

地震勘探文集

(一)

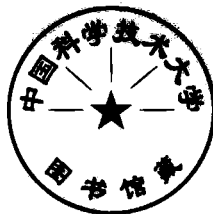
石油工业出版社

內 容 提 要

這本書是收集蘇聯最近幾年，關於地震勘探解釋方法及工作方法等方面的論文十篇。其中對反射法解釋方法的探討；有效速度的簡易求法；反射波時距曲線的校正等方面都有專門的論述；對測井中的反射波垂直時距曲線及續至波的利用進行了很好的

對提高地震記錄質量的一種有效辦法——聯合混波器及極性的檢查作了專門介紹。

這本書是從事地震勘探的同志們很重要的參考文獻；也是地球物理工作同志們有價值的学习資料。



統一書號：15037·618

地 震 勘 探 論 文 集

(一)

*

石油工業出版社出版（地址：北京六號路石油工業部內）

北京市書刊出版業營業許可證出字第083號

石油工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{2}$ 開本 * 印張2 $\frac{3}{4}$ * 58千字 * 印1—4,000冊

1958年12月北京第1版第1次印刷

定價(10)0.37元

1. 地震勘探資料解釋方法的途徑 Н.Н. 普茨列夫(1)
2. 根据反射波时距曲綫共軛点計算有效速度的簡易方法 Е.В. 列查諾娃(27)
3. 用普通比例尺繪成的反射波时距曲綫借助圖版計算有效速度 В.А. 安德烈也夫(31)
4. 关于反射波时距曲綫的校正 В.И. 普利瑪(36)
5. 反射波的垂直时距曲綫 Г.И. 彼特克維奇(44)
6. 地震測井中的續至波 А.Н. 亞科布宋(49)
7. 联合混波器 В.И. 普利瑪(58)
8. 关于В.И. 普利瑪提出的新的混波器綫路的問題 А.И. 斯魯茨科夫斯基(68)
9. 檢波器極性的檢查 А.Н. 莫茲然柯(76)
10. 卷紙机械自动开关 В.Г. 卡格罗也夫(83)

地震勘探資料解釋方法的途徑

H. H. 普茨列夫

大家都知道，实际地層介質不是均匀的，在其中地震波傳播的速度与空間每点座标有关。这个关系决定于沉积層的岩性，岩層的地質年代以及構造的結構。速度分佈的函数 $v(x, y, z)$ 可能是很复杂的，因而在实际工作中研究这种函数是很困难的。

但是經驗証明，大部分地区波在水平方向傳播速度的变化要比它在垂直方向变化小得多。所以通常对于波在水平方向的速度变化忽略不計，要不就是通过專門的校正方法来計算。那么这样就可以假定，射綫的弯曲只是由于垂直方向速度的变化所引起的。

但要注意，波在水平方向速度的变化虽然比垂直方向要小，而且在大多数情况下并不影响地震射綫的弯曲，但是水平方向速度的变化在解釋工作中的作用却是很大的，甚至是决定性的。首先，它对于研究平緩構造的作用，則計算速度的水平梯度成为解釋工作的主要任务。不过，在这种情况下計算垂直方向速度的变化还是有着一定的意义，特别是在利用延長时距曲綫时。

如果我們提出的任务只是为了求得近似的，但精确度必須达到要求而且比較簡單的解釋方法，这种方法用来解釋各种介質可以看成是連續的反射波的时距曲綫，那么可以認為，速度的变化仅仅是沿着垂直的方向。这样，把任务局限

起来就可以使下面的叙述能够切合实际，同时也符合于大多数实际解释工作的需要。

平均速度法

平均速度法是一种应用得最广的，用来解释反射波时距曲线的近似的解释方法。但是在实际工作中这种方法往往应用时不够精确。例如，在构造反射面时，认为对所有的时距曲线速度都是不变的，与个别反射点垂直坐标值无关。当地层的倾角比较陡，速度梯度比较大时，这就就会引起界面失真，甚至在爆炸点和检波器的距离很小的情况下也是如此。同时给地震成果的地质解释增加了困难。

