

地壳与上地幔的地 震探测

(中)

中国科学院地球物理研究所

滕吉文 编

成都地质学院物探系深P探测教研室

翻印

目 录

第四篇	多次复盖的共反射点法与迭加	1
第十五章	多次复盖的共反射点时距曲线	1
第一节	均匀水平介质时的共反射点时距曲线	4
第二节	均匀介质倾斜地层时的共反射点时距曲线	6
第三节	非均匀介质时的共反射点时距曲线	6
第十六章	多次复盖的作用分析	11
第一节	压制多次波	11
第二节	突出有效波	20
第十七章	多次复盖资料的动静校正	27
第一节	动校正量的选择	27
第二节	动校正的计算方法	31
第三节	动校正量的检查方法	39
第四节	静校正的求取	42
第十八章	速度谱	42
第一节	速度谱的基本原理	43
第二节	速度谱的计算	46
第三节	速度谱参数的选择	50
第四节	速度谱的应用	52
第十九章	偏移迭加	53
第一节	偏移迭加问题的提出	53
第二节	偏移迭加的原理与方法	58
第三节	号数的选取	66
第四节	偏移迭加的实现	69
第五篇	地震探测资料的数字处理原理	70
第二十章	数字频率滤波	70
第一节	线性时不变系统与单位脉冲函数	71
第二节	数字滤波的基本概念及与电滤波器的比较	78
第三节	数字频率滤波原理	82

第四节	理想滤波口时间特性 $h(t)$ 的计标	85
第五节	在时间域中进行卷积滤波的运标	89
第二十一章	相关分析	107
第一节	相关分析基础	108
第二节	相关函数的特性	112
第三节	相关滤波	116
第四节	利用多边相关函数确定同相轴的 时间、斜率和评价同相轴的质量	121
第二十二章	时间域——空间域滤波	129
第一节	空间域滤波的基本概念	129
第二节	时间域——空间域滤波问题的提出	132
第三节	扇形滤波	134
第四节	扇形滤波的滤波因子的计标	138
第五节	扇形滤波的实现	147
第二十三章	最小平方反滤波及其应用	150
第一节	反滤波的基本概念	150
第二节	提高讯噪比的反滤波	153
第三节	提高分辨能力的反滤波	153
第四节	最小平方反滤波的基本原理	158
第二十四章	递归滤波、时变滤波	172
第一节	递归滤波原理及应用	172
第二节	时变滤波	182
第六篇	弹性波的激发、接收与观测系统	187
第二十五章	不同波种的探测特点	187
第一节	反射波法的特点	187
第二节	折射波法的特点	189
第二十六章	观测系统	190
第一节	观测系统的概念	190
第二节	观测点间隔 ΔX 和炸药点间距 L 的选择	192
第三节	反射波法的观测系统	196
第四节	折射波法的观测系统	201
第二十七章	振动的激发条件和接收条件	207
第一节	振动激发条件的基本要求	207
第二节	激发方式	208

第三节	振动的接收条件	217
第二十八章	组合原理及应用	229
第一节	组合的统计效应	227
第二节	组合的方向性效应的意义	234
第三节	简单线性组合原理	237
第四节	不等灵敏度组合	244
第五节	正反组合	247
第六节	其它类型的组合	249
第七节	组合方案的设计和效果	251
第二十九章	西拉高瓦湖中水下爆炸研究地壳与上地幔结构和速度分布的设计	
	——非连续剖面离散点观测	256
第一节	前言	256
第二节	观测系统	257
第三节	炸药量与有效波接收距离的估计	258
第四节	激发与接收地点的部署	261
第五节	仪器操作、试验记录与初步分析的要求	265
第六节	试验与观测工作过程中可能出现的较大的困难问题	267
	结束语	268

第四篇

多次覆盖

共反射点水平迭加

多次迭加即共反射点水平迭加，它是磁带地震探测野外观测方法和室内回放处理的一种重要手段。

共反射点的多次迭加法，就是把不同激发点激发，在不同接收点上接收到的地下同一反射点的讯号经过动、静校正后进行迭加，以获得新的回收记录的一种迭加方法，用以达到提高讯噪比。它所利用的矛盾不是频率滤波时的频谱差异，也不是组合时的方向性差异，而是利用动态校正后的剩余时差的差异；但是组合时的统计效应对迭加也起作用。它又比一般的组合技术有更多的优点，一般的组合方法中随着组合数目的增加，虽然也能提高讯噪比，但它所代表的地下反射“点”的体积也相应增加，平均效应加强，这样在一定程序上就掩盖了地下的细微地质构造现象。而多次迭加方法随着迭加次数的增加，提高了讯噪比，但并不扩大地下反射点的体积，因而能较真实的反映地下的细微地质构造现象，提高了探测效果。特别是这种方法对于压制多次反射波和海上水下爆炸所产生的交混回响，突出反射有效波有着特殊的效果。

