

应用模糊数学方法自动 整理地震速度谱

童增祥 陆仁雄 葛燧和

田树人 李进龙

摘 要

本文应用模糊数学方法,首先对地质结构(凹陷、凸起)进行判别,然后运用人工整理速度谱的经验法则,把速度曲线的各个备选点看成一个四维空间的模糊点(模糊集),综合进行评判,定出各个模糊点的亮度,并据已择点的连线,完成速度谱的自动整理。本方法能够简捷、灵活、极其近似地模拟人工整理速度谱的过程。利用此法编制的地震速度谱自动整理程序,在泰曼普计算机上已经获得了令人满意的水平叠加剖面。

ABSTRACT

With the application of fuzzy mathematics, geological structure (depressions and uplifts) are determined first, then each alternative point for the velocity curve is taken as a fuzzy point (fuzzy set) in four dimensional space by rule of thumb in manual velocity picking; after integrated judgement, the brightness of each fuzzy point is determined and the selected points are connected into a line to complete the automatic velocity picking. The method can simulate precisely and feasibly the process of manual velocity picking. The program of automatic velocity picking using this algorithm has resulted in satisfactory stack sections on TIMAP computer.

引 言

在地震资料数字处理过程中,沿测线正确拾取叠加速度信息,是处理好水平叠加剖面的关键。目前主要采用人工分析速度谱的方法求取这一参数。它的优点是处理人员可以机动灵活地运用自己的知识和经验,还可以重复多次地进行整理,不断地提高剖面的

质量。其缺点是整理结果的满意程度直接受处理人员水平高低、经验多少的影响,并且整理、抄写、编码、穿卡、核对要耗费大量的人工劳动,数据核对中稍有不慎,出现差错,即需返工的现象也时有发生,从而延长了资料处理周期。

1974年, John E. Beitzed 和 James M. Davis 首先将图论原理使用于速度谱自动整理。1976年华东石油学院杜世通付教授参考这种方法,在依里斯60机上编制了速度谱自动整理程序,并作了大量试验,取得了可喜的成果^[1]。1979年柴振一工程师在此基础上将概率统计方法和图论相结合,对方法作了进一步改进并用于生产^[2]。投产以来,已处理了大量的地震资料,效果较好。在大多数情况下,都能满足处理要求,在凸起斜坡部位、断裂复杂地段,加人工干预后亦能获得较满意的水平叠加剖面,达到了节约人工劳动和缩短处理周期的目的。

由计算机自动整理速度谱实质上是一个人工智能的模拟过程,把人工整理所遵循的经验法则数学化、机器化。经验法则越完善,其数学表达越确切,自动整理的效果就可能越好。但是,人工整理速度谱所遵循的经验法则,内容是丰富的,表现是带有模糊性的,使用时又是多变的,难以确切地表达为一成不变的数学公式。因此,我们选用模糊数学方法,根据人工整理的经验法则,把速度曲线的各个备择点看成一个四维空间的模糊点(即模糊集),综合进行评判,定出各个模糊点的亮度,并根据已择点的连线,完成速度谱的自动整理。在凹陷向凸起的过渡带,由于横向速度层的不连续性和纵向叠加速度的急剧增高,在运用评判原则时应与凹陷区有所不同,因此要求程序能对凹、凸作出判别,并应用不同的评判原则,进行速度拾取。

速度谱自动整理的依据

所谓速度谱整理通常是指处理人员对变密度(或字符)速度谱上的二维极值点——能量团中的极大点进行去伪存真的过程。辨别二维极值点的真伪需要依据一些准则,概括起来主要有以下几点:

1. 二维极值点能量准则。除多次波和异常波外,二维极值点的能量越大越可靠。
2. 层速度准则。用所拾取的速度计算出的层速度在地质上必须合理。
3. 趋势贴近准则。所拾取的二维极值点应与速度谱上一维和二维极值点的正确分布趋势贴近。
4. 距离最小准则。从已选中的二维极值点开始向下选点时,若其它条件相同,应优先选取距离最小的点。

以上是人工整理一个孤立的速度谱时所依据的准则,还应考虑速度谱在横向上的变化。

在相邻速度曲线变化较大时,尚需对地质结构的凹、凸作出判别,我们认为判别为凸起应具备以下四个特点:

1. 凸起总是有一个强反射面(由剥蚀面或角度不整合所引起)。这个界面一般埋藏较浅,速度谱能量或相关值最大。

2. 强反射面往往造成程度不同的能量屏蔽, 其下无强反射出现, 表现在速度谱上就是最大二维极值点以下的极值点能量普遍较小。

3. 强反射面以下的反射波比较零散、规律性差, 凸起或凸起斜坡部位各种异常波发育, 所以速度谱深部二维极值点的分布杂乱无章。

4. 若凸起部位中、深层有反射且来自老地层, 其速度值应急剧变高, 即速度曲线上抬迅速。

数学模型的建立

人工整理速度谱, 就是在速度谱上经过反复推敲后选择出一次波的二维极值点, 并使之构成一条合理的速度曲线。自动整理速度谱就是模拟人工整理速度谱的智能过程, 也就是自动地逐个选取恰当的二维极值点(速度点)的过程。如图 1 所示, $t-v$ 坐标平面是速度谱, $P_1, P_2, \dots, P_k$ 是已选取的速度点, 如何选取下一个速度点 P_{k+1} 呢?

此时, P_k 称为当寻点。由于地震波传播速度的变化主要取决于地层的岩性、厚度及埋藏深度的变化, 而这些变化是有一定的分布规律的。所以, P_{k+1} 的选取只需在一定的区域内进行, 这个区域称为当寻点 P_k 的当寻区域 Π_k 。 Π_k 中的二维极值点 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 称为备择点, 问题是究竟哪一个备择点可定为速度点 P_{k+1} ?

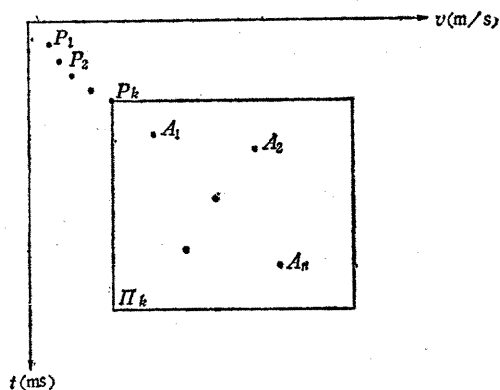


图 1

人工整理速度谱时, 选取速度点所遵循的准则主要是二维极值点能量准则、层速度准则、趋势贴近准则、距离最小准则。就物理本质而言, 这几个准则有联系也有区别, 就整理速度谱来说, 这几个准则既可看成各自独立, 但又必须综合应用。也就是说, 对每个备择点, 首先分别考虑它对能量准则、层速度准则、趋势贴近准则、距离最小准则的符合程度, 然后综合考虑这几个量, 确定它对于速度点 P_k 的符合程度。这里我们不是绝对地简单地说某个备择点符合或不符合某个准则, 因为无论在表达上还是在实际使用中, 这几个准则都不是刚性的绝对的, 而是有弹性的, 是带有模糊性和不确定性的。用“符合程度”代替“符合”或“不符合”, 表面上看来是用某种含糊性、不确定性代替明确性、严格性。但是, 因为它确切地反映了客观实际的弹性、模糊性和不确定性, 所以从观念与实际关系上看, 这一描述是更正确、更明确、更严格了。这种思想方法可以很自然地用模糊数学来表述。

记 E 为能量准则, v^* 为层速度准则, λ 为趋势贴近准则, D 为距离准则。备择点 A_i 可看成四元集 $X = \{E, v^*, \lambda, D\}$ 上的一个模糊集 $\tilde{A}_i$ 。用模糊集论的记号, 记为

$$\tilde{A}_i = \mu_{\tilde{A}_i}(E)/E + \mu_{\tilde{A}_i}(v^*)/v^* + \mu_{\tilde{A}_i}(\lambda)/\lambda + \mu_{\tilde{A}_i}(D)/D$$

