

# 探地雷达物理模拟相似性准则及 监测油气污染试验

曾昭发 薛建 王者江 田钢 翁爱华

(长春科技大学地球探测与信息技术学院, 长春 130026)

**摘要** 利用探地雷达研究油气污染问题是探地雷达应用研究的前沿课题之一。在推导雷达波模型实验的相似性准则的基础上, 制作了砂质模型, 并以原油为污染材料进行了探地雷达监测油气污染的模型实验。证明探地雷达方法能有效地解决油气污染的范围和油气污染的强度问题。同时为开展下一步实验和野外工作提供了指导。

**关键词** 探地雷达 相似性准则 模型实验 油气污染

**中图分类号** X74

随着社会的发展, 环境问题已成为当今一个重大而有意义的研究课题。而油气污染又是环境污染的一个主要方面。通过地球物理方法监测或探测油气在地下的运移过程, 不仅可以减少因油气泄漏造成的损失, 而且对环境的改善具有重要的指导意义。探地雷达作为近年发展起来的一种新的浅部地球物理方法, 已广泛地应用于浅部地球物理领域的各个方面, 解决如工程地质、环境等方面的疑难问题<sup>[1]</sup>。但是探地雷达的资料解释发展较慢, 对雷达曲线和图像的解释还处在目视判译阶段。对复杂目的体波形图像的解释仍很困难, 解决的办法之一是进行物理模拟。为此, 从理论上推导了探地雷达模型实验的相似性准则<sup>[2]</sup>, 并利用物理实验的方法模拟实际油气泄漏的情况和对油气污染范围进行探测。实践表明, 探地雷达为油气泄漏的探测与监测提供了一种优良的方法。对于解决地下油气管线的油气泄漏, 该方法不仅快捷而且能有效地确定油气污染的范围及强度。

## 1 探地雷达基本理论

探地雷达是利用高频电磁波实现对介质的探测。电磁波在介质中的传播满足 Maxwell 方程, 即

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

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

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

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

第一作者简介 曾昭发 男 25 岁 博士 地球物理专业

收稿日期 1998-01-07

其中: E —— 电场强度; B —— 磁感应强度; D —— 电位移; H —— 磁场强度; J —— 电流密度;  $\rho$  —— 电荷密度。

将(1), (2)取旋度, 并将状态方程代入后, 经推导可得(由于电磁波的磁场和电场形式上是一致的, 为了方便, 以下只写电场分量):

$$\nabla^2 E + (\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega)E = 0 \tag{5}$$

令  $k^2 = \mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega$ ,  $k$  称为波数, 则

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \tag{6}$$

为无源区的探地雷达波传播的赫姆霍兹方程。

令  $k = \beta + i\alpha$  则可以求出  $\alpha$ (称为吸收系数),  $\beta$ (称为相位系数)为:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}\right)^2} - 1 \right)} \tag{7}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}\right)^2} + 1 \right)} \tag{8}$$

在离源足够远区, 雷达波解可具有如下的平面解<sup>[3]</sup>:

$$E = E_0 e^{-\alpha r} \cdot e^{-i(\alpha r - \beta r)} \tag{9}$$

那么雷达波在介质中传播的波长为:  $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$ , 而相速度为:  $v = \frac{\omega}{\beta}$ , 衰减为  $e^{-\alpha r}$ 。探地雷达应用中所遇介质的磁导率通常变化很小, 可近视为  $\mu = \mu_0$  ( $i = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ )。在探地雷达的频率内, 雷达波的传播性状主要受介质的介电常数和电导率的控制。

## 2 探地雷达模型实验的相似性准则

根据 Maxwell 方程可推导出类似(5)式的雷达波在地下介质中传播的波动方程<sup>[4]</sup>:

$$\nabla \times \nabla \times E - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \tag{10}$$

其中  $E$  为电场强度,  $\mu, \epsilon, \sigma$  分别为原型的磁导率、电导率和介电常数。

而雷达波在实验物理模型中的传播也满足:

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E} - \bar{\mu} \bar{\epsilon} \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} - \bar{\mu} \bar{\sigma} \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = 0 \tag{11}$$

其中  $\bar{E}$  为模型的电场强度,  $\bar{\mu}, \bar{\epsilon}, \bar{\sigma}$  分别为模型的磁导率、电导率和介电常数。假设:

$$\frac{\bar{E}}{E} = M_E \quad \frac{\bar{\mu}}{\mu} = M_\mu \quad \frac{\bar{\sigma}}{\sigma} = M_\sigma \quad \frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon} = M_\epsilon \quad \frac{\bar{t}}{t} = M_t \quad \frac{\bar{\Delta}}{\Delta} = M_\Delta \tag{12}$$

$M_E, M_\mu, M_\epsilon, M_\sigma, M_t, M_\Delta$  分别为电场、磁导率、介电常数、电磁波传播时间和尺度因子(假设  $dx = dy = dz = \Delta$ )的相似比。代入(11)

$$\nabla \times \nabla \times M_E E - \bar{\mu} \bar{\epsilon} M_\epsilon M_\mu \frac{\partial^2 (M_E E)}{\partial (M_t t)^2} - \bar{\mu} \bar{\sigma} M_\sigma M_\mu \frac{\partial (M_E E)}{\partial (M_t t)} = 0 \tag{13}$$