要比较精确地应用平均速度法，必须在时距曲线的每一个点上按反射点的不同深度写上不同的计算速度，这种速度是根据已知的平均速度 $U_m(Z)$ 的分布计算出来的。

下面将简单地描述平均速度法如何能够精确地应用来解决解释工作中的若干主要的问题。这里主要指反射法。

绘制射线曲线图的近似法

首先我们来说明平均速度法在绘制射线曲线图中的应用大致地绘制出的射线曲线图是用来解决各种不同的任务。

从震源(坐标的原点)到每一介质点射线所经过的曲线路程看成是直线的，也就是说，震源和空间各点之间的介质看成是均匀的，在这种介质中，波以不同深度的各点介质所持有的平均速度传播。但这种情况只对垂直射线才是精确的，而对倾斜射线它将是近似的。

根据作者提出的这种方法绘制射线曲线图在参考文件

[3] 已經述及, 这里只是引用一些与这方面有关的分析公式。

根据均匀介質的已知比例式, 并認為速度是垂直坐标的函数 $V_m(Z)$, 就可以得出射綫和等时面的近似方程式:

$$X = \frac{ZV_m(Z)}{\sqrt{V^{*2} - V_m^2(Z)}} = \frac{ZV_m(Z)\sin i_0}{\sqrt{V_o^2 - V_m^2(Z)\sin^2 i_0}}; \quad (1)$$

$$X^2 + Z^2 = t^2 V_m^2(Z). \quad (2)$$

式中 V^* ——时距曲綫上的視速度(射綫的参数), 它也可用初出射角和初速度按下式表示:

$$V_o = V^* \sin i_0$$

由于上述方程式中平均速度 V_m 是深度的函数, 因此这些方程式已不是表示均匀介質中所得到的直綫和圓的分析公式了, 而是表示函数 $V_m(Z)$ 的更复杂的曲綫。

分析結果証明, 当 X 值較小时, 曲綫在实际应用中, 是相当精确的符合于实际射綫及波前的。这可以用下面的实例証明。假設以綫性函数表示眞速度变化的規律:

$$V(Z) = V_o(1 + B_Z) = 2.0(1 + 0.5Z) \text{ 公里/秒}$$

在实际中对于砂質泥岩地層經常会遇到一些近似于常用的参数。

如果取 $X = 1$ 公里, 則当 $Z = 0.5; 1.0; 2.0$ 公里时, 我們將有下列初出射角 i_0 和時間 t 的精确值和近似值(參閱下表)。

Z	i_0	i'_0	Δi_0	t , 秒	t' , 秒	Δt , 秒
0.5	50°55'	52°51'	1°56'	0.495	0.500	0.005
1.0	33°41'	34°58'	1°17'	0.570	0.573	0.003
2.0	17°06'	18°03'	0°57'	0.772	0.775	0.003

这里 i 和 t — 初出射角值和时间值的精确值; i_0 和 t' — 初出射角和时间的近似值; Δi_0 和 Δt — 相应地若示初出射角的精确值和近似值之间, 时间的精确值与近似值之间的差。

上述例子证明, 误差较小, 特别是当 $\frac{x}{z}$ 比值较小时。

当 $\frac{x}{z}$ 比值增大, 并且速度梯度 β 为大值时, 误差非常的大, 因此就不能忽略不计。

确定反射面产状要素上改进后的平均速度法完全可以用子构制反射面, 甚至在倾角很大的情况下, 但只不过 X 值必须较小时。计算反射点坐标值的方法在参考文献[2]中有专门述及, 所以这里就不再重复。我们引用以时距曲线和反射面的坐标值来表示倾角的公式, 同时应用了函数 $V_m(Z)$ 代替固定参数 V 的方法。现在把反射等时面的方程式——波的反射点的几何位置(波的到达时间是已知的)——写出, 其公式如下:

$$\frac{(X - l/2)^2}{V_m^2(Z)T^2} + \frac{Z^2}{V_m^2(Z)T^2 - l^2} = \frac{1}{4} \quad (3)$$