由于利用多次迭加的资料，通过动静校正并能获得速度剖面——速度谱等重要参数，因而对地质、岩性的研究也取得了新的进展，这在地壳与上地幔的连续观测中，对于取得详细的地壳结构与物质组成也必将会起到重要作用。

第十五章

多次复盖的共反射点时距曲线

图 15-1 中 O_1 、 O_2 、 O_3 为共反射点各边的外炸点（或称炮点）， D_1 、 D_2 、 D_3 为相应的反射点各边所取讯号的接收点， X_1 、 X_2 、

χ_3 为炸点——接收点（即摆或析波口）之间的距离（以下简称炮析距）。如果各边的 χ_1 、 χ_2 、 χ_3 作为横坐标 相应的时间 t 为纵坐标，即得出共反射点的时距曲线。

共反射点时距曲线在水平界面或倾斜界面时，均具有与水平界面相类似的时距曲线方程，这就给我们的时差分析工作带来了很大方便，现假定水平界面时，对共反射点时距曲线的特点作一分析。

第一节

均匀水平介质时的共反射点时距曲线

如图 15-1 所示，同一共反射点各路（边）的炸点接收点，总是对称于地石上某一中心点 M 分布，即 $O_1M = D_1M$ ， $O_2M = D_2M$ ， $O_3M = D_3M$ ，这个中心点即为共反射点各边中炸点到接收点的距离（炮析距）等于零的点。为此，我们称它为共地石点，这个点在多次复盖中有很大的意义，经过动校正以后，同一共反射点参加迭加各边的反射时间都应当变为这一点的 t_0 反射时间。

在水平地层时，其反射点和共地石点的桩号是一样的，在倾斜地层时，虽然地下已不存在共反射点，而共地石点总还是存在的；此时只要把共反射点各边的反射时间想办法校正为共地石点的 t_0 反射时间，同样可以进行同相位迭加。

由图 15-1 可知：

$$t_1 = \sqrt{\frac{\chi_1^2}{V_1^2} + t_0^2}$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{\chi_2^2}{V_2^2} + t_0^2}$$

$$t_3 = \sqrt{\frac{\chi_3^2}{V_3^2} + t_0^2}$$

$$t_4 = \sqrt{\frac{\chi_4^2}{V_4^2} + t_0^2}$$

显然在任意点爆炸，在其对称於共地石点接收时，其时距曲线方程为：

$$\left. \begin{aligned} t_i &= \sqrt{\frac{x_i^2}{V^2} + t_0^2} \\ t &= \sqrt{\frac{x^2}{V^2} + t_0^2} \end{aligned} \right\} (15-1)$$