其中： $\mu_{\tilde{A}_i}(E)$ 表示备择点 A_i 对能量准则 E 符合的程度，称为 A_i 的能量从属度； $\mu_{\tilde{A}_i}(v^*)$ 、 $\mu_{\tilde{A}_i}(\lambda)$ 和 $\mu_{\tilde{A}_i}(D)$ 的意义类同。形象地说，可将备择点看成为四维空间中的模糊点。现在的问题是：

1. 如何确定备择点的能量从属度、层速度从属度、趋势贴近从属度和距离从属度？
2. 怎样综合这几个从属度，定出模糊点的亮度，即备择点对速度点 P_k 的符合程度？

首先讨论从属度问题。

二维极值点能量准则表明，速度谱上二维极值点能量的大小反映了反射波能量的强弱和道集内各道相关性的好坏，除多次波和异常波外，当寻区域中能量越大的备择点越可能是速度点，即它的能量从属度越大。因而，能量从属度可按下式计算

$$\mu_{\tilde{A}_i}(E) = E_i / (\max_{j=1, n} E_j)$$

其中： E_i 是备择点 A_i 的能量值； $\max_{j=1, n} E_j$ 表示当寻区域 Π_k 中各备择点能量的最大值。显然，该公式只具有相对的意义：当寻区域 Π_k 变了， $\mu_{\tilde{A}_i}(E)$ 的值也会随之而变。另外，这个准则也有例外情况（如多次波和异常波等），这就告诉我们不能单凭它来确定速度点，即使在综合考虑的时候， $\mu_{\tilde{A}_i}(E)$ 也只能占一定的比重。

层速度准则要求用所选取的速度点计算出的层速度在地质上必须合理。层速度合理性

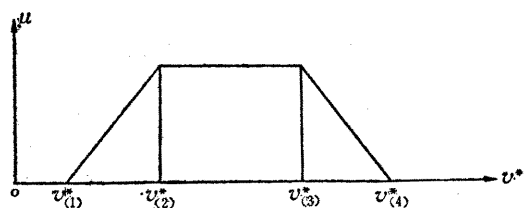


图 2

性与拾取速度曲线斜率变化的合理性是一致的。在一定的地区、一定的地层深度，层速度的变化有一定的范围。这个范围表现为一定的地震信息参数 $v_{(1)}^*$ 、 $v_{(2)}^*$ 、 $v_{(3)}^*$ 、 $v_{(4)}^*$ ，如图 2 所示。由备择点 A_i 的速度参数 v_i 算出的层速度 v_i^* 过大或过小都是不合理的。

据此，层速度从属度 $\mu_{\tilde{A}_i}(v^*)$ 可按 下式

计算

$$\mu_{\tilde{A}_i}(v^*) = \begin{cases} 0 & v_i^* < v_{(1)}^* \\ \frac{v_i^* - v_{(1)}^*}{v_{(2)}^* - v_{(1)}^*} & v_{(1)}^* \leq v_i^* < v_{(2)}^* \\ 1 & v_{(2)}^* \leq v_i^* \leq v_{(3)}^* \\ \frac{v_{(4)}^* - v_i^*}{v_{(4)}^* - v_{(3)}^*} & v_{(3)}^* < v_i^* \leq v_{(4)}^* \\ 0 & v_{(4)}^* < v_i^* \end{cases}$$

其中 v_i^* 是由备择点 A_i 的时间参数 t_i 、均方根速度 v_i 和当寻点 P_k 的时间参数 t_{Pk} 、均方根速度 v_{Pk} 按 Dix 公式

$$v_i^* = \sqrt{\frac{t_i v_i^2 - t_{Pk} v_{Pk}^2}{t_i - t_{Pk}}}$$

计算得到。层速度合理性是有弹性的, 允许范围比较宽, 不能单凭这个准则确定速度点, 即在综合考察的时候, $\mu_{A_i}(v^*)$ 也只是占一定的比重。

趋势贴近准则要求速度点与能量点的分布趋势贴近。“贴近”是一个带有模糊性的概念。怎样刻画这个概念, 数学上提出过不少方案。我们是这样考虑的, 如图 3 所示: $A_1, A_2, \dots, A_n$ 是 P_k 的当寻区域 Π_k 中的备择点, 即能量二维极值点; $B_1, B_2, \dots, B_m$ 是 Π_k 中的能量一维极值点; 过 P_k 的直线 L 称为当寻区域 Π_k 的拟合直线, L 是按能量集中原则, 即按 Π_k 中各个能量极值点 (包括一维和二维极值点) 到 L 的加权距离之和达到最小的原则而确定的, L 便表现了当寻区域 Π_k 中能量极值点的分布趋势; 直线 $\overline{P_k A_i}$ 和 L 的交角记为 θ_i , 可以认为, θ_i 越小则 $\overline{P_k A_i}$ 越贴近 Π_k 中能量极值点的分布趋势。设 L 的斜率为 k_L , $\overline{P_k A_i}$ 的斜率为 k_i , θ_i 的正切值 $\tan \theta_i$ 为 λ_i , 则有

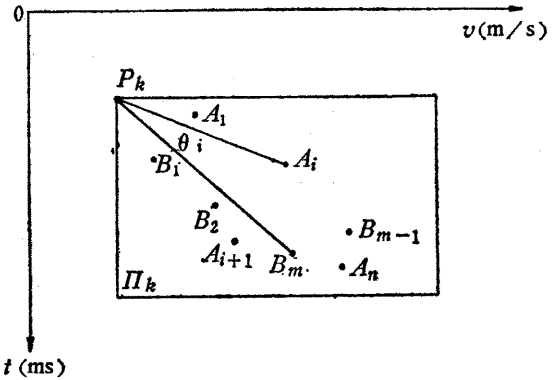


图 3

$$\lambda_i = \left| \frac{k_L - k_i}{1 + k_L k_i} \right|$$

可见, λ_i 与 θ_i 有类似的功能, 即 λ_i 越小表示 $\overline{P_k A_i}$ 越贴近 Π_k 中能量极值点的分布趋势。因而备择点 A_i 的趋势贴近从属度 $\mu_{A_i}(\lambda)$ 可按式计算

$$\mu_{A_i}(\lambda) = \begin{cases} 1 & \lambda = 0 \\ 1 - \frac{\lambda_i}{\max_{j=1, n} \lambda_j} & \lambda \neq 0 \end{cases}$$

距离最小准则指出, 若两个备择点的其它条件相似, 则应优先选取离当寻点 P_k 距离较近的点为速度点。据此, 备择点 A_i 的距离从属度 $\mu_{A_i}(D)$ 可按式计算

$$\mu_{A_i}(D) = \frac{\min_{j=1, n} d_j}{d_i}$$

其中 d_i 是 A_i 到 P_k 的距离, 即 $d_i = \sqrt{(t_i - t_{Pk})^2 + (v_i - v_{Pk})^2}$ 。若要灵活些, 也可将 d_i 看做某种加权的距离, 计算公式为: $d_i = \sqrt{p(t_i - t_{Pk})^2 + q(v_i - v_{Pk})^2}$, 这裡的 p 和 q 是可变的参数。

至此, 备择点 A_i 已表示为集 $X = \{E, v^*, \lambda, D\}$ 上的模糊集 $\tilde{A}_i = \mu_{A_i}(E)/E + \mu_{A_i}(v^*)/v^* + \mu_{A_i}(\lambda)/\lambda + \mu_{A_i}(D)/D$, 备择点的全体则可表示为集 $\{A_i, \dots, A_n\}$ 和 X 之间的模糊关系 R , 即一个 $n \times 4$ 阶模糊矩阵

$$\begin{array}{c}
 E \qquad \nu^* \qquad \lambda \qquad D \\
 \begin{array}{l}
 A_1 \\
 A_2 \\
 \vdots \\
 A_n
 \end{array}
 \left[\begin{array}{cccc}
 \mu_{A_1}(E) & \mu_{A_1}(\nu^*) & \mu_{A_1}(\lambda) & \mu_{A_1}(D) \\
 \mu_{A_2}(E) & \mu_{A_2}(\nu^*) & \mu_{A_2}(\lambda) & \mu_{A_2}(D) \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \mu_{A_n}(E) & \mu_{A_n}(\nu^*) & \mu_{A_n}(\lambda) & \mu_{A_n}(D)
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

