

# 石油地球物理·讨论·勘探求心量板法

——一种新的绘制剖面方法

赵亚明

## 摘要

本文从讨论现有各种曲射线量板法所存在的缺点入手，提出一种模拟求取 $z_0$ 、 $R$ 量板的方法——求心量板法。文中对现有曲射线量板在不同地质条件下的使用方法以及 $V_0$ 、 $\beta$ 值的物理意义也进行了讨论。

## ABSTRACT

In this paper a new method called centring template method, used to simulatively solve  $z_0$ 、 $R$  template, is presented on the basis of an analysis of defects existing in current curved ray templates. The usage of these current curved ray templates under different geologic conditions and the physical meaning of  $V_0$  and  $\beta$  are also discussed in this paper.

在地震勘探的早期，人们把地震波简化为直射线，并由此产生了直射线构组剖面、直射线归位等一系列方法。然而，一般地下地层的真速度不可能是一个常数，地震射线也不可能是一条直线，此时如用直射线求解，就会引起偏移量过大和构造形态、断层位置的解释误差太大的问题。尤其是断层面，因其倾角大，用直射线法归位引起的误差就更为严重了。

由于归位问题的重要性，近二十多年来有关的研究文章是很多的。按其研究方法的不同，基本可分为两类：

1. 用数学分析的方法，在各种不同的垂向速度变化规律的情况下，可得出一种简易的构组方法—— $z_0$ 、 $R$ 量板法。一般都采用变 $\beta$ 或变 $V_0$ 的方法来解决速度变化规律不符合 $V = V_0(1 + \beta z)$ 的假设前提所产生的各种矛盾。

2. 用正反演模型法，推出地下结构的精确形态。

在上述两种方法中，后者由于方法本身比较复杂，往往只局限于对某些局部对象的研究。因此，本文的讨论主要限于前者。

## 现有各种曲射线量板的缺点

### 常 $V_0$ 、 $\beta$ 量板

常 $V_0$ 、 $\beta$ 量板是所有曲射线量板中最简单的一种。

可以证明，当 $V = V_0 + Kz = V_0(1 + \beta z)$ 时，地震波的波前可用圆的方程来表达，即

# 石油地球物理勘探

$$x^2 + \left[ z - \frac{1}{\beta} (\operatorname{ch} V_0 \beta t - 1) \right]^2 = \frac{1}{\beta^2} \operatorname{sh}^2 V_0 \beta t \quad (1)$$

式中:  $V_0$  为地层的起始速度;  $\beta$  为速度的增长系数。

$$\text{取 } z_0 = \frac{1}{\beta} (\operatorname{ch} V_0 \beta t - 1) \quad R = \frac{1}{\beta} \operatorname{sh} V_0 \beta t$$

在炮点正下方  $z_0$  处, 以  $R$  为半径画圆, 可得到不同炮点处的波前面。各圆的公切线, 即为归位后的正确位置。

由此可见, 当速度随深度呈线性增长时, 所得的波前方程具有分析方便、构组简捷的优点。因此, 这种方法长期以来一直为人们所利用。但其矛盾也很突出, 它所假设的速度增长规律常常与实际情况不符。在很多工区, 根据  $V = V_0(1 + \beta z)$  的公式计算, 深部地层的速度可以高达 8,000~10,000 米/秒以上, 这显然是不合理的。

因此, 一般只能就主要目的层段, 用拟合法求得  $V_0$ 、 $\beta$  值。拟合法一般有两种:

## 1. 用公式

$$V_m(t) = \frac{\exp V_0 \beta t - 1}{\beta t}$$

与实测的平均速度曲线 ( $V_m - t$ ) 相拟合。

## 2. 用公式

$$V = V_0(1 + \beta z)$$

与实测 (一般经过适当的换算) 的真速度曲线相拟合。根据目的层的速度增长梯度确定  $\beta$  值, 将此直线延伸到  $z = 0$  处, 即可求得  $V_0$  值 (图 1)。

上述两种拟合方法, 虽然所用公式不同, 但本质上无差别。现从后者入手, 分析它的根本缺点:

### 1. 方法本身的含义不清

此种拟合方法所包含的物理意义, 是把目的层上下的介质都用目的层的  $K(V_0, \beta)$  值进行了替换。此时所求得的波前面, 不仅对于目的层以上的浅层和目的层以下的深层来说是错误的, 即使对于目的层本身来说亦是不对的。我们可以用射线图板法来证明。当对上覆介质的速度进行替换后, 其下层位的射线轨迹及波前面必然会发生相应的变化。因此, 用此种方法模拟所得到的结果, 在任一深度上都不能代表实际的情况。

