

# 第一章 地震波运动学理论

第1节 地震波的基本概念

第2节 一个界面情况下反射波的时距曲线

第3节 多层介质和连续介质中反射波时距曲线

第4节 地震折射波运动学

第5节 透过波和反射波的垂直时距曲线



主讲教师：刘洋

# 第1节 地震波的基本概念

- 一、地震波的基本概念
- 二、波的特征
- 三、纵波与横波
- 四、地震波的传播规律
- 五、地震勘探中的各种地震波

# 一、地震波的基本概念

---

## 1. 波动

振动在介质中传播形成波动

两个条件 { 震源（在介质中激发振动）  
                  { 媒介（能传播振动的介质）

相关参数 { 介质参数 — 速度、密度  
                  { 振动参数 — 应力、应变和位移

# 一、地震波的基本概念

---

## 2. 介质的分类

### (1) 均匀介质与非均匀介质

**均匀介质：** 介质内每一点的物理特性参数均相同

**非均匀介质：** 介质内的物理特性参数随空间位置的变化而变化

### (2) 弹性介质与非弹性介质

**弹性介质：** 介质卸载后能够完全恢复到加载前状态

**非弹性介质：** 卸载后不能够完全恢复到加载前状态

# 一、地震波的基本概念

---

## (3) 各向同性介质与各向异性介质

各向同性介质： 介质参数与方向无关

各向异性介质： 介质参数随方向变化而变化

## (4) 单相与双相、多相

单相： 固体、流体（油、气、水）

双相： 固体骨架以及孔隙内的流体

# 一、地震波的基本概念

---

实际地下介质的特征

非均匀、非弹性、各向异性、多相

# 一、地震波的基本概念

---

## 3. 几种波

根据传播介质分类

|       |      |
|-------|------|
| 声波:   | 空气   |
| 水波:   | 水    |
| 地震波:  | 地下介质 |
| 弹性波:  | 弹性介质 |
| ..... |      |

# 一、地震波的基本概念

---

## 4. 地震波的产生

震源 → 振动 → 在地下传播 → 地震波

### (1) 天然地震

地球内部发生运动而引起的地壳震动

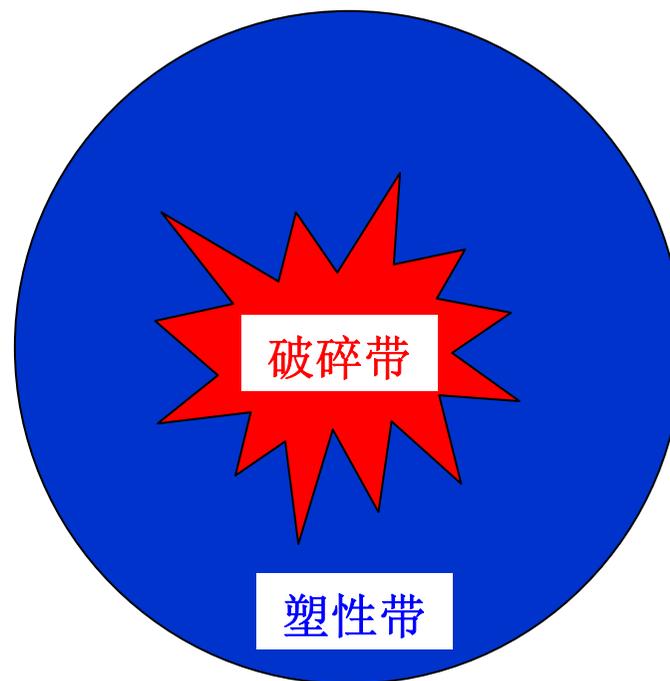
### (2) 人工地震

人为方法产生地震波，如撞击地面、炸药爆破等

# 一、地震波的基本概念

---

## 5. 爆炸对岩石的影响



弹性带

## 二、波的几个特征

---

### 1. 振动在介质中传播形成波动

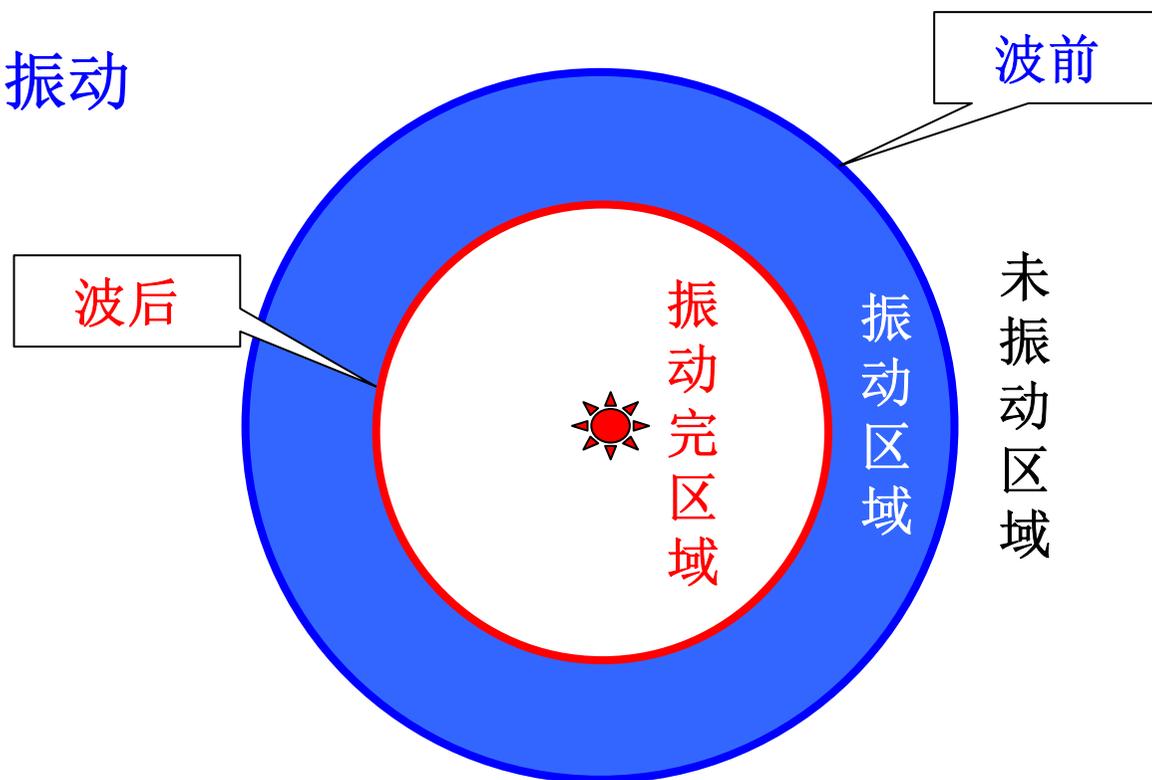
- (1) 振动与波动： 部分与整体关系
- (2) 振动在传播： 介质本身不传播，  
质点在平衡位置附近振动
- (3) 能量在传播
- (4) 波速有限

## 二、波的几个特征

---

### 2. 波前、波后和波面

某时刻的振动



## 二、波的几个特征

---

- (1) 波前： 在某一时刻，介质中刚刚开始振动的点连接起来形成的面
- (2) 波后： 在某一时刻，介质中刚刚停止振动的点连接起来形成的面
- (3) 波面 介质中同一时刻开始振动的点连接起来形成的曲面

波前和波后都是波面

## 二、波的几个特征

---

### 3. 波的分类（根据波面的形状）

(1) 球面波：波面都是球面

(2) 柱面波：波面都是柱面

(3) 平面波：波面都是平面

如何产生球面波、  
柱面波、平面波？

#### 关于地震波的认识

- 假设地下介质均匀各向同性，震源看成一个点，可以把地震波看成是球面波。
- 远离震源，只考虑整个波前面的一小部分，可以把波近似为平面波。

## 二、波的几个特征

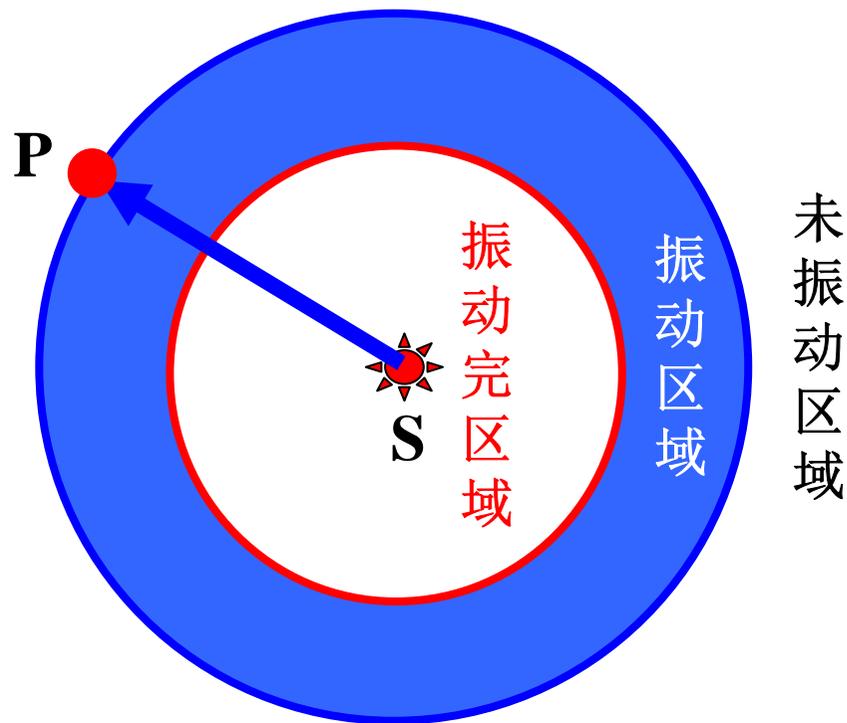
### 4. 波线（射线）

假想路径

(1) 射线一般垂直于波面

(2) 几何地震学

用波前、射线等几何图形来研究地震波的传播路径和传播时间。



## 二、波的几个特征

---

### 5. 振动曲线和波形曲线

#### (1) 振动曲线（振动图）

在某一点处质点位移和时间的关系(同一点不同时刻的位移形成的曲线)

#### (2) 波形曲线（波剖面、波场快照）

某一时刻各点的位移（同一时刻各点的位移形成的曲线）

#### •某个检波器所记录的振动，是什么图？

振动图、地震记录

#### •某个时刻拍照片记录湖面上的波动，是什么图？

波剖面、波场快照

## 二、波的几个特征

---

### 6. 正弦波特征

(1) 波峰、波谷、波长

(2) 相位、振幅、周期和频率

(3) 波速：在沿波的传播方向上，波单位时间前进的距离

(4) 速度 $v$ 、波长 $\lambda$ 、频率 $f$ 和周期 $T$ 之间的关系

$$v = \lambda f = \lambda / T$$

(5) 视波速、视波长

不是沿波的传播方向确定的波长和速度

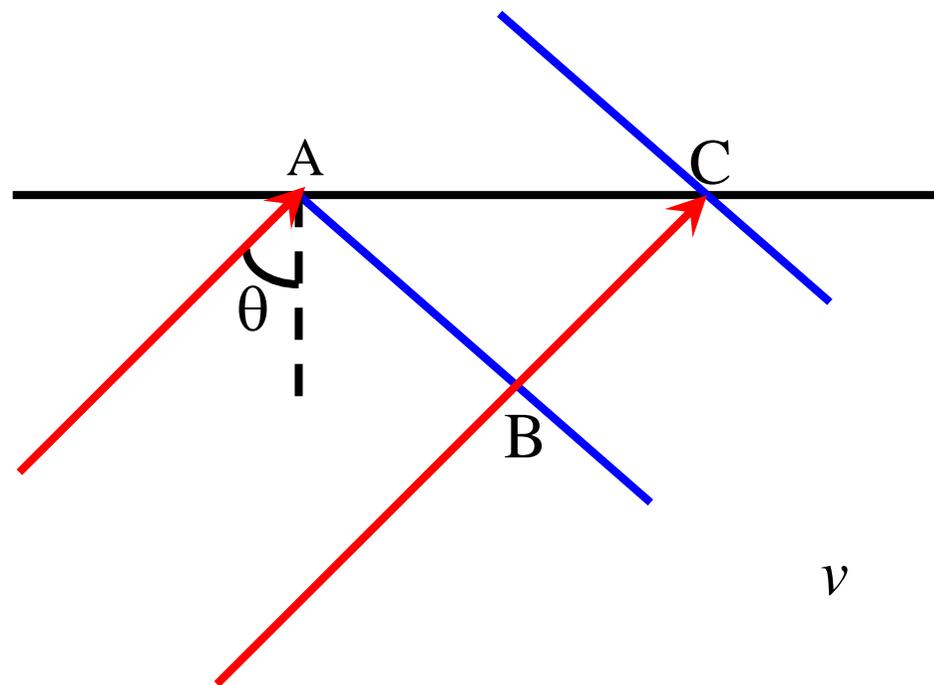
## 二、波的几个特征

介质速度为  $v$ 、波长为  $\lambda$

A、C 测量到的  
视速度为  $v_a$   
视波长为  $\lambda_a$

$$v_a = \frac{AC}{t_{BC}} = \frac{AC}{BC/v} = \frac{v}{\sin \theta}$$

$$\lambda_a = v_a T = \frac{v}{\sin \theta} T = \frac{\lambda}{\sin \theta}$$



**思考题（真速度计算）：**如果在地面上两个方位测量到了平面波的视速度，能否获得真速度的大小和方向？

?

## 三、地震波的传播规律

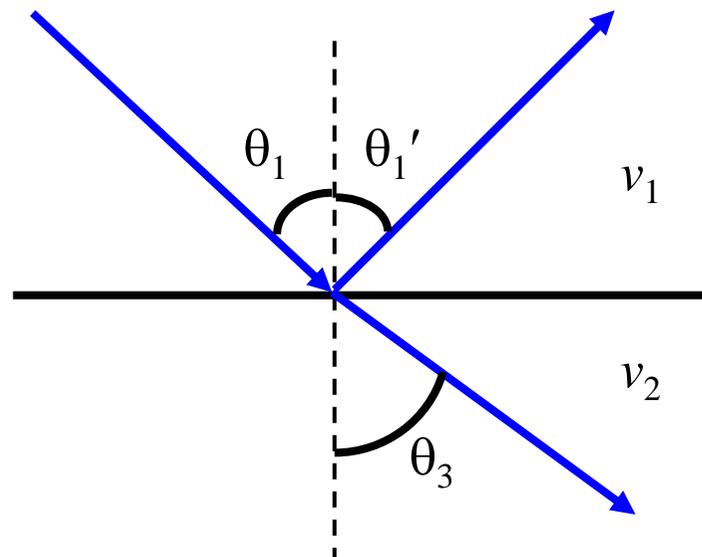
### 1. 反射与透射定律（Snell定律）

(1) 基本概念：界面法线、入射线、入射面、入射角、反射线、反射面、反射角

(2) 反射定理和透射定理

$$\theta_1 = \theta_1'$$

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}$$

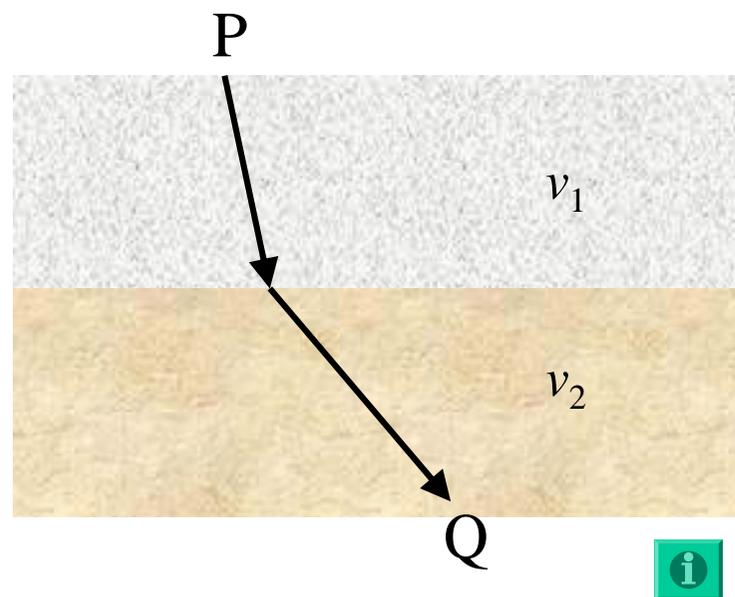
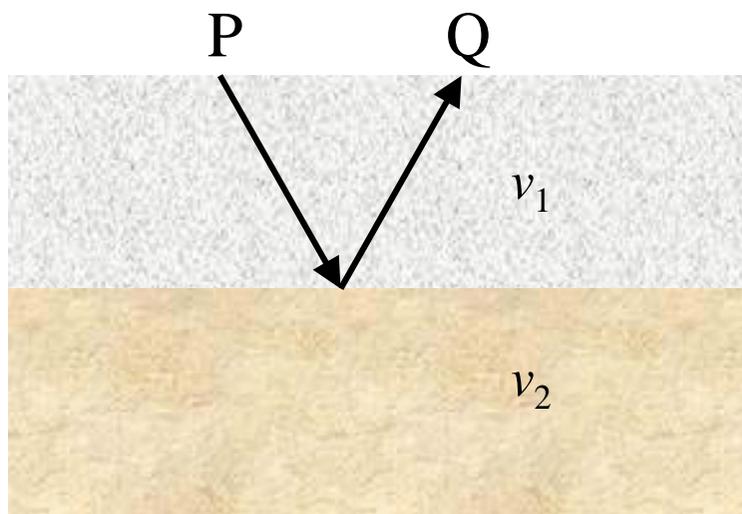


