

# 瞬态瑞雷波探测信号模型及其相速度的校正

李正斌 (西安交通大学电信学院微波与光通信技术研究所 710049)

潘秋明 (煤炭科学研究总院西安分院 710054)

**摘要** 在网络分析的基础上,将瑞雷波探测的 A 道信号作为一网络的输入,B 道信号作为其输出,给出 A、B 两道的最一般信号模型,解释了目前瞬态法信号计算相速度及其频散曲线与稳态信号相速度及其频散曲线差异的实质。提出了瞬态瑞雷波相速度的改进算法。结果表明,校正后的相速度有明显的降低,其频散曲线的分辨率有所提高。

**关键词** 瞬态瑞雷波 相速度 校正 信号模型

**中国图书资料分类法分类号** P631.443

**作者简介** 李正斌 男 30 岁 博士 电磁场与微波技术

## 1 引言

瞬态瑞雷波探测技术已在矿井、地面工程中得到广泛的应用,相应的探测设备如 MRD-II 型瑞雷波勘探仪也已批量生产,解决了许多井下探测问题,尤其是在矿井超前探测构造、残余煤层厚度中取得了很好的效果,体现出明显的社会效益和经济效益。但是目前瑞雷波探测参数中的相速度值偏高,严重影响了该参数用于岩石力学参数的估算和岩层速度的判别。

我们知道,稳态瑞雷波探测是用一正弦波  $A \cos(\omega t + \phi)$  激励地层的<sup>[1]</sup>。如图 1 所示,在离震源(圆型垫)一定距离放置两个间隔约 1 m 的检波器,测

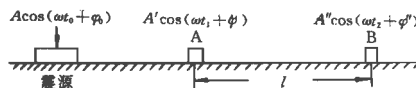


图 1 稳态瑞雷波探测示意图

量该正弦波在两检波器之间传播时产生的相位变化  $\Delta\phi = \phi'' - \phi^{[1,2]}$ ,再由  $\omega\Delta t = \Delta\phi$  算出该正弦波从 A 点传播至 B 点相位变化所需的时间  $\Delta t$ ,从而算出正弦波以  $\omega$  频率从 A 点传播至 B 点的相速度<sup>[1,2]</sup>,以及相应波长对应的地层深度。改变  $\omega$  可以得到相速度随深度的变化关系——相速度频散曲线,并用于划分地层。

瞬态冲击产生的瑞雷波信号  $A_x(t)$  如图 2 所

## PRINCIPLES OF MEASURING COAL THICKNESS BY RESISTIVITY METHOD ALONG A HORIZONTAL BOREHOLE AND ITS FORWARD SIMULATION

Han Depin(Xian Branch of CCMRI)

**Abstract** The methods and principles of measuring coal thickness by resistivity method along a horizontal borehole in coal seam are presented. Several sorts of geologic-electrical models are forward simulated by using linear numerical filter. Many modelling results have showed that the resistivity curves reflect obviously the variation of coal thickness, which are enabled to measure the coal seam with the thickness more than 0.8 m.

**Keywords** horizontal borehole; resistivity method; thickness of coal seam; forward simulation

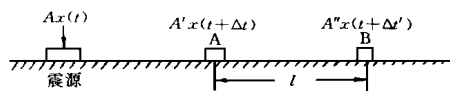


图 2 瞬态瑞雷波探测示意图

示。根据信号理论,  $Ax(t)$  可以按傅氏变换分解成许多个正弦波信号的叠加<sup>[3,4,5,6]</sup>, 类似于稳态探测可以算得每一正弦波在图 2 中从 A 点传播至 B 点的相位变化  $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$ 。同样由  $\omega\Delta t = \Delta\varphi$  及  $v_p = l/\Delta t$  算出每一频率  $\omega$  的相速度、相应波长对应的地层深度。这样也就得到了瞬态冲击的相速度随深度的变化关系——相速度频散曲线。

依据上述思想, 稳态激励探测的瑞雷波相速度与岩层速度(横波)基本吻合<sup>[1,2]</sup>。但瞬态冲击信号经傅氏变换后算得的相位移而得到的相速度比岩层横波速度明显偏高, 有时比纵波速度还大, 特别是对应于深层的低频段尤其如此。虽然瑞雷波速度随地层的埋深有所增高<sup>[7]</sup>, 但不至于增加到大大超过纵波速度的程度。要解释这一现象还得从网络和信号模型说起。

## 2 网络与信号模型

从信号处理的角度研究弹性波在地层中传播时, 可以将地层看作是一个四端网络<sup>[8]</sup>。具体到瑞雷波探测技术中, 可以先撇开震源而把上述图 1、图 2 中所示的 A 点看作网络的输入端, B 点为输出端, 如图 3 所示。网络的性能可由传递函数完整地描述<sup>[8]</sup>。在这里我们主要关心的是传递函数的相位特性。