### 2. 剖面深度与实测资料不吻合

在上述理想的情况下,

$$t = \int \frac{dz}{V(z)} = \int \frac{dz}{V_0(1 + \beta z)} = \frac{1}{V_0 \beta} \ln(1 + \beta z) \quad (2)$$

在实际情况下,

$$t = \int \frac{dz}{V(z)} \quad (3)$$

由于式 (3) 中的  $V(z)$  在浅层部分不能用  $V = V_0(1 + \beta z)$  表示, 因此用式 (2) 积分

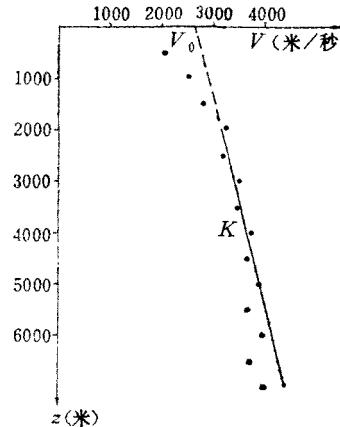


图 1 常  $V_0$ 、 $\beta$  值求法

求得的  $t-z$  曲线，必然与实际结果式(3)不符。这就造成了构组剖面的深度误差。

### 为了弥补实测 $V(z)$ 曲线与假设不符合的缺点，有人曾把 $V(z)$ 曲线分成几段，分别求出其 $V_0$ 、 $\beta$ 值。这就是所谓分段模拟的方法(图 2)。

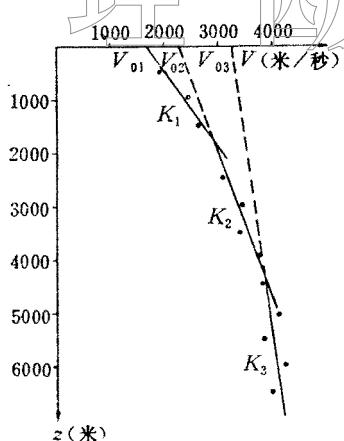


图 2 分段模拟求  $V_0$ 、 $\beta$  值

由上述分析可知，这种方法在原理上也是错误的。它除了对第一层是正确的以外，第二层的构组精度与常  $V_0$ 、 $\beta$  法相比并无任何改进，对第三层及其以下地层同样也存在着由于强制更换速度介质所产生的错误。

另外，由于

$$t_1 = \frac{1}{V_{01}\beta_1} \ln(1 + \beta_1 z)$$

$$t_2 = \frac{1}{V_{02}\beta_2} \ln(1 + \beta_2 z)$$

$t_1 \neq t_2$ ，因此在模拟段的交接处会产生  $t-z$  曲线的脱节现象。

### 平均梯度法量板

为了解决上述矛盾，普泽列夫曾提出一种求取  $z_0$ 、 $R$  量板的改进方法<sup>[1]</sup>，称为“平均梯度法”，这种方法是在求取不同时刻的构组弧(波前面)时，不断地将其上层的介质进行了替换。用以替换的介质的  $V_0$  值可取为某一常数，速度增长规律变成了线性的。由于采用了“不断替换”这一概念，使前两种方法的缺点得到了部分弥补，它所构组的剖面深度与实测的  $t_0-z$  曲线完全相符，并且避免了量板速度随着深度无限制地线性增长的缺点。这是构组方法中的一项重大改进。但是，也有其固有的矛盾与缺点：

#### 1. $V_0$ 值如何确定？它的物理意义是什么？

有人曾用在  $V-z$  曲线上求截距的方法来确定  $V_0$  值。图 3 中的  $V(z)$  曲线是一条实测的曲线，其速度的增长梯度由浅至深是不相等的。此时用浅、中、深层分别截取所得的  $V_0$  值会有很大的差异。由浅层求得的  $V_0$  值用于深层构组时，会引起  $z_0$  值偏大和偏移量偏小的现象；由深层求得的  $V_0$  值，用于浅层构组时， $\beta$  值会出现负值， $z_0$  值因此变负。在第四系覆盖较厚的地区，此种  $z_0$  值变负的现象，一般也不符合实际垂向速度变化的规律。