下面, 讨论第二个问题: 怎样综合这几个从属度, 定出模糊点的亮度, 即备择点对速度点 P_k 的符合程度? 显然, 解决这个问题需要寻求某种规律, 我们对每个 A_i 赋予一个负实数, 以表示 A_i 的亮度, 并据此选取速度点。在模糊数学中, 这是一个综合评判问题, 其关键是寻求评判规律, 即寻求一个以四维空间的单位方体 $[0, 1]^4$ 为定义域的四元实函数 $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$, 该函数称为评判函数。

备择点对四个准则符合程度越高 (即各个从属度越大), 它当然对速度点 P_k 的符合程度也越高, 这表明评判函数 f 应该是各个自变量的递增函数。如果一个备择点的各个从属度发生微量变化, 可以想象, 它对速度点 P_k 的符合程度也只能发生微量的变化, 这表明评判函数 f 对各个自变量是连续的。数学上可以证明, 函数 $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ 一定是四元连续函数。有理由设想极限情况, 如果点 A_i 的各个从属度都是零, 那么它绝对不可能是速度点, 即它的亮度是零。这个情况的数学表达便是评判函数 f 应具有这样的性质: $f = (0, 0, 0, 0) = 0$ 。人工整理速度谱的经验还表明: 若备择点 A_i 的各种从属度比 A_j 的各种从属度分别大一个非负量 y_1, y_2, y_3, y_4 , 则 A_i 对速度点 P_{k+1} 的符合程度比 A_j 也会大一个量, 这个量主要与 y_1, y_2, y_3, y_4 有关, 而与 A_j 对 P_{k+1} 的符合程度无关或关系甚微。这就要求评判函数 f 满足以下性质:

$$f(x_1 + y_1, x_2 + y_2, x_3 + y_3, x_4 + y_4) = f(x_1, x_2, x_3, x_4) + g(y_1, y_2, y_3, y_4)$$

其中 g 是任一非负函数, 各 x_i, y_i 都是非负实数, 且 $x_i + y_i \leq 1$, 此时可以断言, 评判函数 f 一定是关于 $(+, \cdot)$ 的线性型, 即

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_3 x_3 + p_4 x_4$$

其中 $p_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 是任意常数。在我们讨论的问题中, 它们是待定参数, 表示各个经验准则所占的权重。

关于评判函数 f , 我们有下列定理。

定理 若 m 元函数 $f: [0, 1]^m \rightarrow R$ 满足下列条件:

- (1) $f = (0, 0, \dots, 0) = 0$;
- (2) $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 在 $[0, 1]^m$ 上连续;
- (3) $\forall x_i, y_i \in [0, 1] \quad (i = 1, 2, \dots, m)$ 有

$$f(x_1 + y_1, x_2 + y_2, \dots, x_m + y_m) = f(x_1, x_2, \dots, x_m) + g(y_1, y_2, \dots, y_m)$$

其中 g 是 $[0, 1]^m$ 上的任一实函数。则

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_m x_m$$

式中 $p_1, p_2, \dots, p_m \in R$ 是任意常数。

这个定理的严格证明见附录。显然, 我们要寻求的评判函数正是该定理的特例。由

此可见, 若记模糊点 A_i 的亮度为 μ_{A_i} , 则有 $\mu_{A_i} = p_1 \mu_{A_i}(E) + p_2 \mu_{A_i}(v^*) + p_3 \mu_{A_i}(\lambda) + p_4 \mu_{A_i}(D)$ 。为了使用每一模糊点的亮度都在闭区间 $[0, 1]$ 中, 可取待定参数 p_i 均为非负数, 而且满足归一化条件 $\sum_{i=1}^4 p_i = 1$ 。根据试验, 我们取 $p_1 = 0.5$, $p_2 = 0.2$, $p_3 = 0.1$, $p_4 = 0.2$ 。

至此, 已建立起自动整理速度谱的数学模型的主要部分。必须指出, 跟人运用经验法则时一样, 这个模型在使用时也是有变化的。当寻区域取得过小, 往往会没有合适的点; 当寻区域取得过大, 往往使计算复杂, 而且数学模型与实际情况的误差增大, 甚至要作重大的修正。人工整理速度谱时, 常在有意无意之间, 灵活地进行改变和调正。现在的问题是怎样使计算机模拟人的这种灵活性?

据统计, 当寻区域取 $500\text{ms} \times 510\text{m/s}$ (即 $\Delta t \times \Delta v$) 时, 在大多数情况下 (特别是浅层、中层) 已能选到恰当的二维极值点为速度点。如果这个区域中没有备择点或各点的亮度太小, 则可把当寻区域扩大为 $800\text{ms} \times 810\text{m/s}$ 。

应该指出, 由于在地层凹陷和凸起上的速度曲线的变化规律差异较大, 所以还必须判别地层形态是凹陷结构还是凸起结构。

凸起结构一般总是对应着一个强反射面。这个界面埋藏较浅, 速度谱相关 (或叠加) 能量大。强反射面往往形成能量屏蔽, 其下无强反射出现, 表现在速度谱上就是最大二维极值点以下的极值点相关 (或叠加) 能量普遍较弱, 而且强反射面以下的反射波比较零散、规律性差。凸起部位各种异常波发育, 所以速度谱上深部的二维极值点杂乱无章。若凸起部位中深层有一次反射, 而且来自老地层, 则其速度急剧变高, 即速度曲线上抬迅速。

在用计算机作凹凸判别时, 我们着重考虑能量最大点的埋藏深度 $t_{\max}$ 、浅层和深层 (以 $t_{\max}$ 为界) 的能量平均值之比、深层能量分布的规律性、速度曲线总趋势的斜率, 然后综合这些因素, 作出凹凸判别。

从数学上来说, “地层凸起” 是带模糊性的命题, 它可以表示为四元素 $Y = \{T, E_\delta, \lambda_\delta, K\}$ 上的模糊集 $\tilde{P}$ 。其中 T 表示凸起地层能量最大点埋藏深度的合理性; E_δ 是凸起地层浅、深层能量均值比的合理性; λ_δ 是凸起地层深层能量分布规律性; K 是凸起地层拟合直线斜率合理性。Y 中各元素对于 $\tilde{P}$ 的从属度可按下列各式计算, 即

$$\mu_{\tilde{P}}(T) = \begin{cases} 0 & t_{\max} > t_0 \\ 1 - \left(\frac{t_{\max}}{t_b} \right)^2 & t_{\max} \leq t_b \end{cases}$$

其中, $t_{\max}$ 是速度谱上能量最大值点的时间; t_b 是待定常数, 其意义是某地区凸起地层埋藏深度的时间值。

$$\mu_{\tilde{P}}(E_\delta) = \begin{cases} 0 & \sum_{t_i > t_{\max}} E_i^* / |E^*| > \sum_{t_i \leq t_{\max}} E_i^* / |E^*| \\ 1 - \left(\frac{\sum_{t_i > t_{\max}} E_i^* / |E^*|}{\sum_{t_i \leq t_{\max}} E_i^* / |E^*|} \right)^2 & \sum_{t_i > t_{\max}} E_i^* / |E^*| \leq \sum_{t_i \leq t_{\max}} E_i^* / |E^*| \end{cases}$$