或

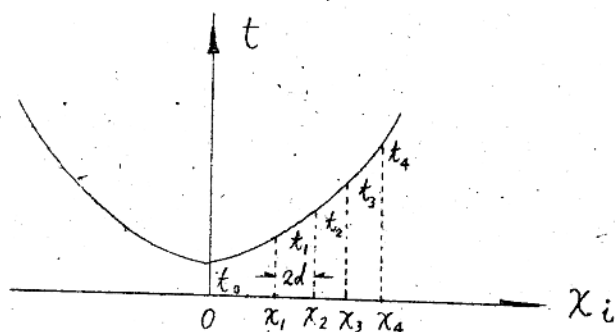


图 15-1
共反射点时沿曲线

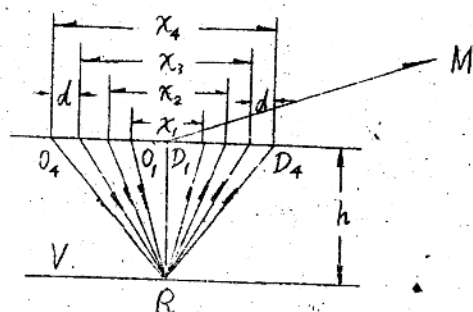
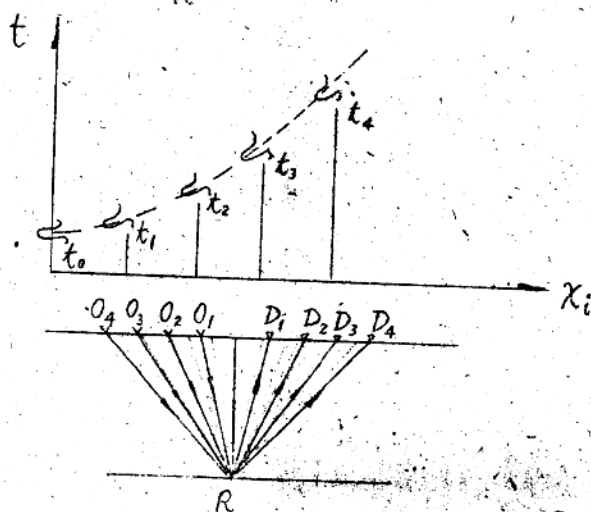


图 15-2
共反射点波列



该式与普通的水平层石时距曲线在形式上完全一样，但其中的符号含义都不相同。

t ：为共反射点各边的反射时间

x ：为共反射点各边的炮检距

V ：为平均速度

从(1)可见动校正量为：

$$t_N = t - t_0 = \sqrt{\frac{x^2}{V^2} + t_0^2} - t_0 \quad (15-2)$$

如果把各边的反射时间减去公式(15-2)中的动校正量 t_N ，即可把它们化为共地石点 t_0 反射时间，再把几张记录上同属于一个反射点的各边加边地震记录加在一起，各边反射讯号记录时间恰好相同，迭加时反射讯号互相加强，因而必然突出反射波(图15-3)，图15-2为一个四次迭加时的共反射点波列。

第二节

均匀介质倾斜地层时的共反射点

时距曲线

均匀介质中倾斜地层的共反射点各边的射线路程及其相应的时距曲线：见图15-4a。

O_1, O_2, O_3 和 D_1, D_2, D_3 为各边的炮点及接收点， C, D, E 为其反射点， M 为共地石点， B 点为法线反射点，由图可见， C, D, E 并不在一个点上，而是散布在某一地段，倾角越大，

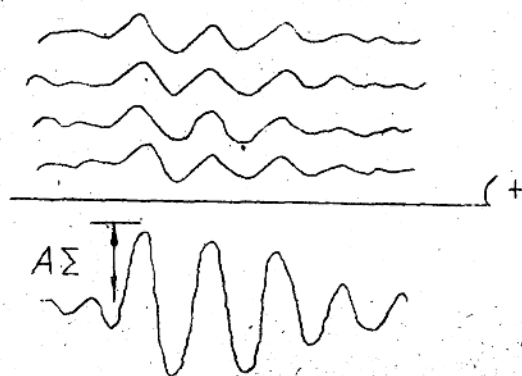


图15-3

迭加后反射波加强

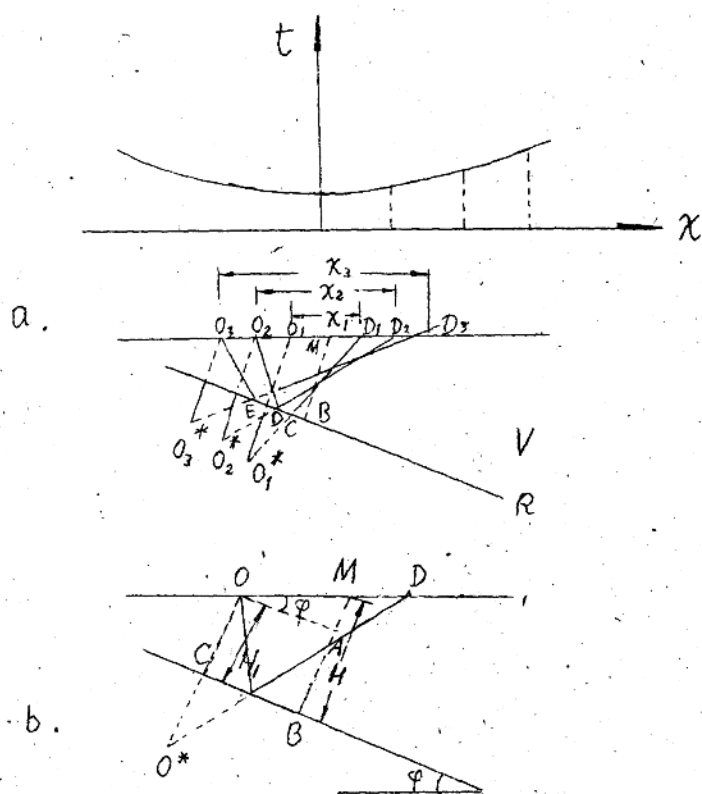


图 15-4 均匀介质 倾斜地层共反射点时距
曲线(a)和时间推导(b)