引起上述混乱的根本原因，是当速度为非线性规律变化时，这种求  $V_0$  的方法从严格的物理概念上来说是错误的。实际上  $V_0$  值是一个与  $\beta$  值同时不断变化的变数，因此，根本上就不存在一个常  $V_0$  值的问题。

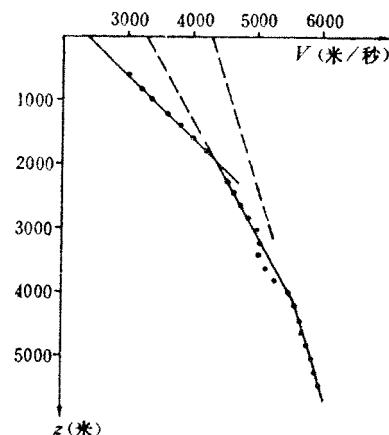


图 3 用不同层段求取  $V_0$  值的不同结果

## 2. 用平均梯度法所构成的剖面究竟能达到多大的归位精度?

显然, 当  $V(z)$  的变化规律为任意时, 想要用数学方法推算出此种方法所能达到的构组精度, 实际上是一个很难解决的问题。因而难以对其使用价值作出精确的估价。

为了克服平均梯度法所存在的缺点, 下面提出一种新的  $z_0$ 、 $R$  量板方法——求心量板法。

## 求心量板法

求心量板法是首先用射线轨迹法求出波前面, 然后用直接模拟的方法求各波前面圆的  $z_0$ 、 $R$  值。

其制作步骤如下:

1. 根据地震测井或其它速度资料给出本区自浅至深的速度层参数(见图 4)。

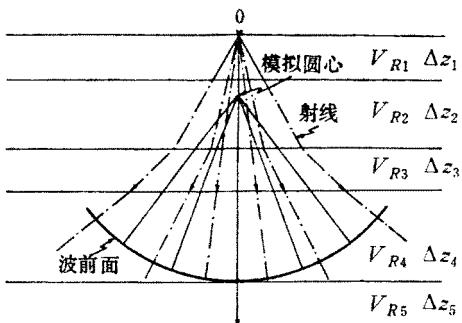


图 4 用射线图板反求  $z_0$ 、 $R$  的方法原理

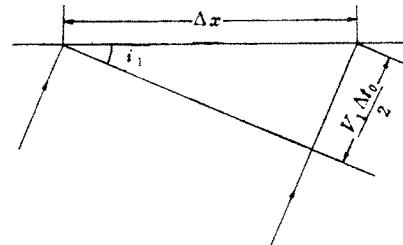


图 5 最大  $P$  值的确定方法

2. 给出不同的  $P$  值, 用斯奈尔定律求出射线图板及波前面图板(两者画在同一张图上, 称为综合射线图板)。

$$P = \frac{\sin i_2}{V_{R1}} = \frac{\sin i_2}{V_{R2}} = \dots = \frac{\sin i_n}{V_{Rn}}$$

最大  $P$  值的确定方法见图 5。

由  $\sin i_1 = \frac{V_{R1} \Delta t_0 / 2}{\Delta x}$

得  $P = \frac{\sin i_1}{V_{R1}} = \frac{\Delta t_0}{2 \Delta x} = \frac{1}{2V^*}$

式中:  $V^*$  为时间剖面上构组对象的最小视速度; 最大的  $P$  值一般可取为  $1/2V^*$  或略大一些。

3. 在张开角的范围内, 用最小二乘法模拟出波前面(圆), 求出该圆的圆心及半径。圆心即为  $z_0$ , 半径即为  $R$ 。

因为地震射线垂直于波前面, 界面与波前面相切, 所以模拟圆的圆弧张开角  $\theta$  应等

# 石油地球物理勘探

于或略大于地层倾角  $\varphi$  (图 6)。取  $\theta$  值略大于  $\varphi$  值的原因是为了保证切弧位置的精度。

## 4. 求模拟圆的均方根误差。

由图 7 知  $\Delta z = z' - z''$ , 其中  $z'$  为实际波前面的深度,  $z''$  为模拟波前面的深度。其均方根误差为

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^N (\Delta z)^2}$$

试验证明, 当张开角不大于  $30^\circ$  时, 均方根误差值一般可以忽略不计。当张开角较大时, 可根据构组对象的产状变化范围规定一个张开角的范围 (如  $30^\circ$ — $50^\circ$ ) 以减少模拟误差, 或者采用分段模拟的方法, 算出两套以上的量板, 按产状的陡缓, 各自规定所使用的张开角范围。