其中, E_i 表示时间参数为 t_i 的二维能量极值点的能量值。显然, $\sum_{t_i > t_{\max}} E_i^* / E^* |$ 是以 $t_{\max}$ 为界的以下地层的能量均值; $\sum_{t_i \leq t_{\max}} E_i^* / E^* |$ 是 $t_{\max}$ 以上地层的能量均值。

$$\mu_{\tilde{P}}(\lambda_{\delta}) = \begin{cases} 0 & \begin{matrix} E^* | > E^* | \\ t \leq t_{\max} & t > t_{\max} \end{matrix} \\ 1 - \left(\frac{E^* |}{E^* |} \right)^2 & \begin{matrix} E^* | \leq E^* | \\ t \leq t_{\max} & t > t_{\max} \end{matrix} \end{cases}$$

式中, $E^* |$ 是能量最大点 ($t_{\max}$) 以上时间 (浅层) 的二维极值点个数; $E^* |$ 是能量最大点 ($t_{\max}$) 以下时间 (深层) 的二维极值点个数。易知, 能量最大点的接收时间越小 (即地层越浅), $t \leq t_{\max}$ 的二维极值点个数就越多, $E^* |$ 的值也就越大, $\mu_{\tilde{P}}(\lambda_{\delta})$ 就必然越大, 从而地层为凸起结构的可能性就越大。

$$\mu_{\tilde{P}}(K) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N |K_i - K_A| / K_G \cdot N & \sum_{i=1}^N |K_i - K_A| \leq K_G \cdot N \\ 1 & \sum_{i=1}^N |K_i - K_A| > K_G \cdot N \end{cases}$$

式中: K_A 是经过能量最大值点 ($t_{\max}, v_{\max}$) 以下深层各能量极值点拟合直线的斜率; K_i 是能量最大值点 ($t_{\max}, v_{\max}$) 与所过二维极值点连线的斜率; K_G 为给定参数。显然, 深层二维极值点分布越散乱, $\mu_{\tilde{P}}(K)$ 的值就越大, 从而地层为凸起的可能性也就越大。

为了判别地层的凹凸, 需要把上述四个从属度综合起来, 其数学表达式为

$$\mu_{\tilde{P}}(P) = q_1 \mu_{\tilde{P}}(T) + q_2 \mu_{\tilde{P}}(E_{\delta}) + q_3 \mu_{\tilde{P}}(\lambda_{\delta}) + q_4 \mu_{\tilde{P}}(K)$$

其中 $q_i (i=1, 2, 3, 4)$ 是待定参数; $\mu_{\tilde{P}}(P)$ 是地层为凸起结构的可能性的值。实质上作凹凸判断是带有模糊性的、不确定性的, 但其结论却必须是明确的、非此即彼的。这就要求有个阈值 μ , 当 $\mu_{\tilde{P}}(P) > \mu$ 时可判断为凸, 否则只能判断为凹。

把当寻区域中的各备择点看成各个模糊集 (点), 综合评判出各点的亮度, 据此选取速度点。当寻区域应取多大? 取什么形状? 综合评判的各个原则怎样应用? 这些都有一定的灵活性, 必要时还需作出凹凸判断, 以便更恰当地进行评判。这就是用模糊数学方法在计算机上模拟人的经验, 实现速度谱自动整理的主要方法原理。

程 序 实 现

泰曼普计算机仅有 64K (16 位字长) 内存的小型机器, 原速度谱程序只是单谱输出无法适应人工整理速度谱的经验法则的需要。鉴于这种情况, 我们采用记鼓的办法, 即一个速度谱计算完后, 进行单谱拾取, 先记鼓, 待整条测线计算拾取完之后, 再从鼓上读出, 进行横向平滑处理, 接着把拾取结果记录到磁带上, 同时也把拾取的速度曲线以方字符方式标示在速度谱上。速度谱绘图格式见后面的图 14, A 为拾取的二维极值速度点, B 为延拓速度点。速度谱自动整理总体框图、整理速度曲线程序框图分别由图

