

用改进的 τ - p 变换算法提取瞬态瑞雷波频散曲线

宋先海¹, 肖柏勋¹, 张学强², 顾汉明², 刘江平²

(1. 长江工程地球物理勘测研究院, 湖北 武汉 430010; 2. 中国地质大学 应用地球物理系, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 传统的 τ - p 变换算法易出现假频和端点效应。基于前人的思想, 笔者对时空域中传统的 τ - p 变换算法进行了改进, 有效地解决了上述问题。理论模型试算证实了本算法的正确性和有效性, 实例分析结果表明, 用改进后的 τ - p 变换算法进行波场分离提取瞬态瑞雷波频散曲线具有失真小、可靠性高、压制假频和端点效应好等优点。

关键词: 瞬态瑞雷波; 波频散曲线; τ - p 变换; 假频和端点效应; 双曲线速度滤波

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2003)04-0292-04

由于瞬态瑞雷波勘探具有轻便、快捷、高效、分辨率高、不受各地层速度关系影响等优点, 因而近年来倍受关注^[1]。而瑞雷波频散曲线与地下介质结构密切相关^[2], 所以如何提取准确可靠的频散曲线是瑞雷波勘探技术的关键问题之一。

对于瑞雷波频散曲线的提取, 前人做过一些研究。刘云祯^[3]等人提出通过多道分析选择最佳观测时窗, 利用 f - k 变换提取瑞雷波频散曲线, 但是当各种转换波与面波严重耦合在一起时, 难以选择最佳观测窗口; Tatham 等人^[4]提出利用 τ - p 变换进行波场分离的思想, 为瑞雷波频散曲线的提取提供了一条新的途径。

为此, 基于前人的思想, 利用诊断医学中计算机层析滤波反投影技术, 将 Schultz^[5] 和 Stoffa^[6] 等人提出的传统 τ - p 变换算法进行了改进和优化。在 τ - p 正变换前进行双曲线速度滤波 (hyperbola velocity filter, 简称 HVF), 在 τ - p 反变换时应用滤波法, 二者联合应用以便压制变换中的假频和端点效应, 改善和提高 τ - p 变换的质量。理论模型试算结果证实了改进后的变换算法的正确性和有效性; 实例分析结果表明, 用改进后的 τ - p 变换算法进行波场分离提取瞬态瑞雷波频散曲线具有失真小、可靠性高、压制假频和端点效应好等优点。

1 时空域中改进的变换算法

1.1 传统的变换算法

对于时空域 (x - t 域) 的一个共炮点 (CSP) 道集

地震记录 $\Phi(x, t)$, 利用如下 τ - p 正变换 (倾斜叠加) 便可映射成 τ - p 域

$$\Psi(p, \tau) = \sum \Phi(x, \tau + px), \quad (1)$$

式中, $\tau = t - px$; τ 参数的物理意义为垂直波慢度, 几何意义为 τ - p 变换中在时间轴上的截距; p 参数的物理意义为水平波慢度, 几何意义为射线参数 (或时距曲线的瞬时斜率)。

通过上述变换, 在域内相互交叉干涉的复杂波场, 变换到域内则各自分离。在域内反射波双曲线同相轴映射到域内则为一个椭圆; 具有线性同相轴特性的面波、直达波、声波、折射波, 由于值为一定值, 因此变换到域内则以各自分离的“点”状形式表现出来。这样, 便可以在域内根据需要进行波场分离, 提取所需的地震信号。

反变换就是从空间变换到原来的空间, 变换公式为

$$\Phi(x, t) = \sum \Psi(p, t - px). \quad (2)$$

将上述 (1)、(2) 式的正、反 τ - p 变换对写成离散形式, 则分别为

$$\Psi(p_j, \tau_i) = \sum_{n=1}^N \Phi(x_n, \tau_i + p_j x_n), \quad (3)$$

$$\Phi(x_n, t_m) = \sum_{j=1}^J \Psi(p_j, t_m - p_j x_n), \quad (4)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, I$; $j = 1, 2, \dots, J$; $n = 1, 2, \dots, N$; $m = 1, 2, \dots, M$; N 为多道炮集地震记录的道数; M 为每道记录的样点数; I 为 τ - p 变换中在时间轴上的截距

收稿日期: 2002-09-23

基金项目: “九·五”国家重点科技攻关项目 (96-221-01-02-05); 长江水利委员会综合勘测局科技发展基金资助项目 (KY2000-4)