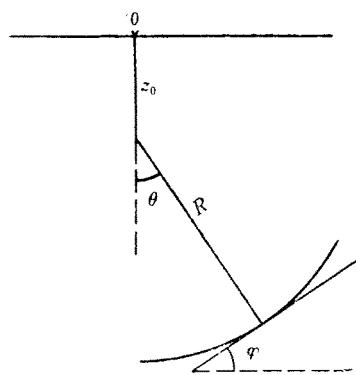


图 6 张开角  $\theta$  的确定方法

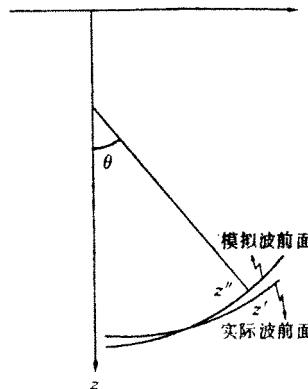


图 7 模拟圆的均方根误差求法示意图

5. 为了便于与数学分析方法的成果相比较, 还可以用反推法从  $z_0$ 、 $R$  值求出其相对应的  $V_0$ 、 $\beta$  值。

从 (1) 式可知

$$z_0 = \frac{1}{\beta} (\operatorname{ch} V_0 t - 1) \quad R = \frac{1}{\beta} \operatorname{sh} V_0 \beta t$$

令

$$V_0 \beta t = A \tag{4}$$

则

$$z_0 = \frac{1}{\beta} (\operatorname{ch} A - 1)$$

$$R = \frac{1}{\beta} \operatorname{sh} A$$

$$\frac{z_0}{R} = \frac{\operatorname{ch} A - 1}{\operatorname{sh} A} \tag{5}$$

从 (5) 式可以解出  $A$  值。

又

$$\beta = \frac{\operatorname{sh} A}{R} \tag{6}$$

将  $\beta$  值代入 (4) 式, 即可求得  $V_0$  值。

# 石油地球物理勘探

上述求取  $z_0$ 、 $R$ 、 $\varepsilon$ 、 $V_0$ 、 $\beta$  的过程，可编成简单的计算程序用计算机计算。因此，只要给出  $V_{R1}$ 、 $\Delta z_1$ ； $V_{R2}$ 、 $\Delta z_2$ ；… $V_{Rn}$ 、 $\Delta z_n$  等一系列数值，很快即可得出所需各种数值，使用时颇为方便。

由以上分析可见，求心量板法具有明显的特点：

1. 由于一般地下速度的模型都可以“层状介质”的形式提供，因此它可适用于任意的速度变化规律。
2. 由于它代表了一种“最佳近似”的状态，因此，在所有的  $z_0$ 、 $R$  量板的构组方法中，它所提供的数据应该是最佳的。
3. 当已知速度的横向变化规律时，可用此法直接求出所需的空间变化的  $z_0$ 、 $R$  量板。

## 若干问题的讨论

### $V_0$ 的物理意义

求心量板法求取  $z_0$ 、 $R$  值时，是将某一波前面以上的地层介质以某一虚拟介质代替它。使该虚拟介质的波前面尽可能与已知波前面相接近。 $V_0$  即为该虚拟介质的起始速度， $V_0 \beta = K$  即为该虚拟介质的垂向速度梯度。这种虚拟介质实际上是不存在的，因此，不能将  $V_0$  理解为地表或浅层速度。

例如，图 8 是某山区的海相地层的  $V_0-t_0$  及  $\beta-t_0$  曲线，该处表层速度为 2,450 米/秒，而用求心量板法求得的  $V_0$  值最大可达 4,000 米/秒左右，并且  $V_0$  值自浅至深变化很大，最大最小值之差可达一倍以上。

### 曲射线量板的用法

我们目前用以构组剖面的基础都是相当于“自激自收”的时间剖面。此时，曲射线量板法不一定是最佳的构组方法。我们应根据不同的地质对象，采用不同的构组方法。

1. 当地下介质为层速度较稳定的平行层状介质时（如某山区的中、古生界海相地层剖面），由于入射角恒等于零，射线在地层分界面上并不产生折射，应为直射线。此时如果仍用曲射线法构组，很可能是弄巧成拙，反而降低了剖面精度。