地层越浅，点就越分散，地下点越分散，则探测的精度就越低。但是在一定情况下，这些点散布的范围还是不太大的，因此还可以保证一定的探测精度，此时其反射点的时距方程推导如下：

如图 4b 所示，O 点炸，D 点接收，M 是共地点 OD = x = 炮检距，D 点的反射时间为：

$$t = \frac{1}{V} \sqrt{x^2 + 4H_1^2 + 4H_1 x \sin \varphi} \quad (15-3)$$

从 O 点向 MB 作垂线 OA，则：

$$\begin{aligned} H &= MB = AM + AB = AM + OC \\ &= \frac{x}{2} \sin \varphi + H_1 \end{aligned}$$

$$M_1 = H - \frac{x}{2} \sin \varphi \quad (15-4)$$

代入 (15-3) 式

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{V} \sqrt{x^2 + 4 \left(H - \frac{x}{2} \sin \varphi \right)^2 + 4x \sin \varphi \left(H - \frac{x}{2} \sin \varphi \right)} \\ V^2 t^2 &= x^2 + 4H^2 - 4Hx \sin \varphi + x^2 \sin^2 \varphi + 4Hx \sin \varphi \\ &\quad - 2x^2 \sin^2 \varphi \\ &= x^2 (1 - \sin^2 \varphi) + 4H^2 \\ &= x^2 \cos^2 \varphi + 4H^2 \end{aligned} \quad (15-5)$$

(15-5) 式可能化为：

$$\begin{aligned} t^2 &= \frac{x^2 \cos^2 \varphi}{V^2} + \frac{4H^2}{V^2} \\ &= \frac{x^2}{V^2 / \cos^2 \varphi} + t_0^2 \\ t &= \sqrt{\frac{x^2}{V_D^2} + t_0^2} \end{aligned}$$

这就是均匀介质倾斜地层共反射点时距方程。把 (15-6) 式与 (15-1) 式相比可见，二者极为相似，所不同者为 (15-1) 式的平均速度为 V ，这里变为 V_D ， $V_D = V / \cos \varphi$ ，它所代表的并不是真正的平均速度，故称它为视平均速度。

从式 (15-6) 可见，它仍然是一条对称于其地石点 M 的双曲线，我们可以从共地石点的时距曲线中求得 V_D ，再用上节的式 (15-2) 求出动校正量 t_N ，把它都校正为其地石点的 t_0 反射时间。

第三节

非均匀介质时的共反射点时距曲线

上两节所讨论的两种情况，均为近似的假设地下介质为均匀的，这与实际情况是有出入的，由于实际地层介质不均匀，波的传播速度一般均为随地层深度加深而增大（暂不涉及地壳与上

地慢中的低速带(高速地层), 因此按折射定律

$$\sin i_1 / \sin i_2 = V_1 / V_2$$

所以地震波在地下传播时並不是一条直线而是一条折线(图15-5)。这条折线所走路程虽然比较长, 但所用的时间, 反而比直射线少。他所走的路程 $OABCD$ 是一条花费时间最少的路程(费马原理)。因此在实际上传播所需的时间总是比用平均速度时要小些(图15-6), t_1 是用平均速度求得的反射时间, t_2 是实际的反射时间。

下面我们分为几种情况来讨论:

1. 水平层状介质的共反射点时距曲线。上面已讲过, 在水平均匀介质情况下, 共反射点时距曲线与普通时距曲线虽然根据的原理不同, 但方程一样。这在水平成层介质的情况下也是如此。因此我们就可以用普通的时距曲线方程来代替共反射点的时距曲线方程。

水平介质的普通时距方程为:

$$t^2 = C_1 + C_2 X^2 + C_3 X^4 + C_4 X^6 + \dots \quad (15-7)$$

式中的 $C_1, C_2, C_3, C_4 \dots$ 决定于地层的厚度 $h_1, h_2, h_3, h_4 \dots$ 及层速度 $V_1, V_2, V_3, V_4 \dots$ 。

