


图5 三层数电模型的脉冲响应Ⅱ

- (a) $\sigma_1 = 0.001$, $\sigma_2 = 0.01$, $\sigma_3 = 0.1$, $\epsilon_1 = 80$, $\epsilon_2 = 30$, $\epsilon_3 = 4$, $H = 1m$, $H_2 = 1m$
 (b) $\sigma_1 = 0.01$, $\sigma_2 = 0.1$, $\sigma_3 = 0.001$, $\epsilon_1 = 80$, $\epsilon_2 = 30$, $\epsilon_3 = 4$, $H_1 = 1m$, $H_2 = 1m$

与介质中的衰减和相对介电常数的变化有关。从这一正演模型计算中可以看到，多层介质的电磁波响应存在有多次反射。为此，在分析处理和解释电磁数据时，正确提取有用反射信号就显得十分重要。

图5示出了相同的相对介电常数变化(从大到小)，不同导电率分布的三层地电正演模型。图5a正确反映了各界面的单次反射和多次反射，在 $t = (6E-8)$ s处为第一个界面的单次反射波，在 $t = (9.7E-8)$ s处为第二界面的单次反射波，其它为多次反射波。图5b中，除了第一界面(第一层介质与第二层介质的界面)处的单次反射和多次反射波外，无第二界面的反射波。这是因为第二层介质的导电率 $\sigma_2 = 0.1 \text{ m/s}$ 为良导介质，当脉冲电磁波在此介质中传播时，具有很强的衰减能力，该介质层可视为屏蔽层。所以，虽然第三层的介电特性变化很明显，但无法正确反映其地电特性。这一正演计算实例，说明了介质的衰减和吸收会对正确解释地下地电结构带来一定的困难。

结 论

本文提出的有耗介质中平面脉冲电磁波的脉冲响应正演模拟技术，正确地揭示了平面脉冲电磁波在有耗介质中的传播规律。这为分析、处理和解释脉冲电磁数据提供了重要理论依据，也验证了该正演技术的正确性、可靠性和实用性。

参 考 文 献

- 1 Claerbout J F. *Fundamentals of Geophysical Date Processing*, McGraw-Hill Book Co, 1976
- 2 沈飚，朴化荣. 反射 MT 法层析成像正演模拟. 石油地球物理勘探, 1992, 27(6): 769~774

· 消息 ·

黄骅拗陷火成岩油藏研讨会在河北临城召开

由天津市石油学会委托大港油田举办的“黄骅拗陷火成岩油藏研讨会”于1996年5月21日～25日在河北省临城县召开。来自中国地质大学、核工业部北京地质研究院、华北油田以及大港油田的50余位代表参加了会议，会议上宣读了10篇论文，并进行了专题讲座和讨论。

本次会议主要议题是：就海陆相火成岩构造特征、演化过程、形成机制、喷发侵入特点进行专题讲座，并交流火成岩油气藏地球物理勘探方法，重点涉及地震采集、处理及火成岩储层描述技术。会议还围绕火成岩相带划分及其与油气生成聚集的关系等问题展开了讨论。本次会议对黄骅拗陷及华北盆地火成岩油藏研究将会产生深远的影响。

会后，代表们还兴致勃勃地考查了崆山溶洞和嶂石岩地貌。

本刊通讯员 熊金良