数; J 为 p 道数。

1.2 传统 τ - p 变换算法的改进

在 x - t 域中实现传统的 τ - p 变换会出现假频和端点效应人为假象,这两者大大降低了 τ - p 变换的质量。假频是由于变换过程中瞬时斜率 p 给的过大引起的,端点效应则是由于在 x - t 域中共炮点道集道数有限造成的。为此,在 τ - p 正变换前进行 HVF,在反变换时应用滤波法,二者联合运用以便压制变换中的假频和端点效应,提高 τ - p 变换的质量。

HVF 是随时间和偏移距变化的一种滤波形式,它要求用一个近似叠加速度 v_{Rms} 来确定地下介质叠加速度的变化范围($v_{\text{min}}, v_{\text{max}}$),进而用下式来确定出与某真实界面射线参数相关的 p 值变化范围

$$\frac{x}{tv_{\text{max}}^2} < p < \frac{x}{tv_{\text{min}}^2}, \quad (5)$$

式中, $v_{\text{max/min}} = (1 \pm k/100)v_{\text{Rms}}$, k 为速度带半宽百分率。

对于输入道集的每一点,在正变换前切除(5)式确定的 p 值范围以外的值,使之不参加 τ - p 变换叠加。

滤波法是利用诊断医学中计算机层析滤波反投影技术的思想,在 τ - p 反变换时将下述的滤波算子 G 作用于 $\Psi(p, \tau)$ 上,然后再进行求和叠加。

$$G(m\Delta t) = \begin{cases} \frac{1}{4(\Delta t)^2} & m = 0 \\ 0 & m = \text{偶数} \\ -\frac{1}{m^2\pi^2(\Delta t)^2} & m = \text{奇数} \end{cases}, \quad (6)$$

式中, Δt 为采样间隔。于是,由(4)式和(6)式有

$$\Phi(x_n, t_m) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^J G(m\Delta t) \cdot \Psi(p_j, t_m - p_j x_n). \quad (7)$$

1.3 改进的 τ - p 变换算法在计算机上的实现

在计算机上实现改进的 τ - p 正变换算法主要有以下几步流程(图 1)。

(1) 输入 CSP 道集或其它道集,如共中心点(CMP)道集;

(2) 用(5)式进行 HVF;

(3) 对某一 p 值,在 x - t 域地震道集记录上取多条相互平行的斜线,与时间 t 轴相交的截距时间为 τ_i 各不相同。对每条斜线上的值,校正后求和,然后放入相应的 τ - p 平面内,这样就形成了一个 p 道;

(4) 以步长 Δp 增加,直至形成所有的 p 道集。

在计算机上实现改进的 τ - p 反变换的过程与正变换相似。在 τ - p 域中,利用(6)式取相互平行的斜线,对每条斜线上的数值,校正后求和,并送到 x - t

