

天然源面波频率-波数法的应用

丁连靖, 冉伟彦
(北京市地质勘察技术院, 北京 102218)

摘 要: 在借鉴国外资料的基础之上, 通过分析面波的基本特性, 成功开发了天然源面波频率-波数法野外采集观测系统及数据处理系统, 并通过大量已知孔的试验, 在检验该方法的同时, 确立了随机布阵的野外观测方法。

关键词 天然源面波 频率-波数 瑞雷波 分层

中图分类号: P631.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2005)02-0138-04

天然源面波频率-频率波数法是利用天然场面波信号进行地质勘探的一种新的物探方法。天然场面波的提取主要方法有空间自相关法(SAC)和频率-波数法(F-K)。空间自相关法主要在时间-空间域提取面波的相速度, 我院开发引进这种方法较早, 已成功地应用到地质勘探的诸多方面。频率-波数法主要在频率-空间域进行面波相速度的提取。它具有布阵灵活、能较好地去除高阶面波干扰等优点^[1-3]。频率-波数提取面波的方法最早由美国学者卡朋(Kapon)提出, 后由日本冈田广教授使之实用化并推广到地质勘探领域^[4]。我院于 1999 年对 F-K 法立项进行研究, 历经 2 年, 研制成功新的天然面波采集系统及数据处理软件, 并在北京地区进行了大量的已知孔旁试验分析对比, 并于 2001 年首次在长江三角洲杭嘉湖地区加以应用, 成功地进行基岩分层及第四系内部的概略分层, 效果良好。这种地球物理勘探新方法主要以地下介质的波速差异作为地球物理前提, 主要应用在基岩埋深大于 50 m 的平原地区, 可用于石油物探、煤田物探、水文(包括地热)物探、工程物探中地层的划分和提供与岩石力学性质有关的剪切波速度, 具有较好的发展前景。

1 方法原理

1.1 天然源面波的基本特性

由人类日常活动(机械振动、各种道路交通等)和大自然(海浪、风、气压变化等)等因素所引起的, 在地球表面可以观测到的微小振动被称为本方法的天然源信号, 实际上它的成分很复杂, 同时包含有体波(S波和P波)和面波成分(瑞雷波和勒夫波)。研究表明, 天然源面波的能量占天然源信号总能量

的 70% 以上, 研究面波比较有利, 它与体波的主要区别是在不均匀的介质中传播时面波发生频散, 而体波在传播过程中无频散。天然场的瑞雷波与天然场源的其他类型波具有明显不同特征(表 1)。

表 1 瑞雷波与其它各种类型波的区别

波的类型		特 征
体 波	P 波	属压缩波, 质点振动方向与传播方向一致, 传播速度较快, 周期较短, 以极化群形式出现, 能量衰减与传播距离成反比。
	S 波	属于剪切波, 质点振动方向在与传播方向相垂直的水平面上, 传播速度较慢, 周期较长, 以极化群的形式出现, 能量衰减与传播距离成反比。
面 波	勒夫波	质点振动方向在与传播方向相垂直的水平面内的, 传播速度较慢, 在传播过程中发生频散现象, 振幅与传播距离的平方根成反比。
	瑞雷波	振动轨迹在地表附近为逆时针方向转动的椭圆, 传播速度略小于横波波速, 在传播过程中发生频散现象, 能量衰减与传播距离的平方根成反比。

1.2 瑞雷波的基本特性

瑞雷波沿自由表面传播, 在近地表的浅部其质点的振动轨迹为逆时针的椭圆, 椭圆的长短轴之比为 3: 2。其基本特性为:

(1) 地层瑞雷波相速度与横波速度相近。可以利用瑞雷波的波速来求取横波波速, 进而计算岩土层的各种力学参数。

(2) 振幅随深度按指数衰减, 影响深度约为一个波长, 其能量主要集中在半个波长范围内, 故某个波长相速度基本上等于半个波长内各地层的横波相速度加权平均值。

(3) 瑞雷波在不均匀的介质中传播时发生频散现象。体波在传播过程中是以极化群形式出现, 无频散现象, 此特性是提取瑞雷波信号的先决条件。

1.3 天然源面波频率-波数法原理

天然源面波频率-波数法利用最大似然法理论从天然场源中求取瑞雷波的频率-波数功率谱,进而求取面波相速度。

1.3.1 天然源面波表达式

天然场源的面波信号被认为是一种稳定随机过程,某一段时间记录实际上是这一稳定随机过程的一个样本函数,记为 $X[(t,P(x,y))]$,其谱的表现形式可写成

$$X(t,P) = \iiint_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega t + ikP) dz(\omega,k), \quad (1)$$

