

地震剖面分类与浅层三种波的层位对比①

张学强 包军强 刘江平 周鸿秋

摘 要 3种波指的是反射纵波, 折射纵波, 瑞雷面波。层位对比指的是3种波波场特征对比和它们各自反演所得的波速对比。对比的目的是为了确定剖面中形成3种波的地层及其层位, 为3种波交叉渗透的联合反演奠定基础。本文所述内容是同时应用3种波, 进行多波勘探方法理论的重要组成部分。为适应这种新型多波勘探的正、反演, 文中首先以剖面中层数和相邻层之间波速大小关系为依据, 介绍剖面分类与命名的方法, 而后针对本文主题, 论述利用3种波的波场特征和波速关系, 进行层位对比的方法。

关键词 体波; 面波; 剖面分类; 多波层位对比

CLASSIFICATION OF SEISMIC PROFILES AND HORIZONTAL CORRELATION OF THREE SHALLOW WAVES

Zhang Xueqiang, Bao Junqiang, Liu Jiangping, Zhou Hongqiu

(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract Three seismic waves illustrated in this paper refer to reflected compressional wave, refracted compressional wave and Rayleigh wave. The horizontal correlations means correlation of properties between wave fields of the three waves and correlation between seismic velocities obtained from their inversion results. The aim of the correlation is to determine the horizons as well as the strata that form the three waves in seismic sections and to provide theoretical basis for comprehensive inversion by means of cross association of the three waves. This paper is an important part of method and theory which can be used in simultaneous multitype wave exploration. It recounts the classification method and naming method based on the relation between velocity values in strata and between horizons in the section with the purpose of adopting this new forward and inversion technique for multitype wave exploraton. Finally, the paper discusses the horizontal correlation in the light of relationship between the wave field characteristics and the velocity values.

Key words body wave; surface wave; profile classification; horizon correlation by multitype seismic waves

反射波法、折射波法和瑞雷波法是当今工程地震勘探中常用的3种单波勘探方法，三者各自优缺点导致每种方法在工程地质中既存在能提交相当一部分地质资料的有效性，又存在不能充分满足地质需要的局限性。其中反射波法具有分辨率高等优点，但存在无法反演反射层波速 V (例如，反演两层介质中的 V_2)等缺点；折射波法具有反演折射层波速 V 进而据 V 值判定该层岩性等优点，但却存在无法探测波速倒转层等缺点，上述两种纵波勘探方法还共同存在无法反演岩、土与地基力学参数的缺点。瑞雷波法虽然具有能提交上述力学参数等优点，但其反演的两种方法中，波长法因波长深度转换系数难以确定；拟合法则因频散曲线由多参数决定而存在多解性，所以该方法两种反演有待进一步研究完善。造成每种单波勘探方法上述的局限性或主要难题尚未完全解决，其主要原因是由于每种单波勘探都只是提取3种波中的一种而把另外两种连同其它噪声都作为干扰波处理。把3种波都作为有效波，进行一次施工三波并用的多波勘探，不仅能利用3种波各自反演的结果(例如层面埋深等)进行三者彼此对比检验，而且有条件在反演过程中实施3种波交叉渗透的联合反演，从而在联合反演的结果中体现出3种单波勘探方法的取长补短，为工程项目提交精度较高、参数较全的地层、构造，以及岩、土与地基力学参数等地质资料。在3种波的多波勘探方法新理论中，笔者已论述了浅层多波的分离识别与提取^{〔1〕}，该研究成果表明：应用点震源激发、小偏移距长排列接收，能得到含有3种波信号的浅层多波记录，进而通过非常规的数字处理，能从该记录中分别提取3种波的信号。本文是在3种波信号已提取的基础上论述层位对比，它是3种波交叉渗透联合反演的重要组成部分，旨在从多波记录中，确定剖面中形成3种波的三者层数及层位的彼此关系，以避免联合反演时出现差错。例如，中间层为波速倒转的 $V_3 > V_1 > V_2$ 3层剖面，其多波记录中反射波与直达波组成为3层的信号，而折射波与直达波却为2层的信号，不仅层位对比困难，而且可能会出现把折射波信号当作剖面中第二层信号的差错。上例表明在3种波联合反演之前，科学地进行层位对比的必要性。本文首先针对3种波的物理模型及其正演问题，介绍对地震剖面进行分类与模型参数选取的方法，而后论述反演中3种波层位对比的方法。有关3种波交叉渗透的联合反演方法，因篇幅所限拟另立专题论述。