域相应的位置上,改进的 τ - p 正变换的程序加入滤波法,略加修改后就变成了 τ - p 反变换。

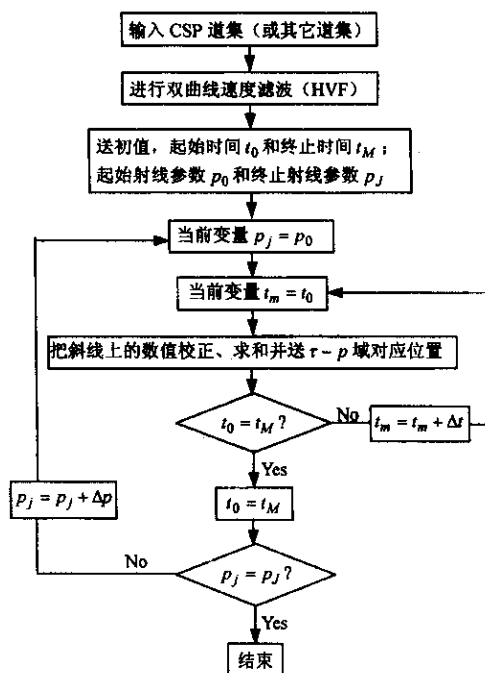


图 1 在计算机上实现改进的正变换算法流程

2 理论模型试算

图 2 是水平层状介质共炮点反射波理论合成地震记录(介质的 3 个反射界面十分清楚),第一层介

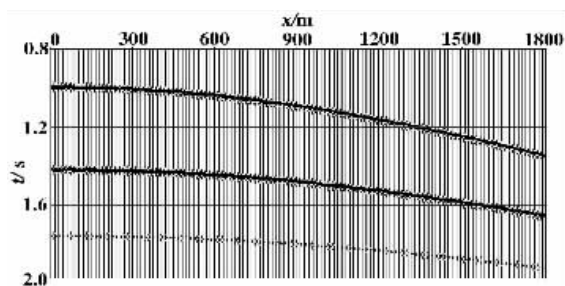
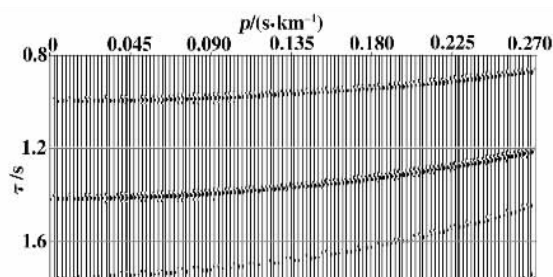
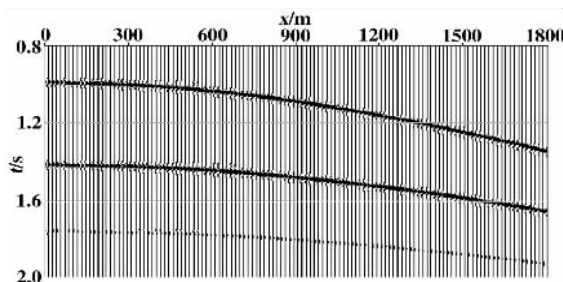


图 2 共炮点反射波理论合成地震记录

质速度为 2 000 m/s,第二层速度为 2 400 m/s,第三层速度为 3 000 m/s,各界面的相应深度分别为 1 000 m、1 500 m 和 2 000 m;最小炮检距为零,最大炮检距为 1 800 m,道间距为 15 m,采样间隔为 2 ms,采样点数为 2 048 个。图 3 是用 HVF 进行变换的结果,原来的 3 条双曲线在 τ - p 域映射成了 3 条椭圆线,且图 2 中的双曲线与图 3 中椭圆线对应的相当好。图 4 是用滤波法返回到域的结果,图 4 与图 2 完全一致,消除了假频和端点效应,提高了变换的质量,从而说明了改进的变换算法的正确性和有效性。

图3 改进的 τ - p 正变换图4 改进的 τ - p 反变换

3 实例分析

图5是在河南省境内某公路试验段(正在进行振冲压碾)施工现场采集的实测瑞雷波原始地震记录。资料采集时,采用多次覆盖观测系统,仪器采用国产SE2404数字地震仪,4 Hz低频检波器接收,锤击激发,记录道数为24道,记录长度为0.5 s,采样间隔为0.5 ms,偏移距为5~7 m,道间距为1.0 m。

由图5a可见,瑞雷波原始地震记录中,直达波、折射波、反射波等与面波叠加耦合在一起。图5b是用改进的变换算法由图5a中提取的一条瑞雷波频散曲线,由于我们只关心10 m以上的浅层部分,故显示深度为0.81~10 m,451个频点(原始频带范围7.81~119.63 Hz,459个频点)。由图5b可见,应

用笔者的算法提高了频散曲线的计算精度和可靠性,该频散曲线高频段(浅层)频点较密,低频段(深层)频点较稀,其变化形态和趋势与地下介质结构完全吻合(图5c),浅层由于进行了振冲压碾,速度较高(相速度约195 m/s),中间层为较松散的砂土,速度较低(相速度约176 m/s),然后到了深层,速度又逐渐增高。该频散曲线消除了直达波、折射波、反射波等干扰,没有出现斜直频散曲线^[7]等畸变异常现象。小于0.81 m以内没有频点主要是由于震源的高频成分较低引起的(最高频率为119.63 Hz)。

4 结论与建议

理论模型和实际资料试算结果表明,改进后的 τ - p 变换算法是一种计算上比较现实的瑞雷波频散曲线提取方法,由于在 τ - p 正变换前进行了双曲线速度滤波,在 τ - p 反变换时应用了滤波法,二者联合应用较好地压制了变换中的假频和端点效应,改善和提高了 τ - p 变换的质量。用改进后的 τ - p 变换算法进行波场分离提取瞬态瑞雷波频散曲线,具有失真小、可靠性高等优点,能够较好地消除直达波、折射波、反射波等干扰。由于改进和优化了传统的 τ - p 变换算法,所以计算速度也较快(笔者计算3层地质模型,在PC586上用约30 s)。但是,为了提高浅层(如文中0.81 m以内)分辨率和可靠性,还需提高震源的高频成分;若想提高深层的分辨率,还需加密深层的频点数。

笔者在计算和算法实现中,得到肖柏勋博士和张学强教授的指导,顾汉明教授对理论模型试算给予了指点。在实测资料采集,刘江平博士提出了很多宝贵意见,在此一并表示衷心感谢。