# 三、地震波的传播规律

## 2. 费马原理

波在各种介质中传播，满足所用时间最短的条件。

思考题：试用费马原理证明斯奈尔定理。

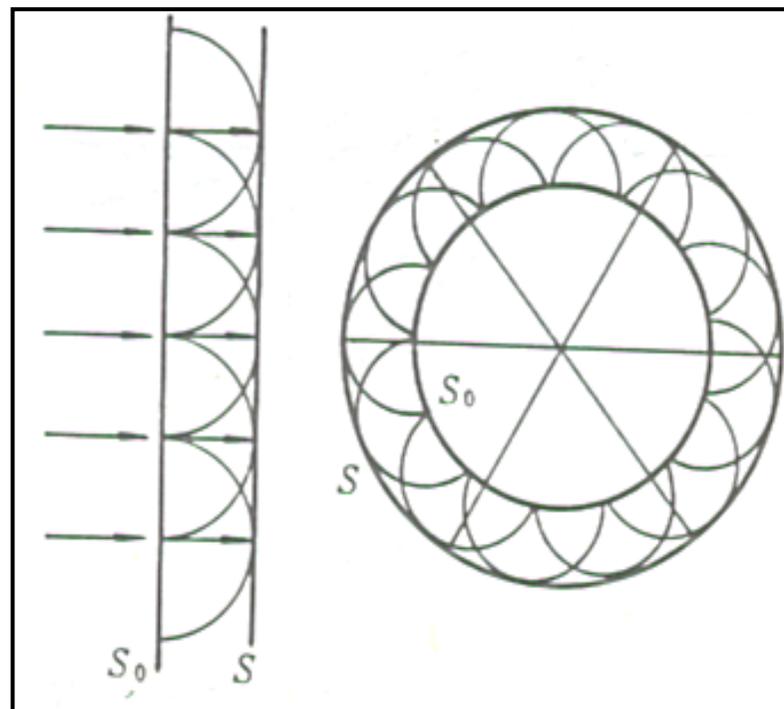


## 三、地震波的传播规律

### 3. 惠更斯原理

介质中波所传播到的各点，都可以看成新的波源，叫做子波源，每个子波源都向各方向发射球面波。

- (1) 解释平面波的传播；
- (2) 解释球面波的传播；
- (3) 证明斯奈尔定理。



## 四、地震勘探有关的各种地震波

---

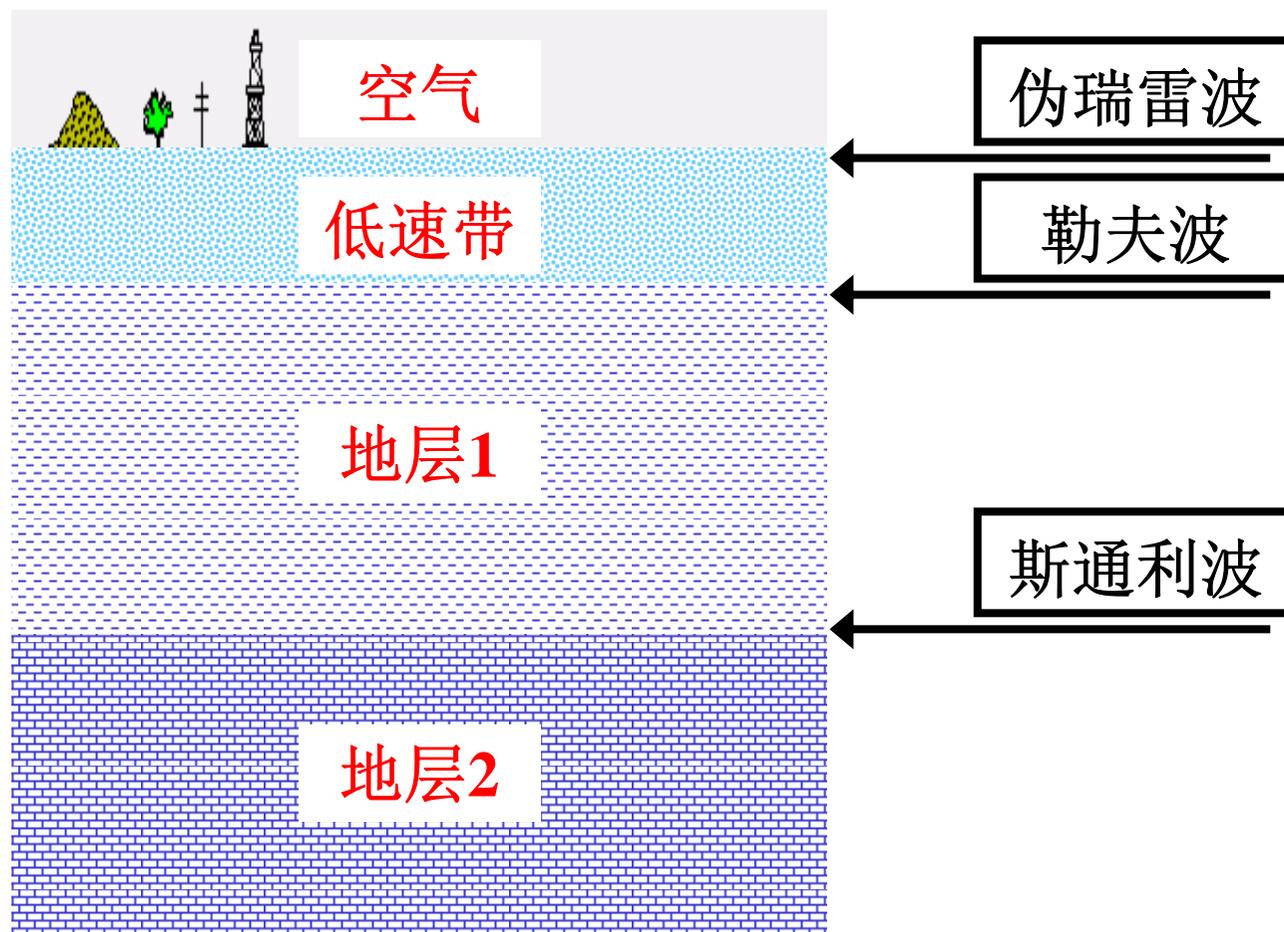
### 1. 体波与面波

(1) 体波： 振动能够在整个介质区域内传播形成的波  
包括： 纵波、横波。

(2) 面波： 沿介质分界面传播，且只是在界面附近才有适当强度的波，这种波随着远离介质分界面能量迅速衰减

包括： 瑞雷波、勒夫波和斯通利波。

## 四、地震勘探有关的各种地震波



## 四、地震勘探有关的各种地震波

---

### 2. 纵波与横波

(1) 纵波：质点振动方向与其传播方向平行  
又称胀缩波

(2) 横波：质点振动方向与其传播方向垂直  
又称剪切波

- 速度差别
- 简称P波、S波
- 传播介质差别
- 振动特点（如各向异性介质中）
- 天然地震

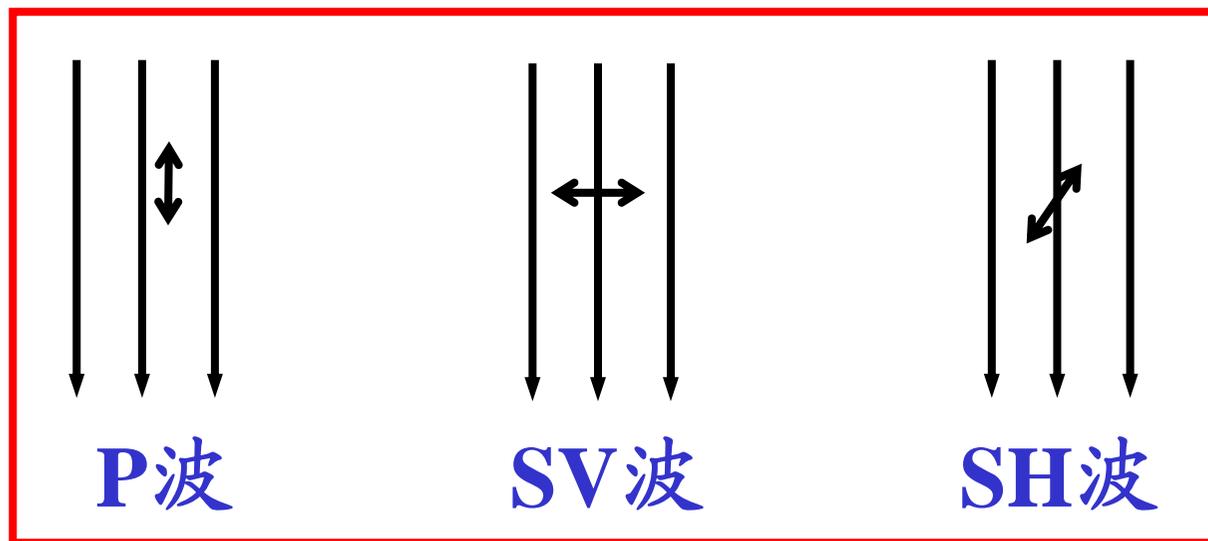
## 四、地震勘探有关的各种地震波

---

S波可以分为SV波和SH波

**SV波：** S波的质点振动方向平行于过测线的铅垂平面

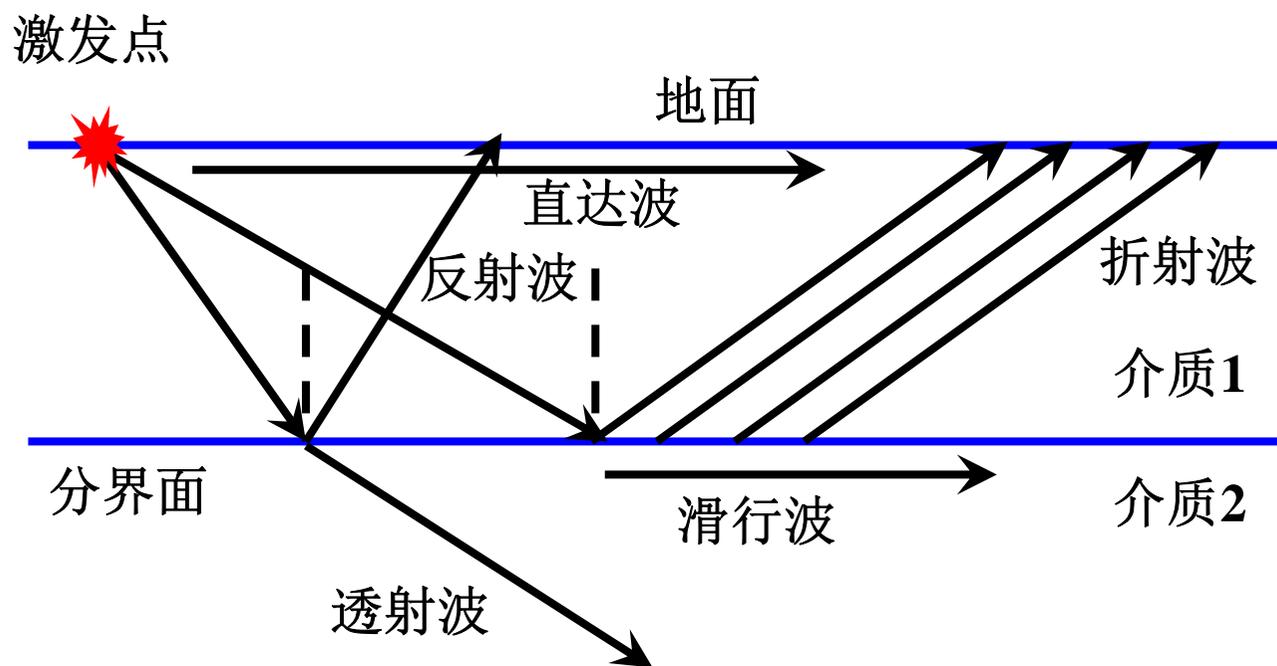
**SH波：** S波的质点振动方向垂直于过测线的铅垂平面



## 四、地震勘探有关的各种地震波

### 3. 直达波、反射波、透射波和折射波

根据波传播路径分类



## 四、地震勘探有关的各种地震波

---

### 4. 有效波与干扰波

(1) 有效波：被利用的波

干扰波：非有效波

(2) 有效波与干扰波是相对的

反射波勘探：有效波是反射波

折射波勘探：有效波是折射波

瑞雷波勘探：有效波是瑞雷波

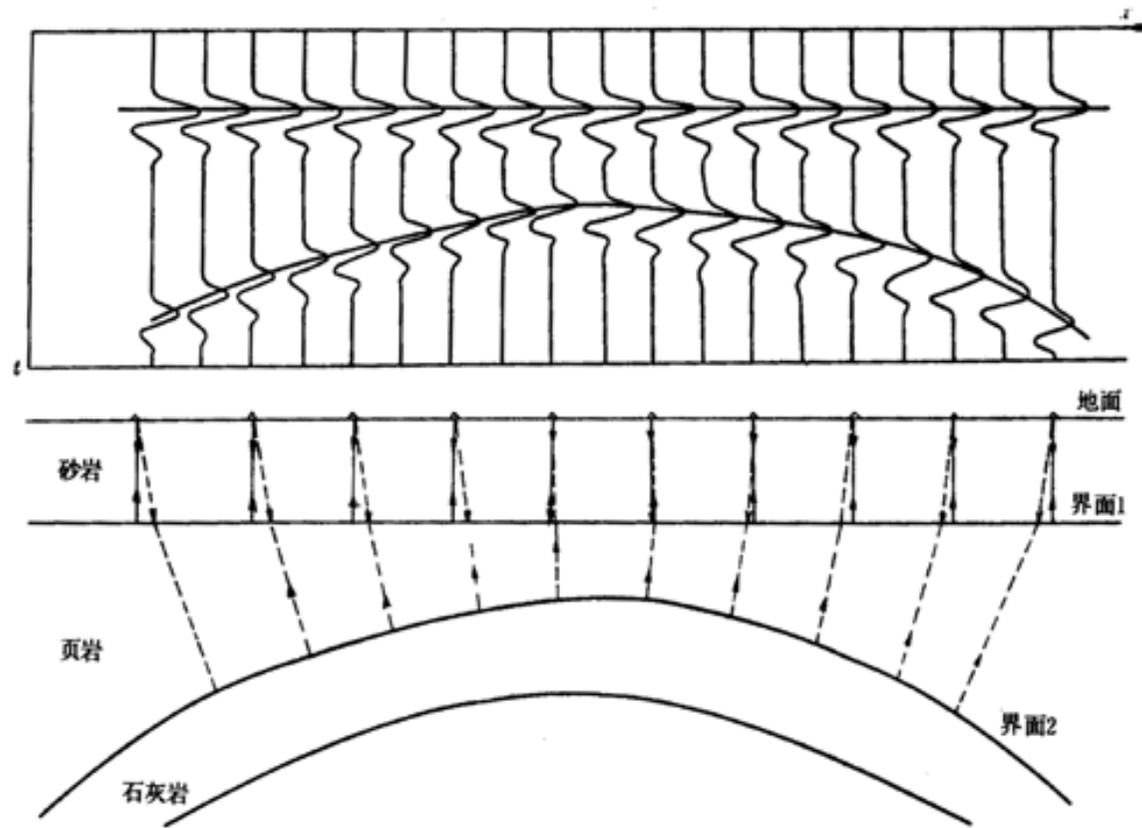
常规石油地震勘探是反射地震勘探，有效波为反射波

## 第2节 一个界面情况下反射波的 时距曲线



- 一、引言
- 二、时距曲线的概念
- 三、直达波时距曲线
- 四、一个水平界面反射波时距曲线
- 五、一个倾斜界面反射波时距曲线
- 六、动校正、正常时差、倾角时差校正
- 七、时距曲面和时间场