1 地震剖面的分类与物理模型

1.1 剖面分类

物理模型为层状介质。笔者借鉴电阻率测深法中对地电断面与测深曲线进行分类与命名的方法^{〔2〕}，以剖面中层数和相邻层之间波速 V 的大小为分类依据，对地震剖面进行了分类与命名。定义：二层剖面中 $V_1 > V_2$ 为D型， $V_1 < V_2$ 为G型剖面(共二类)；3层剖面中 $V_1 < V_2 < V_3$ 为A型， $V_1 < V_2 > V_3$ 为K型， $V_1 > V_2 < V_3$ 为H型， $V_1 > V_2 > V_3$ 为Q型剖面(共四类)，以A，K，H和Q为基本型号，四层剖面分为 $V_1 < V_2 < V_3 < V_4$ 的AA型， $V_1 < V_2 < V_3 > V_4$ 的AK型等八类。推而广之，五层剖面分为 $V_1 < V_2 < V_3 > V_4 < V_5$ 的AKH型等16类。如果以深度 H 为横坐标，以波速 V 为纵坐标，绘图表示剖面中各层波速与厚度的曲线，则定义这种曲线为剖面曲线(图1)。用剖面名称(类型)或曲线，二者均可取代传统的绘制地震剖面图工序，尤其是用剖面名称来表示剖面中层数与相邻层之间波速的大小关系，不仅能简明扼要地概括各类层速度剖面特征，而且能为多波勘

探模型正演和层位对比的描述与分析，带来许多简便。显然，上述分类与命名也适用于单波勘探。

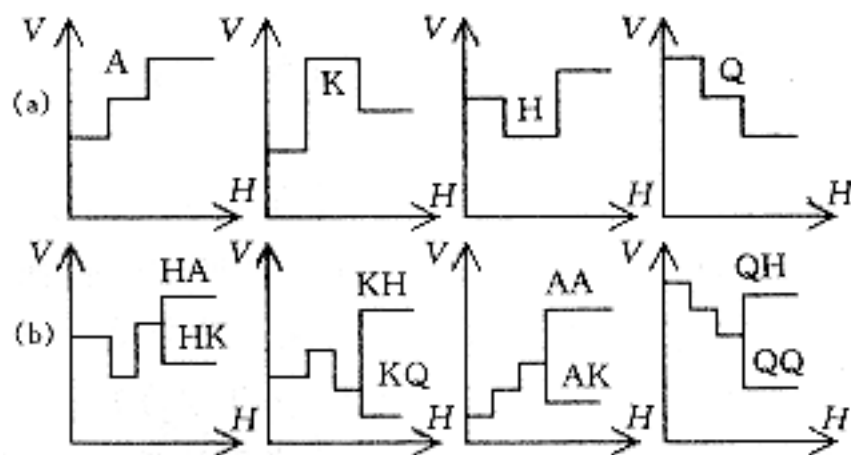


图1 剖面类型及其对应曲线
a—3层剖面；b—四层剖面

1.2 3种波地震剖面的模型与物理参数

剖面中的物理参数，直接决定了剖面各层能否形成3种波和3种波的波场特征。对于水平层状介质，其瑞雷波频散曲线特征，是由剖面中各层的纵波波速 V_P 、横波波速 V_S 、密度 ρ 和层厚度 h 4种参数决定，而反射纵波与折射纵波的运动学波场特征(时距曲线)则由其中的 V_P 与 h 2种参数决定，因此，适用于3种波的水平层状各类剖面模型，其物理参数应由 V_P ， V_S ， ρ 和 h 4种参数组成。基于下述公式〔3〕

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1-\sigma)}{1-2\sigma}} \quad (1)$$

当 V_P 与泊松比 σ 已知时， V_S 即可确定，所以对于剖面四种参数中的 V_P 与 V_S 2种波速参数，我们只取其中的 V_P 1种(亦即模型中波速参数只取纵波波速 V_P)。这种剖面不仅能根据其中 V_P 的层数与各层 V_P 大小关系，确定出该剖面的名称(类型)，而且能满足3种波剖面模型正演的条件，即对于反射与折射纵波，因剖面中波速为纵波波速 V_P ，所以可直接利用各层的 V_P 与 h 值进行正演，而对于瑞雷波，则利用(1)式，把剖面中各层的 V_P 值换算出 V_S 值，进而应用各层的 V_P ， V_S ， ρ 和 h 值进行正演。由于 V_S 是用(1)式换算而得，所以不仅瑞雷波正演所得的该波频散曲线能符合自然规律，而且模型中四种物