因为反射面总是上述曲线的切线, 所以将 $t(3)$ 微分后, 得出

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{V_m \left(1 - \frac{l^2}{V_m^2 T^2} \right) \left(X - \frac{l}{2} \right)}{-ZV_m + N \frac{dV_m}{dZ}} \quad (4)$$

$$\text{式中 } N = \frac{1}{4} (2V_m^2 T^2 - l^2) - \left(X - \frac{l}{2} \right)^2 - Z^2$$

这里往下倾, φ 按倾角是正值的。很明显, 深度值 Z 在公式(4)的右项中不单直接以 $V_m(Z)$ 表示, 而且还以微商

$\frac{dV_m}{dZ}$ 的形式出現。如果像实际中几乎常有的那样，把它含微商的那一项忽略掉，并且采用簡便平均速度法的话，那么当遇到大的傾角的时候，就会产生很大的誤差，誤差值可能达到25%甚至更大。对三度空間介質也可以得到和(4)相似的公式，即公式为：

$$t_{\text{eq}} = \frac{V_m \sqrt{\left(1 - \frac{l^2}{V_m^2 T^2}\right) \left(X - \frac{l}{2}\right)^2 + y^2}}{-ZV_m + N' \frac{dV_m}{dZ}} \quad (4')$$

$$\text{式中 } N' = \frac{1}{4}(2V_m^2 T^2 - l^2) - \left(X - \frac{l}{2}\right)^2 - (y^2 + Z^2)$$

交点法和橢圓法的类比

在实际工作中經常采用交点法構組岩層的剖面，因为这种方法既簡便又能一目了然。大家知道，这种方法，严格的說，只能用于均匀的介質，但如果傾角小，速度梯度不大，爆炸点与檢波点間的距离不大的話，应用这种方法在不均匀的介質中也大致是正确的。但是这些条件的限制并不經常引人注意的，結果造成許多很大的錯誤（如岩層的變緩，人为的断層，深度的失算等等）。

目前，在实际工作中采用两种改进了的交点法。第一种方法（在苏联早在刚刚开始应用反射法的时候就已经采用了），是在速度为常数，等于平均速度的条件下構制出每条时距曲綫的反射段。这个速度是作为时距曲綫上最小時間的函数計算出来的。只有当地層的傾角較小而速度梯度又不大时，这种最簡單的方法才能保証达到在細測中所要求的精确

度。当倾角大于 10° 而速度梯度大于 0.5 秒/公里时，就会明显的看出地層变緩以及反射段断面等現象。

用于不均匀介質的可以达到較高的精确度的另一种改进后的交点法是由 В.И. 恰申于 1943 年提出的。这种方法尽管在实际工作中应用的很广泛，但直到現在出版的書籍中都还没有过很清楚的說明。这种方法的实質是，时距曲綫上每一点的交点半徑根据观测時間 T 值和速度的乘积决定，速度的計算方法是按根据已知的法則 $V_m(Z)$ 并認為地層是水平的。換句話說：在計算交点半徑中所取的速度值不是反射点的深度函数，而是相当于反射等时面極小值的深度的函数，反射等时面是根据方程式 (3)，其中 L 值， T 值和函数 $U_m(Z)$ 是已知的，繪制出来的。

实际上，当 $X = \frac{l}{2}$ (反射等时面的極小值) 时，解方程式

(3) 得出下式：

$$V_m^2(t)T^2 = l^2 + 4Z^2 \quad (5)$$

如果根据已知函数 $V_m(Z)$ 上式的右面等式中以 V_m 值代 Z ，那么得出 T 和 l 的計算速度的表現式，以此来表明平均速度和深度的綫性关系：

$$V_m = V_0 + KZ$$

从式中得出
$$Z = \frac{V_m - V_0}{K}$$

于是 (5) 式可以改写为：

$$V_m^2 T^2 = l^2 + 4 \left(\frac{V_m - V_0}{K} \right)^2$$

解后面等式的 V_m ，則得出計算速度的数值 $V_m(l, T)$ ，

$$V_m = \frac{1}{4 - K^2 T^2} (4V_0 - K \sqrt{K^2 l^2 T^2 - 4l^2 + 4V_0^2 T^2}) = V_m(l, T).$$