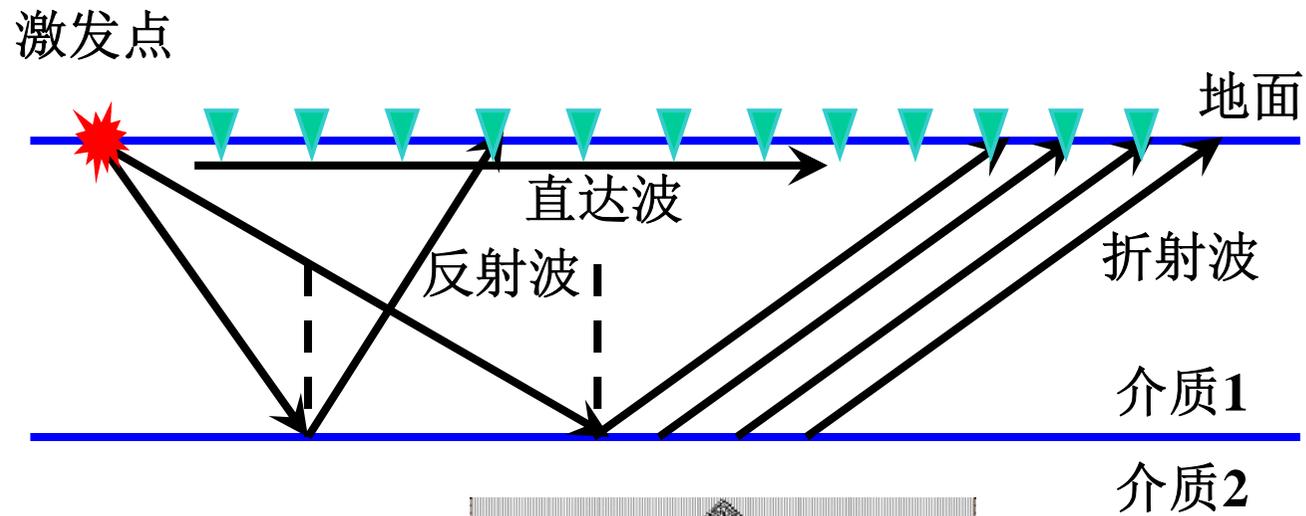
# 一、引言



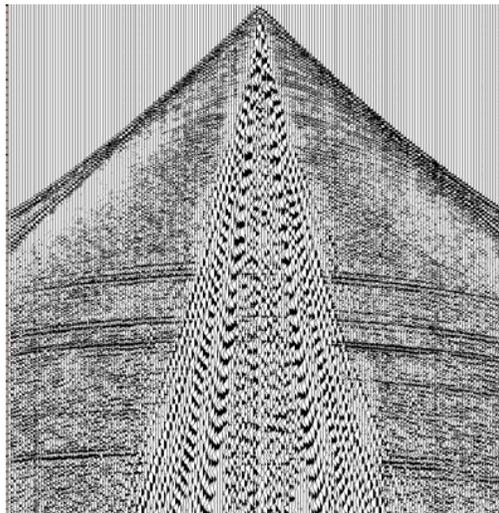
地震勘探原理示意图

# 一、引言

实际地震资料采集：一炮激发、多道接收

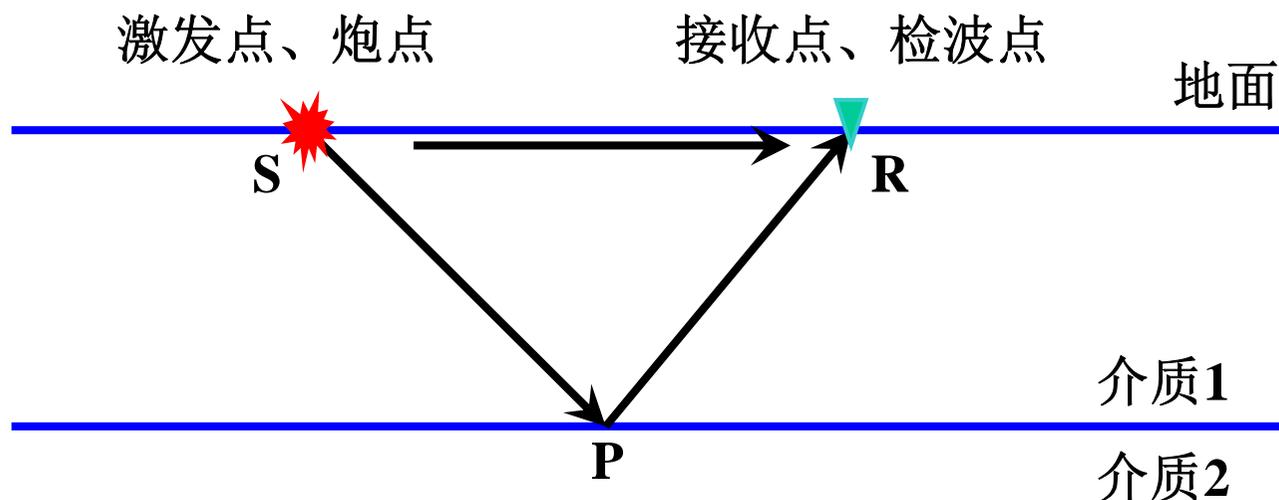


典型单炮记录



第2.2节

## 二、时距曲线的概念

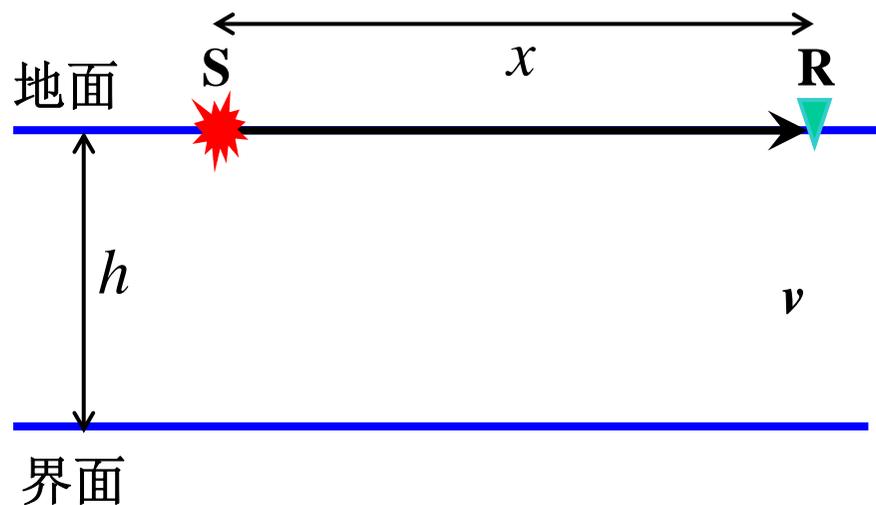


**时：**地震波从炮点传播到检波点的时间，用 $t$ 表示

**距：**炮检距（炮点到检波点的距离），用 $x$ 表示

**时距曲线：**  $t-x$  曲线

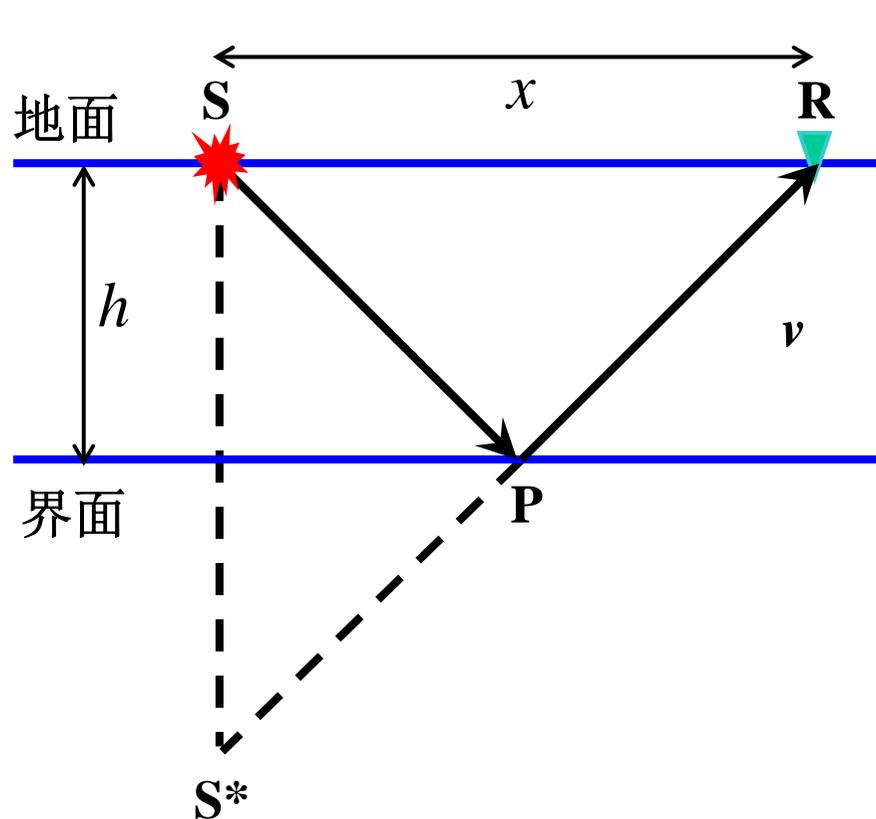
### 三、直达波时距曲线



$$t = x / v$$

直达波时距曲线是  
一条过原点的直线

## 四、一个水平界面反射波时距曲线



$$t = \frac{1}{v} \sqrt{(2h)^2 + x^2}$$

自激自收时间  $t_0$  为

$$t_0 = \frac{2h}{v}$$

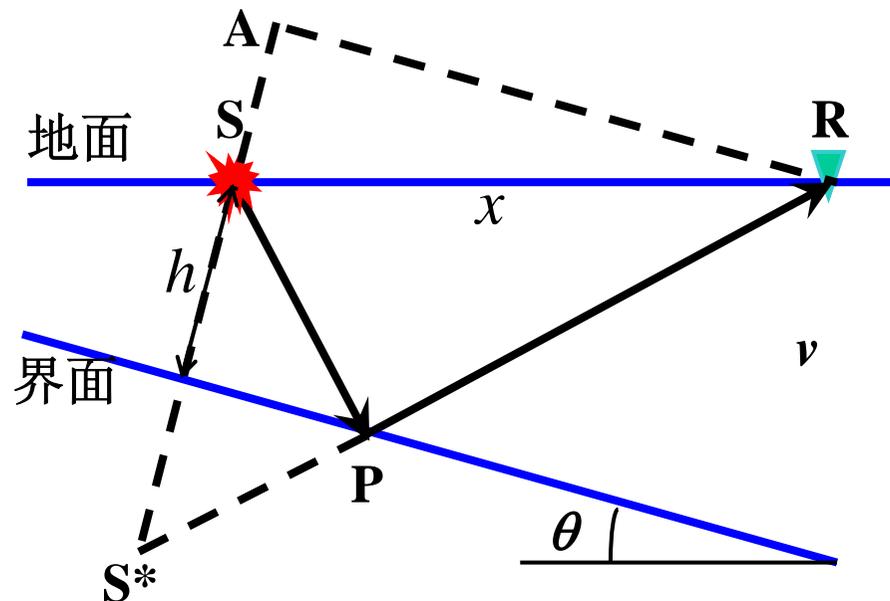
则

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2}$$

一个水平界面反射波时距  
曲线为一条双曲线

时距曲线示意图

## 五、一个倾斜界面反射波时距曲线



上倾方向激发，  
下倾方向接收

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{(AS^*)^2 + (AR)^2}$$

$$AR = x \cos \theta$$

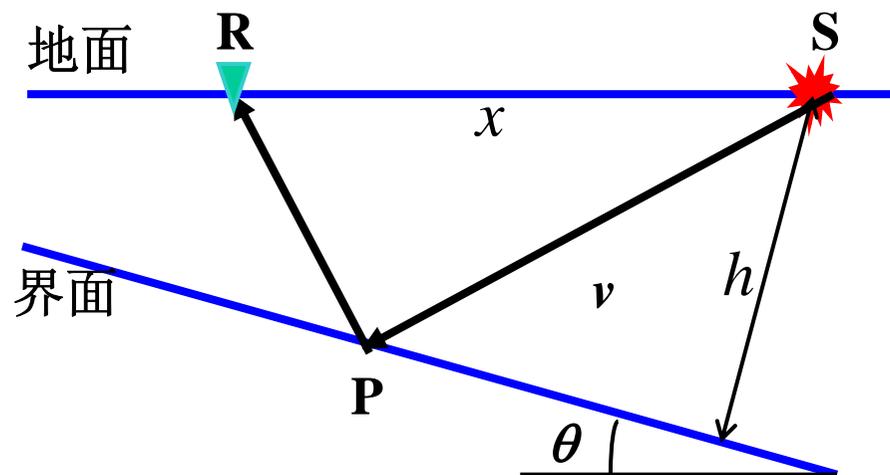
$$AS = x \sin \theta$$

$$AS^* = 2h + x \sin \theta$$

则

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{4h^2 + x^2 + 4hx \sin \theta}$$

## 五、一个倾斜界面反射波时距曲线

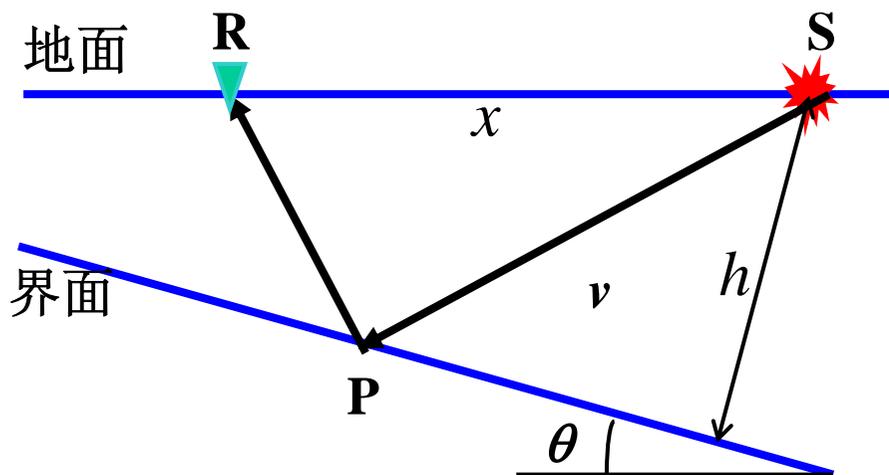


下倾方向激发，  
上倾方向接收

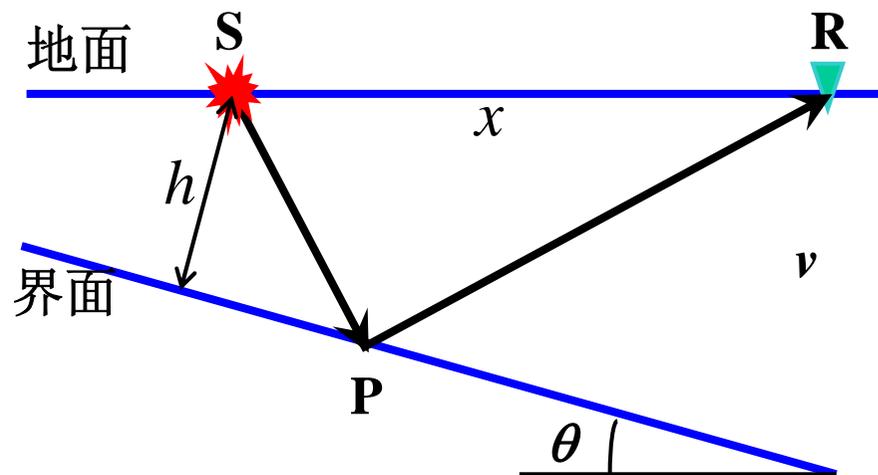
$$h \rightarrow h - x \sin \theta$$

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{v} \sqrt{4(h - x \sin \theta)^2 + x^2 + 4(h - x \sin \theta)x \sin \theta} \\ &= \frac{1}{v} \sqrt{4h^2 + x^2 - 4hx \sin \theta} \end{aligned}$$

## 五、一个倾斜界面反射波时距曲线



$$t = \frac{1}{v} \sqrt{4h^2 + x^2 - 4hx \sin \theta}$$



$$t = \frac{1}{v} \sqrt{4h^2 + x^2 + 4hx \sin \theta}$$

时距曲线统一公式 ( $x$ 为带符号炮检距)

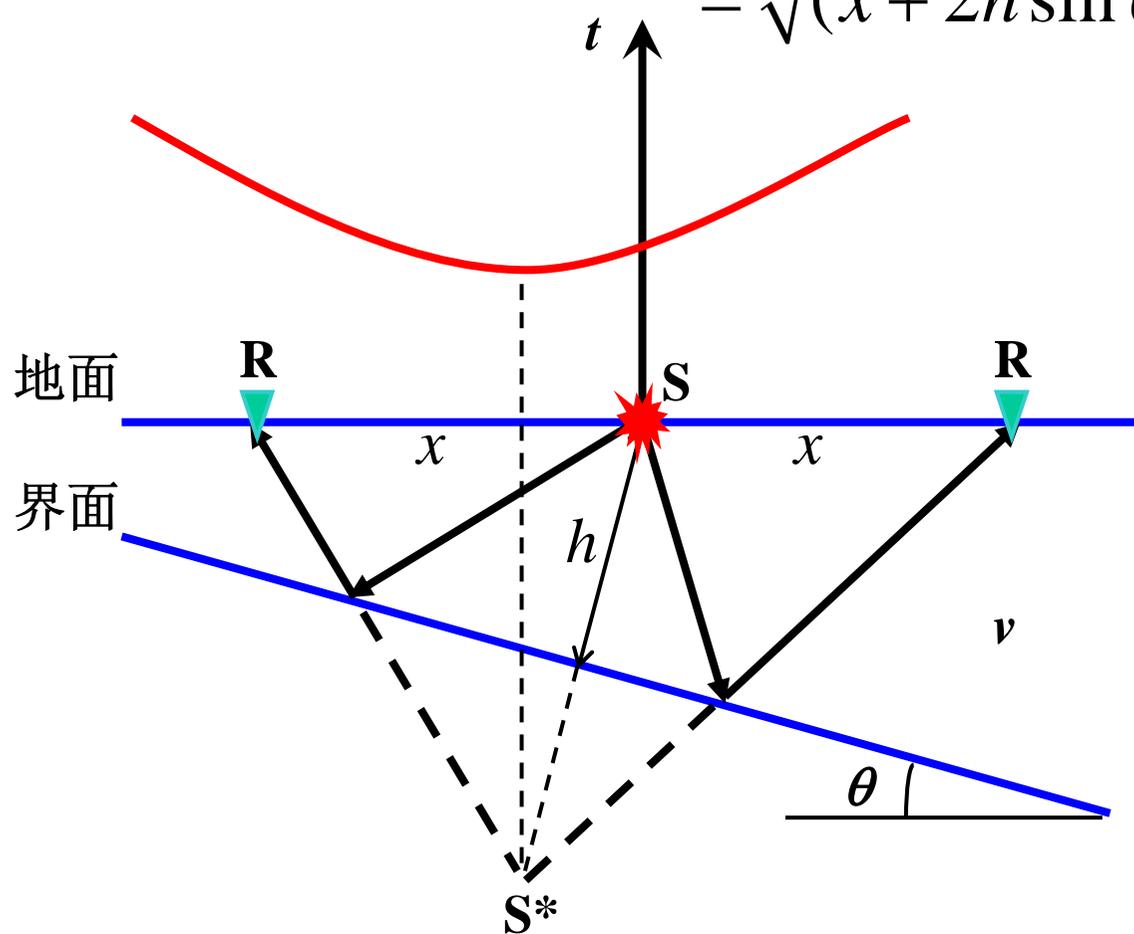
$$t = \frac{1}{v} \sqrt{4h^2 + x^2 + 4hx \sin \theta}$$