理参数也能满足3种波波场对比的应用条件(该条件为每类剖面各层中的 V_P , V_S 和 ρ 三者关系能满足自然界的一般规律, 并且能正演3种波)。

综上所述, 应用上述方法对剖面分类与命名。参数 V_P , V_S , ρ 和 h 中的波速只取 V_P 来建立各类地震剖面模型是能够对每类剖面科学地进行正演与层位对比。现以A型剖面为例来说明这种建模方法的科学性。据剖面分类与命名定义, 该剖面为3层介质, 各层波速关系为 $V_1 < V_2 < V_3$ 。 V 为纵波波速 V_P 的简写, 其下标数码表示剖面中地层序号。该剖面对于反射波的形成及其时距曲线, 根据介质的 V 随 ρ 增大而增大, 反之减小的一般规律, 剖面中 $V_1 < V_2 < V_3$ 反映了波阻抗 $\rho_1 V_1 < \rho_2 V_2 < \rho_3 V_3$ (波阻抗差异为反射波形成条件)。于是根据几何地震学理论, 可得图2a中曲线, 其中 P_1 为直达波, P_2 , P_3 为反射波时距曲线, P 的下标表示与该曲线对应的剖面中地层序号(下同); 对于折射波, 据该波的形成条件与几何地震学理论, 可得图2b中的 P_1 直达波与 P'_2 , P'_3 折射波时距曲线(若第2层厚度 h_2 小于该层临界厚度 $h_{32}A$, 则 P'_2 曲线应落在续至区, 但其斜率不变)^[4]; 对于瑞雷波, 据 $V_P > V_S > V_R$ 规律(V_R 为瑞雷波波速), 剖面中 $V_1 < V_2 < V_3$ 意味着 $V_{R1} < V_{R2} < V_{R3}$, 于是A型剖面正演所得瑞雷波频散曲线应如图2c所示, 其中坐标 f, V_r 分别表示瑞雷波频散的频率与相速度(假设第二层厚度 h_2 足够大, 否则不会出现第2层的渐近线 P''_2)。如果应用图2中a, b, c3类曲线进行层位对比(属于反演问题), 则不难得出剖面为A型, 3种波的层数、层位一一对应的结论。上例说明各类剖面不做图, 只用名称表示、剖面中2种波速只给1种是可行的。另一种波速 V_S 可根据 V 与泊松比 σ 数值换算而得。