从上式可见, 水平层时距方程已不是双曲线了, 但是在一般情况下, 它与双曲线差别很小, 所以略去后几项, 仍当双曲线来看待。

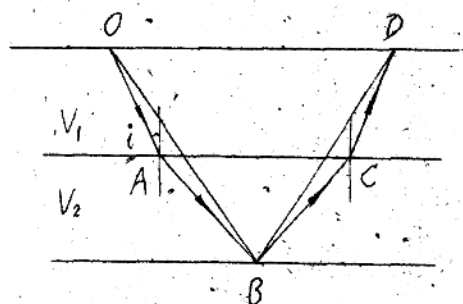


图15-5 水平介质中地震波的射线路径

a. 3层介质 b. 多层介质

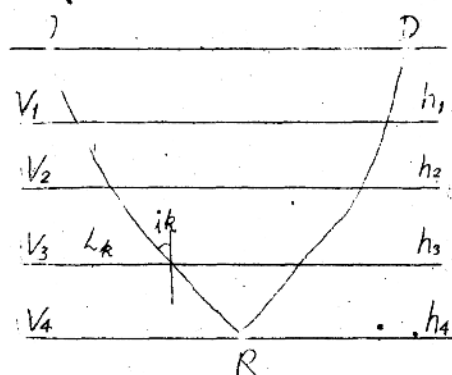


图 15-5 b

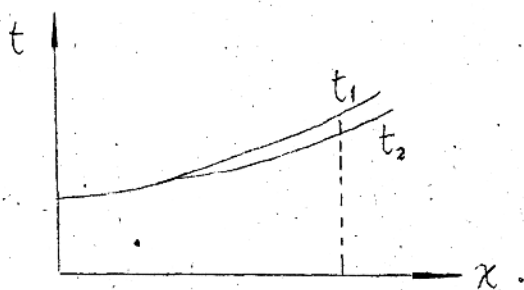


图 15-6 反射时间的差异

如果 O 点激发，在第 n 层上 R 点反射（图 15-5b），到达 D 点的旅行时间为其经过各水平层的旅行时间的总和

$$t = 2 \sum_{k=1}^n \frac{t_k}{V_k} = 2 \sum_{k=1}^n \frac{h_k}{V_k \cos i_k} \quad (15-8)$$

由折射定律可知：

$$\frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2} = \dots = \frac{\sin i_k}{V_k} = p$$

$$\text{故 } \sin i_k = p V_k \quad \cos i_k = \sqrt{1 - p^2 V_k^2}$$

代入 (15-8) 式得

$$t = 2 \sum_{k=1}^n \frac{h_k}{V_k \sqrt{1 - p^2 V_k^2}} \quad (15-8')$$

令(15-8)式 $2h_k/V_k = t_k$ 为每一层次的双程垂直旅行时间, 则(15-8)式可化为:

$$t = \sum_{k=1}^n \frac{t_k}{\sqrt{1 - p^2 V_k^2}} \quad (15-9)$$

用二项式展开(15-9)式则得

$$t = \sum_{k=1}^n t_k \left[1 + \frac{1}{2} p^2 V_k^2 + \frac{1.3}{2.4} p^4 V_k^4 + \dots \right] \quad (15-10)$$

当 i 角较小时, $PV_k = \sin i_k$ 的高次项可以略去, 由此上式化为:

$$\begin{aligned} t &= \sum_{k=1}^n t_k \left[1 + \frac{1}{2} p^2 V_k^2 \right] \\ &= \sum_{k=1}^n t_k + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n t_k p^2 V_k^2 \end{aligned} \quad (15-11)$$

$\sum_{k=1}^n t_k = t_0$: 双程垂直总旅行时
故(15-11)式化为

$$t = t_0 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n t_k \cdot p^2 V_k^2 \quad (15-12)$$

由图可知, 炮桥距为:

$$\chi = 2 \sum_{k=1}^n \chi_k = 2 \sum_{k=1}^n h_k \tan i_k \quad (15-13)$$

用二项式展开:

$$\begin{aligned} \chi &= 2 \sum_{k=1}^n h_k \cdot PV_k \left(1 + \frac{1}{2} p^2 V_k^2 + \dots \right) \\ &\approx \sum_{k=1}^n t_k p V_k^2 \\ &= \sum_{k=1}^n p t_k V_k^2 \end{aligned} \quad (15-14)$$