## 五、一个倾斜界面反射波时距曲线

时距曲线特征

$$t = \sqrt{4h^2 + x^2 + 4hx \sin \theta} / v$$

$$= \sqrt{(x + 2h \sin \theta)^2 + 4h^2 \cos^2 \theta} / v$$



(1) 为双曲线

(2) 极小点位置

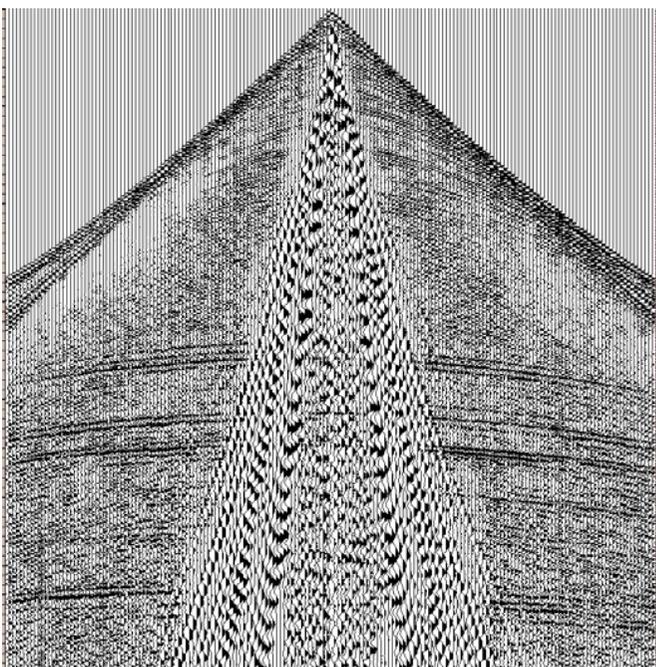
$$x_m = -2h \sin \theta$$

$$t_m = \frac{2h \cos \theta}{v}$$

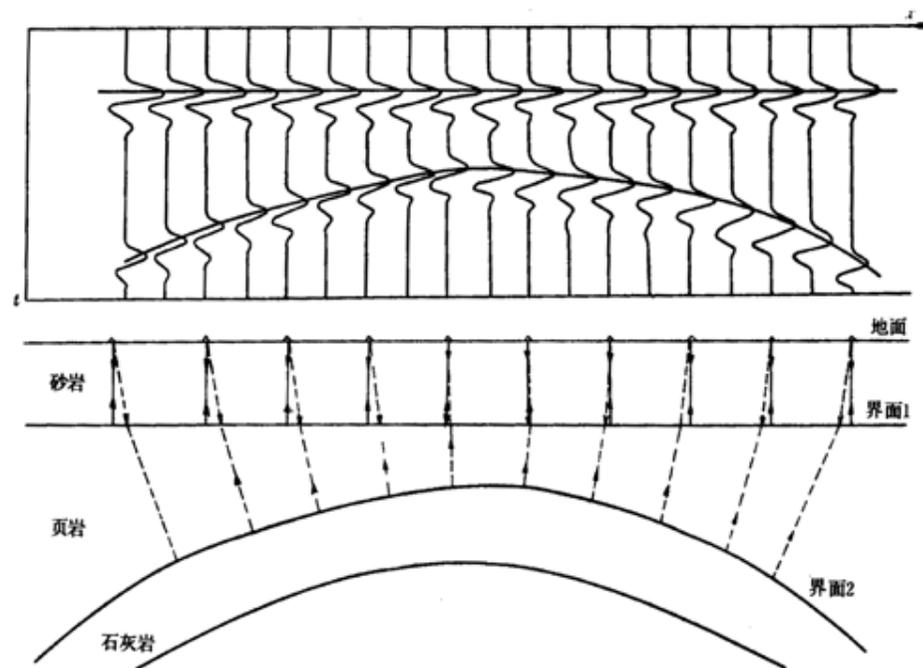
(3) 对称轴

$$x = -2h \sin \theta$$

## 反射波识别



典型单炮记录



地震勘探原理示意图

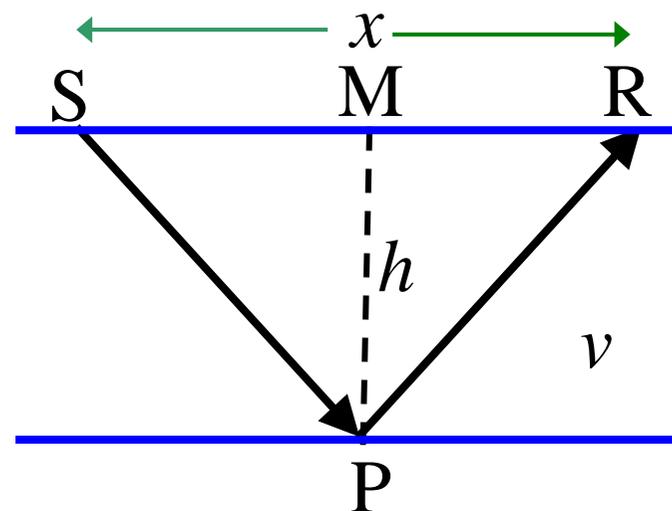
## 六、动校正、正常时差、倾角时差校正

动校正：

把反射波时间 $t$ 校正到炮检中心点  
自激自收时间 $t_0$

动校正量（NMO、正常时差）：

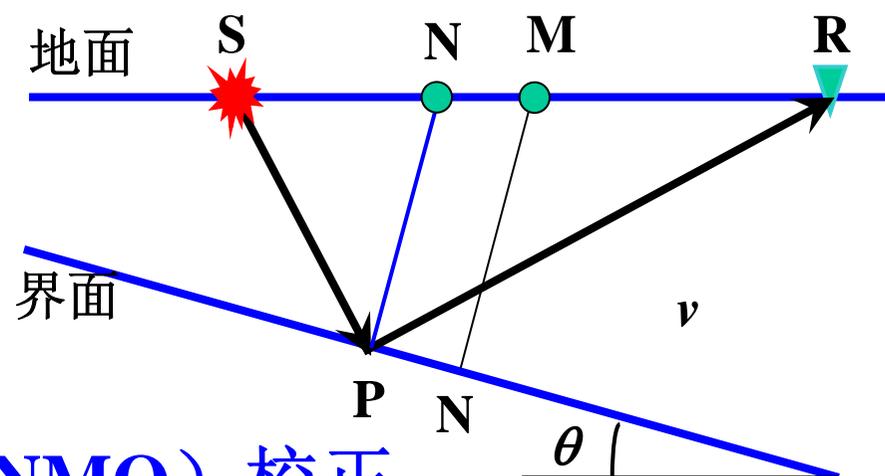
$t - t_0$ ，即正常时差



水平界面情况，动校正量计算公式

$$\Delta t = t - t_0 = \sqrt{t_0^2 + x^2 / v^2} - t_0$$

## 六、动校正、正常时差、倾角时差校正



正常时差 (NMO) 校正:

$t_{SPR}$  校正到 炮检中心点M点 $t_0$ 时间

倾角时差 (DMO) 校正:

消除因地层倾角引起的时差和位置

NMO+DMO校正:

$t_{SPR}$  校正到 N点 $t_0$ 时间

## 七、时距曲面和时间场

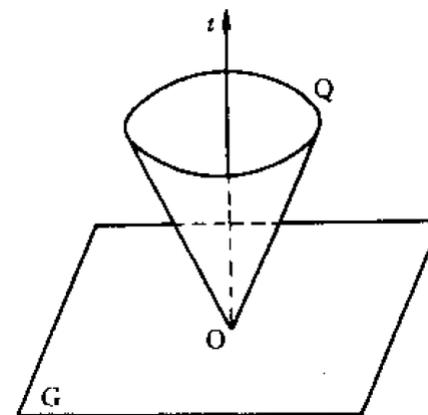
一点激发、一个平面上多点同时接收

例如：激发点和接收点均位于水平地面，  
激发点坐标  $(a, b)$ ，接收点坐标  $(a+x, b+y)$ ，  
一个水平界面，深度  $h$ ，速度为  $v$ ，  
则观测到的直达波时间为

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{v}$$

1. 时距曲面  $t = f(x, y)$

一点激发、一个面上多点同时接收，地震波时间  $t$  与  
横向炮检距  $x$ 、纵向炮检距  $y$  之间的关系  $t=f(x, y)$  曲面。





## 七、时距曲面和时间场

---

一点激发、空间上多点同时接收

例如：激发点坐标  $(a, b, c)$ ，接收点坐标  $(a+x, b+y, c+z)$ ，  
均匀介质，速度为  $v$ ，  
则观测到的直达波时间为

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{v}$$

### 2. 时间场

$$t = f(x, y, z)$$

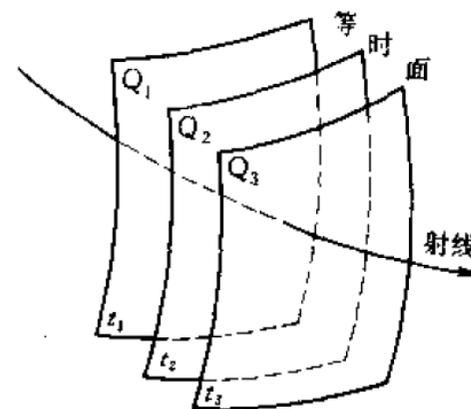
一点激发、空间上多点同时接收，地震波时间  $t$  与横向炮检距  $x$ 、纵向炮检距  $y$ 、垂向炮检距  $z$  之间的关系  $t=f(x,y,z)$ 。

## 七、时距曲面和时间场

(1)  $t = f(x, y, z)$  时间场的表示: 等时面

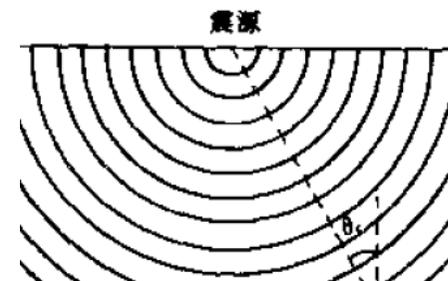
$$t_i = f(x, y, z)$$

等时面与射线的关系: 垂直



(2)  $t = f(x, z)$  时间场的表示: 等时线

等时线与射线的关系: 垂直



## 七、时距曲面和时间场

---

### (3) 等时面、等时线的计算

- 利用波场快照

- 计算波的到达时间

# 第3节 多层介质和连续介质中 反射波时距曲线



一、水平层状介质中的反射波时距曲线

二、连续介质中的反射波时距曲线

# 一、多层水平层状介质中的反射波时距曲线

旅行时间

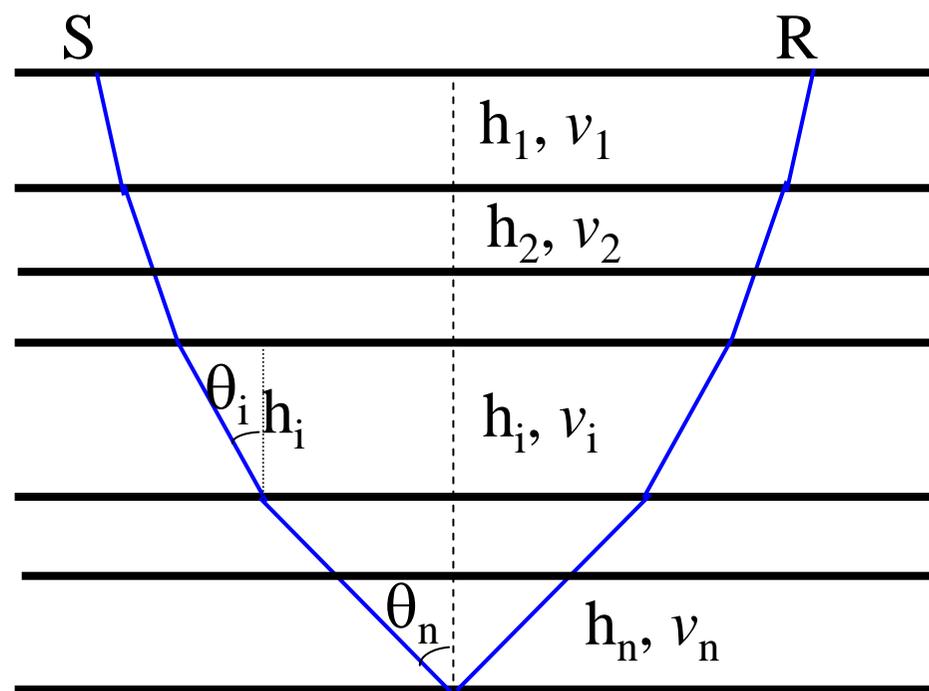
$$t = 2 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\cos \theta_i v_i}$$

炮检距

$$x = 2 \sum_{i=1}^n h_i \operatorname{tg} \theta_i$$

目的

得到 $t$ - $x$ 的显式关系式



# 一、多层水平层状介质中的反射波时距曲线

## Snell定理

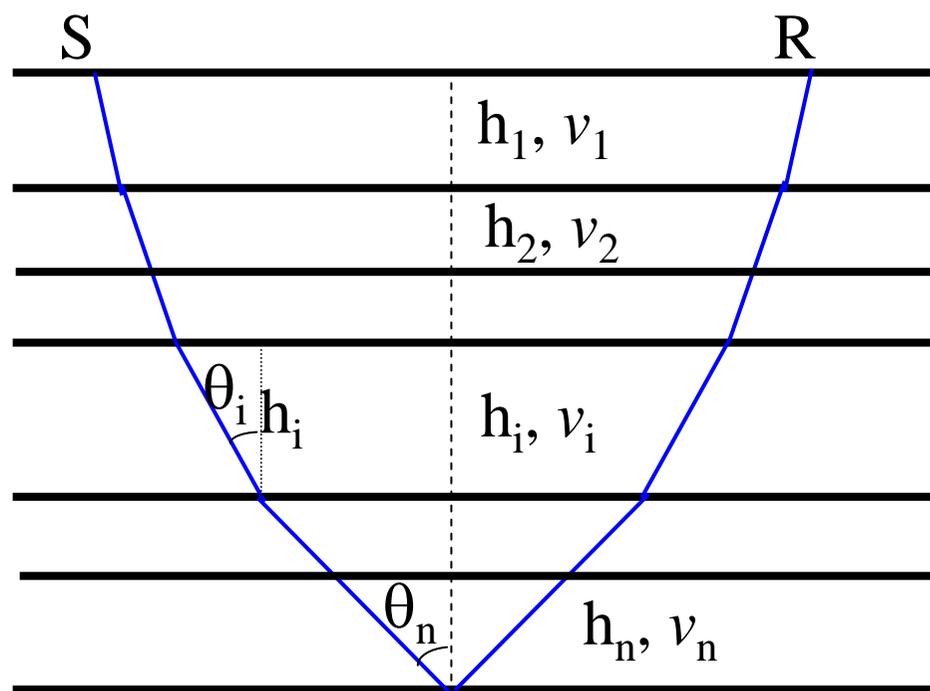
$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} = \dots$$
$$= \frac{\sin \theta_i}{v_i} = \dots = \frac{\sin \theta_n}{v_n} = P$$

**P**为Snell参数

则

$$t = 2 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i \sqrt{1 - (v_i P)^2}}$$

$$x = 2 \sum_{i=1}^n \frac{h_i v_i P}{\sqrt{1 - (P v_i)^2}}$$



# 一、多层水平层状介质中的反射波时距曲线

---

可以证明

$$t^2 = t_0^2 + \beta_1 x^2 + \beta_2 x^4 + \beta_3 x^6 + \dots$$

此时反射波时距曲线表现为非双曲特征

当炮检距较小时，反射波时距曲线可以近似为双曲线

## 关于地下介质的几个结论：

- 速度一般随深度的增大而增大；
- 地层通常表现为成层性；
- 在某些沉积岩地区，由于连续沉积，导致速度连续变化，成为连续介质。

## 二、连续介质中反射波时距曲线

连续介质：速度随深度连续增加的介质

速度线性增加的连续介质模型：

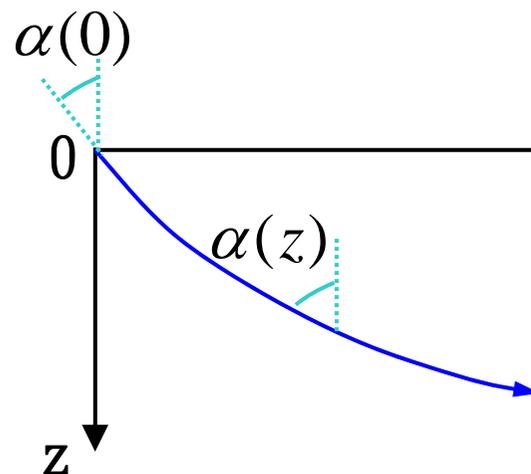
$$v(z) = v_0(1 + \beta z)$$

$v_0$  — 地面速度     $\beta$  — 速度随深度的相对变化率

### 1. 连续介质中的Snell定理

$$P = \frac{\sin \alpha(z)}{v(z)} = \frac{\sin \alpha(0)}{v(0)} = \frac{\sin \alpha_0}{v_0}$$

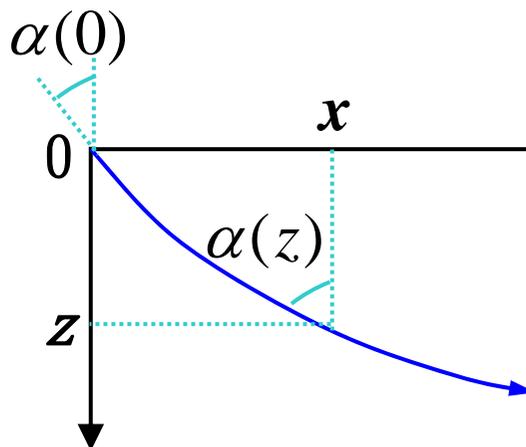
$$\sin \alpha(z) = \sin \alpha_0(1 + \beta z) = P v_0(1 + \beta z)$$



## 二、连续介质中反射波时距曲线

### 2. 连续介质中的射线和等时线方程

$$\begin{aligned}x &= \int_0^z \tan \alpha(z) dz \\ &= \int_0^z \frac{Pv_0(1 + \beta z)}{\sqrt{1 - P^2v_0^2(1 + \beta z)^2}} dz\end{aligned}$$



可以证明

$$\int_0^z \frac{Pv_0(1 + \beta z)}{\sqrt{1 - P^2v_0^2(1 + \beta z)^2}} dz = \frac{\sqrt{1 - P^2v_0^2} - \sqrt{1 - P^2v_0^2(1 + \beta z)^2}}{\beta Pv_0}$$