对图 1 中的 A 点与 B 点, 相应传递函数的  $Z$  变换<sup>[4,5,6]</sup>具有非常简单的形式, 在此不作详细讨论。

在图 2 中, 由于瞬态冲击信号由震源传到 A 点可以表示成指数序列, 因而其  $Z$  变换一般具有有理分式形式。对其作因式分解, 可以写成如下标准形式( $Z$  域)<sup>[4,5,6]</sup>:

$$X_A(Z) = A' \frac{\prod_{m=0}^{\infty} (1 - a_m Z^{-1}) \prod_{n=0}^{\infty} (1 - b_n Z)}{\prod_{k=0}^{\infty} (1 - c_k Z^{-1}) \prod_{l=0}^{\infty} (1 - d_l Z)}, \quad (1)$$

图 3 将 A B 两点间的地层看成是 四端网络

式中  $A'$ ——信号幅度;

$Z^r$ ——线性相位分量<sup>[7]</sup>;

$a_m, b_n, c_k, d_l$  是与地层模型有关的参数, 影响信号相位。

当  $b_n, d_l$  等于零时表示最小相位信号;  $a_m, c_k$  等于零时表示逆最小相位信号<sup>[4,5,6]</sup>。由于地层参数(弹性)的不同, 存在瑞雷波相速度的正常频散和非正常频散<sup>[7]</sup>, 因而(1)式表示了瑞雷波在地层中传播时相对于上述假设的四端网络输入信号的最一般形式。同样 B 点输出也可以表示为:

$$X_B(Z) = A' \frac{\prod_{m=0}^{\infty} (1 - a'_m Z^{-1}) \prod_{n=0}^{\infty} (1 - b'_n Z)}{\prod_{k=0}^{\infty} (1 - c_k Z^{-1}) \prod_{l=0}^{\infty} (1 - d'_l Z)}. \quad (2)$$

在(1)、(2)式中,  $r=0, r'=0$  时表示无线性相位移分量。但实际存在该分量, 即一般情况下  $r \neq 0, r' \neq 0$ 。在(1)式中用  $Z = e^{i\omega}$ ,  $\omega = \pi$  代入得:

$$X_A(\omega = \pi) = A' \frac{\prod_{m=0}^{\infty} (1 + a_m) \prod_{n=0}^{\infty} (1 + b_n)}{\prod_{k=0}^{\infty} (1 + c_k) \prod_{l=0}^{\infty} (1 + d_l)} \cdot e^{i\pi} \quad (3)$$

式中分式为一正实数, 不对相位作贡献<sup>[4,5,6]</sup>, 其线性相位移分量为  $\pi$ 。

同样(2)式中也有类似的结论, 其线性相位移分量为  $\pi'$ 。

按上述假设, 将 A、B 两点间的地层看作是一滤波(四端)网络, 因而可以认为 B 点的线性相位移分量  $\pi'$  是 A 道输入信号的线性相位移分量通过四端网络后产生的。因此可以将(2)式改写为:

$$X_B(Z) = X_A(Z) \cdot H(Z), \quad (4)$$

式中  $H(Z)$ ——网络的传递函数。

这样, 欲求 A、B 两道信号之间的相位差即是求  $H(Z)$  的相频特性<sup>[6]</sup>, 即  $\varphi = \varphi - \varphi_0$ 。将  $Z = e^{i\omega}$  代入(1)、(2)、(4)式中便可得到结果。

但在实际计算时, 都将 A、B 两道信号当作是无线性相位移分量的信号, 即  $r=0, r'=0$  时的特例。依上述推导可以认为  $r$  是  $r'$  经网络后产生的, 可以作为其传递函数的一个相位, 即  $r'=0$ 。而将 A 道信号做傅氏变换后发现, 经常在  $\omega = \pi$  时的相位角不为零, 也就是将 A 道信号的线性相位移分量在计算传递函数的相位时忽略了, 使计算相速度所用的相位差

$$\Delta\varphi = \varphi - (\varphi + r\pi), \quad (5)$$

比实际的相位差小  $r\pi$ 。故依据相速度计算公

式<sup>[1,2,3]</sup>

$$\begin{aligned} v_p(f) &= \frac{l}{\Delta\phi(f)} = \frac{2\pi l}{\Delta\phi(f)} \\ &= \frac{2\pi l}{\phi(f) - (\phi(f) + r\pi)} \end{aligned} \quad (6)$$