式中, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, k 为波数。 $z(\omega,k)$ 是 ω,k 的双正交函数。

天然场的大部分信号为面波,其中最强的一个振型(通常称为基阶)是构成信号的主要成分, ω 与 k 又构成了单值的函数关系。

1.3.2 天然源面波频率-波数功率谱的原理

频率-波数谱的求取方法主要有参数法和非参数法,由于天然信号(气压、海浪)是瞬时性变化,能量是非常有限的,所以在非参数的功率谱求解过程中必然利用窗函数,会引出边窗效应,易出现虚假的结果。所以本次研究采用参数估计法,用最大似然法求解过程如下:

首先假定有 i 道检波器,每道的记录长度为 N ,则每道的数据可表示为 d_{ij} ,其每道的平均值表示为 S_i ,其协方差矩阵 ρ 服从高斯分布,则其概率密度函数可表示为

$$f = \frac{|\varphi|^{\frac{1}{2}}}{(2\pi)^{\frac{mn}{2}}} \exp[-\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m \sum_{k,l=1}^n \varphi_{ijkl} (d_{k,j} - s_k)(d_{l,j} - s_l)]. \quad (2)$$

式中, i,j 是测点编号; k,l 与采样时间对应。

假设实际天然场源面波信号可表示为振幅为 A 的正弦分量和零均值噪声分量之和,现只考虑单道情况,可表示为

$$d_k = Ae^{i\omega k \Delta t} + N_k, \quad (3)$$

式中, N_k 为噪声信号, Δt 为采样间隔, k 为采样点数。

再假设一脉冲响应为 $w_1, w_2, \dots, w_n$ 的滤波器,则输出为

$$x_k = \sum_{n=1}^n w_n d_{k+1-n}, \quad (4)$$

根据最大似然原理,这个滤波器应满足以下 2 点:

(1) 当某一频率的无噪声信号通过后,信号不发生变化,根据卷积定理可得

$$\sum_{n=1}^n w_n e^{i\omega(1-n)\Delta t} = 1. \quad (5)$$

用矩阵记为

$$E^{*T}WE = 1, \quad (6)$$

$$E = [1, e^{i\omega\Delta t}, e^{i\omega 2\Delta t}, \dots, e^{i\omega(n-1)\Delta t}].$$

(2) 当均值为零的纯噪声信号通过后,它的方差达到极小,其方差可表示为

$$\sigma^2 = E(x_k)^2 = E(\sum_{n=1}^n w_n d_{k+1-n})^2. \quad (7)$$

上式方程采用矩阵符号表示为

$$\sigma^2 = W^{*T}\rho W, \quad (8)$$

式中, ρ 为协方差矩阵。在上 2 个条件的基础上,使得天然源信号通过滤波器时的方差达到最小,则有

$$\frac{\partial}{\partial w} [W^{*T}\rho W - \lambda(E^{*T}W - 1)] = 0, \quad (9)$$

式中, λ 为方程引入的待定系数。经求解得

$$W = \lambda\rho^{-1}E^{*}/2. \quad (10)$$

此方程在滤波器系数为复数时同样正确,即有附加条件为

$$E^TW = 1 \quad (11)$$

由此可得

$$\frac{\lambda}{2} = 1/(E^T\rho^{-1}E^{*}), \quad (12)$$

$$W = \rho^{-1}E^{*}/(E^T\rho^{-1}E^{*}). \quad (13)$$

此滤波器是应用最大似然法的原理所设计的最佳滤波器。它只通过单一频率分量而拒绝噪声通过,最后求出方差矩阵可表示为

$$\sigma^2 = 1/(E^T\rho^{-1}E^{*}). \quad (14)$$

这个方差值就作为用最大似然估计功率谱值,写为

$$\hat{P} = (E^T\rho^{-1}E^{*})^{-1} = \{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho^{-1} \exp[i\omega(k-l)\Delta t]\}^{-1}. \quad (15)$$

推广到二维空间,即有

$$\hat{P}(K_x, K_y, \omega) = \{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \Phi_{ij} \exp[iK_x(x_i - x_j) + iK_y(y_i - y_j)]\}^{-1}. \quad (16)$$

式中, K 为波数矢量,它在 x 方向的分量为 K_x , y 方向的分量为 K_y ; Φ 是协方差矩阵 ρ 的逆矩阵; (x_i, y_i) 是测点的位置坐标。