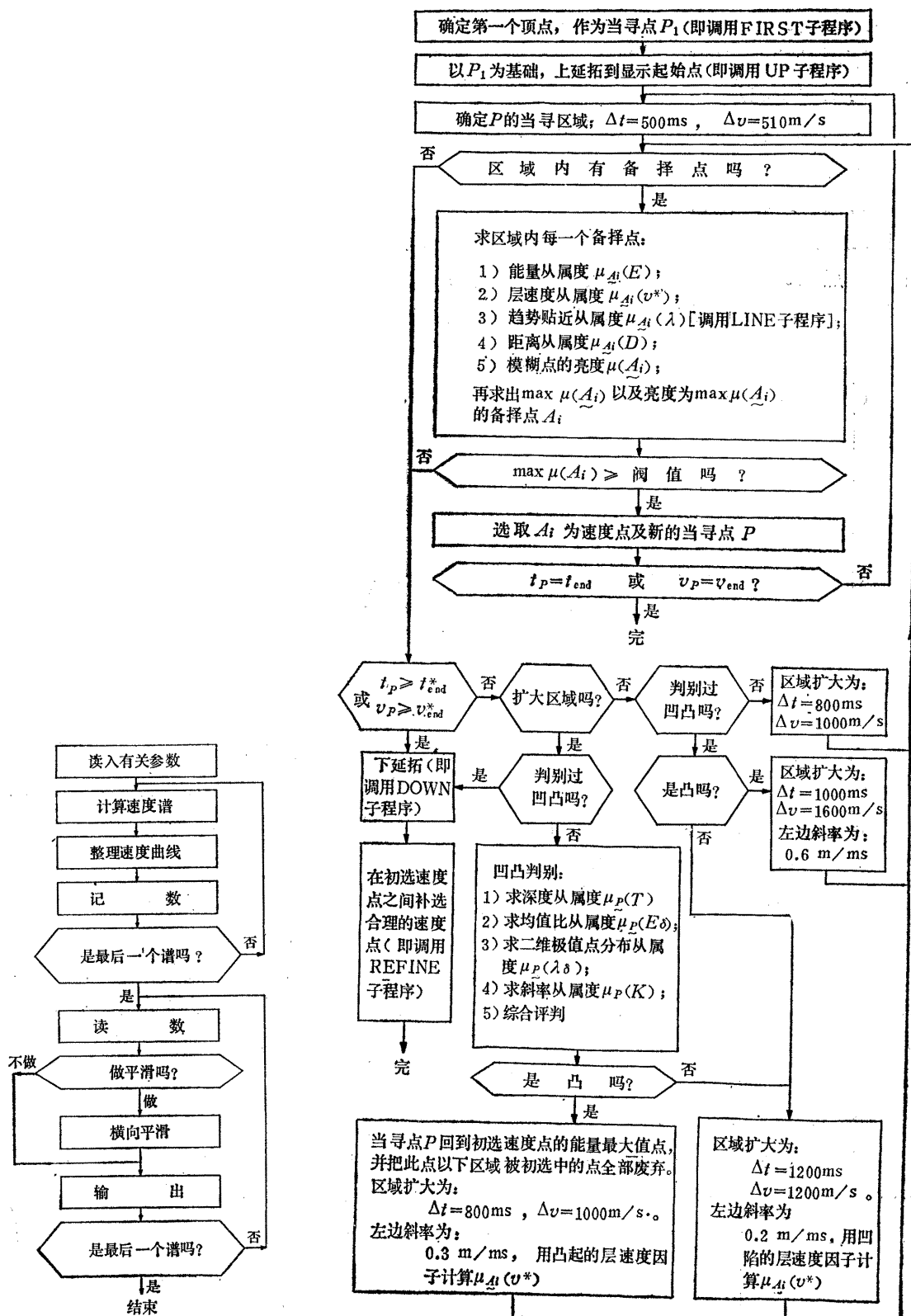


图 4 速度谱自动整理总体框图

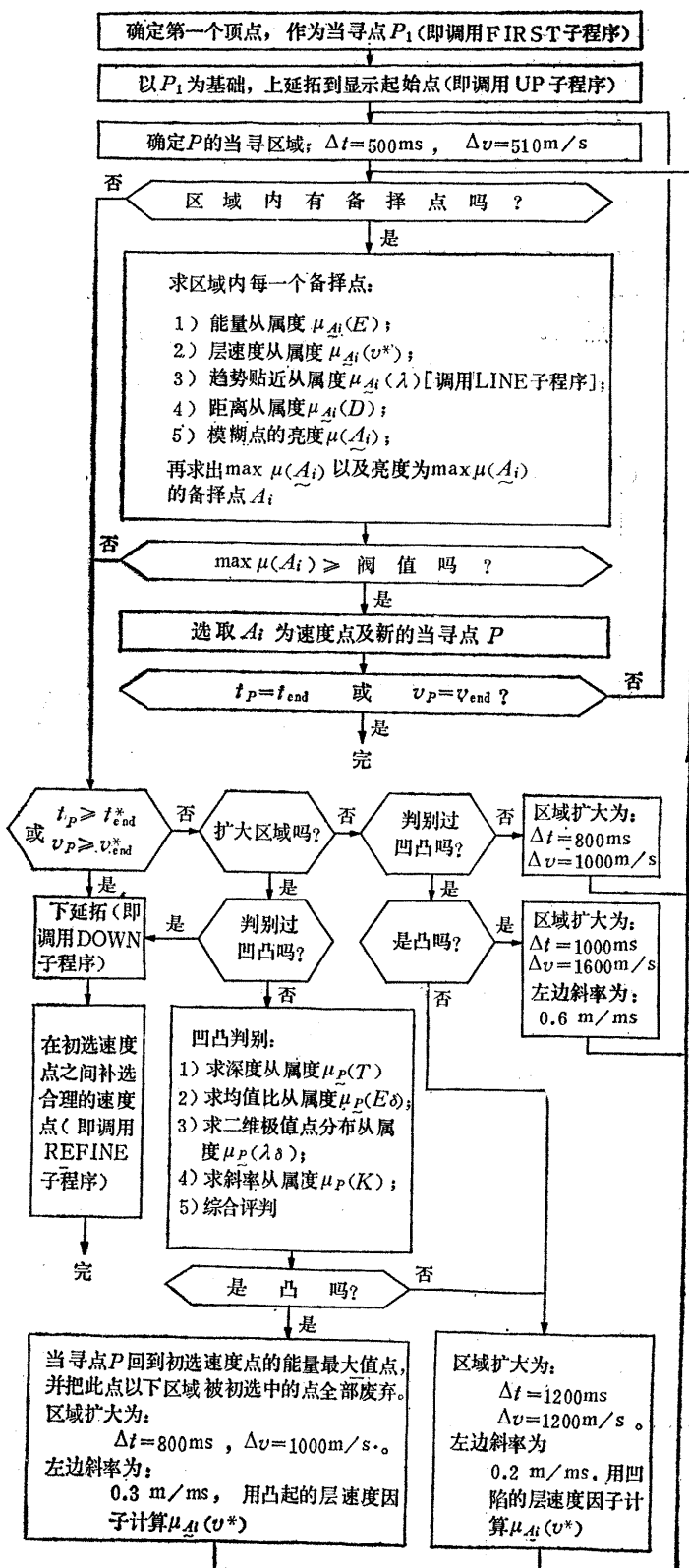


图 5 整理速度曲线程序框图

4和图5给出。

下面对整理速度曲线程序框图的五个子程序略加说明。

FIRST子程序

- 功能 在速度谱上找第一个当寻点 P_1 。
- 方法

1. 若参与速度谱计算的地震道最小炮检距小于或等于 300米, 先采用图 6 的方式, 在区域 Π 内从上到下找二维能量极值点, 若区域 Π 只有一个二维极值点, 它就作为第一个当寻点 P_1 。若区域 Π 有若干个二维极值点, 则选能量最大者为当寻点 P_1 。如区域 Π 无二维极值点, 则按方法2 执行。 L 的斜率为0.6。

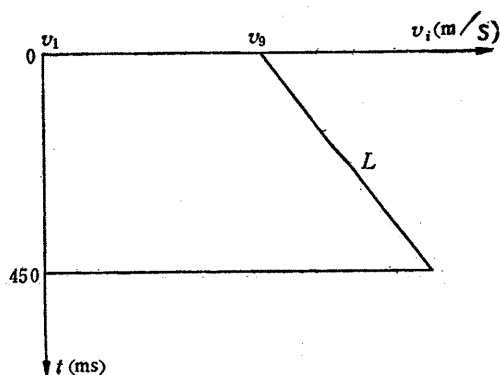


图 6

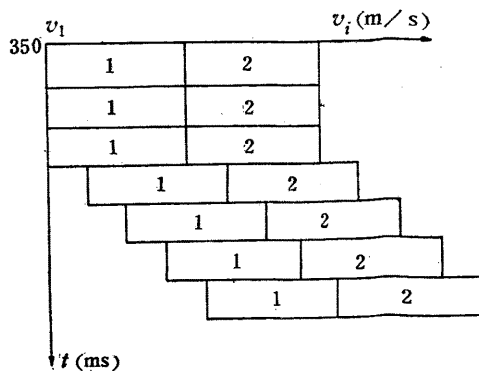


图 7

2. 若最小炮检距大于300米, 采用图7的方式, 先在区域1中从上到下找二维极值点, 被首先找到的两个二维极值点选其能量大者作为第一个当寻点 P_1 。若区域1找不到二维极值点, 再转到区域2从上往下找。区域1、区域2中的每一小区域为 $\Delta t = 100\text{ms}$, $\Delta v = 210\text{m/s}$, 每个 Δt 右移一个速度谱增量。

UP子程序

- 功能 从显示起始点到第一个当寻点之间补插速度点。
- 方法 设第一个当寻点 A 为 P_1 , 起点 O , 以 OP_1 为对角线的长方形区域叫 K , 过 P_1 作区域 K 中的能量极值点的拟合直线, 然后在过拟合直线上补插两个 B 点作为速度点, 如图8所示。

DOWN子程序

- 功能 从最后一个拾取速度点开始向下补插速度点。
- 方法 根据胜利油田几个不同地区的速度资料, 我们预先给出六条速度曲线, 然后看速度谱已被拾取到的最后三个速度点的三条连线的平均斜率与哪一条给定速度曲线的斜率最接近, 就按那条曲线的变化规律进行延拓, 补插速度点。

LINE子程序

- 功能 已知 n 个二维极值点的坐标为 (t_i, v_i) 和一个定点 $P(t_P, v_P)$, 求过 P 点的拟合直线斜率 k 。

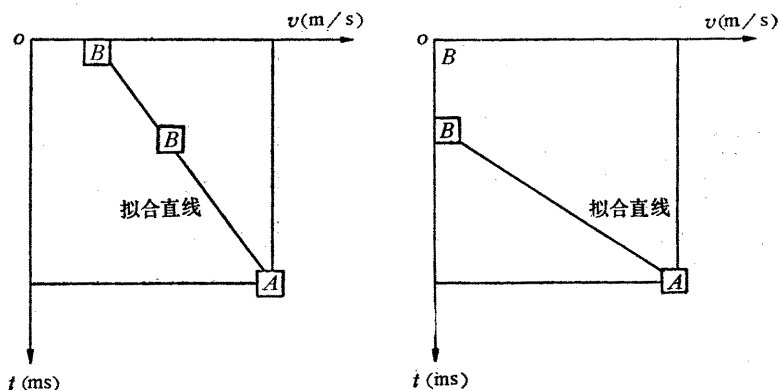


图 8 左: 拟合直线与 v 轴相交; 右: 拟合直线与 t 轴相交

• 方法 设过 P 点的拟合直线方程为

$v = k(t - t_P) + v_P$, 使 $\sum_{i=1}^n [k(t_i - t_P) + v_P - v_i] = 0$, 解 k 得

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n v_i - n v_P}{\sum_{i=1}^n t_i - n t_P}$$