(15-12)式取平方:

$$t^2 = t_0^2 + t_0 \sum_{k=1}^n t_k p V_k^2 + \frac{1}{4} \left(\sum_{k=1}^n t_k p^2 V_k^2 \right)^2$$

$$\approx t_0^2 + t_0 \sum_{k=1}^n t_k \cdot p^2 V_k^2$$

$$= t_0^2 + t_0 p^2 \sum_{k=1}^n t_k V_k^2$$

(15-15)

(14) 式取平方得：

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^n (p t_k V_k^2)^2$$

$$= p^2 \left(\sum_{k=1}^n t_k V_k^2 \right)^2$$

$$p^2 = \chi^2 / \left(\sum_{k=1}^n t_k V_k^2 \right)^2$$

(15-16)

将(16)式代入(13)可得：

$$t^2 = t_0^2 + \lambda^2 \cdot t_0 \sum_{k=1}^n t_k V_k^2$$

$$= t_0^2 + \frac{\chi^2}{\left(\sum_{k=1}^n t_k V_k^2 \right)^2} \cdot \left(\sum_{k=1}^n t_k V_k^2 \right) \cdot t_0$$

$$= t_0^2 + \frac{\chi^2}{\frac{\sum_{k=1}^n t_k V_k^2}{\sum_{k=1}^n t_k}}$$

(15-17)

取 $V_{ij}^2 = \frac{\sum_{k=1}^n t_k V_k^2}{\sum_{k=1}^n t_k}$

$$\therefore V_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n t_k V_k^2}{\sum_{k=1}^n t_k}}$$

(15-18)

上式说明将不同层速度平方后乘上各层垂直旅行时间 t_k 的和数，然后再取平均，平方后即可求得 V_0 。根据上述原因，我们称 V_0 为均方根速度，皆称均方速度。它可从时距曲线上直接求得，即我们过去所称的有效速度。

根据(15-18)式可知，在任何情况下，均方速度总是要比平均速度大，用均方速度所求得的动校正量总比平均速度要小，但是它比较正确可靠。

从上面的推导可见，当水平层状介质时，共反射点的时距曲线方程总是一根近似的双曲线。当炮检距 x 越小时， t_k 越接近于0，则其近似程度越高，因此严格来说，因为共反射点时距曲线方程并不是一条双曲线，故其 x^2-t^2 曲线也不是一条直线，当炮检距很大时，可以看到 x^2-t^2 曲线的下弯形态，但在一般情况下可以满足精度要求。

第十六章

多次复盖的作用分析

第一节 压制多次波

1. 正常时差与剩余时差，来自同一共反射点的一系列反射波，在通常情况下它们只存在着时间差别，波形的变化很小。将这样一系列反射波，依炮检距大小次序排列在一起就称为共反射点波列，若不作任何处理就让它仍速加，必然会把反射波抵消掉。如果在迭加之前，先把它们都校正为共地层的 t_0 时间。迭加以后，反射波就会大大加强。

从而可知，不论在水平或倾斜地层情况下共反射点时——线方程均为

$$t = \sqrt{\frac{x^2}{V^2} + t_0^2} \quad (16-1)$$

式中 V ：在均匀介质、水平地层情况下，为平均速度 V ，在层状水平地层的情况下为均方速度 V_0 。在层状倾斜地层的情况下，为视均方速度 V_s 。为了统一起见，今后我们把它写成

$$t = \sqrt{\frac{x^2}{V_c^2} + t_0^2} \quad (16-2)$$

式中 V_c 称视均方速度，在层速度不变时，它与倾角有关，倾角越大， V_c 则越大，在实际工作中可依实测的 x 、 t 值求出 V_c ，然后用 V_s 去做动校正量，即可得精确的动校正曲线。

这里应当提出，在不同情况下 V_c 的物理意义和数量上的差别。若要把共反射点波列各边的反射时间 t 校正为共地石的 t_0 时间，需要减去一个动校正量 t_N 可用下列表示：

$$t_N = (t_0 + \frac{1}{2} \cdot \frac{x^2}{V_c^2 t_0} - \frac{1}{8} \cdot \frac{x^4}{V_c^4 t_0^3} + \dots) - t_0 \quad (16-4)$$