计算的相速度  $v_p$  比考虑线性相位移分量的相速度大。尤其在低频段,  $\Delta\phi$  非常小, 若未考虑线性相位移分量, 则  $v_p$  更大, 有时比纵波速度高出许多。

综上所述, 在计算相位差时, 应先计算 A 道信号的线性相位移分量( $\omega = \pi$  时的相位值), 并将其加到由相关<sup>[2,8]</sup>得到的相位差  $\Delta\phi$  中, 再代入相速度计算公式中求得相速度:

$$v_p'(f) = \frac{2\pi l}{\Delta\phi(f) + r\pi} \quad (7)$$

计算流程见图 4。

3 实例

图 5 为一实测信号, 其采样频率为 7 500 Hz, A、B 两道检波器之间的距离为 100 cm。图 6 是其幅度谱。经计算得 A 道信号的线性相位移分量为 0.363 275, 即  $\omega = \pi$  时的相位角。

图 7 是 AB 两道信号相关函数的相位谱, 也即网络传递函数的相位频率特性。它是在原相位谱上截取插值后得到的。

图 8、图 9 分别是线性相位移分量校正前后的相速度频散曲线。图中纵坐标表示由频率换算的波长再折算的深度; 横坐标为相速度; 横折线为分层曲线。

对比图 8、图 9 可以看出, 经线性相位移校正后的相速度有明显改正, 使得低频端的值下降了许多

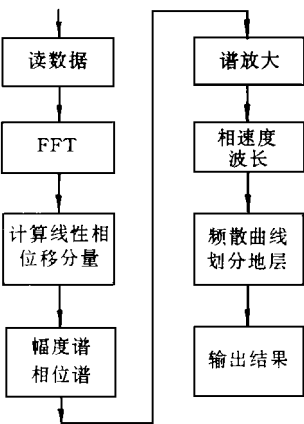


图 4 改进的相速度计算流程图

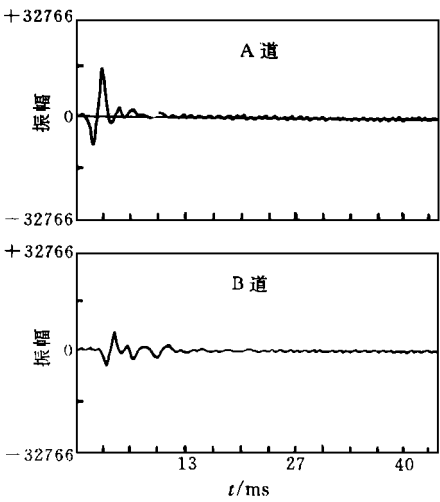


图 5 实测信号

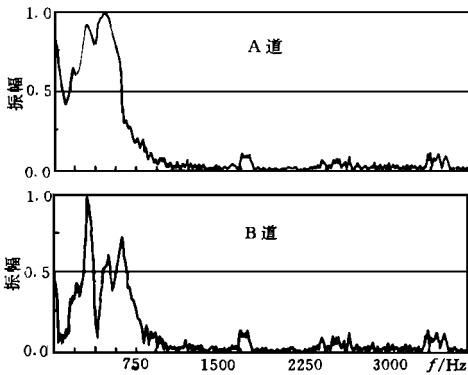


图 6 实测信号幅度谱

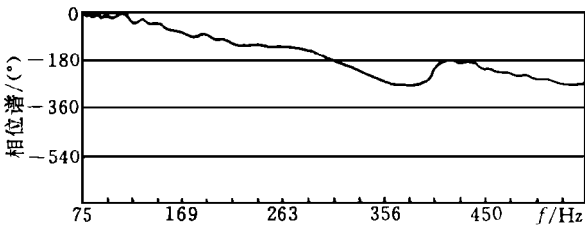


图 7 相关函数的相位频率特性

(仍有偏高是由于相速度随地层埋深增大引起的)。同时, 经校正后的曲线的拐点或“之”字型长度明显缩短, 提高了分辨率和划分精度。

4 结论

经过线性相位移校正后相速度频散曲线低频端的相速度值明显降低, 提高了曲线的分辨率和划分地层的精确度。经过对信号模型的分析 and 网络的引入, 得出了目前瞬态法经傅氏变换计算的相速度与