2 仪器设备配置

天然源面波频率-波数法接收的是天然场源的信号,仪器包括拾震器系统和观测采集系统。

拾震器是将地面振动信号变为电信号的一种换能器,可根据勘探的深浅选择不同固有周期拾震器。

天然源面波观测记录系统主要指把由检波器接收转换的电模拟面波信号,经放大、滤波、积分,最后经 A/D 转换成数字量后传送到微型计算机,进行数据处理的过程。观测记录系统设置了放大、滤波、积分等功能,其作用叙述如下:

(1)前置放大器的作用主要把微弱的天然面波信号放大到 A/D 转换器能测量到的电压范围,从而提高观测精度。

(2)滤波器的作用主要是切除外界环境的低、高频干扰突出有用信号,提高信噪比,所以仪器设置了低、高通滤波器。

(3)积分器的作用主要是为了进一步滤除高频干扰信号,提高低频信号的幅度,降低高频信号的幅度,达到进一步提高信噪比的作用。

(4)A/D 转换器的作用是把模拟量转换成数字量,仪器采用了 24 位高精度的 A/D 转换器,各道采样的起止时间最终严格受控于微型计算机。

(5)微型计算机的作用主要是接收 A/D 转换器所采集器的数据,并实时显示采集的数据波形信号,兼有控制各道同时采样的作用。

3 数据处理

天然源面波频率-波数法处理工作站是以稳定随机理论为基础,用最大似然法提取面波频率-波数谱,求取面波相速度的过程。其工作流程为:各道面波信号显示→数字滤波→求取相似系数→计算频率-速度功率谱→瑞雷波相速度频散曲线→反演横波速度模型。

(1)波形显示。其目的主要是为了检查各道记录的波形质量,以便对各时间段采集的数据做进一步处理。

(2)数字滤波及编辑。虽然面波信号在采集过程中已经通过硬件进行模拟滤波,但对于干扰信号不会清除得很“干净”,所以还有必要选取一定宽度的数字带通滤波,以便清除高、低频的干扰信号,提高信噪比。

(3)求取频率-波数功率谱。首先对相似系数较好的数据段求取各道之间的相关矩阵

$$q_{i,j} = S_{i,j}(\omega) \exp[iK(r_i - r_j)] \quad (17)$$

最大似然滤波系数可表示为

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^n q_{i,j}(K, \omega)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q_{i,j}(K, \omega)} \quad (18)$$

万方数据

推定的最大似然功率谱为

$$p' = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_i^*(K, \omega) A_j(K, \omega) S_{ij}(\omega) \cdot \exp\{K(r_i - r_j)\} \quad (19)$$

(4)天然源面波相速度和传播方向。通过波数坐标 (K_x, K_y) 可确定 F-K 功率谱峰值波数矢量 K 的值,进而可求得某一频率为 f 的相速度:

$$v_c = \frac{2\pi f}{|K|} = \frac{2\pi}{T \sqrt{K_x^2 + K_y^2}} \quad (20)$$

面波传播方向由 F-K 功率谱图可以方便地求出某一个频率成分的面波传播方向。首先台阵的坐标系设为北为 y 轴正方向,东为 x 轴的正方向。这样通过 F-K 功率谱的方位角 ϕ_0 来确定某个频率成分面波的来波方向。

$$\phi_0 = \arctan\left(\frac{K_{0x}}{K_{0y}}\right) \quad (21)$$

(5)层速度的求取。求取层速度采用了最优化选择法。首先根据经验初始模型,计算该模型的理论频散与实测频散之差,并据此修正模型参数(厚度、速度)。这种修正可以由人工凭经验来做或由计算机自动完成。这样的过程反复进行几次,直到 2 种频散的差值小于某一特定值时停止,用此时的模型参数作为反演结果。一般在计算机上实现自动迭代反演的算法是阻尼最小二乘法。

求取相速度(哈斯克法) v_c 所需的参数为层数 N (在计算中不改变)、各层厚度 h_i 和横波速度 v_s 、纵波速度 v_p 、密度 ρ ,周期 T 。即瑞雷波相速度是这些模型参数的非线性函数,即

$$v_c = f(N, v_p, v_s, \rho, h, T) \quad (22)$$

由于各层中其他参数对相速度影响很小,为减少变量,均作为 v_s 的函数对待,实际在迭代过程中修改的模型参数只有 h_i 和 v_{si} 。

4 野外工作方法和技术

4.1 野外布设方法

天然源面波频率-波数法的布阵方法比较自由,可根据野外地形条件采用不规则布阵的方式,可有意避开干扰源(如锅炉房,高速公路等),使各道所受干扰达到最小,野外适用性增强。布阵的范围依勘探目的层的深度而定。根据瑞雷波的基本特性可知瑞雷波的勘探深度与波长成正比,勘探目的层越深,所应接收、提取的面波信号波长应越长,相应的布阵范围应越大,检波器之间的间距也相应加大,反之亦然。