## 二、连续介质中反射波时距曲线

---

所以

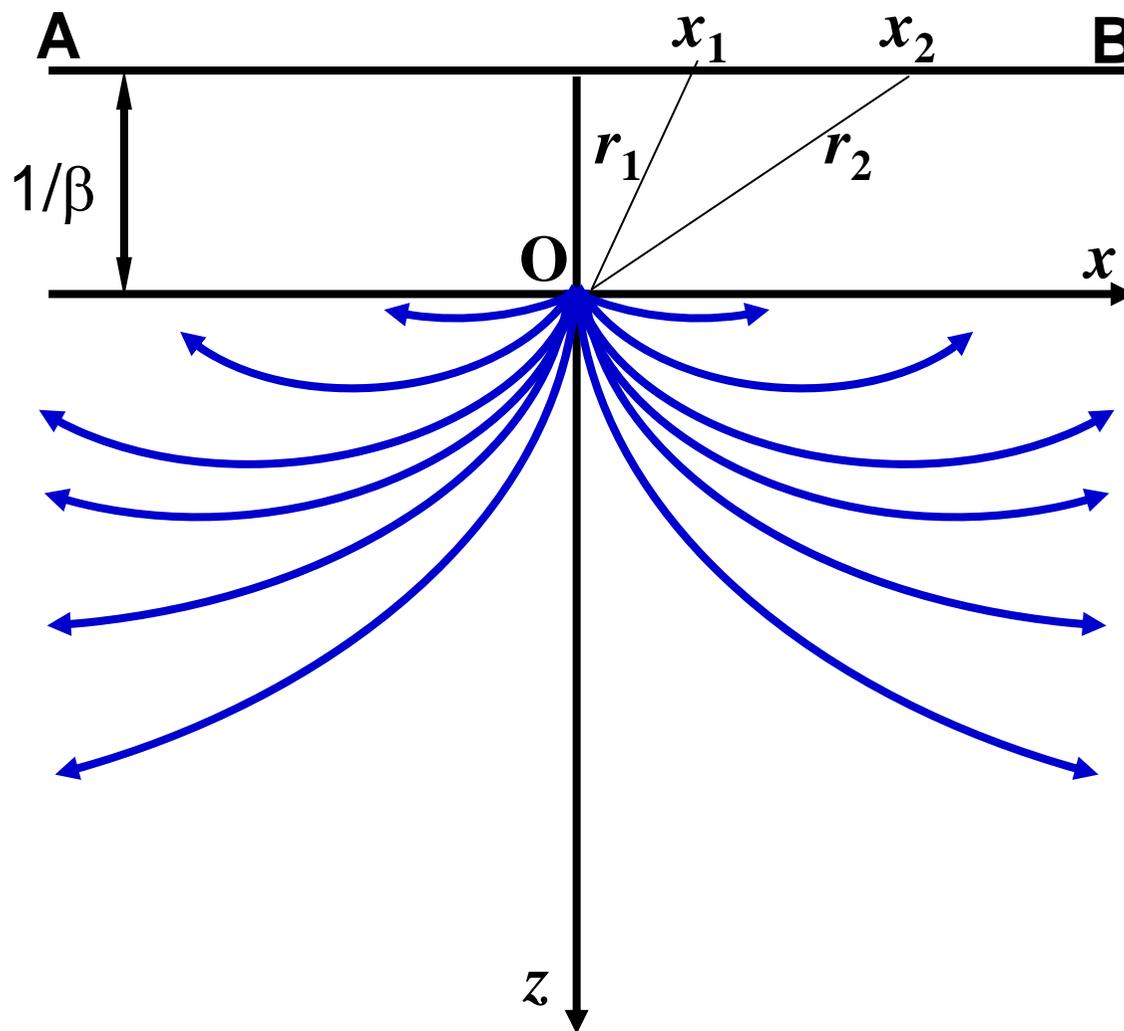
$$x = \frac{\sqrt{1 - P^2 v_0^2} - \sqrt{1 - P^2 v_0^2 (1 + \beta z)^2}}{\beta P v_0} = \frac{\cos \alpha_0 - \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0 (1 + \beta z)^2}}{\beta \sin \alpha_0}$$

$$\left( x - \frac{\cot \alpha_0}{\beta} \right)^2 + \left( z + \frac{1}{\beta} \right)^2 = \left( \frac{\csc \alpha_0}{\beta} \right)^2$$

即

速度线性连续介质中，射线是一个圆弧

## 二、连续介质中反射波时距曲线

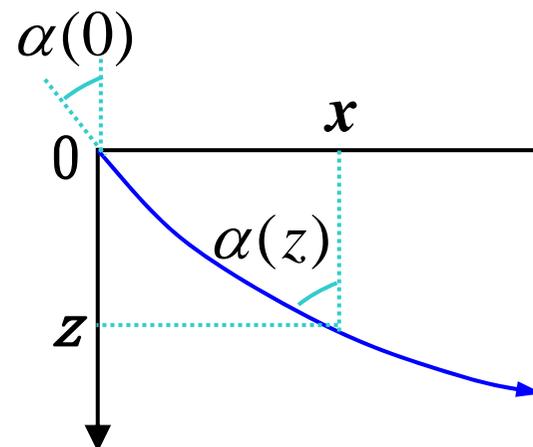


速度线性连续介质中的射线

## 二、连续介质中反射波时距曲线

时间

$$t = \int_0^z \frac{dz}{\cos \alpha(z)v(z)}$$
$$= \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha(z)v(z)}}$$
$$= \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{1 - P^2 v_0^2 (1 + \beta z)^2 v_0 (1 + \beta z)}}$$



可以证明（思考题）

$$\int_0^z \frac{dz}{\sqrt{1 - P^2 v_0^2 (1 + \beta z)^2 v_0 (1 + \beta z)}} = \frac{1}{v_0 \beta} \ln \frac{(1 + \beta z) \left( \sqrt{1 - P^2 v_0^2} + 1 \right)}{\sqrt{1 - P^2 v_0^2 (1 + \beta z)^2} + 1}$$

## 二、连续介质中反射波时距曲线

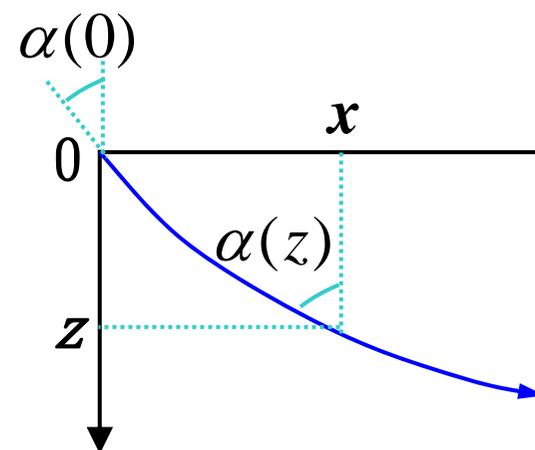
$$t = \frac{1}{v_0 \beta} \ln \frac{(1 + \beta z) \left( \sqrt{1 - P^2 v_0^2} + 1 \right)}{\sqrt{1 - P^2 v_0^2} (1 + \beta z)^2 + 1}$$

而

$$x = \frac{\sqrt{1 - P^2 v_0^2} - \sqrt{1 - P^2 v_0^2} (1 + \beta z)^2}{\beta P v_0}$$

则上两式消去P可得

$$x^2 + \left( z - \frac{\text{ch}(v_0 \beta t) - 1}{\beta} \right)^2 = \left( \frac{\text{sh}(v_0 \beta t)}{\beta} \right)^2$$

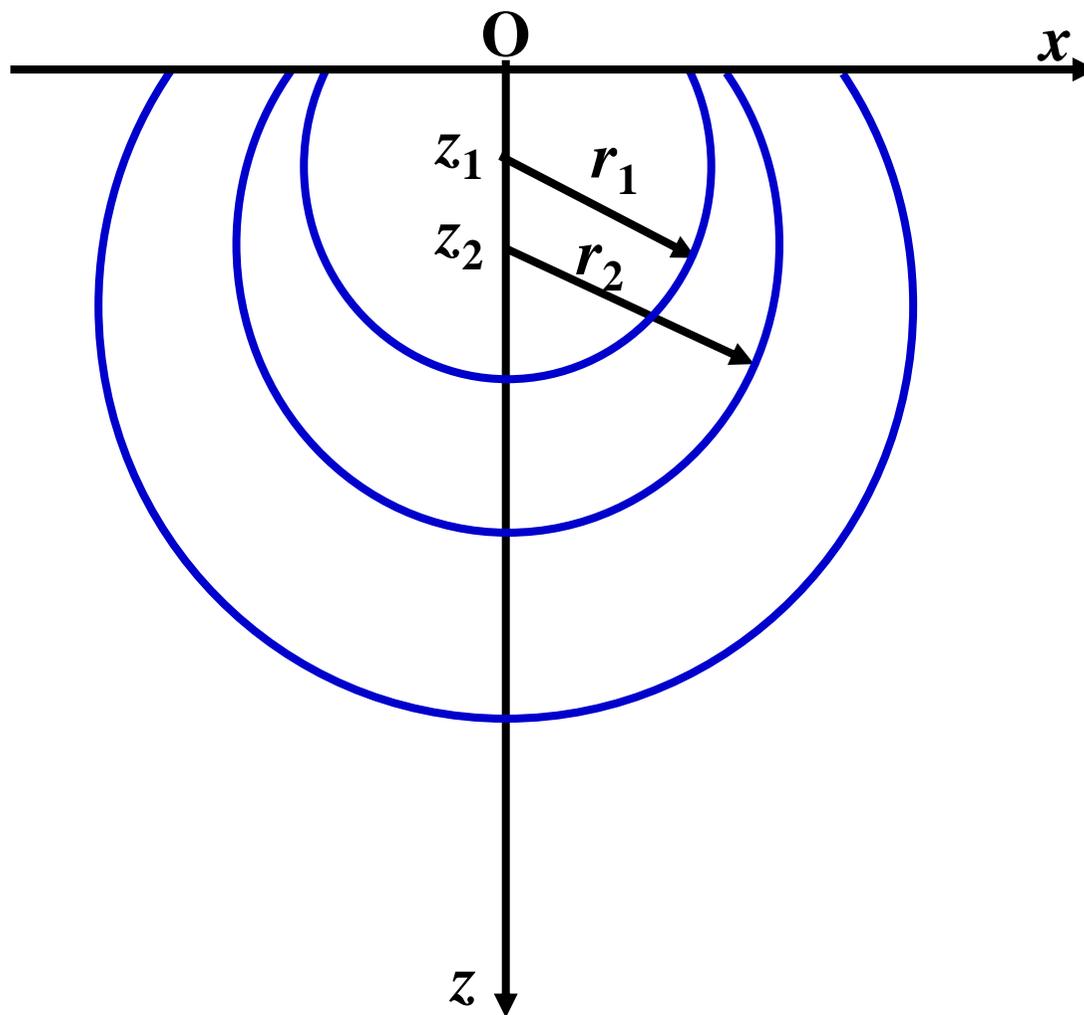


$$\text{sh}(u) = \frac{e^u - e^{-u}}{2}$$

$$\text{ch}(u) = \frac{e^u + e^{-u}}{2}$$

## 二、连续介质中反射波时距曲线

---

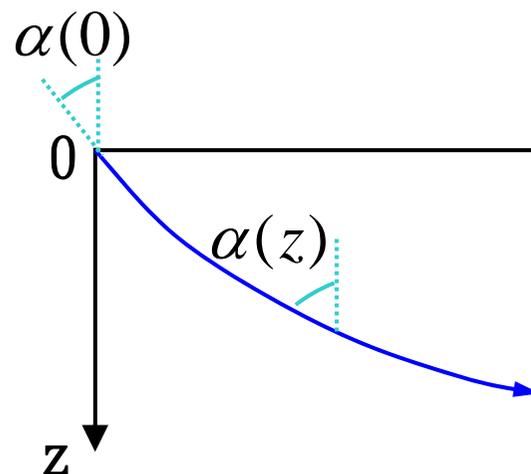


速度线性连续介质的等时线

## 二、连续介质中反射波时距曲线

$$\sin \alpha(z) = \sin \alpha_0 (1 + \beta z)$$

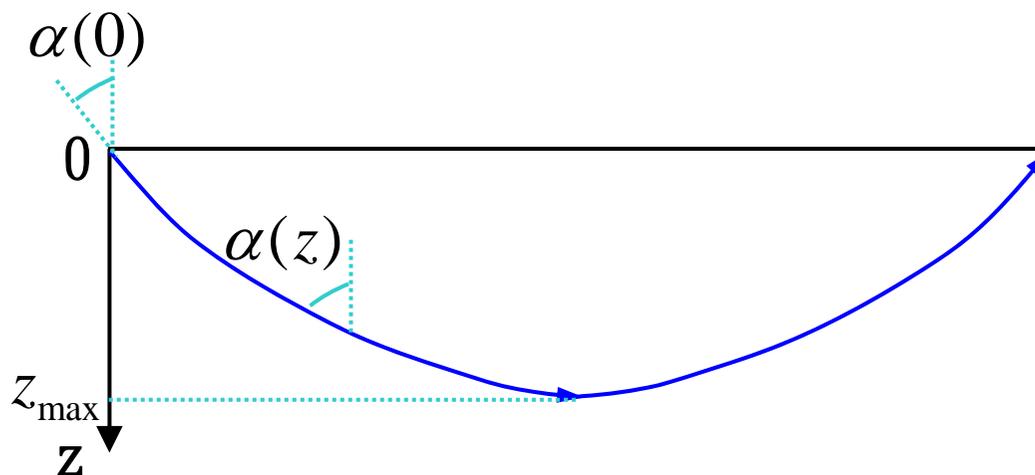
$\alpha(z)$  随深度增加而增加，  
当增加到**90度**时，射线会  
向上传播到地面，此时这  
种波称为**回折波**。



最大穿透深度  $z_{\max}$

$$1 = \sin \alpha_0 (1 + \beta z_{\max})$$

$$z_{\max} = \frac{1}{\beta} (\csc \alpha_0 - 1)$$

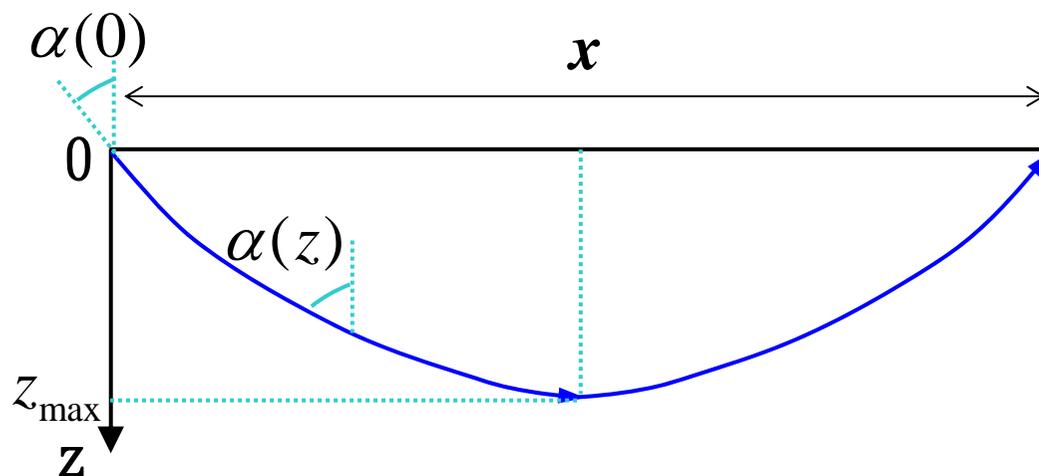


## 二、连续介质中反射波时距曲线

### 3. 回折波（直达波）时距曲线

$$t = 2 \int_0^{z_{\max}} \frac{dz}{\cos \alpha(z) v(z)}$$

$$x = 2 \int_0^{z_{\max}} \tan \alpha(z) dz$$



$$t = 2 \int_0^{z_{\max}} \frac{dz}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha(z) v(z)^2}} = 2 \int_0^{z_{\max}} \frac{dz}{\sqrt{1 - P^2 v_0^2 (1 + \beta z)^2 v_0 (1 + \beta z)}}$$

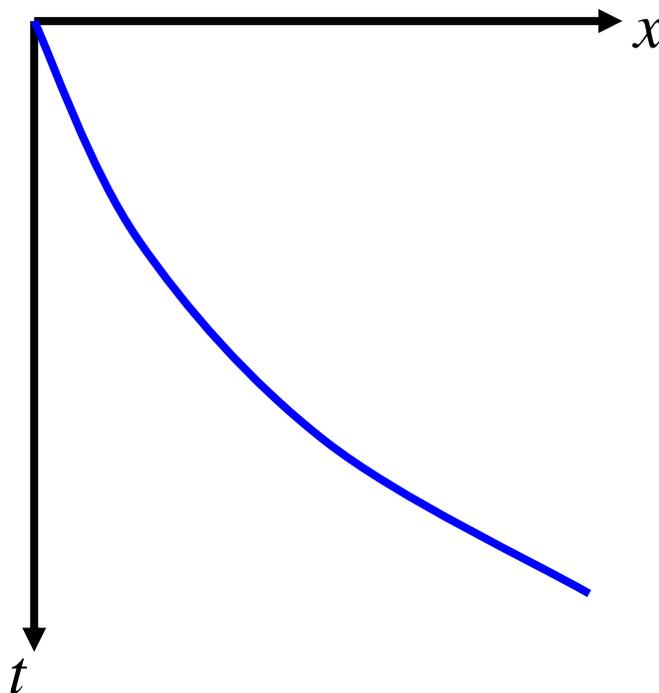
$$x = 2 \int_0^{z_{\max}} \frac{P v_0 (1 + \beta z)}{\sqrt{1 - P^2 v_0^2 (1 + \beta z)^2}} dz$$

## 二、连续介质中反射波时距曲线

经过推导可得直达波时距曲线方程为

$$t = \frac{1}{v_0\beta} \operatorname{arch}\left(1 + \frac{\beta^2 x^2}{2}\right) \quad \operatorname{arcch}(u) = \ln\left(u + \sqrt{u^2 - 1}\right)$$