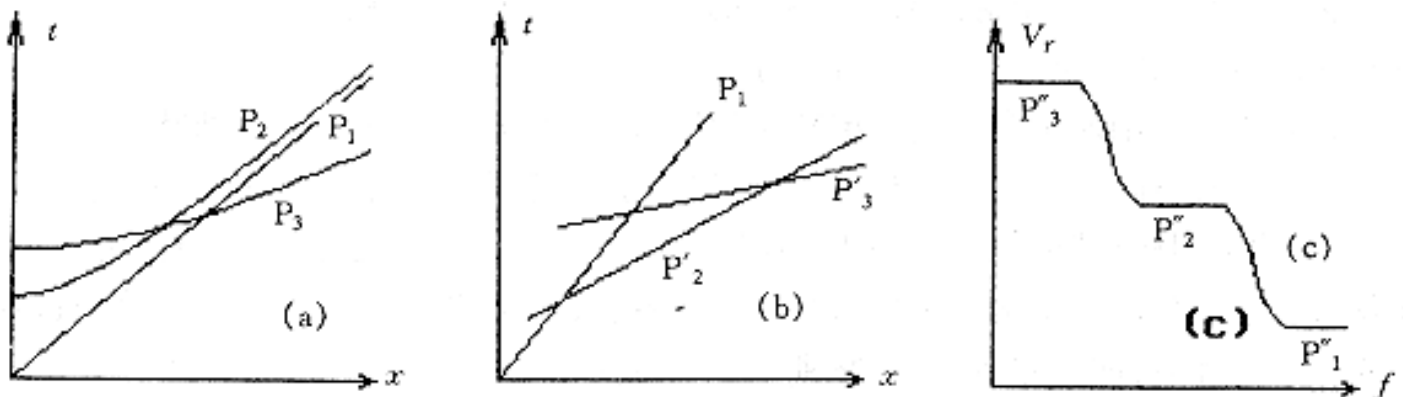


图2 A型剖面浅层的3种波曲线

a—反射波时距曲线；b—折射波时距曲线；c—瑞雷波频散曲线

2 三种波的层位对比

由于层状介质中瑞雷波具有频散特性，记录中该波信号反映不出剖面中层数与层位的波场特征，因而导致 $t-x$ 域(简称时域，原始记录为时域记录)中进行3种波层位对比的不可能。但对于反射波与折射波(以下简称2种波)的层位对比，利用时域记录中2种波信号同相轴的几何特征进行层位对比好像是可能的，然而由于时域浅层多波记录中存在着多波信号交叉混叠和波速倒转层不能形成折射波的问题，因此往往导致2种波的层位对比困难甚至不可能。由于时域记录中3种波层位对比存在上述问题，所以笔者采用了下述的2种方法，其一为 $\tau-p$ 域记录中2种波波场特征与瑞雷频散曲线三者彼此对比的方法，其二为3种波各自反演所得波速的彼此对比方法。

2.1 $\tau-p$ 域记录与频散曲线对比

以上记录与曲线均来自同1张时域记录。 $\tau-p$ 域记录中2种波的各自波场特征和二者彼此关系，是进行2种波层位对比的依据。 $\tau-p$ 域中2种波运动学波场特征的曲线如图3所示(其对应的剖面为AA型)，图中椭圆为反射波； $\tau \neq 0$ 的点为折射波； $\tau=0$ 的点为直达波；序号1, 2, 3, 4表示与点、线对应的剖面中地层序号； V_1 为第一层纵波波速。根据该图 $\tau-p$ 域中2种波波场所显示出的各类剖面中层数与层位，以及二者彼此关系，存在着以下3条规律可以用于2种波的层位对比，其一，椭圆同相轴为地层的反射波信号，椭圆数为剖面中反射层数目。坐标 $\tau \neq 0$ 的“点”状信号为地层的折射波信号，“点”数为剖面中折射层数目。其二，上述椭圆和落在其中 $\tau \neq 0$ 的“点”状信号，均为剖面中同一地层形成的2种波，即二者均对应于剖面中的同一层位。其三，记录中椭圆数与 $\tau \neq 0$ 的“点”数相等，则表明剖面中的反射层与折射层的数目相等，并且二者层位一一对应；若不等，则二者层位不完全一一对应，并且椭圆数与 $\tau \neq 0$ 的“点”数之差就是剖面中存在波速倒转层的数目，其中没有 $\tau \neq 0$ “点”的椭圆信号所显示的层位，就是剖面中波速倒转层的层位。如果遇到记录中椭圆上是否存在 $\tau \neq 0$ 的“点”难以确定，这时应用“调节门槛值”的方法^[1]，即可有效地进行判定。对于记录中的瑞雷波信号，虽然因该波频散特性而显示不出剖面中层数与层位的特征，但多波记录中的该波信号经过瞬态瑞雷波法的数字处理后，即可得到如图2c所示的能显示剖面中层数与层位特征的瑞雷波频散曲线，于是利用该曲线与上述2种波的 $\tau-p$ 域记录进行分析与对比，即可达到实现3种波层位对比的目的。现以图4所示的KH型剖面模型为例，来分析并说明应用上述方法(波场法)对各类剖面进行层位对比的有效性。该模型考虑了浅层基岩埋深及其上部覆盖层中各种物理参数的一般情况，取四层中各层的纵波波速分别为 $V_1=600$ m/s, $V_2=1\,400$ m/s, $V_3=800$ m/s, $V_4=3\,000$ m/s；各层厚度为 $h_1=5$ m, $h_2=15$ m, $h_3=20$ m(以上参数亦可从图4的剖面曲线中直接读出，并从中可看出基岩埋深为40 m)。与上述波速对应的各层密度 ρ 取 $\rho_1=1.9$ g/cm³, $\rho_2=2.3$ g/cm³, $\rho_3=2.1$ g/cm³, $\rho_4=2.6$ g/cm³，泊松比 σ 为 $\sigma_1=0.45$, $\sigma_2=0.35$, $\sigma_3=0.40$, $\sigma_4=0.25$ (据上述各层的 V 与 σ 数值，应用(1)式换算出的横波波速 V_s 为 $VS_1=181$ m/s, $VS_2=673$ m/s, $VS_3=327$ m/s, $VS_4=1\,732$ m/s)。理论记录中道数为24道，道距为10 m，(排列长度为230