在实际工作中，函数 $V_m(Z)$ 通常从曲线图中求出，而它的分解式是未知的。此外，正需要计算的并不是计算速度 $V_m(l, T)$ ，而是交点半径 $R(l, T)$ 。因此，交点的半径 $R(l, T)$ 以从方程式(5)和公式 $R = V_m(Z)T$ 中消去 Z 值而计算出来。

用这一种跃进后的交点法在某种程度上能计算出时距曲线各点的不同的速度，这就大大地提高了构造剖面的精确性。但当倾角大于 $20-30^\circ$ 时，这种方法的精确性就显得不够了。例如反射段变深，它的长度变短，以及倾角变大等与实际不符的现象。

如果能够精确地应用平均速度法就可以进一步地提高用交点法构造剖面的精确性。我们假定，在时距曲线的每一点上视速度也是已知的。如果假设为

$$\sin i = \frac{V_m(Z)}{V^*},$$

则反射点横坐标的公式可写成下式：

$$X = l - Z \operatorname{tg} i$$

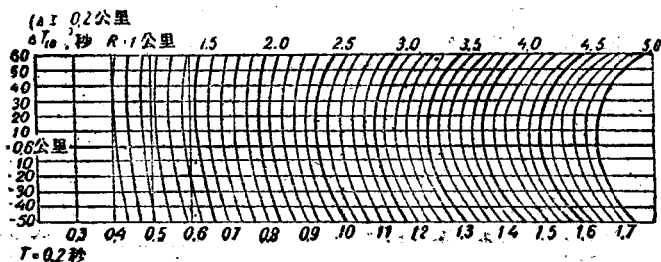


圖 1

以 X 值代入方程式 (3) 并解这个 T 的方程式变换后得

$$T = \frac{1}{V_m} [Z \operatorname{Sec} i + \sqrt{Z^2 + (l - Z \operatorname{tg} i)^2}] \quad (6)$$

在这里还要和交点半徑公式联立起来。

$$R = V_m T. \quad (6')$$

从上列联立方程式 (6) 和 (6') 中用计算方法消去深度 Z , 就得出 l , T 及 V^* 的交点半徑表現式。在这种情况下解方程式 (6) 的 V_m 甚至对平均速度和深度的綫性关系都是困难的。关系曲綫 $R(l, T, V^*)$ 可以用几种曲綫圖 $R(T, V^*)$ 来表示, 其中爆炸点与檢波器間的距离是固定不变的。

圖 1 所示为这样的曲綫圖之一, 我們举它作为例子。这一曲綫圖中 $l = 0.6$ 公里, 它是恩巴南部一个地区的平均速度和深度的关系曲綫圖。縱軸表示 ΔT , 橫軸 ΔX 是定值, 等于 0.2 公里。交点半徑是許多参数之一。

当速度不变, 用与橢圓法相似的包綫法構組反射面时, 利用方程式 (3) 可能很成功。为此最好根据已知速度的分佈繪出若干曲綫族的曲綫圖, 其中, $T = \text{常数}$, 而爆炸点与檢波器間的距离各不相同。

这时必須解出方程式 (3) 中的 X 值, 也就是在計算时要运用公式

$$X = \frac{l}{2} \pm \frac{V_m T}{2} \sqrt{\frac{V_m^2 T^2 - l^2 - 4Z^2}{V_m^2 T^2 - l^2}} = X(l, T, Z) \quad (3')$$