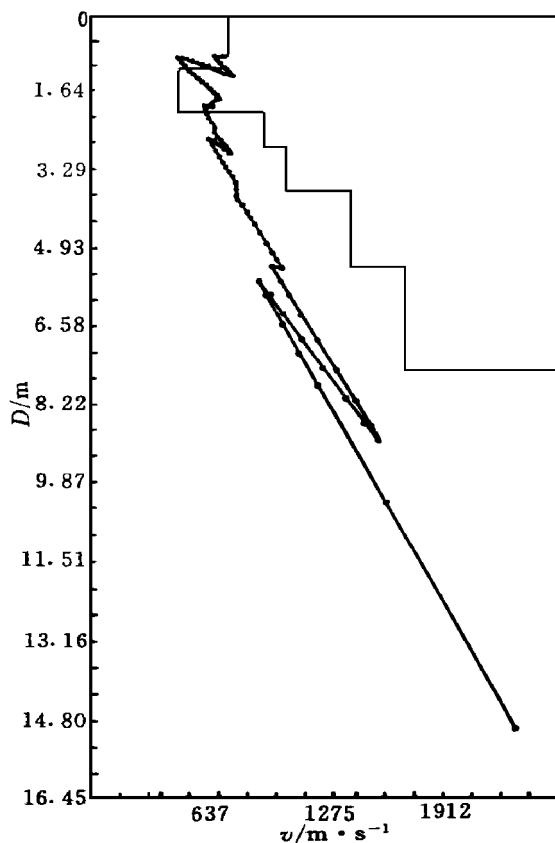


图 8 未考虑线性相位移分量的相速度频散曲线  
稳态法的差异的实质是:

a · 信号模型不同, 稳态法简单, 不同时存在最小相位和逆最小相位分量, 也无线性相位分量。

b · 瞬态法计算相速度需考虑线性相位移分量。

## 参考文献

- 1 夏宇靖等 · 瑞雷波勘探方法研究 —— 瑞雷波地震法探测洞

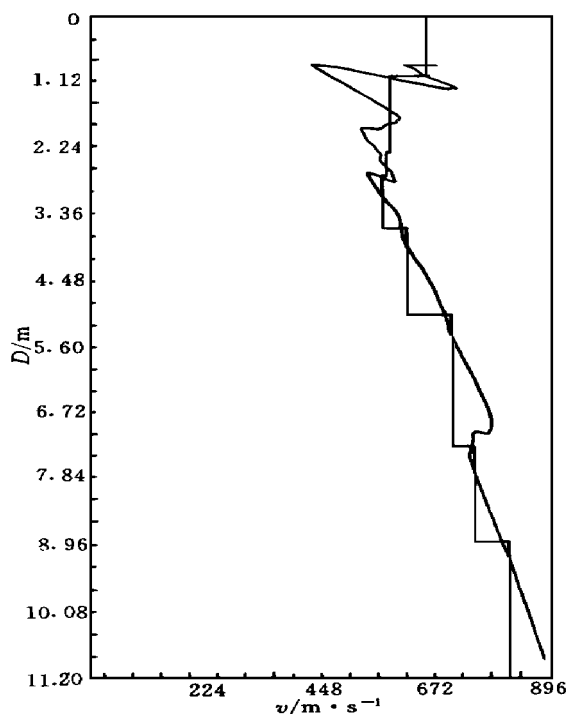


图 9 经线性相位移分量校正后的相速度频散曲线

穴和其它地质体方法研究 · 煤炭科学研究总院西安分院科研报告, 1991

- 2 杨成林等 · 瑞雷波勘探 · 北京: 地质出版社, 1993
- 3 巴特 M · 地球物理学中的谱分析 · 北京: 地震出版社, 1978
- 4 澳本海姆 A V · 数字信号处理 · 北京: 科学出版社, 1965
- 5 程乾生 · 数字信号处理的数学原理 · 北京: 石油工业出版社, 1979
- 6 吴兆熊, 邹理和 · 数字信号处理(下册) · 北京: 国防工业出版社, 1985: 131
- 7 安艺敬一 · 地震学原理 · 北京: 地震出版社, 1991
- 8 郑治真 · 数字信号处理 · 北京: 地震出版社, 1991

(收稿日期 1996-05-04)

## THE SIGNAL MODEL IN TRANSIENT RAYLEIGH WAVE PROSPECTING AND THE CORRECTION OF ITS PHASE VELOCITY

Li Zhenbing (Telecommunication Institute of Xi'an Jiaotong University)

Pan Qiuming (Xian Branch of CCMRI)

**Abstract** By using the network theorem, the authors consider that one of both sensory channels in transient Rayleigh wave prospecting is taken as the input node of a network, the other as the output node. An universal signal model of both channels is provided, the substance of difference between the phase velocities and their dispersion curves calculated both by the transient source and stable source are interpreted. The improved algorithm of the phase velocity of transient Rayleigh wave is provided. The result indicates that the corrected phase velocity is decreased obviously, and the resolution of its dispersion curve is somewhat increased.

**Keywords** transient Rayleigh wave; phase velocity; corrections; signal model.