m), 偏移距与点震源深度(即井深)均为0 m。反射波、折射波和直达波信号用的是雷克子波, 其长度为20 ms。用以上有关参数作出的直达波、反射波和折射波的理论记录见图5中的P与P', 其中P的下标表示与信号对应的剖面中地层序号, 其中P₁为直达波; P₂, P₃, P₄分别为第二、第三、第四层的反射波(定量计算结果为: 当炮检距x=40 m时, 直达波P₁走时t₁=66.6 ms, 第二层反射波P₂走时t₂=68.7 ms, 当x=60 m时, t₁≈t₂=100 ms, 当x=60 m时, t₁=t₂, 所以记录中x>60 m的远源区, P₁与P₂合而为一); P'₂与P'₄分别为剖面中第二与第四层的折射波(由于KH型剖面中第三层为波速倒转层, 所以记录中没有P'₃信号); 记录中以OP为界、分布在top区域中的信号是该剖面瑞雷波信号, 该信号是利用上述各层V, σ, ρ和h4个参数作出该波的频散曲线(图6)之后(该曲线频率范围取0.1~40 Hz, 是为了满足曲线出现第1层P''₁与第4层P''₄渐近线的要求), 再利用下式作出时域瑞雷波理论记录。

$$R(i, k) = \sum_{j=1}^n a_j \sin 2\pi f_j \left[(k-1)dt - \frac{x_i}{V_{rj}} \right] \quad (2)$$

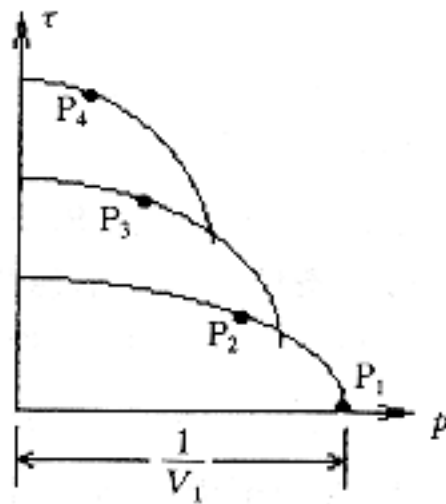


图3 AA型剖面的 τ -p域曲线

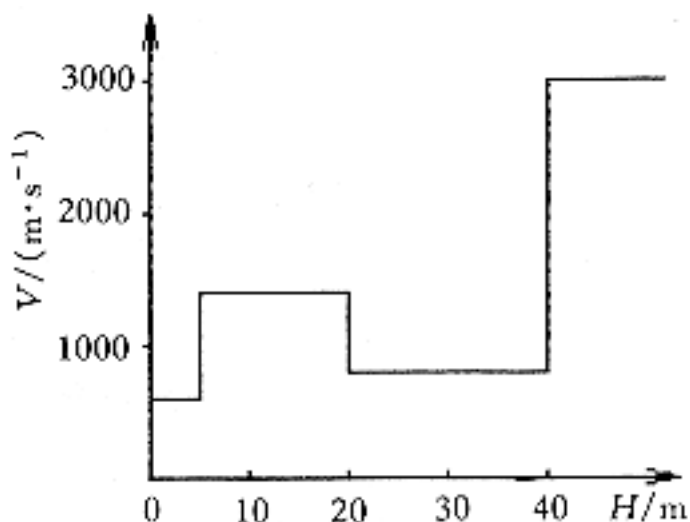


图4 KH型剖面曲线

式中， i 为地震道序号； k 为每道1024个样点中的采样点序号； x_i 为炮检距， dt 为采样间隔； a_j 为正弦波的振幅； j 为频点序号，频率范围据图6曲线取0.1~40 Hz。显然从图5记录中只能确定出瑞雷波信号是分布在top区域内而无法利用该信号确定出剖面中层数与层位。但是用图5记录中的该波信号，能作出与其对应的频散曲线图6，进而在曲线中确定出各层瑞雷波的层速度 V_R （它与该波相速度 V_l 不同）关系为 $VR1 < VR2 > VR3 < VR4$ ，并且曲线中 P'' 下标的数码与图5记录中 P 与 P' 下标的数码相同者，是属于剖面中同一地的3种波信息（除 P_1 表示直达波外， P, P', P'' 分别表示反射波、折射波和瑞雷波（下同）。上述为剖面类型已知条件下，应用波场理论对KH型剖面记录中的各种波，从理论上进行认定与层位对比，上述正演的分析对比是比较容易的。但如果剖面类型未知时，对图5记录进行反演的3种波场分析与层位对比，则记录中瑞雷波信号无法分层；反射波近源区受瑞雷波与折射波干扰，远源区 P_2, P_3, P_4 近似为直线状同相轴，看不出双曲线状，尤其是其中 P_2 与直达波 P_1 信号合而为一， P_3 因对应地层为波速倒转层而导致该层反射波同相轴曲线出现反常，所以很可能把 P_1 判定为只是第一层的直达波，把 P_3, P_4 误判为第二层与第三层的反射波，从而导致层数（判定为3层）与层位两方面的判定都出现差错；对于折射波，从记录中 P'_2, P'_4 信号虽然能很容易判定它们为不同层位的折射波，但由于无法从该波信号中确定剖面是否存在波速倒转层，所以无法确定剖面的层数与 P'_2, P'_4 信号的层位。以上反演图5记录的分析表明，在复杂条件下（存在波速倒转层和第一层 h_1 较小等的条件下），应用时域记录，即使只进行2种波的层位对比，也是十分困难，甚至可能出现差错。