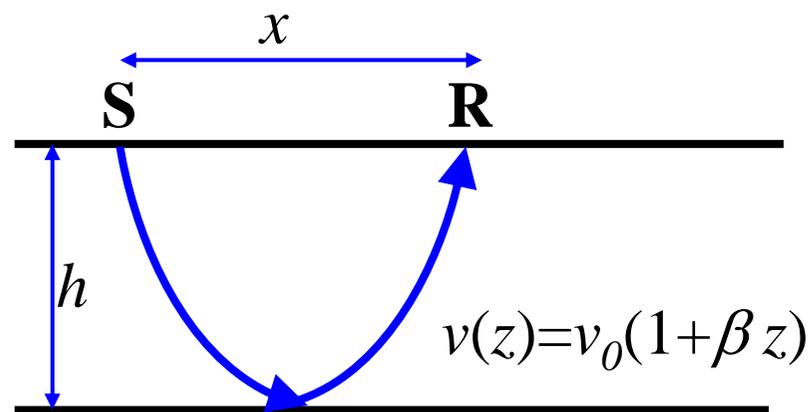
直达波时距  
曲线示意图



## 二、连续介质中反射波时距曲线

### 4. 反射波时距曲线

可推导出反射波时距曲线  
方程为

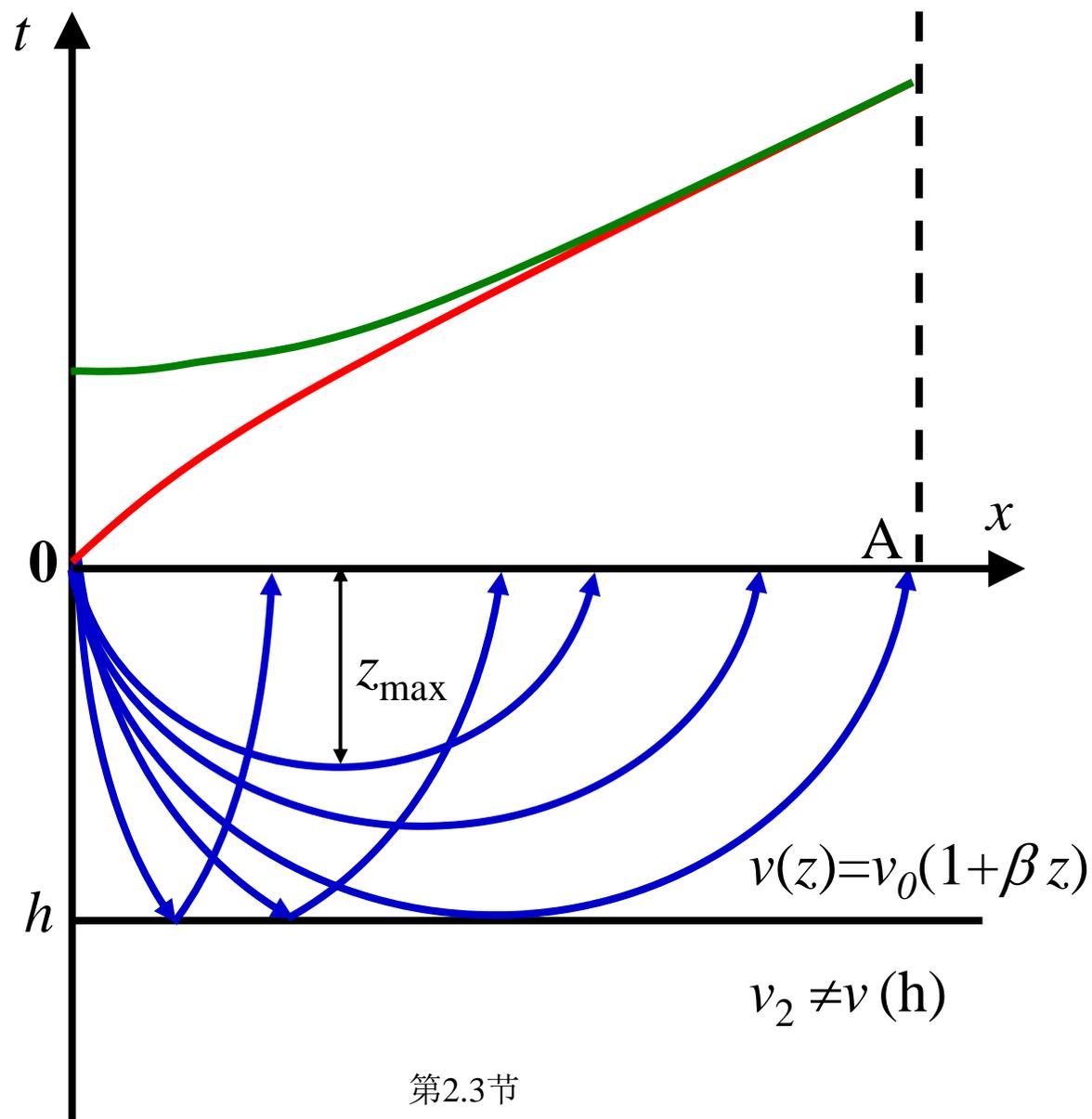


$$t = \frac{2}{v_0\beta} \operatorname{arch} \left( 1 + \frac{\beta^2 x^2 / 4 + \left( e^{v_0\beta t_0/2} - 1 \right)^2}{2e^{v_0\beta t_0/2}} \right) \quad v_2 \neq v(h)$$

其中

$$t_0 = \frac{2}{v_0\beta} \ln(1 + \beta h)$$

## 二、连续介质中反射波时距曲线



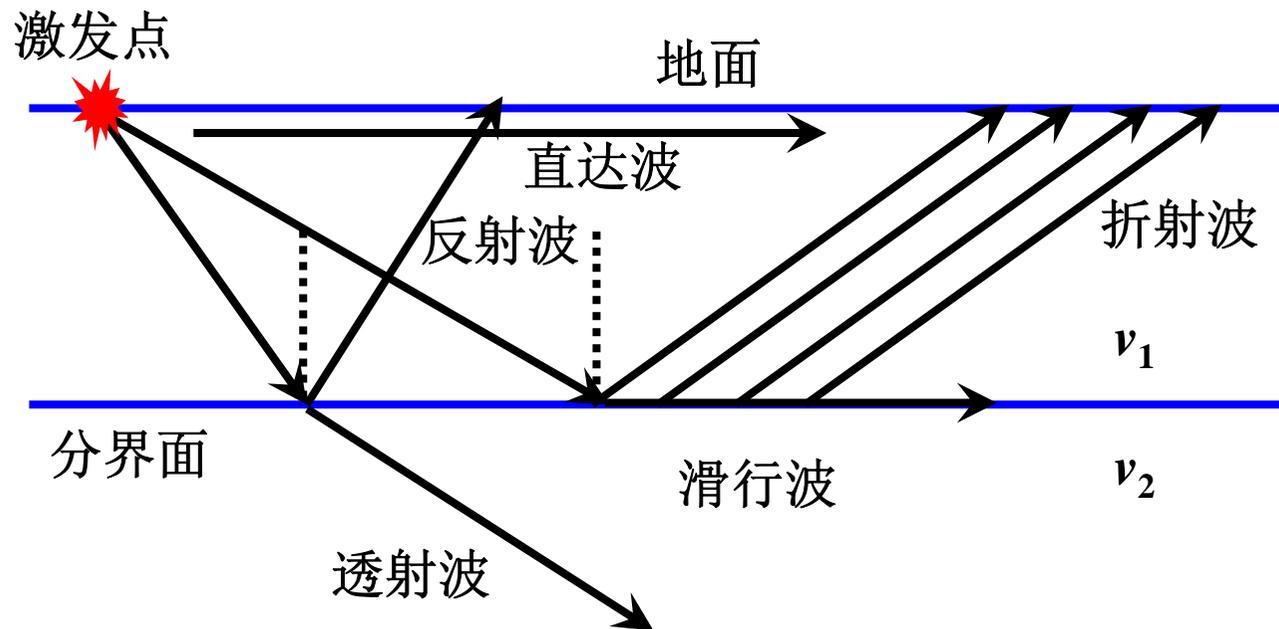
# 第4节 地震折射波运动学



一、折射波的概念、形成条件和盲区

二、折射波时距曲线

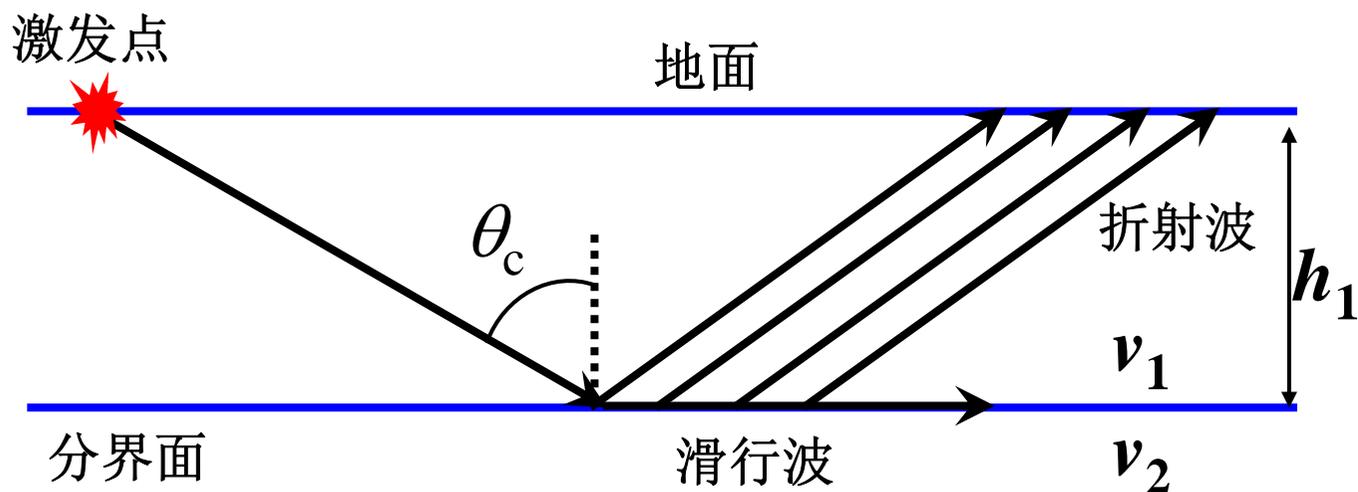
# 一、折射波的概念、形成条件和盲区



## 1. 折射波

地震以临界角入射到两个不同介质的分界面，产生沿界面滑行的地震波，滑行波在传播过程中不断出射，形成折射波。

# 一、折射波的概念、形成条件和盲区



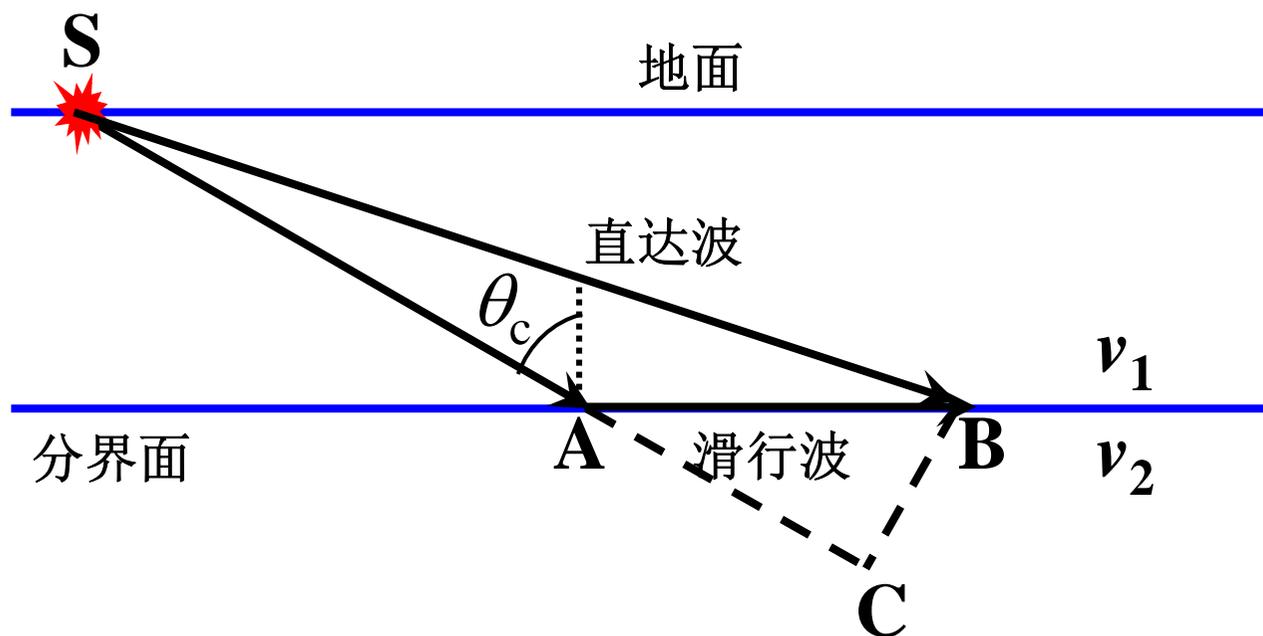
## 2. 折射波形成条件

(1)  $v_2 > v_1$       (2) 以临界角入射       $\sin \theta_c = v_1 / v_2$

## 3. 折射波盲区：指不能观测到折射波的范围

盲区半径：       $r = h_1 \tan \theta_c$

# 一、折射波的概念、形成条件和盲区



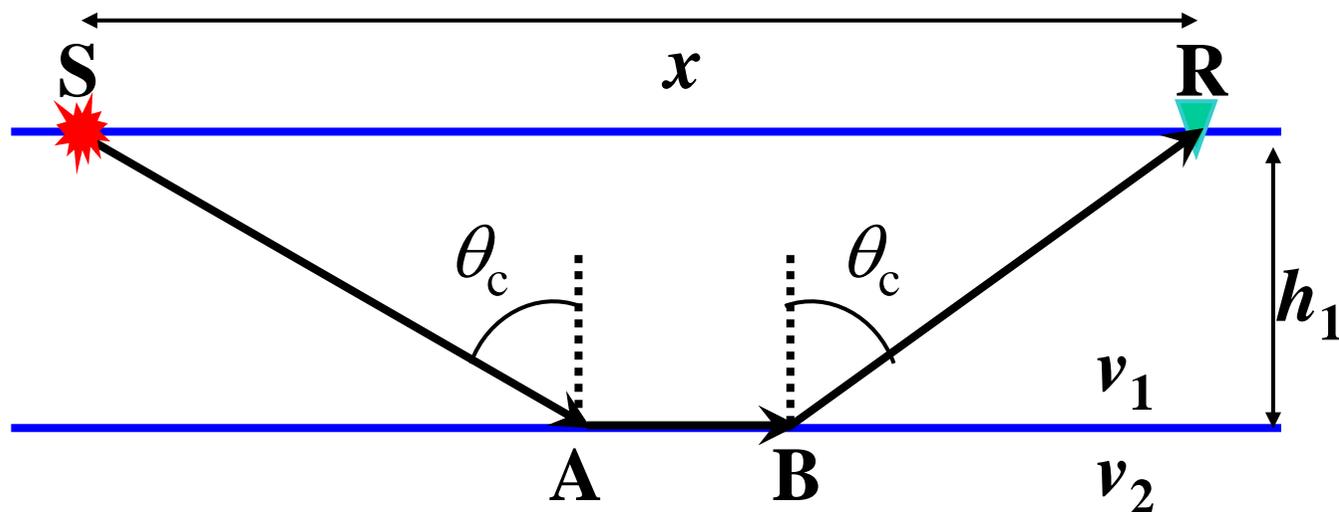
4. 临界点以外，界面上任一点处，  
滑行波比直达波先到达

$$t_{\text{直达波}} = \frac{SB}{v_1}$$

$$t_{\text{滑行波}} = \frac{SA}{v_1} + \frac{AB}{v_2} = \frac{SA}{v_1} + \frac{\sin \theta_c AB}{v_1} = \frac{SA}{v_1} + \frac{SC}{v_1}$$

## 二、折射波时距曲线

### 1. 一个水平界面



$$\begin{aligned} t &= 2 \frac{SA}{v_1} + \frac{AB}{v_2} = \frac{2h_1}{v_1 \cos \theta_c} + \frac{x - 2h_1 \tan \theta_c}{v_2} \\ &= \frac{x}{v_2} + \left( \frac{2h_1}{v_1 \cos \theta_c} - \frac{2h_1 \tan \theta_c}{v_2} \right) \\ &= \frac{x}{v_2} + \left( \frac{2h_1}{v_1 \cos \theta_c} - \frac{2h_1 \tan \theta_c}{v_1 / \sin \theta_c} \right) = \frac{x}{v_2} + \frac{2h_1 \cos \theta_c}{v_1} \end{aligned}$$

## 二、折射波时距曲线

---

(1) 折射波时距曲线方程：
$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{2h_1 \cos \theta_c}{v_1}$$

折射波时距曲线示意图

### (2) 折射波时距曲线特征

(a) 为直线；

(b) 直线斜率反映了滑行速度 $v_2$ ；

(c) 截距（交叉时）：
$$\frac{2h_1 \cos \theta_c}{v_1}$$



## 二、折射波时距曲线

---

### 多层水平层状介质时距曲线

$$t = \frac{x}{v_{n+1}} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{h_i \cos \theta_i}{v_i}$$