REFINE 子程序

• 功能 在已找出的速度点之间, 补上新的速度点, 使它们的全体成为一条完整的速度曲线。

• 方法 设当寻点 P 的当寻区域中, 有不正一个备择点。在主程序中, 只能选取亮度最高的点作为速度点, 此时, 其它的点就可能被遗漏掉, 该子程序解决了这个问题。在图9中, 设 P 的当寻区域为 Π_P , 中间有 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 六个二维极值点, 如 A 点的亮度最高, 则 A 就被选为新的当寻点 (即速度点), REFINE 子程序是在以 PA 为对角线的长方形中找能量最大的备择点 (不包括 P 、 A 两点), 假如在 B 、 C 、 D 、 E 、 F 中, C 、 D 、 E 符合条件, 即

$$\left| \frac{v_A - v_i}{t_A - t_i} - \frac{v_i - v_P}{t_i - t_P} \right| < G_k$$

式中 G_k 为给定参数。若其中 D 点能量最大, 则 D 点就被选为新的速度点。然后分别在以 PD 和 DA 为对角线的长方形区域中递推地用上述方法, 在图中就可找到 C 和 E 两个新的速度点。

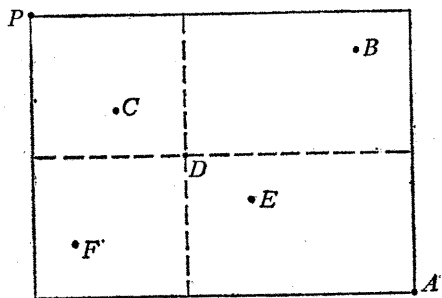


图 9

以上仅是地震速度谱自动整理程序的主要部分。自然, 把模糊数学的思想方法真正程序化、机器化, 还有许多问题需要在程序中加以考虑, 限于篇幅, 本文不再赘述。

效果分析

为了考核本方法和编制程序的实际效果,我们全部使用缺省参数,在不加人工干预的情况下,对胜利油田四个工区有代表性的十二条地震测线进行了试处理,剖面长度共355km。其中沾化地区九条测线,东营、车镇、潍北地区各一条测线。

从所处理出的十二条水平叠加剖面与用人工提取速度处理的水平叠加剖面的对比可以看出,两种方法处理的结果是吻合的。用自动拾取速度处理的十二条水平叠加剖面,浅、中、深层都可圆满地解决地质任务,剖面的地质效果是令人满意的。

下面我们以东营地区607.9测线、沾化地区626.2测线为例,分析用模糊数学方法自动整理地震速度谱的效果。

东营地区607.9测线是通过东营凹陷西部的一条南北向剖面,南端为广饶凸起,北部背斜构造为胜利油田西部的坨庄构造,中部断层发育(1450CDP点附近)为郝现断裂带,剖面长度为55km。为了显示剖面特征和构造全貌,在剖面的横向上进行了压缩。使用人工提取速度处理时,共使用46个速度谱,并作了大量的反复细致的分析工作,得到一条处理较好的剖面(图10)。我们以相同的速度谱和个数进行自动处理,所得到的叠加剖面(图11)基本上达到了图10的水平,某些地段(如CDP1364—1642)的有效波组更加清楚,凹陷向凸起的过渡地段与广饶凸起内部的地质结构也明显地反映出来,说明此方法具有较强的适应性。

沾化地区626.2测线是一条通过陈家庄凸起至呈子口凸起的南北向剖面。凹陷内的各系地层向南逐渐减薄,与陈家庄凸起为超覆或披覆接触,向北与呈子口凸起为大断层接触。剖面左侧的构造为孤岛构造的西南倾没部份,剖面右边的背斜是渤南构造。剖面全长为31km,显示时也对横向距离进行了压缩。在剖面处理时使用了相同的33个速度谱,人工提供速度参数处理的水平叠加剖面(图12)与自动整理速度谱处理的水平叠加剖面(图13)品质上基本一致。为了检验本方法对凸起、凹陷、斜坡的适应性,给出了三个典型的速度谱自动整理结果(图14),其位置标明在图13的上方。

图14a自动拾取结果代表了斜坡型的速度变化曲线。由于地层逐渐减薄,老地层迅速抬高,速度曲线常形成一个拐点,拐点出现的时间与老地层的反射时间相一致,图14b和图14c代表凹陷型的速度变化曲线。由于凹陷内新地层沉积较全、较厚,老地层埋藏较深,无地层缺失现象,地震速度增高主要与地层厚度、埋藏深度及岩性有关,因此速度曲线基本上光滑地呈线性增长。图14d代表凸起型的速度曲线。由于老地层的突然抬高,新地层的减薄与缺失,地震速度渐变规律的地质基础已不存在。因此,速度曲线在基岩埋藏深度(或反射时间)附近急剧升高,拐点平直部位加长,叠加速度值可达4,500m/s或5,000m/s以上。