因为对这个曲綫來說, l 是規定的, 所以当 $T = \text{常数}$ 时, X 的两个值都适合于 Z 的每个值(應該記住, V_m 是 Z 的函数)。这就可能按各点繪制出 $T = \text{常数}$ 的曲綫。应当用时把曲綫圖依次放在剖面圖上(最好把透写紙上的剖面圖放在曲

綫上)，复制出 $T = \text{常数}$ 的曲綫段，然后以弧的包綫作出界面。

如果在曲綫 $T = \text{常数}$ 的曲綫圖上用上述的方法也同样繪出射綫族的話，則所得双重時間場就可根据視速度用来構組較短的反射段。

研究改进过的平均速度法也可以用来計算速度和两个坐标的关系，但产狀要素的所有公式在这种情况下往往比較复杂。所以确切的說，此法并不是广泛地用来解决空間問題的。

因此，如果平均速度法能够比平常在实际工作中应用得更为精确的話，就可以大大地提高在解釋地震勘探資料中構組剖面的精确性，特别是当傾角很大时。

但是在許多情況下，就是这种比較精确的平均速度法也还是不适用的，这首先是当爆炸点与檢波器的距离很大的时候，其次当地層傾斜接近于垂直时也是如此。

速度的平均梯度法

，正确的解釋地震勘探資料是一項極其困难的任务，即使仅解釋速度沿着垂直方向变化的資料也是如此。这首先因为：从震源到質点波的傳播時間和水平的射綫位移只能用限定的函数簡單的表现出来。

因此往往在实际工作中，很困难同时地滿足这种簡單函数的選擇条件，并且也很困难使得这种函数相当精确地符合于观察的資料。

但即使滿意地選擇到函数 $V(Z)$ 根据求出的時間 t 和水平射綫位移 X 的公式也有用很复杂的計算方法，才能繪制出射綫的曲綫圖，以及解决構組分界面的任务，而且只有在

双因次情况下才比較簡單。有时在实际工作中就这样的处理。但这里必須指出以下两种情况：

(1) 借助射綫曲綫圖既簡單又精确的圖解的方法，只限于解决構組反射界面剖面圖的任务。这种方法不可能或者極其困难提出和解决別的解釋任务，特別是計算不均匀介質的反射波时距曲綫的速度。

(2) 很精确的用选择适当函数 $V(Z)$ 的方法繪制射綫圖在实际工作中是有困难的，因为它須要很熟練的技术和大量的計算。

如果速度随深度增加的規律是直綫的 $V = V_0(1 + \beta Z)$ ，解决繪制射綫圖的問題，分析測定产狀要素的問題以及其他問題就是最簡單的[2]。所以进一步發展綫性規律解釋理論的想法完全是很自然的，就像目前我們对均匀介質所做的那样一样。如果解决了這個問題，發展了用随深度增加的速度可变平均梯度类似于平均速度法的近似解釋法；在以后就可以推广任意函数 $V(Z)$ 的相应解釋方法。这种方法必須看作是仅次于平均速度法的第二个接近于实际的方法。計算的結果証明，这种方法的精确性几乎在任何实际的情况下都是十分滿意的，这不仅是对于連續介質；而且在許多情況下，对于層次不多的平行岩層的介質也同样的。

下面將叙述速度随深度而增大的平均梯度法，用来解决解釋地震勘探(主要是反射法)資料的主要問題之原理。

用平均梯度法繪制射綫曲綫圖 我們来研究用平均梯度法繪制射綫曲綫圖。假定，任意的真速度或平均速度与深度的关系为已知。震源和空間各点間的实际介質根据假想的介質(在假想介質中的速度是直綫变化的，而且各介質的系数