因而要使实验模型测量与野外原型测量之间保持相似, 则

$$\frac{M_E}{M_\Delta^2} = M_\mu M_\epsilon \frac{M_E}{M_t^2} = M_\mu M_\sigma \frac{M_E}{M_t} \tag{14}$$

推导可得:

$$M_{\mu} M_{\sigma} = \frac{M_{\Delta}^2}{M_t} = 1 \quad (15)$$

$$M_{\mu} M_E \frac{M_{\Delta}^2}{M_t} = 1 \quad (16)$$

式(15)、(16)便为探地雷达模型实验的相似性准则。

对于通常的探地雷达测量时所遇到的介质, 有  $\mu = \mu_0, M_{\mu} = 1$ 。

$$M_E \frac{M_{\Delta}^2}{M_t} = 1 \quad M_{\sigma} \frac{M_{\Delta}^2}{M_t} = 1 \quad (17)$$

式(17)反映了雷达波在原型和模型中传播的时间、空间和介电常数的关系。

雷达波在介质中传播具有较强的衰减, 即满足(9)式。在模型实验中仪器具有相同的灵敏度时, 也要模拟这一规律。根据以上推导, 同理可得:

$$M_{\alpha} M_r = 1 \quad M_{\alpha} = M_f \sqrt{M_{\mu} M_E} \quad (18)$$

其中

$$M_{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha} \quad M_r = \frac{r}{r}$$

当模型的介电常数与原型的一致时, 且  $M_{\mu} = 1$ , 则有

$$M_{\mu} M_r = 1 \quad (19)$$

以上(18)和(19)式反映了探地雷达的物理模型实验中, 频率和穿透深度的关系。即模型实验采用的天线频率与野外实际测量时采用的天线频率的比例越大, 其穿透深度的比例就越小。即在采用更高频率的探地雷达进行室内的模型实验时, 可将模型尺寸按比例地减小, 可取得野外测量中等同的效果。

### 3 模型及实验结果

利用较干的砂作为模型实验材料, 模型长宽高分别为 1.9 m、1.1 m、1.0 m。测量采用 SR-2 型探地雷达, 天线为 900 MHz 的单体天线。利用 1 L 原油作为油气污染材料。

#### 3.1 物性参数

模型材料砂比较干, 含泥量较少。通过对已知物体及已知深度的探地雷达测量, 利用近似公式(20)计算相对介电常数约为 10。利用中间梯度法, 测量实验砂的平均电阻率和极化率分别为 200  $\Omega\text{m}$  和 2.1%。

$$v = c / \sqrt{\epsilon} \quad (20)$$

其中  $v$ 、 $c$ 、 $\epsilon$  分别为雷达波的速度、光速和相对介电常数。

#### 3.2 探地雷达测量

该物理模型的模拟实验, 以实际油气泄漏和运移作为基础。如图 1 的中心线偏右置一原油泄漏源。共完成 7 条测线, 测线距离为 10 cm。采用连续和点测两种方式。点测的点距为 1 cm。限于篇幅, 这里只给出部分测量结果。

从图 2 与图 3 比较, 当砂表面具有油气污染时, 探地雷达的波形幅度值明显降低, 而雷达波的速度明显提高, 其穿透能力明显增强。这主要是由于油气的电阻率较高而介电常