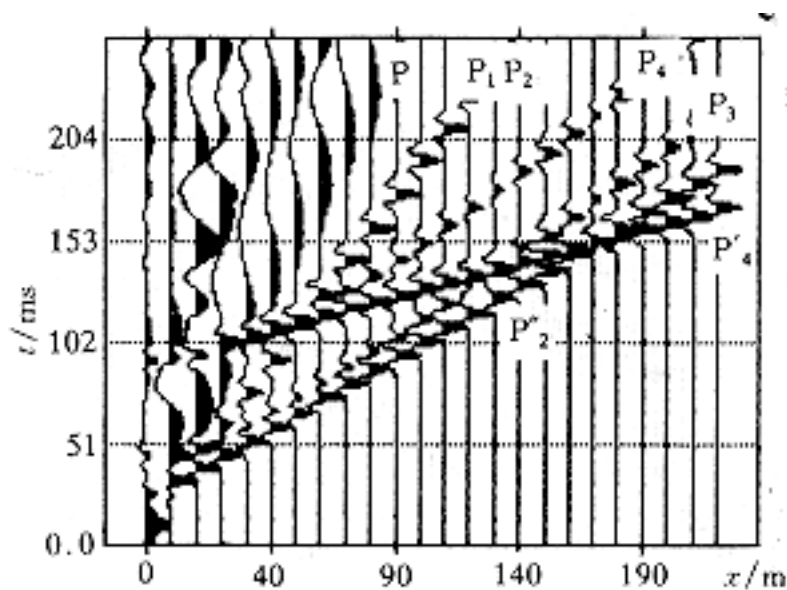


图5 KH型剖面的时域多波记录

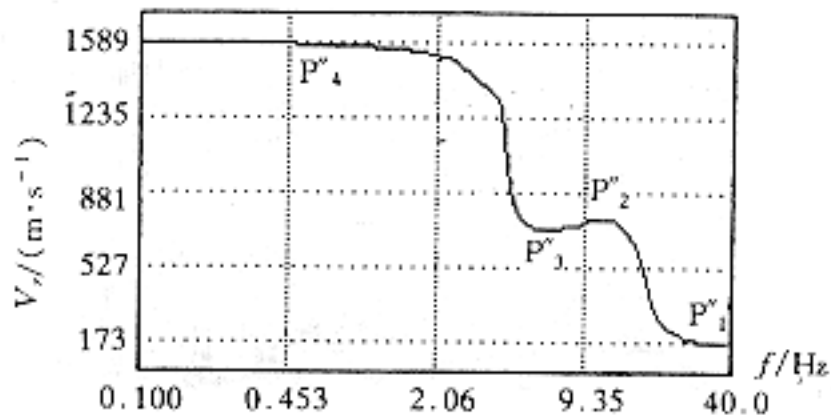


图6 与图5中瑞雷波信号对应的频散曲线

把图5时域记录数据，进行 τ - p 正变换的倾斜叠加数字处理后，得图7的 τ - p 域记录，再对图7记录数据进行调节门槛值的处理后，得图8记录(调节门槛值处理的目的是为了确认图7记录中折射波的“点”数与“点”位)。于是应用前述 τ - p 域记录中2种识别与层位对比的方法(3条规律)，并借助图8记录，即能比较容易地对图7记录进行层位对比(由于理论记录用的是长度的20 ms的雷克子波，其振幅中心点与初至走时之差为10 ms，所以图7与图8记录中的信号，均应进行10 ms的相位时间校正，校正后 P_1 “点”之 τ 值为零，而 P'_2 与 P'_4 2个“点”的 τ 值均不为零)。从图7记录中椭圆有3个， $\tau \neq 0$ 的点有2个，以及 P_3 椭圆中没有 $\tau \neq 0$ “点”的波场特征，得出的结论为：剖面为KH型，其中第2层的 P_2 与 P'_2 2种波的层位对应，第四层的 P_4 与 P'_4 2种波的层位对应， P_3 为波速倒转的第3层反射波信号。再把它们(图7记录和上述结论)与图6瑞雷波频散曲线进行对比与分析，得出3种波层位对比的结论为：图7的记录中 P, P' 与图8曲线中 P'' ，三者下标序号相同的是属于剖面中同一地层的3种波，三者下标序号数码1，