但是，当平行层状介质剖面中存在着构造扭曲和断层等复杂情况时，地震射线又变成了各种不同形状的曲射线，此时宜根据具体情况决定所采用的构组量板及构组方法。

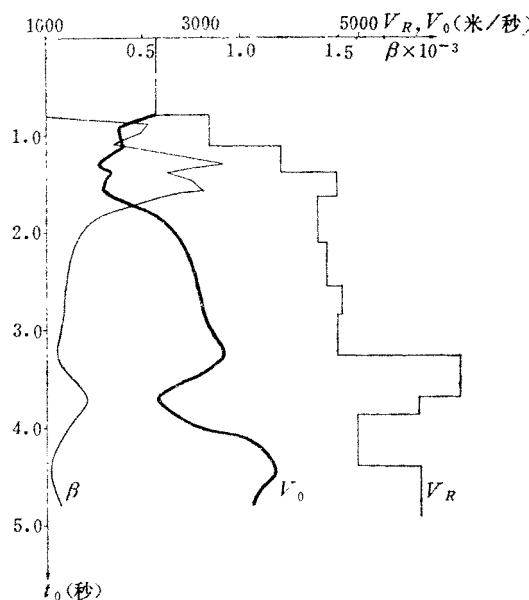


图 8 某山区的海相地层  $V_0-t_0$  及  $\beta-t_0$  曲线实例

2. 即使在近似平行的层状介质时，是用曲射线法或直射线法构组地层反射剖面，也要通过试验得出结论。例如，在平原地区的陆相地层剖面，由于剖面产状比较平缓，不整合面上下的产状变化大多数不明显，并且大多数剖面呈现出继承性沉降的特点，即下陡上缓。但各层的倾角是渐变的，此时，如果浅层地层产状差异不太大，地震射线与地层产状之间，基本上还应近似为法线入射关系。这种情况与常规的曲射线构组方法的假设前提（将入射角看作是射线与铅垂线的夹角），往往存在着较大的差别，此时的构组方法就需要通过试验摸索其规律。

3. 无论是在山区或平原，断层面均应采用曲射线法构组。这是因为断面产状一般与地层产状不一致，断面波的射线轨迹必然是曲射线的缘故。

当构组断面波时，应注意垂直地层产状取 $z_0$ 值，再作弧求切线，如图9所示。

### 负 $z_0$ 值的物理意义

当用求心量板法求取 $z_0$ 值时，有时会出现模拟圆的圆心在地面以上，即 $z_0$ 为负值的情况。此种情况常产生于海相地层出露区。当表层速度较大（如灰岩），深层速度较小（如页岩）时，就有可能产生负 $z_0$ 值（图10）。

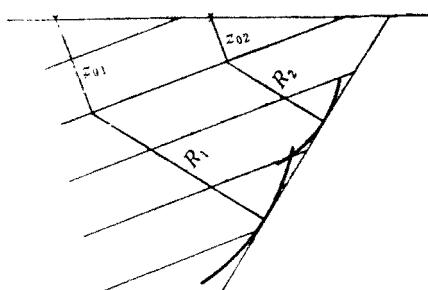


图 9 断面波的构组方法

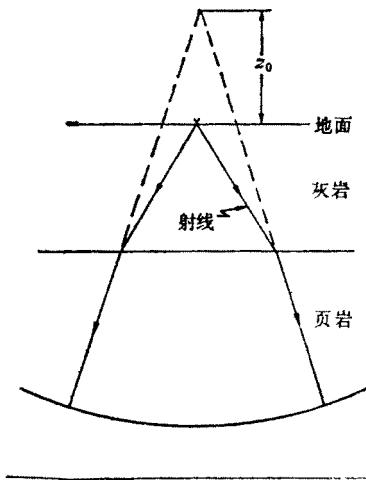


图 10 负 $z_0$ 值的产生

以上认识仅仅是初步的，有待在进一步的实践中发展和完善。

在这一工作中，曾得到刘义正、丁维照、张炳等同志的热情帮助，在此向他们致谢。

### 参 考 文 献

- [1] H.H.普泽列夫著，林中洋，高明远等译，《反射波法地震勘探资料解释》，中国工业出版社，1963
- [2] 南方石油地质勘探研究所，海相地层分层变速剖面构组方法，《石油地球物理勘探》，第2期，1978