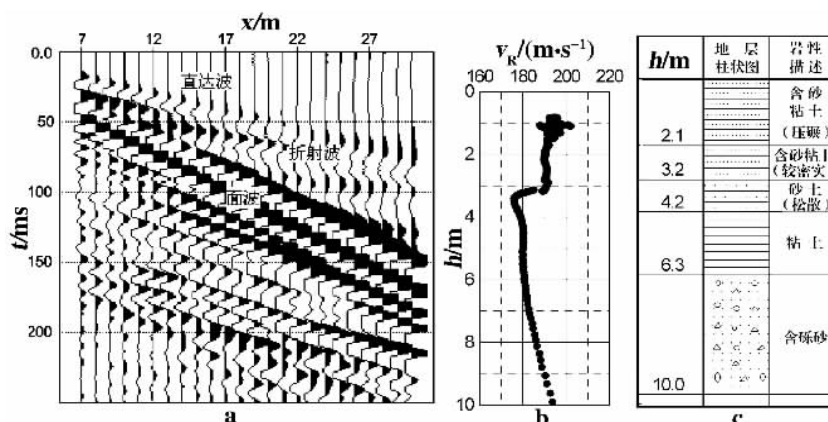


图5 河南省某公路试验段瑞雷波曲线处理结果与地层对比

a—实测瑞雷波地震记录;b—提取的瑞雷波频散曲线;c—地层柱状图

参考文献:

- [1] 宋先海. 瑞雷波频散曲线的正反演研究[D]. 武汉:中国地质大学应用地球物理系,2001.
- [2] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京:地质出版社,1993.
- [3] 刘云祯,王振东. 瞬态面波法的数据采集处理系统及应用实例[J]. 物探与化探,1996,20(1):28-33.
- [4] Tatham R H, Goolsbee D V. Separation of S-wave and p-wave reflections offshore western Florida[J]. Geophysics, 1984, 49(5): 493-508.
- [5] Schutz P S, Clearbout J F. Velocity estimation and downward continuation by wavefront synthesis[J]. Geophysics, 1978, 43(3): 691-714.
- [6] Stoffa P L, Buhl P, Dibold J B, et al. Direct mapping of seismic data to the domain of intercept time and ray parameter-A Plane-wave decompositions[J]. Geophysics, 1981, 46(4): 255-267.
- [7] 崔占荣,张世洪,张俊喻. 瞬态瑞雷波勘探中一些问题的讨论[J]. 物探与化探,1995,19(5):369-377.
- [8] 包军强,张学强,刘江平,等. 浅层多波的分离识别与提取[J]. 物探与化探,1998,22(5):336-342.
- [9] 张学强,包军强,刘江平,等. 地震剖面分类与浅层三种波的层位对比[J]. 物探与化探,1999,23(1):7-13.
- [10] 刘江平,杨永清,李修忠. 复杂地形条件下地震速度提取方法及分析[J]. 物探与化探,1999,23(4):258-264.
- [11] 宋先海,肖柏勋,黄荣荣,等. 用等厚薄层权重自适应迭代阻尼最小二乘法反演瑞雷波频散曲线[J]. 物探与化探,2003,27(3):212-216.

THE APPLICATION OF IMPROVED τ - p TRANSFORM ALGORITHM TO THE EXTRACTION OF DISPERSION CURVE OF TRANSIENT RAYLEIGH WAVE

SONG Xian-hai¹, XIAO Bo-xun¹, ZHANG Xue-qiang², GU Han-ming², LIU Jiang-ping²

(1. Institute of Changjiang Engineering Geophysical Prospecting, Wuhan 430010, China; 2. Department of Applied Geophysics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Traditional transform algorithm has been improved in this paper. The new efficient algorithm has overcome the troubles of false frequency and port effect existing in traditional transform algorithm. The test of theoretical models and the field seismic data indicate that the improved transform algorithm has the merits of good stability, high reliability and weak distortion, and can efficiently eliminate false frequency and port effect.

Key words: transient Rayleigh wave; dispersion curve; τ - p transform; false frequency and port effect; hyperbola velocity filter

作者简介: 宋先海(1973-),男,2001年毕业于中国地质大学(武汉)应用地球物理系,获硕士学位。现任长江工程地球物理勘测研究院(武汉)软件开发部主任,高级工程师,长江水利委员会综合勘测局科技发展基金项目“瑞雷波勘探的理论与应用技术研究”项目负责人。现主要从事瑞雷波正反演研究及软件开发工作,公开发表论著数篇。