式中 $V_c t_0 \approx 2H$ ，当 x/H 不大时，上式可简化为

$$t_N = \frac{1}{2} \frac{x^2}{V_c^2 t_0} \quad (16-5)$$

当地下存在多次波时，地震波的射线路程如图 16-2a 所示。

因为多次波在浅层介质中传播时，速度 V_D 较小，所以多次波的共反射点时距曲线应当比一次波快。

其校正量应为：

$$t_{ND} \approx \frac{x^2}{2t_{0D} V_D^2} \quad (16-6)$$

设 $t_{0D} = t_0$ ，则 (16-6) 式变为

$$t_{ND} = \frac{x^2}{2t_0 V_D^2} \quad (16-7)$$

如果用一次波的速度 V_c 对上述波列进行校正，则校正后的时差应为：

$$\begin{aligned} \Delta t_N &= t_{ND} - t_N \\ &= \frac{x^2}{2t_0} \left(\frac{1}{V_D^2} - \frac{1}{V_c^2} \right) \end{aligned} \quad (16-8)$$

Δt_N 称为剩余时差。

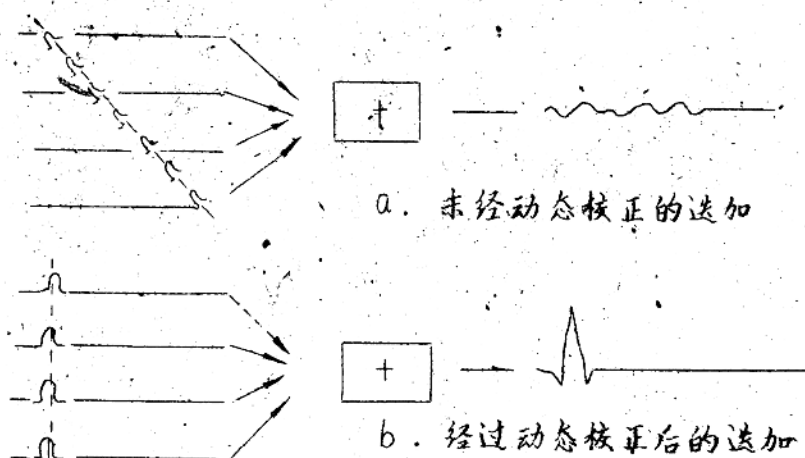


图 16-1 共反射点迭加

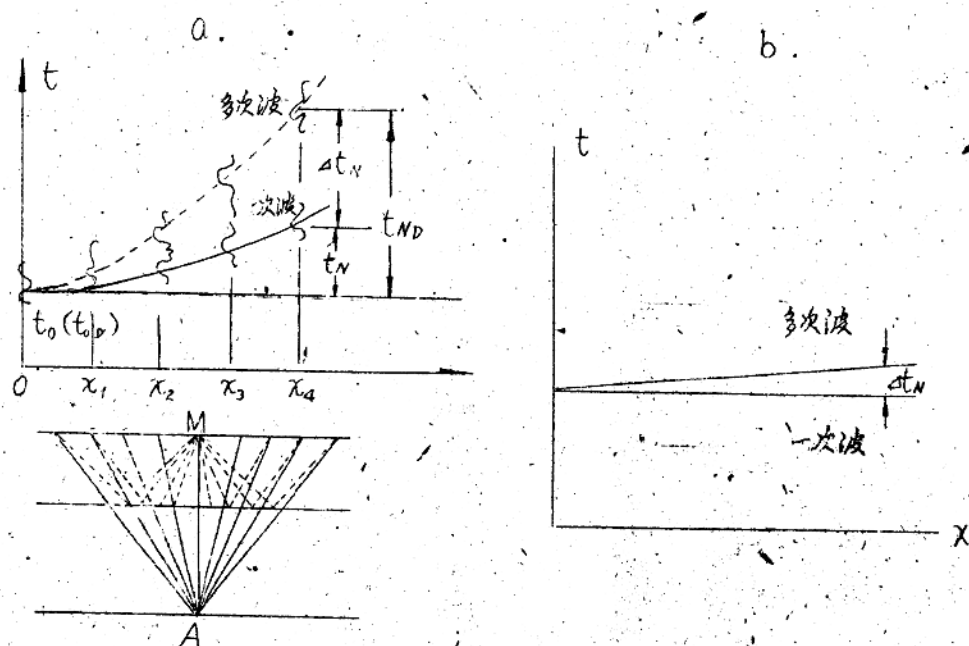


图 16-2

一次波与多次波的共反射点时距曲线