4.2 观测时间

由于天然源频率-波数法所接收是天然场的信号,白天的各种干扰源较多(如行人、车辆及工厂等噪声源),同时各种电磁波信号亦较强,对面波的接收产生干扰,影响较大,故一般在夜间进行面波信号的采集,各种干扰源和电磁波信号均较弱,观测效果相对较好。

5 应用试验效果

为了检验天然源面波频率-波数法的有效性,为此在北京地区已知孔旁进行了大量的试验研究,并首次在长江三角洲地区加以应用,从试验效果来看,各界面的相对误差均小于 10%。

5.1 北七家已知孔

北七家已知孔紧临公路,经常有重载大型车辆经过,有一定的干扰。对原始采集信号波形的畸变道和畸变段的数据进行修改、删除,并用带通数字滤波进行高、低频干扰信号的滤除,然后进行频率-波数法计算。从速度-频率曲线(图 1)看,只在个别频点上发生有突跳(主要受外部干扰所造成),大部分频点较为连续,曲线形态较好。经反演计算,层速度界面与已知孔的层位界面对应的误差不大,平均相对误差为 4.85%。

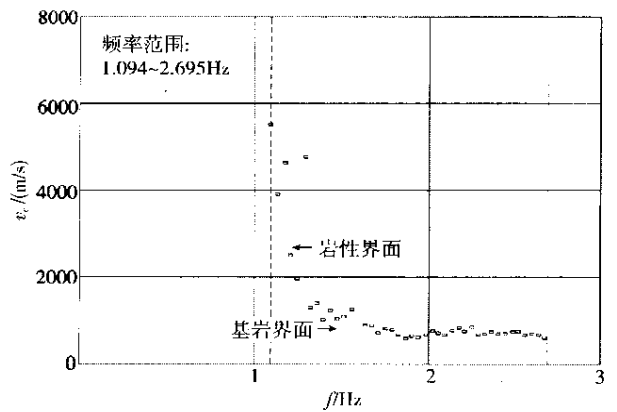


图 1 北七家已知孔的速度-频率曲线

5.2 浙江海宁地区试验

以往在基岩埋深较浅(小于 200 m)的地区应用空间自相关法进行计算时,其计算结果易受高阶面波的干扰。利用频率-波数法提取相速度能够去除高阶面波干扰,得到较好的频散曲线,岩性界面反映明显,取得了较好的分层效果(图 2)。

5.3 大东流已知井

大东流已知孔旁采用了不规则布阵的形式,即采用不等间距,平面任意布设的方式。采用频率-波

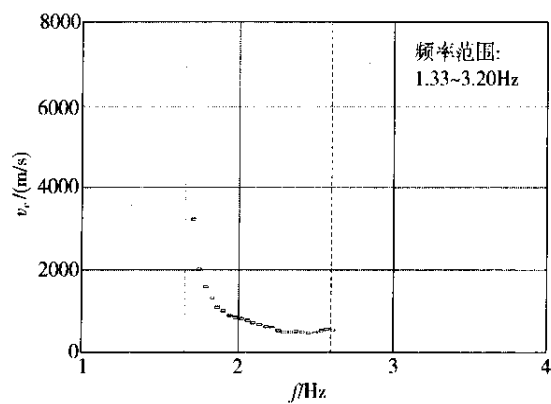
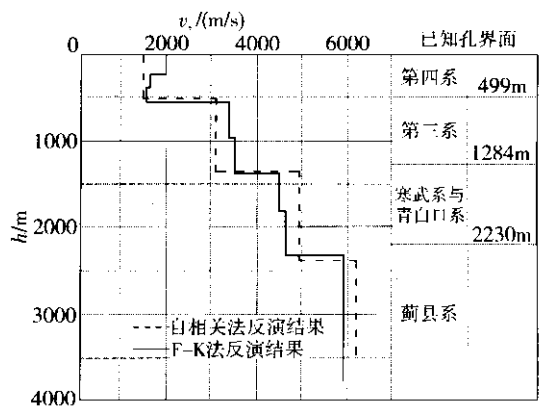