### 折射波时距曲线特征:

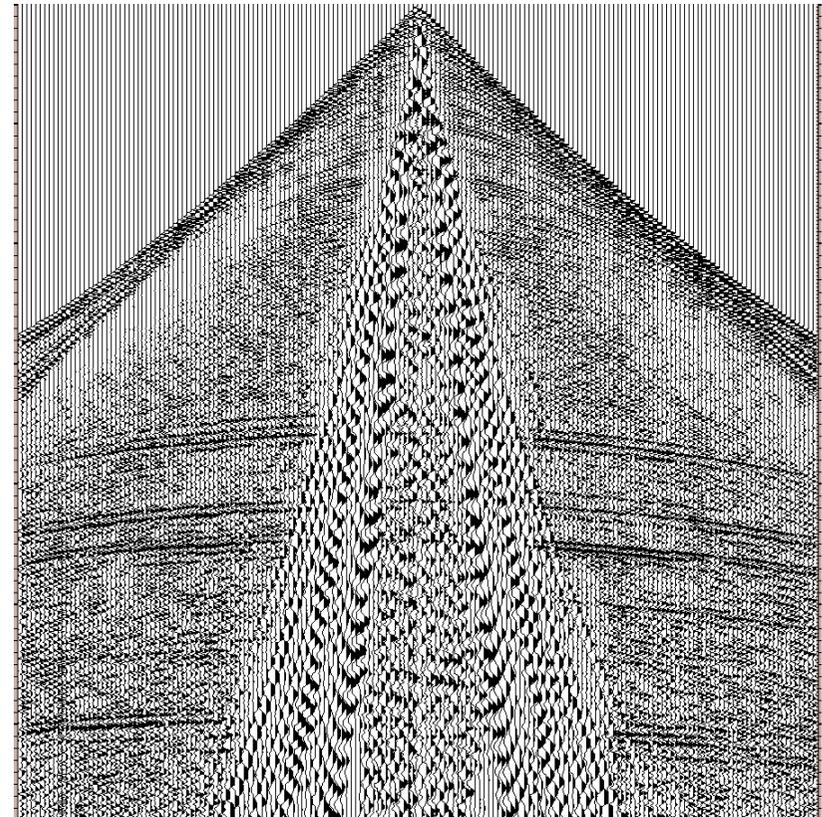
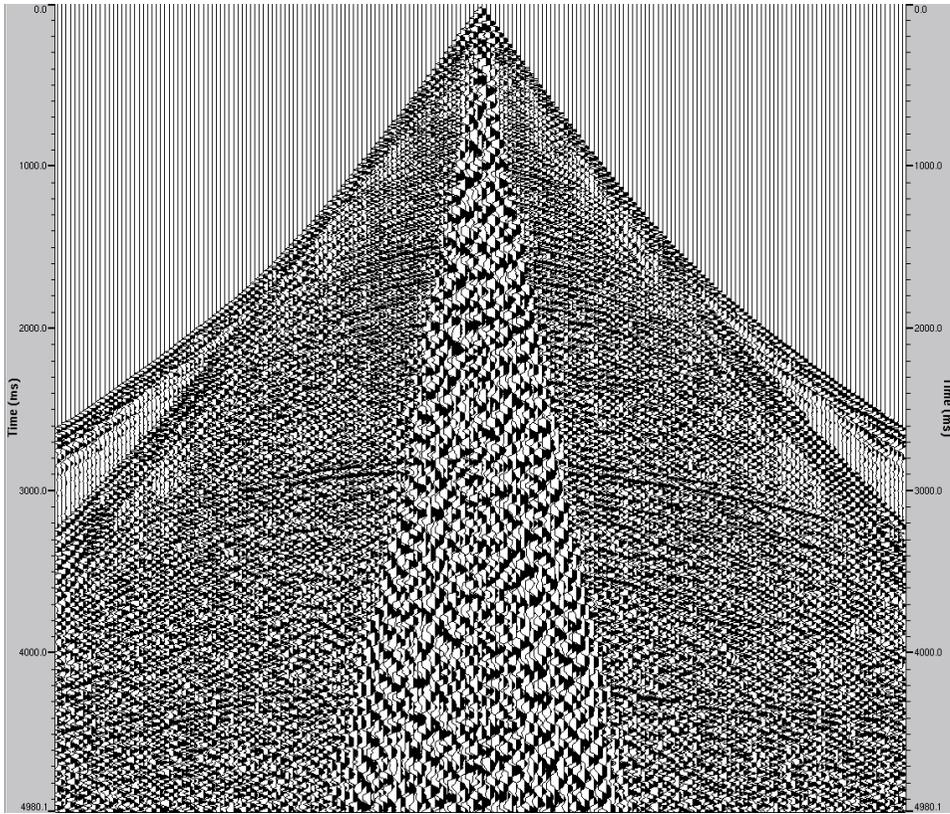
(a) 为直线;

(b) 直线斜率反映了滑行速度 $v_{n+1}$ ;

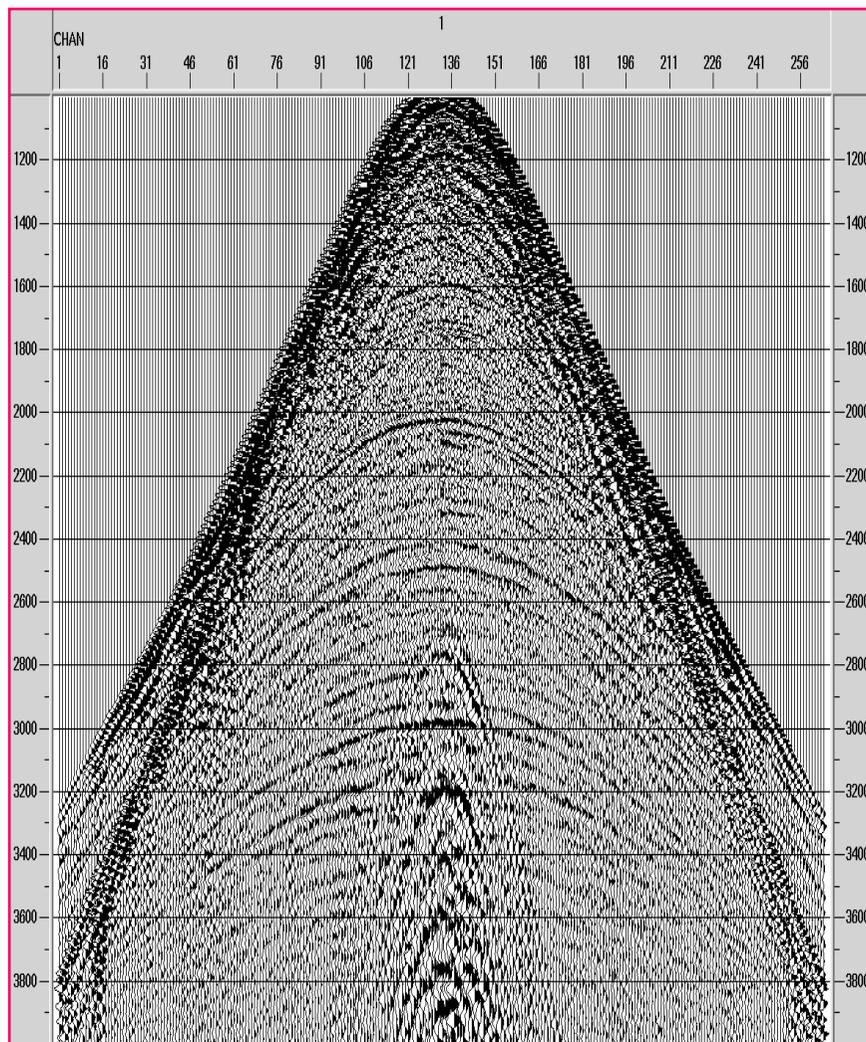
(c) 截距 (交叉时) :  $t_m = \sum_{i=1}^n 2h_i \cos \theta_i / v_i$

## 思考题

- 1.对于多层水平层状介质，
  - (1) 画出直达波、折射波时距曲线示意图；
  - (2) 反射波时距曲线与直达波、折射波时距曲线的关系。
2. 单炮记录中直达波、折射波与反射波的识别。



# 典型单炮记录1



## 典型单炮记录2

第2.4节

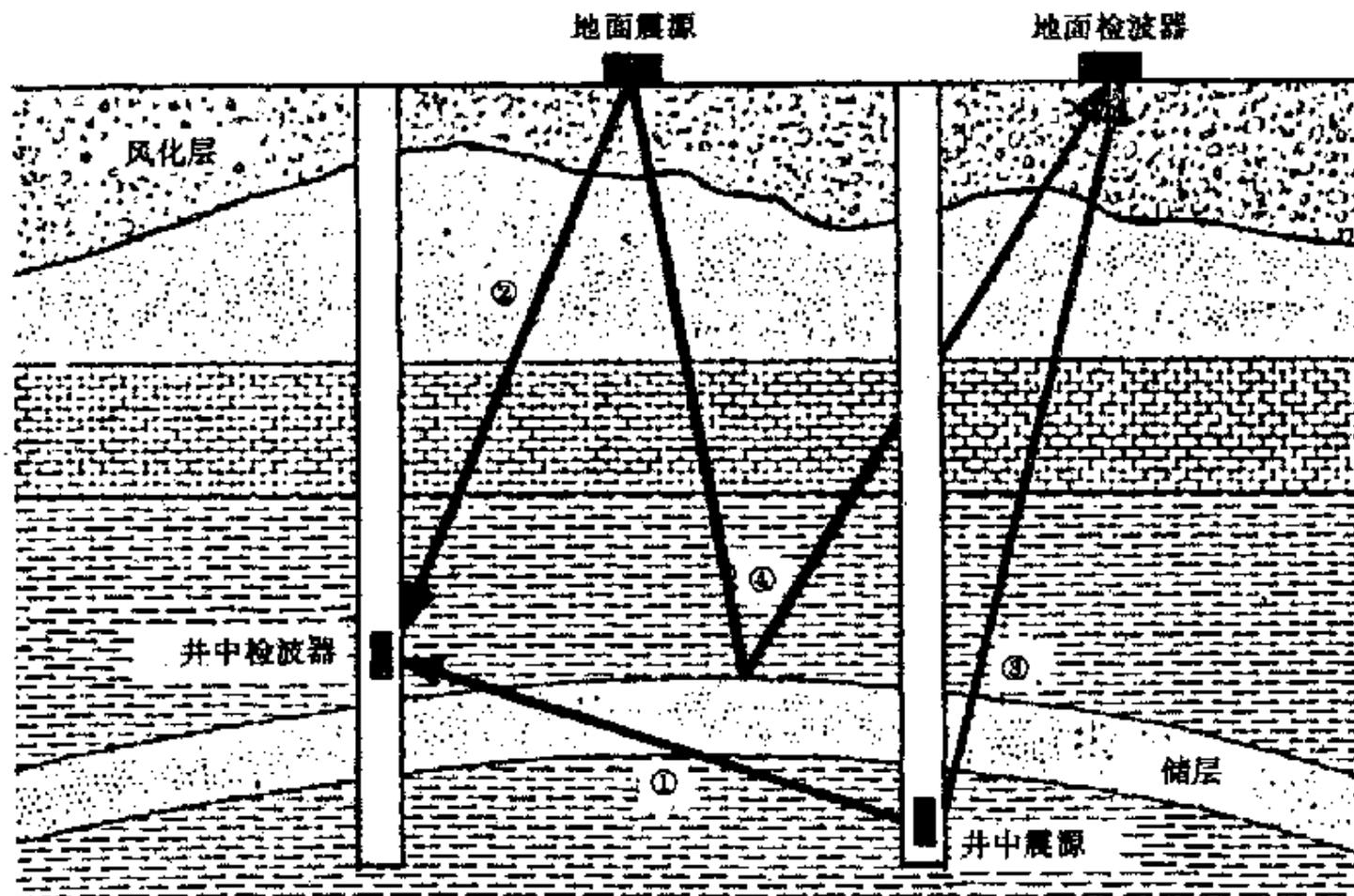
# 第5节 透过波和反射波的 垂直时距曲线



- 一、垂直时距曲线的概念
- 二、零井源距VSP垂直时距曲线
- 三、非零井源距VSP垂直时距曲线

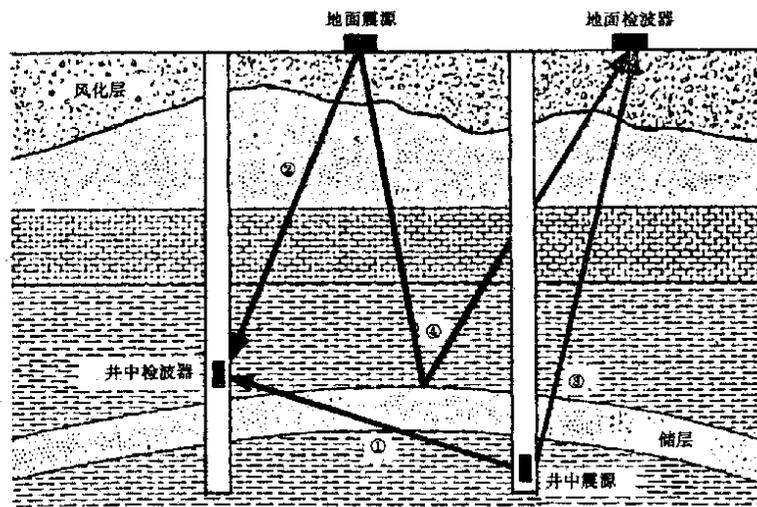
# 一、垂直时距曲线的概念

## 1. 地震勘探采集方法



# 一、垂直时距曲线的概念

## 1. 地震勘探采集方法



|      |    |        |      |
|------|----|--------|------|
|      | 接收 |        |      |
| 激发   |    | 地面接收   | 井中接收 |
| 地面激发 |    | 地面地震勘探 | VSP  |
| 井中激发 |    | 逆VSP   | 井间地震 |

各种勘探方法反射观测范围、信噪比、精度、费用分析

# 一、垂直时距曲线的概念

## 2. 与VSP有关的几个基本概念

井源距： 激发点到井口的距离

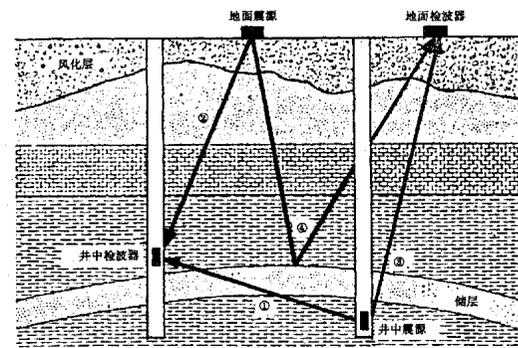
零井源距VSP： 井源距接近零的VSP

非零井源距VSP： 井源距不为零的VSP

垂直时距曲线： 地面激发、井下接收，观测到的地震波到达时间与接收点深度的关系曲线

下行波： 下行传播到检波器的波，例如直达波

上行波： 上行传播到检波器的波，例如反射波



## 二、零井源距VSP垂直时距曲线

研究水平层状介质情况，针对直达波、反射波

### 1. 零井源距VSP直达波垂直时距曲线

#### (1) 垂直时距曲线公式推导

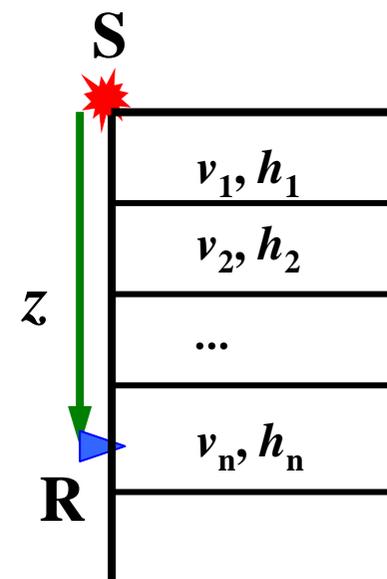
**R**位于第**1**层内  $t = \frac{z}{v_1}$

**R**位于第**2**层内

$$t = \frac{h_1}{v_1} + \frac{(z - h_1)}{v_2} = \frac{z}{v_2} + \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) h_1$$

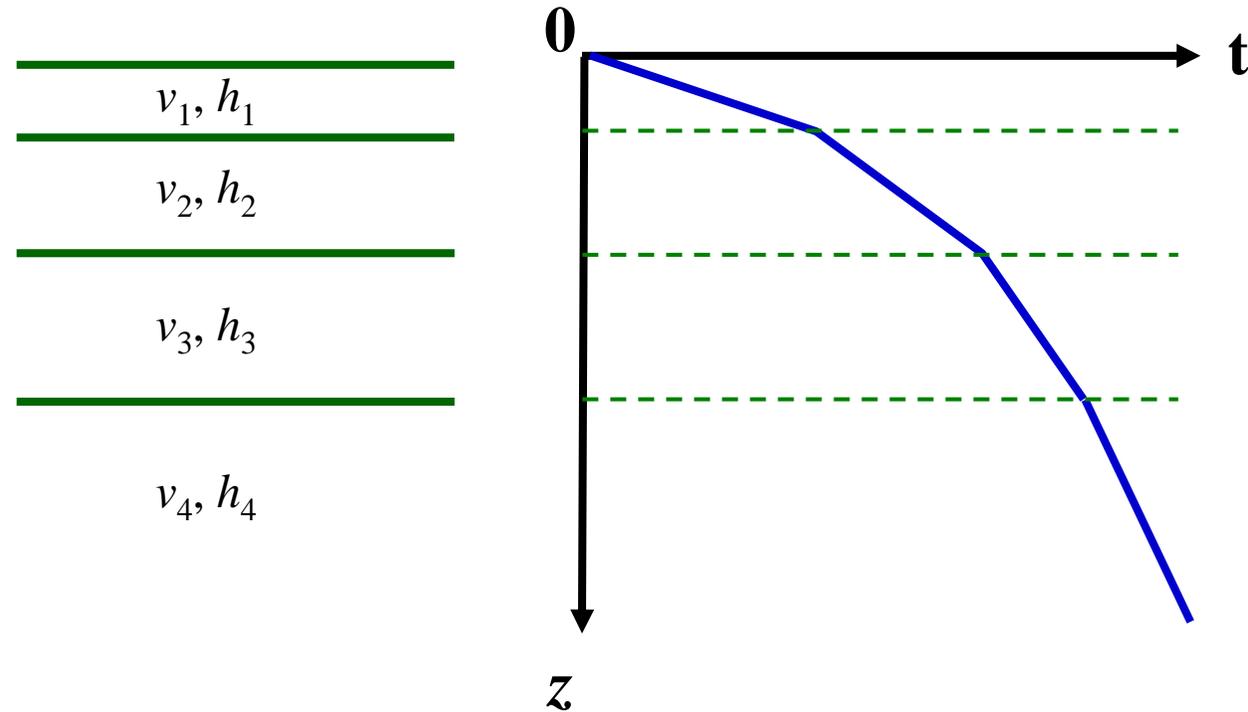
**R**位于第**n**层内

$$t = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{v_i} + \frac{(z - \sum_{i=1}^{n-1} h_i)}{v_n} = \frac{z}{v_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \left( \frac{1}{v_i} - \frac{1}{v_n} \right) h_i$$