上述分析可以说明,应用模糊数学方法自动整理地震速度谱所处理的水平叠加剖面可与人工整理速度谱所处理的剖面相媲美。

此项工作由上海铁道学院模糊数学研究室与胜利油田地调研究所协作完成,曾得到

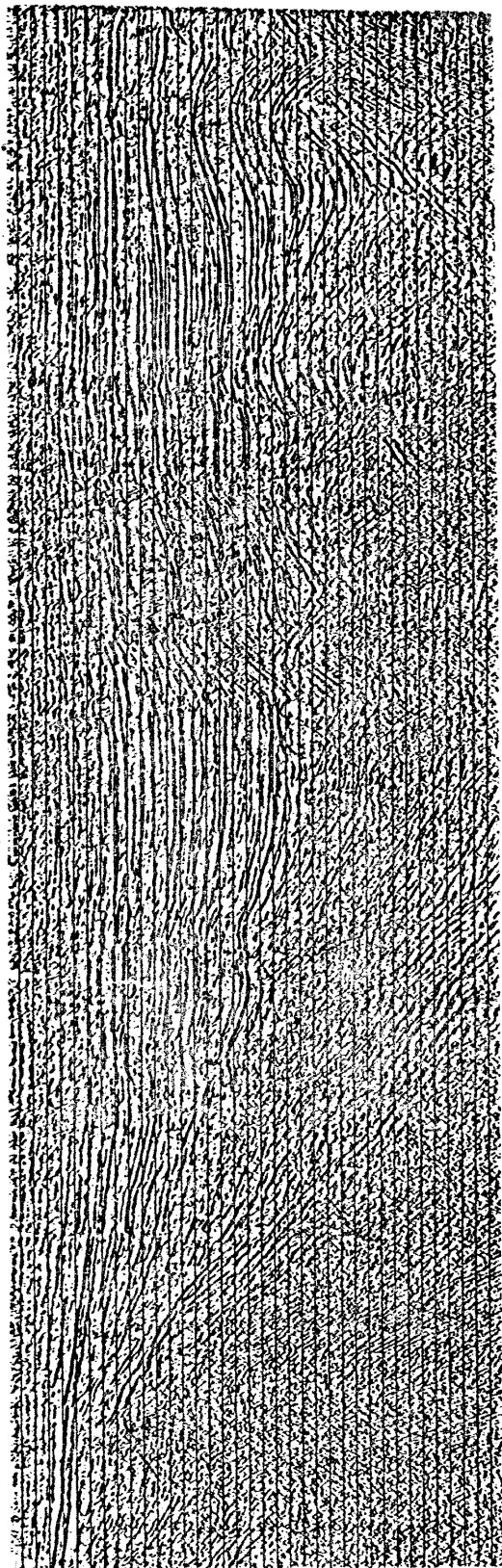


图 10 607.9 测线人工整理速度的水平叠加剖面

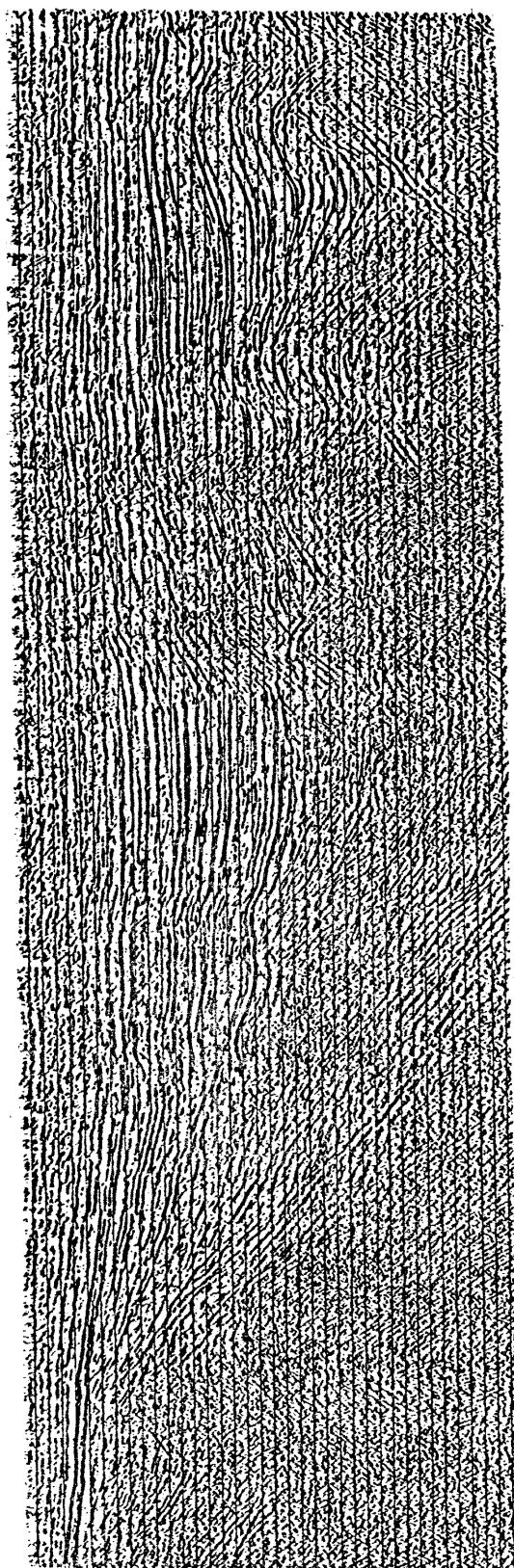


图 11 607.9 测线自动整理速度的水平叠加剖面

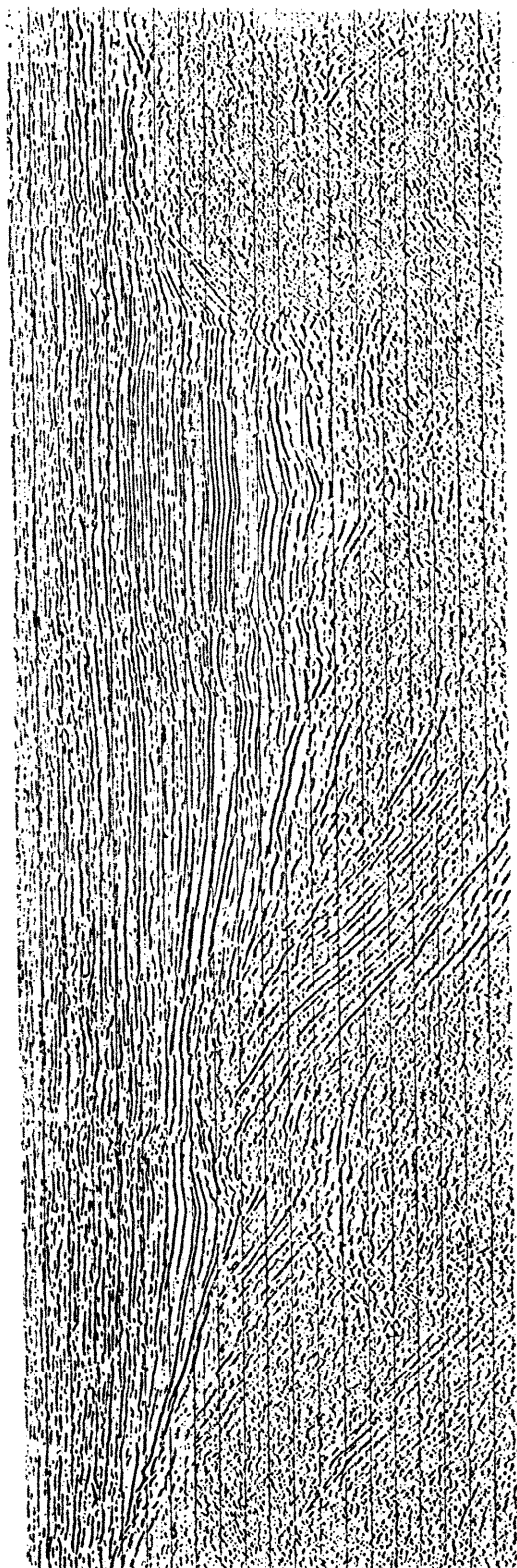


图 12 626.2测线人工整理速度的水平叠加剖面

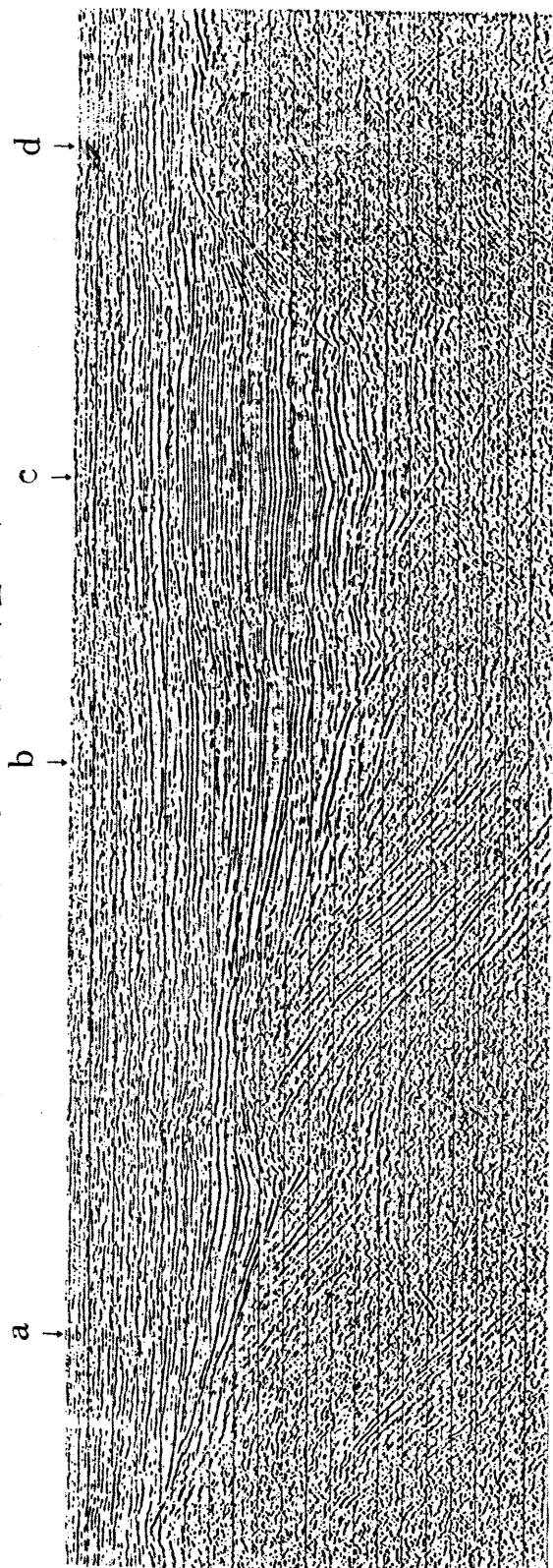


图 13 626.2测线自动整理速度的水平叠加剖面

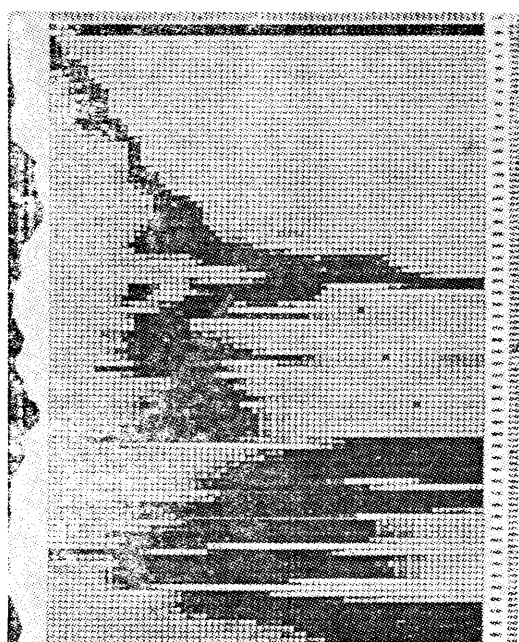


图 14a 自动整理的速度谱 (斜坡型)