2, 3, 4为该波所显示出的剖面中地层层位。例如图6曲线中 P''_4 的瑞雷波, 它与图7记录中 P_4 , P'_4 2种波的层位对应, 并且三者均为剖面中第四层的3种波。上述记录的反演结论与该记录中KH型剖面正演分析的结果完全一致。

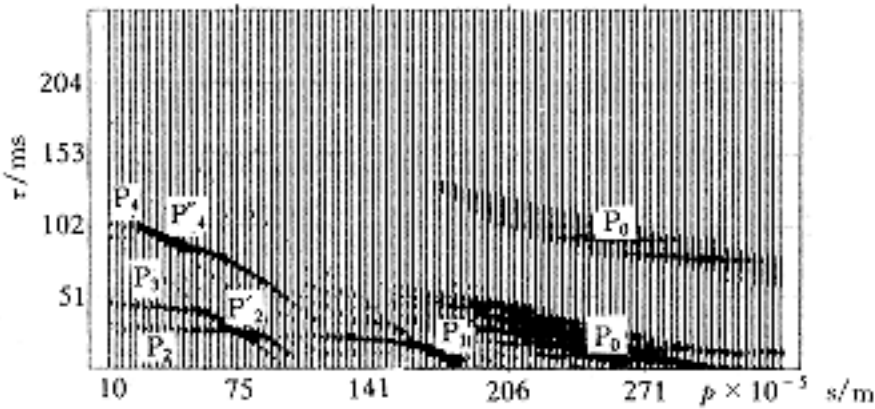


图7 KH型剖面的 τ - p 域理论记录

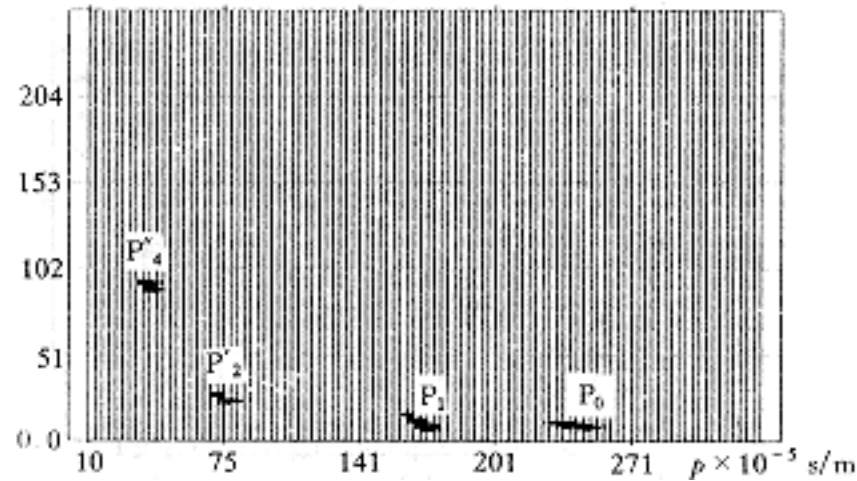


图8 经门槛值调节处理的记录

2.2 3种波波速的层位对比

3种波波速层位对比指的是3种波各自反演所得的各层波速对比(其对比方法简称波速法)。其目的有三方面, 一是检查反演时对记录中3种波波场层位对比的正确与否, 二是对3种波各自反演所得的各层埋深进行彼此检验, 三是用于3种波交叉渗透的联合反演(此反演方法拟另立专题论述)。因同一地层反射纵波与折射纵波的波速 V_p 等值, 所以2种波各自反演所得剖面中各层的波速 V_p , 二者数值相等或相近(要考虑误差)的地层, 即属于2种波的同一地层。瑞雷波与2种波因 $V_R < V_p$, 所以该波反演所得的各层 V_R 值无法直接与2种波反演所得的各层 V_p 进行层位对比, 为解决这一问题, 笔者采用了 V_R 与 V_p 彼此换算的方法, 把(1)变换为

$$\frac{V_R}{V_P} = \frac{V_R}{V_S} \cdot \sqrt{\frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)}} \quad (3)$$