## 二、零井源距VSP垂直时距曲线

### (2) 直达波垂直时距曲线特征



- 由一系列直线段组成
- 各个直线段斜率的意义

## 二、零井源距VSP垂直时距曲线

### 2. 零井源距VSP反射波垂直时距曲线

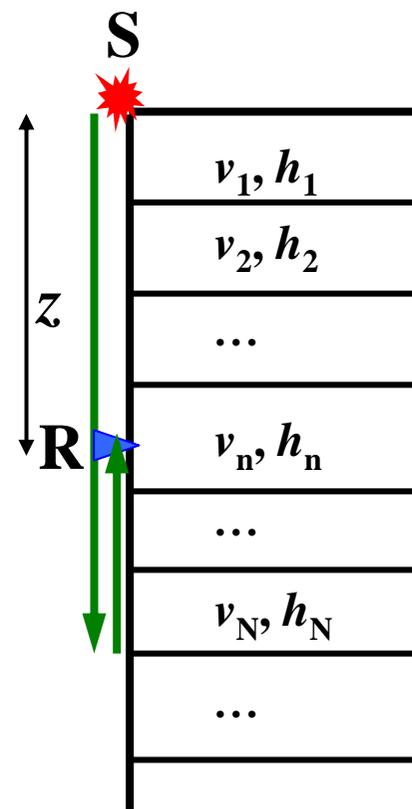
#### (1) 垂直时距曲线公式推导

研究来自第N个界面的反射

R位于第1层内 
$$t = \sum_{i=1}^N \frac{2h_i}{v_i} - \frac{z}{v_1}$$

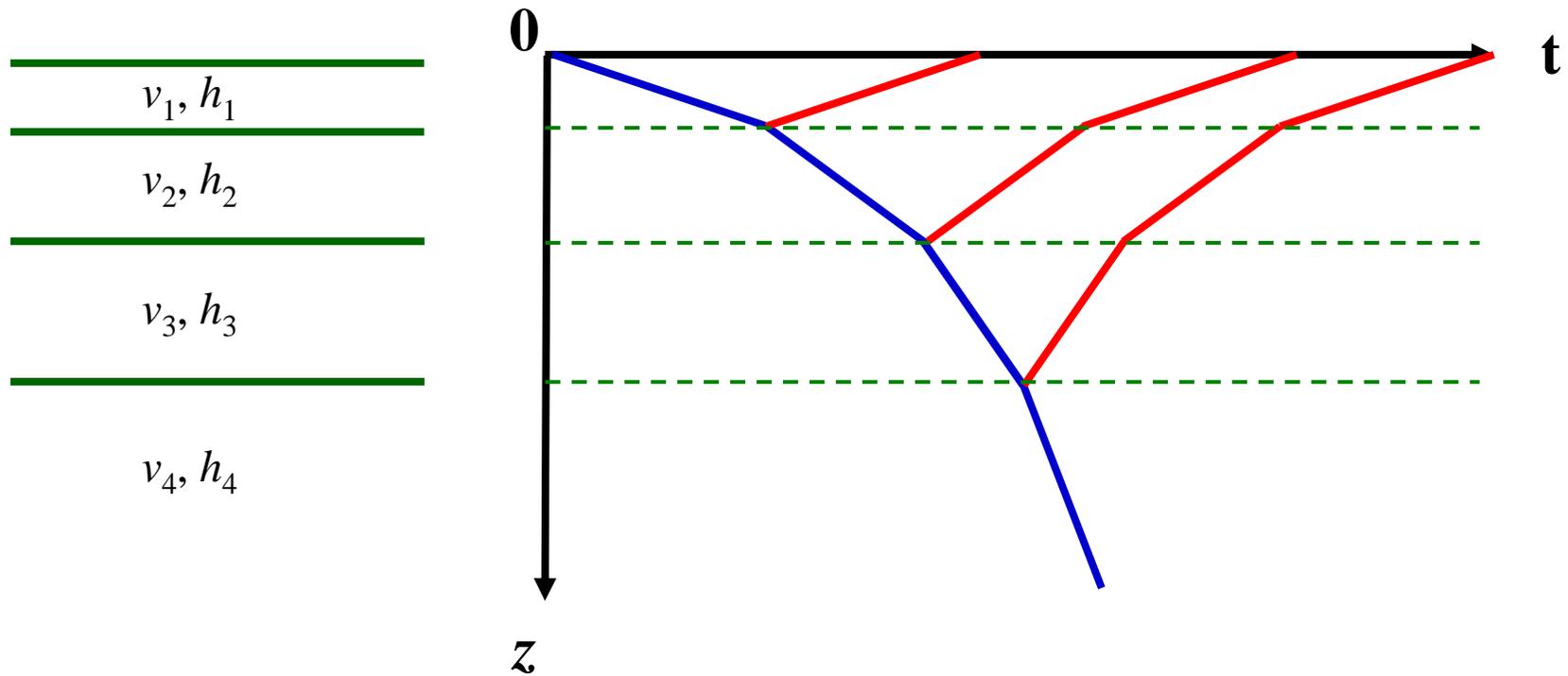
R位于第2层内 
$$t = \sum_{i=1}^N \frac{2h_i}{v_i} - \left( \frac{h_1}{v_1} + \frac{(z - h_1)}{v_2} \right)$$

R位于第n层内 
$$t = \sum_{i=1}^N \frac{2h_i}{v_i} - \left( \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{v_i} + \frac{(z - \sum_{i=1}^{n-1} h_i)}{v_n} \right)$$

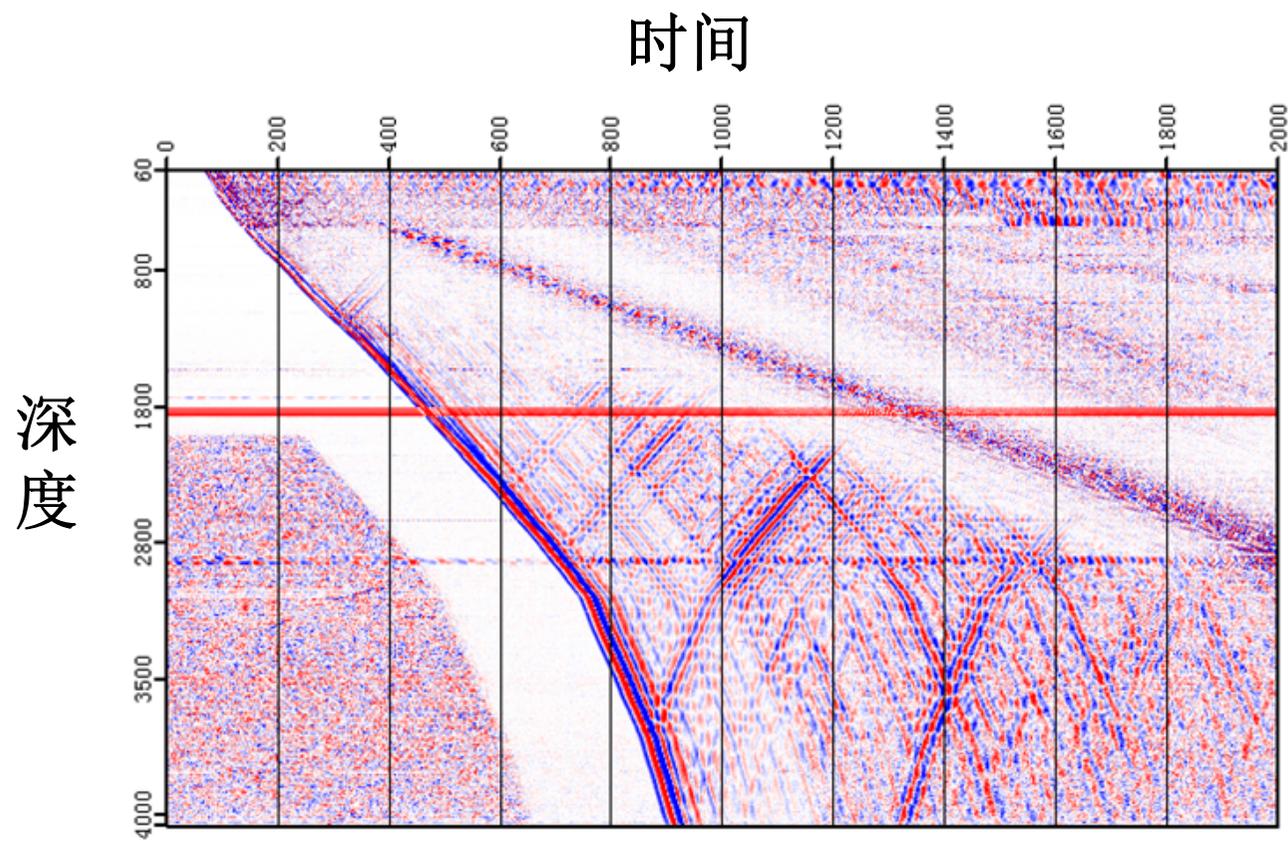


## 二、零井源距VSP垂直时距曲线

### (2) 反射波垂直时距曲线特征



## 二、零井源距VSP垂直时距曲线



零井源距VSP记录

### 三、非零井源距VSP垂直时距曲线

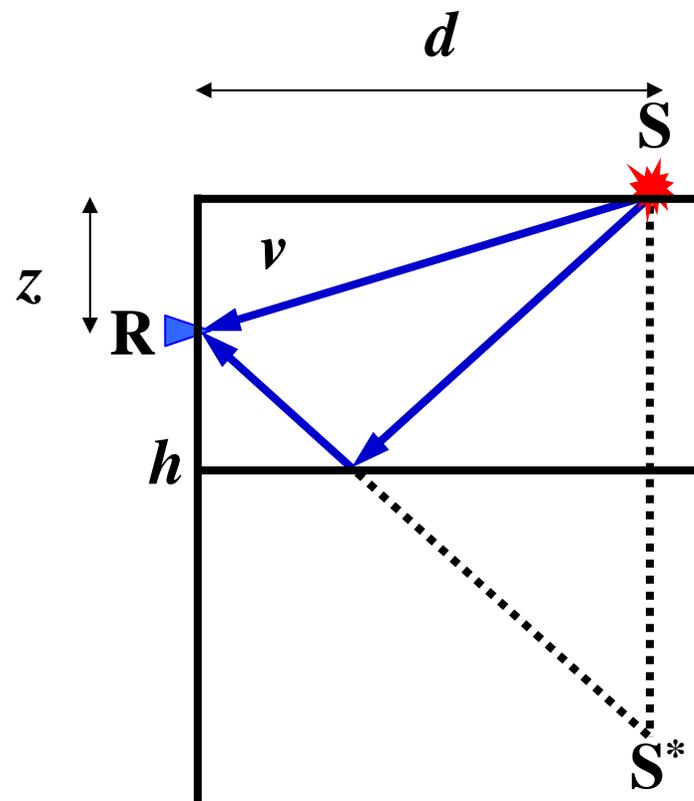
研究一个水平界面情况，针对直达波、反射波

#### 1. 直达波垂直时距曲线

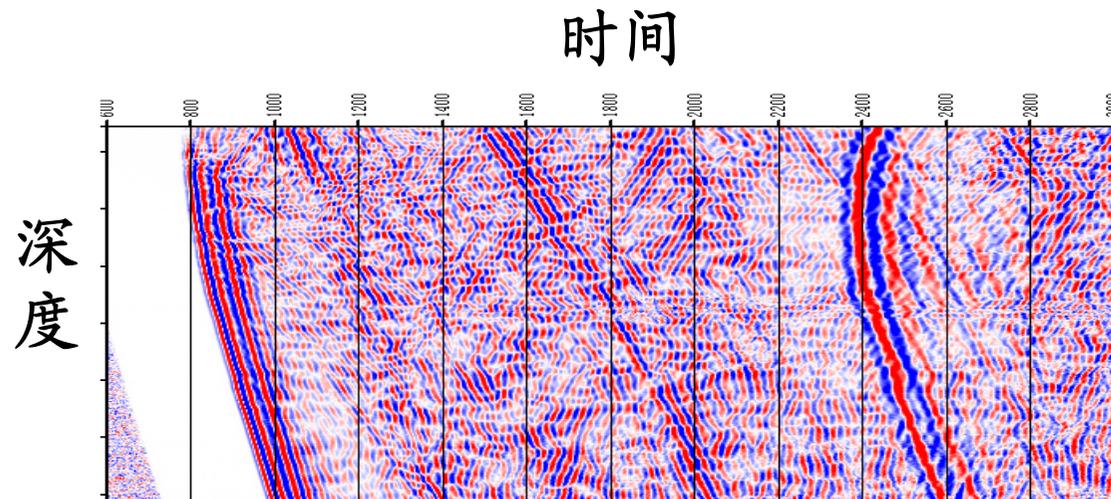
$$t = \frac{\sqrt{d^2 + z^2}}{v}$$

#### 2. 反射波垂直时距曲线

$$t = \frac{\sqrt{d^2 + (2h - z)^2}}{v}$$

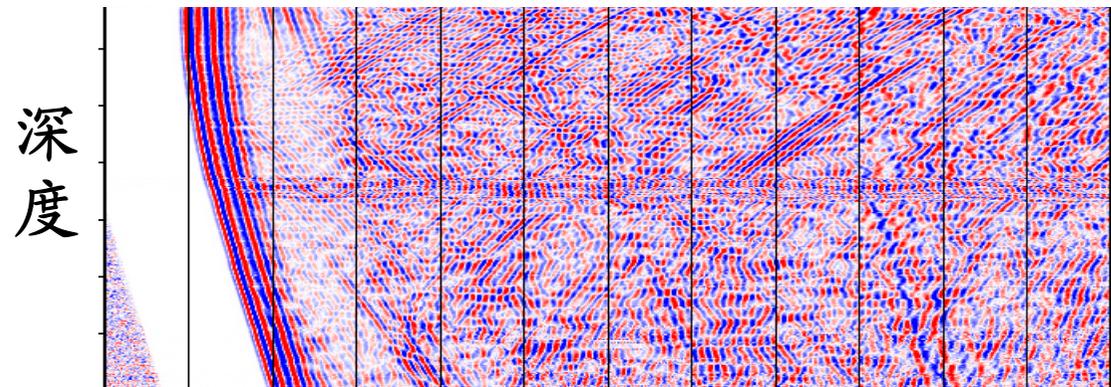


### 三、非零井源距VSP垂直时距曲线



VSP采用  
三分量检波器  
接收

(a) 垂直分量记录



(b) 水平分量记录

### 非零井源距VSP记录

## 第二章 总结

### 1.基本概念

- 各种介质的概念
- 波动、弹性波、地震波、波前、波后、波面、振动曲线（地震记录）、波形曲线（波剖面、波场快照）
- 波长、视波长、速度、视速度、周期、频率
- 体波、面波、纵波、横波
- 反射波、透射波、直达波、滑行波、折射波
- 波阻抗、时距曲线、动校正、正常时差、回折波、**VSP**、上行波、下行波

## 2.基本原理、定理

- 惠更斯原理、费马原理、**Snell**定理

## 3.时距曲线

- 直达波时距曲线
- 一个水平界面、一个倾斜界面反射波时距曲线
- 一个水平界面折射波时距曲线
- 水平层状介质透过波、反射波垂直时距曲线

## 4.单炮记录中各种波的识别

## 第二章 专业英语词汇

## 2.1 地震波的基本概念

介质: **medium** (复数**media**)

地层: **stratum** (复数**strata**)

弹性的、非弹性的: **elastic**、**an~**

弹性、非弹性: **elasticity**、**an~**

均匀的、非均匀的: **homogeneous**、**in~/heterogeneous**

均质、非均质: **homogeneity**、**heterogeneity**

各向同性的、各向异性的: **isotropic**、**an~**

各向同性、各向异性: **isotropy**、**an~**

固相、流相: **solid phase**、**fluid phase**

**传播: propagate/propagation**

**应力: stress**

**应变: strain**

**位移: displacement**

**波前: wave front**

**波后: wave rear**

**波面: wave surface**

**振动: vibration**

**倾角: dip angle**

射线: ray

路径: path

勘探地震学: prospecting/exploration seismology

地震剖面: seismic profile/section

地震记录: seismic record、seismogram

波场快照: snapshot

波长: wave length 、 wavelength

周期: period

频率: frequency

速度: **velocity**

视速度: **apparent velocity**

入射角: **incident angle**

反射角: **reflection angle**

费马原理: **Fermat principle**

惠更斯原理: **Huygens principle**

斯奈尔定律: **Snell Law**

反射定律: **reflection law**

声波: **acoustic wave**

地震波: **seismic wave**

弹性波: **elastic wave**

直达波: **direct wave**

反射波: **reflection/reflected wave**

透射波: **transmission/transmitted wave**

折射波: **refraction/refracted wave**

平面/球面/柱面波: **spherical / cylindrical / plane wave**

体波： **body wave**

纵波： **compressional / P wave**

横波： **shear / S wave**

面波： **surface wave**

瑞雷波： **Rayleigh wave**

勒夫波： **Love wave**

斯通利波： **Stoneley wave**

有效波（信号）： **effective wave (signal)**

干扰波（噪音）： **interference (noise)**

## 2.2 一个界面情况下反射波的时距曲线

震源: **source**

接收器: **receiver**

检波器: **geophone, detector**

炮点: **shot point, source point, SP**

接收点: **receiver point, RP**

炮检距: **offset**

时距曲线: **time-distance curve, T-X curve, hodograph**

测线: **survey line**

界面: **interface/boundary**

水平界面: **horizontal interface [hori' zontal]**

倾斜界面: **tilted/angled/slanting/diping interface**

## 2.3 多层介质和连续介质中反射波时距曲线

## 2.4 地震折射波运动学

## 2.5 透过波和反射波的垂直时距曲线

水平层状介质: **horizontally layered media**

连续介质: **continuous medium**

回折波: **diving wave**

垂直地震剖面: **vertical seismic profile, VSP**

零井源距VSP: **Zero-offset VSP**

非零井源距VSP: **Offset VSP**

下行波: **down-going wave, downgoing wave**

上行波: **up-going wave, upgoing wave**