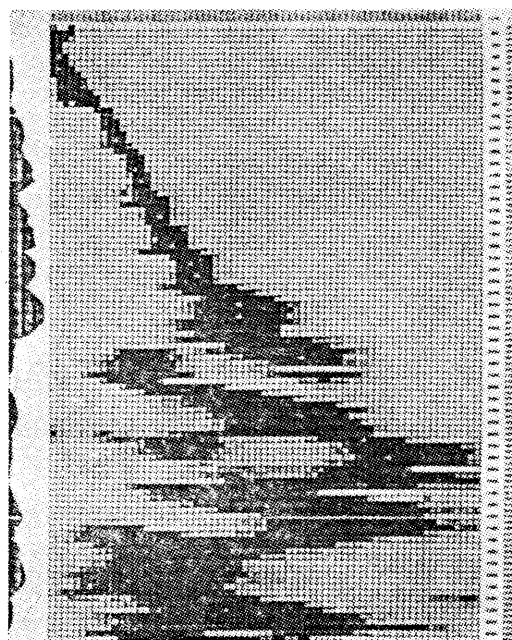


图 14b 自动整理的速度谱 (凹陷型)

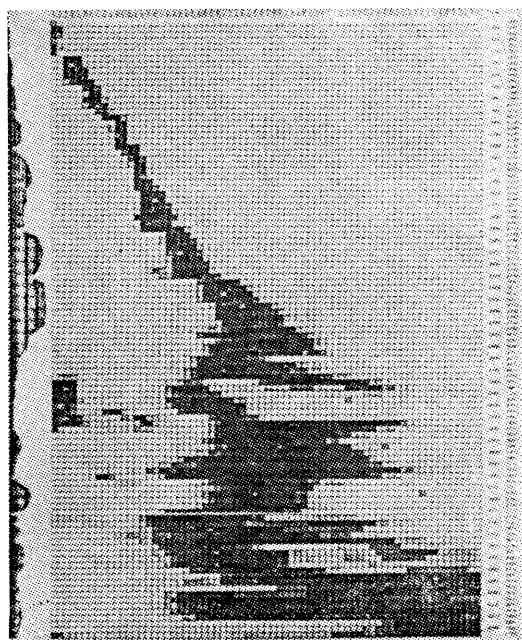


图 14c 自动整理的速度谱 (凹陷型)

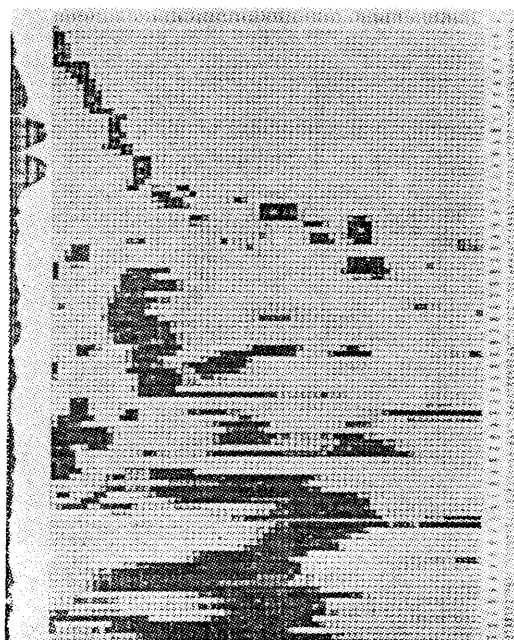


图 14d 自动整理的速度谱 (凸起型)

刘成正、卢春喜、董繁麟、孙泽、贺元凯同志的帮助，在此谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] 杜世通等，速度谱自动整理方法，《华东石油学院学报》，第2期，1977

[2] 柴振一, 地震速度自动整理, 《地球物理技术汇编》(一), 石油地球物理勘探编辑部, 1981

附 录

定理 设函数 $f: [0, 1]^m \rightarrow R$ 满足下列条件: (1) $f(0, 0, \dots, 0) = 0$; (2) $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 在 $[0, 1]^m$ 上连续; (3) $\forall x_i, y_i, x_i + y_i \in [0, 1] (i = 1, 2, \dots, m)$, 有 $f(x_1 + y_1, x_2 + y_2, \dots, x_m + y_m) = f(x_1, x_2, \dots, x_m) + g(y_1, y_2, \dots, y_m)$, 其中 g 是 $[0, 1]^m$ 上任一函数。则

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_m x_m$$

式中 $p_i \in R (i = 1, 2, \dots, m)$ 是任意常数。

证明 在条件 (3) 中, 令 $x_1 = x_2 = \dots = x_m = 0$, 得

$$\begin{aligned} f(y_1, y_2, \dots, y_m) &= f(0, 0, \dots, 0) + g(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ &= g(y_1, y_2, \dots, y_m) \end{aligned}$$

从而条件 (3) 可写成

$$\begin{aligned} f(x_1 + y_1, x_2 + y_2, \dots, x_m + y_m) \\ = f(x_1, x_2, \dots, x_m) + f(y_1, y_2, \dots, y_m) \end{aligned}$$

易见

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = f(x_1, 0, 0, \dots, 0) + f(0, x_2, 0, \dots, 0) + \dots + f(0, 0, \dots, 0, x_m)$$

记 $f_1(x) = f(x_1, 0, \dots, 0)$, $f_2(x) = f(0, x_2, 0, \dots, 0)$, $\dots$, $f_m(x) = f(0, \dots, 0, x_m)$, 则 $f_i(x) (i = 1, 2, \dots, m)$ 都是 $[0, 1]$ 上的连续实函数, 且满足条件

$$f_i(x + y + \dots + z) = f_i(x) + f_i(y) + \dots + f_i(z) \quad \forall x, y, \dots, z, x + y + \dots + z \in [0, 1]$$

现考察 $f_i(x)$ 的形式。对 $[0, 1]$ 中的任一有理数 $\frac{m}{n} (m \leq n)$,

$$\begin{aligned} f_i\left(\frac{m}{n}\right) &= f_i\left(\underbrace{\frac{1}{n} + \dots + \frac{1}{n}}_{m \text{ 个}}\right) = m f_i\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{m}{n} \left[\underbrace{f_i\left(\frac{1}{n}\right) + \dots + f_i\left(\frac{1}{n}\right)}_{n \text{ 个}} \right] \\ &= \frac{m}{n} f_i\left(n \cdot \frac{1}{n}\right) = \frac{m}{n} f_i(1) \end{aligned}$$

证 $f_i(1) = p_i$, 则知对 $[0, 1]$ 中任一有理数 x , 有

$$f_i(x) = p_i(x)$$

设 y 是 $[0, 1]$ 中任一实数, 由有理数的稠密性知存在 $[0, 1]$ 中的一个有理数列 $x_k, \lim_{k \rightarrow \infty} x_k = y$, 又由 f_i 的连续性得知

$$f_i(y) = \lim_{k \rightarrow \infty} f_i(x_k) = \lim_{k \rightarrow \infty} p_i x_k = p_i y$$

至此已得

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_m x_m$$

其中 p_i 都是常数。