图 2 浙江海宁的速度-频率曲线



3 大东流已知孔的自相关法与 F-K 法反演结果对比

数法计算能起到较好的分层效果(图 3),计算的速度界面与已知孔的界面相对误差为 3.1%,充分显示了天然源频率-波数法在布阵方面的灵活性。

6 结论及建议

天然源面波频率-波数法利用的是天然场源信号,具有成本低,布阵灵活,不扰民等优点,因而具有很好的发展前景。从北京及长江三角洲地区的应用效果来看,反演计算的波速界面与实际地层界面的相对误差小于 10%,说明此方法勘探精度相对较高。在实际勘探过程中应多掌握区域地质及已知孔资料,以便确定速度界面的岩性,避免出现物探上的多解现象,以便正确分层。

参考文献:

[1] 王振东. 微动应用技术讲座[J]. 国外地质勘探技术, 1990, (4-8).
[2] 冉伟彦, 王振东. 长波微动法及其新进展[J]. 物探与化探, 1986 (2).
[3] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
[4] 冈田广, 凌群群. 微动利用的地下構造ノ二關まち最近研究ノ二つについて[R]. 日本北海道大地球物理研究报告, 1994.

为其中之一的 CGG 处理系统折射静校正技术取得了意想不到的好效果,包括剖面效果与整体的闭合效果,合理选择好折射基准面及折射静校正各项参数是关键,特别是它还具有易操作、方便快捷等特点,是值得一试的静校正技术。

参考文献：

[1] 熊翥. 中国西部地区物探工作的思考[J]. 石油地球物理勘探, 2000,35(2) 257-270.
[2] 陈启元,王彦春,段云卿,等. 复杂山区的静校正方法探讨[J].

石油物探,2001,40(1) 73-81.
[3] 王彦春,苑春芳. 静校正及神经网络处理技术[M]. 北京:地质出版社,2000.
[4] 王翠华. 折射静校正应用研究[J]. 石油物探,2000,39(4) 107-113.
[5] 许亚军,徐子伯,魏庚雨,等. 塔里木复杂地表地区静校正问题的处理及效果[J]. 石油地球物理勘探,1996,31(4) 483-494.
[6] 李培明,李振华,祖云飞,等. 模型约束的三维初至折射静校正[J]. 石油地球物理勘探,2003,38(2) 199-202.
[7] 华勇. 折射层析静校正方法及其应用效果[J]. 勘探地球物理进展,2002,25(5) 52-54.

THE APPLICATION OF REFRACTION STATIC CORRECTION UNDER COMPLEX SURFACE CONDITIONS

DUAN Hong-you^{1,2}, ZENG Qing-cai^{1,2}, LI Chen²

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China ; 2. Institute of Exploration and Development, Branch Corporation of Henan Oilfield, SINOPEC, Nanyang 473132, China)

Abstract : This paper describes in brief the basic principle, technical advantage and applicable conditions of the refraction static correction technique in CGG processing system, and deals with the influence of some key factors including the refraction datum level upon the refraction static correction. Exemplified by the application of this technique in mountainous areas, deserts and gobi areas, the paper also analyzes the results of the refraction static correction.

Key words : seismic data processing ; complex surface ; refraction static correction ; refraction datum level

作者简介：段洪有(1964-),男,高级工程师。1986年毕业于华东石油学院物探专业,一直从事地震资料处理方法研究,现为中国地质大学在读研究生,公开发表学术论文数篇。



上接 141 页

THE APPLICATION OF NATURAL SOURCE SURFACE WAVE FREQUENCY-WAVES METHOD

DING Lian-jing, RAN Wei-yan
(Beijing Institute of Geo-exploration Technology, Beijing 102218, China)

Abstract : The natural source surface wave frequency-waves (NSSWF) method is a new geophysical method deriving surface wave signals from natural source. In recently years, based on the learning of foreign files and analysis of the fundamental characteristics of surface wave, the authors have successfully developed the field observation and collection system and data processing system. Through testing large quantities of known holes, the field observation technique of stochastic matrix has been set up alongside with the test of the above method.

Key words : natural source surface wave ; frequency-waves ; Rayleigh wave

作者简介：丁连靖(1967-),男,北京市顺义区人。1989年毕业于长春地质学院物探专业,现任北京市地质勘察技术院华清地热开发有限公司工程师、技术负责,主要从事天然源面波的理论研究及地热井前期物探勘查工作,公开发表学术论文数篇。