β 各不相同)始終用近似法計算出來。換句話說,射綫到空間某點的路程以圓弧代替。但因為實際介質中速度隨深度不是以綫性變化的規律變化的,因此對每一地層,係數 β 都是新值,它與深度有關。同時因為它和平均速度相似,所以方便的稱它為隨深度增大的速度的平均梯度 $\beta_m(Z)$ 。因而,當初速度 V_0 為已知時,根據速度隨深度直綫變化規律計算出來的波從震源沿着垂直方向到已知點傳播的時間,等於實際的垂直時間,這樣的係數 β 謂之速度的平均梯度。知道了深度函數 $U(Z)$ 與速度之後,就可以按下面等式求出平均梯度 $\beta_m(Z)$:

$$\frac{1}{V_0 \beta_m} \ln(1 + \beta_m Z) = \int_0^Z \frac{\alpha^2}{V(Z)} \quad (7)$$

如果像實際上常有那樣,平均速度和深度的關係 $V_m(Z)$ 為已知的,則 $\beta_m(Z)$ 可由下列關係式中求得:

$$\frac{V_m(Z)}{V_0} = \frac{\beta_m Z}{\ln(1 + \beta_m Z)} \quad (8)$$

利用如圖 5 所示的曲綫圖 $\frac{V_m}{V_0}(\beta_m Z)$ 把上式的關係 $V_m(Z)$ 換算成 $\beta_m(Z)$ 。

當進行了解隨深度而增的速度的平均梯度 $\beta_m(Z)$ 時,已知速度分佈的射綫和等時面的方程式可近似地以下式表示:

$$\left. \begin{aligned} & \left(X - \frac{1}{\beta_m(Z)} \operatorname{ctg} i_0 \right)^2 + \left(Z + \frac{1}{\beta_m(Z)} \right)^2 \\ & = \frac{1}{\beta_m^2(Z)} \operatorname{cosec}^2 i_0 \\ & X^2 + \left[Z - \frac{1}{\beta_m(Z)} \operatorname{Ch} V_m(Z) t - 1 \right]^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$= \frac{1}{\beta_m^2(Z)} Ch^2 V_0 \beta_m(t) t$$

这已經不是像速度随深度增大是綫性的，系数 β 为恒定的那样，圆的方程式了；而是較复杂的曲綫的方程式，并且曲綫和圆的不同之点是决定于函数 $\beta_m(Z)$ 。正如計算結果証明，这些曲綫在相当程度上接近实际射綫和等时面，其中包括远离 Z 軸的射綫部份。可用下面的例子来証实这点，用指数定律表示速度的实际分佈情况，

$$V(Z) = V_0 e^{KZ}$$

因此函数 $\beta_m(Z)$ 的关系为：

$$\beta_m(1 - e^{-KZ}) = K \ln(1 + \beta_m Z).$$

进行繪制已知規律 $V(Z)$ 的各射綫和等时面的方法有三种：用精确的公式，利用平均速度法和利用平均梯度法。我們取 $V_0 = 20$ 公里/秒， $K = 0.5$ 1/公里。根据这样的参数，当深度从 0 变化到 2 公里时，真速度也随着增大的梯度几乎增加了二倍。圖 2 所示为这种平均速度 $V_m(Z)$ 和速度平均梯度 $\beta_m(Z)$ 的曲綫圖。可以看出 β_m 的变化是介乎 0.5 1/公里 (当 $Z=0$ 的时候) 与 0.69 1/公里 (当 $l=2$ 公里时) 之間。圖 3 所示为用上述三种方法所繪制出来的 $i_0 = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ 50^\circ$ 的地震射綫圖以及 $t = 0.3, 0.6$, 和 0.9 秒的等时面圖。可以看出，平均梯度法得出比平均速度法更精确效果。只有当射綫和垂直綫的夾角很大并且時間值也很大时，繪出来的射綫和等时面，实际的才有显著的誤差。对于实际上几乎从来不用来構組分界面的曲綫圖上某些部份与实际的射綫和等时面的誤差就比較大。在專門应用方面，特別是应用来計算直达波的时候，平均梯度法的精确性在大多数的情况下