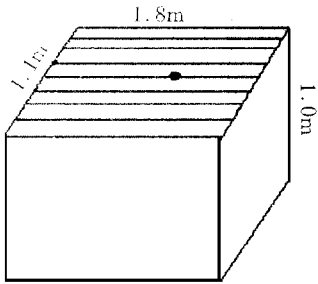


图1 物理模型及测线图

Fig 1 Map of physical model and survey lines

• 为注油点

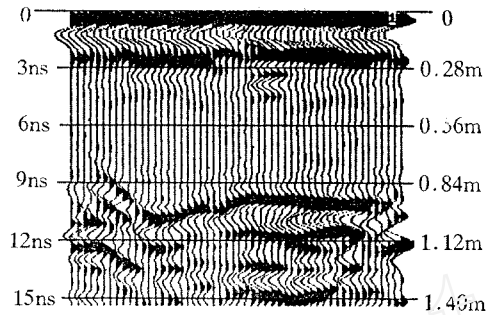


图2 模型中没有原油污染时探地雷达测量图

Fig 2 Map of GPR survey on model with no oil

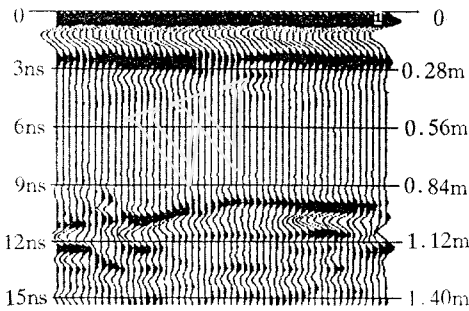


图3 模型中注入原油时探地雷达测量图

Fig 3 Map of GPR survey while oil poured in to model

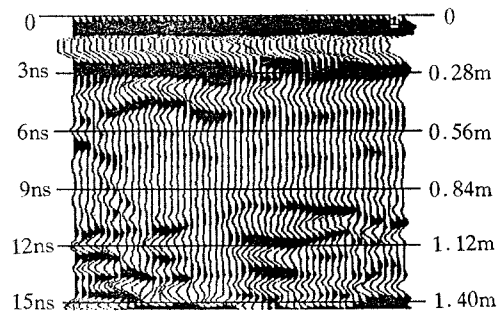


图4 模型中原油运移4h后探地雷达测量图

Fig 4 Map of GPR survey after oil poured in to model 4 h

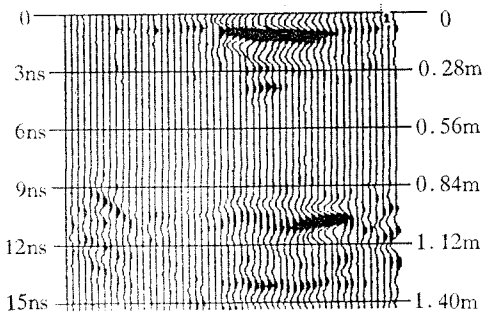


图5 图3- 图2的探地雷达波形剖面图

Fig 5 GPR image of figure3 subtract figure 2

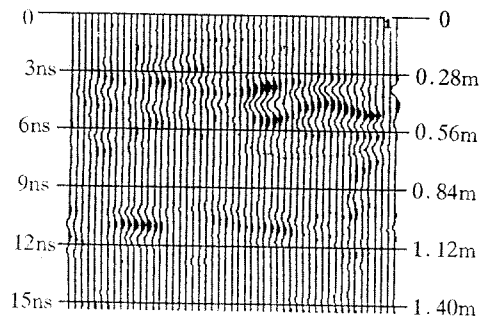


图6 图4- 图2的探地雷达波形剖面图

Fig 6 GPR image of figure4 subtract figure 2

数较小。图5为图3减图2的结果,可见油气的泄漏范围非常清晰,在油气污染范围下方,

模型底反射较强是由于砂中具有油气后, 雷达波穿透能力增强, 造成了模型底反射能量强。图4为油气在砂中运移4h后的探地雷达测量图, 图6为图4减图2的结果。从图可见, 由于油气的运移, 油气浓度降低反映为波形幅度降低, 而油气污染的范围明显增大。

#### 4 结论和建议

(1) 雷达波在介质中传播满足麦克斯韦方程, 因雷达波的传播为瞬态电磁波的传播满足相似性准则, 因而野外探地雷达测量的一些复杂问题可用物理模拟实验来研究。

(2) 通过物性的测试可知, 油气与一般的介质(如砂、土壤等)在介电常数、电阻率等参数之间有较大的差异, 从物性上提供了利用探地雷达解决浅部油气污染问题的前提。

(3) 通过利用探地雷达方法监测油气污染的物理模拟实验, 证明利用探地雷达方法能有效地监测油气在地下的运移过程, 并能有效地确定油气污染的范围。

(4) 通过探地雷达测量的波形特征分析, 可以定性地确定油气污染的强度。

(5) 油气污染问题和监测油气运移利用模型实验, 并根据相似性准则, 指导利用较低频的探地雷达天线探测浅部的油气污染(如油气田的油气污染、输油管的泄漏和管理、地下水的油气污染等)具有重要意义。

实验成果表明, 探地雷达具有解决油气污染的能力, 但尚有许多工作需进一步开展, 如油气污染的定量分析问题, 不同介质中的污染问题, 甚至于DNA PL 运移机制问题等。

#### 参 考 文 献

- 1 Maxwell, Michael. Detection and mapping of a gasoline spill using ground penetrating radar: A case study. SA GEEP '95, Environment and Engineering Geophysical Society, U SA, 1995
- 2 赵鸿儒. 工程多波地震勘探. 北京: 地质出版社, 1996
- 3 李大心. 探地雷达方法与应用. 北京: 地质出版社, 1994
- 4 曾昭发. 探地雷达数据解释和探地雷达应用: [学位论文]. 长春: 长春科技大学, 1997

### THE PHYSICAL MODELING SIMILARITY CRITERION OF RADAR WAVE AND THE TEST FOR MONITORING OIL AND GAS POLLUTION USING GPR

Zeng Zhaofa, Xue Jian, Wang Zhejiang, Tian Gang, Weng Aihua

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130026)

**Abstract** Using GPR (Ground Penetrating Radar) to study the pollution of oil and gas is a kind of modern technique for the application of GPR. On the base of inducing the physical modeling similarity criterion of radar wave, we designed and made a sand model, and did the experiment of monitoring oil and gas pollution. From the experiments, we can found that GPR can determine range and density of oil pollution.

**Key words** GPR, similarity criterion, physical modeling, pollution of oil and gas