式中， (V_R / V_S) 为用解析法或数值法求瑞雷方程 $f(V_R/V_S, \sigma)=0$ 的根，也可以用经验公式

$$\frac{V_R}{V_S} = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} \quad (4)$$

得到，用上述3种方法计算的 V_R / V_S 随 σ 变化的3条曲线见图9，其中虚线是利用(4)式作出，据该图应用(4)式求 V_R / V_S 误差不大，也比较简易。从(3)、(4)两式可见 V_R / V_P 决定于泊松比 σ 的大小，浅层基岩 σ 大体为0.25，第四系地层 σ 一般为0.35 ~ 0.50，其中疏松地层当 $\sigma \geq 0.45$ 时，计算表明 $V_R / V_S \approx 0.95 \sim 0.5$ ，所以得知各层 σ 值之后，用(3)式把剖面中各层 V_R 换算为 V_P 或把 V_P 换算为 V_R 之后，均可应用波速法对剖面进行3种波的波速层位对比。

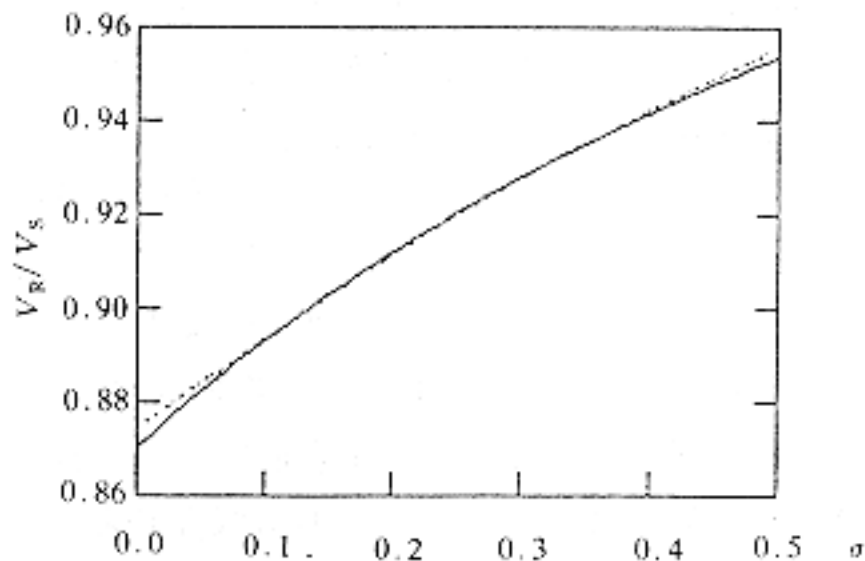


图9 3种方法计算的 V_R / V_S 随 σ 变化曲线

3 结论与讨论

1.按照文中对地震剖面分类与命名的定义,剖面分类方法不仅适用于水平层状,而且也适用于倾斜和弯曲界面的层状介质;不仅适用于多波,而且也适用于单波勘探。

2.对于非水平的倾斜层状剖面, τ - p 域中直达波、反射波、折射波的各自波场特征和三者波场的彼此关系,仍然符合文中所指的3条规律,而以瑞雷波信号作出的该波频散曲线特征,乃是排列中每两道检波器中间点(记录点)下部的地层信息,所以文中3种波场层位对比方法,也适用于层面倾斜的各类剖面。

3.对于层面为弯曲的层状介质,在文中论述的波场法与波速法层位对比方法中,波场法只有在层面曲率半径较大时才有可能实现,但这时 τ - p 域记录中的折射波信号不是也不可能是强信号的“亮点”,而只是信号稍强的“线元”。

①国家自然科学基金资助课题(1996年批准号49674229,负责人周鸿秋)。

第一作者简介 张学强,男,1964年生,中国地质大学(武汉)讲师,1995年在该校获硕士学位,从事工程地震勘测的科研、教学与应用开发工作,发表“包络函数在时间场自动化反演解释中的应用”等论文5篇。

作者单位:张学强 包军强 刘江平 周鸿秋 (中国地质大学,武汉 430074)

参 考 文 献

[1] 包军强,张学强,刘江平,周鸿秋.浅层多波的分离识别与提取.物探与化探,1998,22(5):336—342

[2] 丁绪荣主编.普通物探教程——电法及放射性.北京:地质出版社,1984,33—35

[3] 丁绪荣主编.普通物探教程——地震附声波探测.北京:地质出版社,1984,第8页

[4] 周鸿秋,包军强,张学强.临界方程法及其对地层性质的自动化判定.地球科学(中国地质大学学报),1977,22(6):633—673

1998年7月16日收稿,同年8月14日收修收稿。