都能达到十分满意的程度。

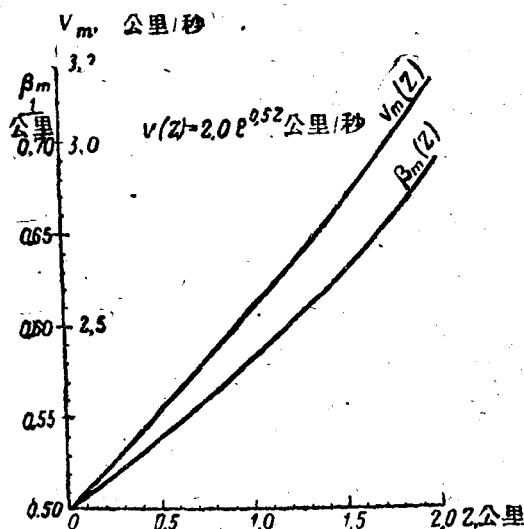


圖 2

我們要注意，在絕大多數情況下，速度隨深度增大的程度和函數 V_m 線性的誤差比上面我們所研究的實例子中的要小得多，因而繪制射綫圖的近似法的精確性也將更高。

必須指出，如果利用預先計算好綜合射綫曲綫圖，此圖画在極坐標上，那么按公式(9)可以計算到極小值。射綫和等時面的方程式可以改寫成下式：

$$\left. \begin{aligned} (\xi - \operatorname{ctg} i_0)^2 + (\zeta + 1)^2 &= \cos^2 i_0 \\ \xi + [\zeta - (\operatorname{ch} \tau - 1)]^2 &= \operatorname{Sh}^2 \tau, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 $\xi = \beta x$; $\zeta = \beta z$; $Z = V_0 \beta t$.

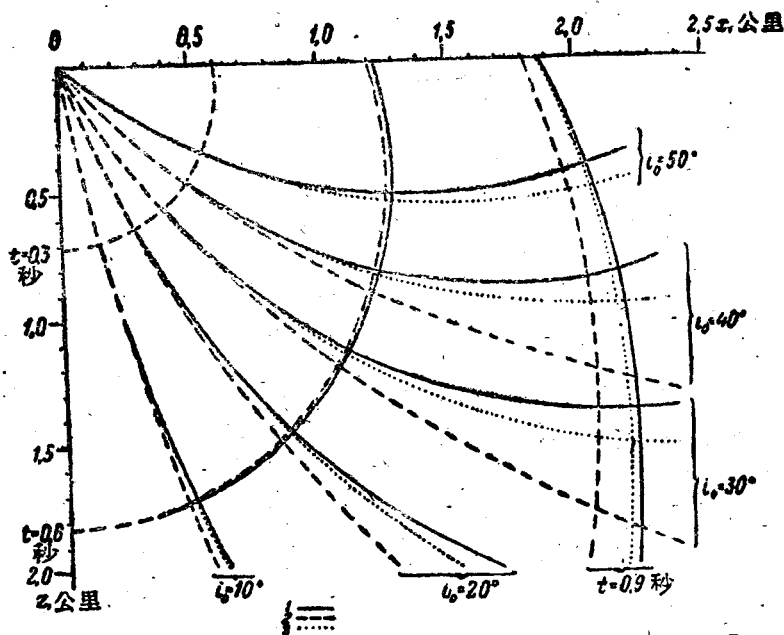


圖 3

- 1—实际射线和等时面；2—用平均速度法作出的射线和等时面；
3—用速度平均梯度法作出的射线和等时面

$$V = 2.0 \cdot 10^3 \text{ 公里/秒}$$

註：1. 如果曲线以一种符号表示，那么在这种情况下，三种方法得出的结果是同样的。

2. 当 $t = 0.6$ 秒时，速度平均梯度法得出实际的等时面。

3. 对于 $i = 50^\circ$ 的射线，不采用平均速度法。

圖 4 所示为两组不同的正交圆的重力场，这样的曲线图对于任何线性规律都是适用的。应用此图和函数 $\frac{V_m}{V_0}(\beta_m Z)$ 的曲线图(圖 5)用基本的计算方法——乘法和除法可以加速绘制任意规律 $V_m(Z)$ 或 $V(Z)$ 的射线图和等时线图。