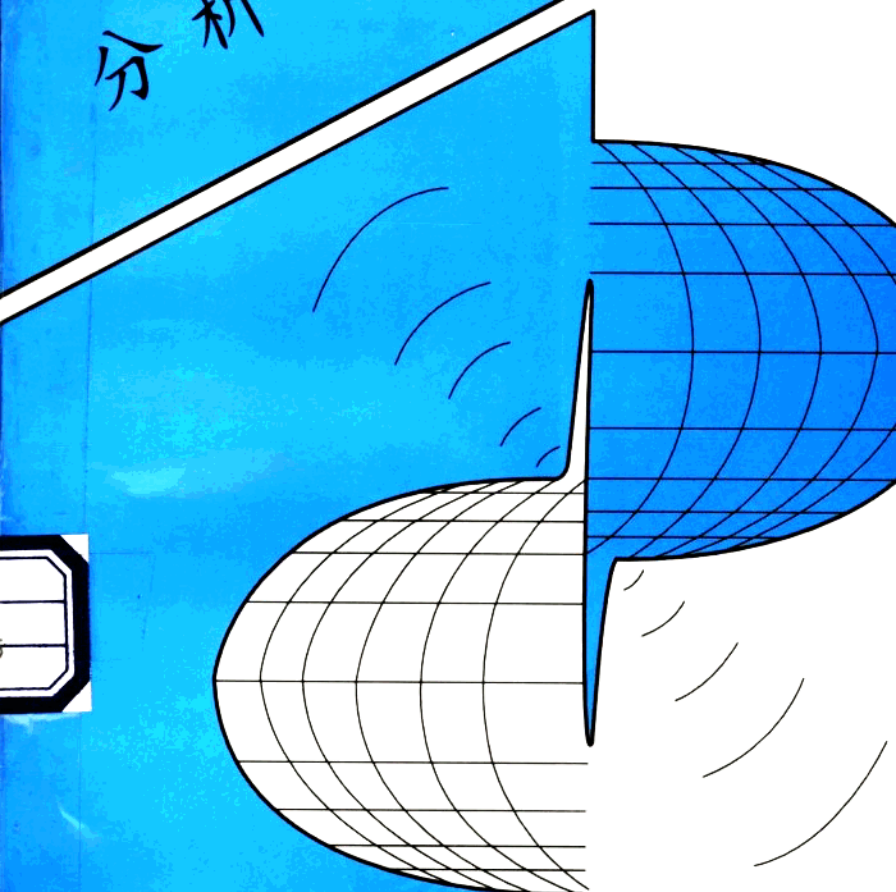


地震波 分析与应用



国家地震局预测预防司 国家地震局人事教育司
国家地震局地球物理研究所 国家地震局杭州干部培训中心

地震出版社
1998

地震波分析与应用

国家地震局预测预防司
国家地震局人事教育司
国家地震局地球物理研究所
国家地震局杭州干部培训中心

地震出版社

1998

内容提要

本书共有六讲：第一、二、三讲为地震波分析部分，包括地震波动理论、地震记录分析和地震参数测定；第四、五、六讲为地震波应用部分，包括地震波在大震速报、深井地震观测和诱发地震方面的应用。每讲备有示教性软件演示。本书可作为地震动观测台站台网的业务培训教材，也可以作为从事测震工作的科技人员和大专院校师生的教学参考书。本教材配有教学录像带。

地震波分析与应用

国家地震局预测预防司

国家地震局人事教育司

国家地震局地球物理研究所

国家地震局杭州干部培训中心

责任编辑：姚家榴

特约编辑：刘新美

*

地质出版社 出版 发行

北京民族学院南路9号

北京地大彩印厂 印刷

850×1168 1/32 7.125印张 187千字

1998年3月第一版 1998年3月第一次印刷

印数 0001—1500

ISBN 7-5028-1520-1/P·934

(1978) 定价：15.00元

地震波分析与应用

编 著

张少泉	徐子君	何建树
杨宝仁	苏晓梅	陈乃其

审 定

徐京华	潘怀文
李志雄	高荣胜

前 言

中国是世界上的多地震的国家,饱受地震灾害之苦。目前,中国正处在一个新的地震活跃期,防震减灾的任务更迫切地摆在我们面前。作为防震减灾四个环节的第一个环节——地震监测预报,自然成为我们防震减灾事业的基础。

台站为立业之本。离开台站观测,预测预防就成了无源之水、无本之木。国家地震局对台站建设一直极为关心。为改善地震台站和台网人员的业务素质,曾在“七五”、“八五”期间组织了多期学习班,进行技术培训工作。在此基础上,1994年底由国家地震局人事教育司和预测预防司,联合组织拍摄了一套《地震波分析与应用》的声像教材。

1997年6月国家地震局举办测震业务培训班,各省局和主要台站选派业务骨干参加。在培训班上,作为辅导材料,试映了该教学片。该教材受到参加培训班基本台和台网的好评,纷纷希望能尽早提供台站人员使用。预测预防司考虑到这套侧重于分析应用的教材,与正在拍摄的侧重于仪器观测的教材《地震观测技术》,可以互相补充,决定给予经费支持和技术指导,并与教育部门协商,委托国家地震局杭州干部培训中心、国家地震局地球物理研究所和中国地震学会《地震学报》编辑部,共同承担这套声像教材的转录和文字整理工作。

这套教材包括六讲,其中前三讲为地震波分析,系公用部分;后三讲为地震波应用,系应用专题部分。这六讲内容前后贯通,有一定联系,因而可以作为地震波分析培训的通用教材,也可以每讲单独使用。例如,作为基础培训班,宜选用第一、二、三讲,介绍地震波的理论、分析和参数计算;若作为从事某一方面应用的人员培训,如“大震速报”、“诱发地震”、“深井观测”,亦可选择第四、五、六讲的相关内容进行讲授。教材中,每讲之后有一个小结和思考题;还安排几个电算演示;最后,给出参考文献,供希望深入的同志进一步学习。

这本教材(包括文字和声像)是在国家地震局预测预防司和人事教育司共同指导和监督下完成的。陈建民副司长和章思亚副司长,徐京华、李志雄处长和宁为民、潘怀文、高荣胜副处长等,为教材的摄制、编写和推广使用,给予很多指示和帮助。杨晓莲负责全书图件的清绘。朱选同志参与了这项工作的筹划和总校。谨在此一并致以谢意。

1997年10月

目 录

第一讲 地震波动理论

1 波的基本概念	(1)
2 地球内部结构	(13)
3 理想介质中的地震波	(16)
4 实际介质中的地震波	(26)
5 散射系数的计算	(31)
第一讲小结	(41)

第二讲 地震记录分析

1 地震记录图	(42)
2 震相识别方法	(50)
3 震相的运动学参数	(56)
4 震相的动力学参数	(60)
5 模拟记录与数字记录	(63)
第二讲小结	(72)

第三讲 地震参数计算

1 地震基本参数计算	(73)
2 震源几何参数计算	(83)
3 震源物理参数计算	(87)
4 地球结构参数计算	(90)
5 工程地震参数计算	(101)
第三讲小结	(110)

第四讲 大震速报的地震波分析

1 大震速报系统	(111)
2 大震速报震相分析	(116)
3 大震速报定位软件	(127)
4 大震速报震级讨论	(132)
5 大震速报图集的编纂	(137)
6 大震速报工作的发展	(138)
第四讲小结	(139)

第五讲 深井观测的地震波分析

1 深井地震观测与分析的概况	(140)
2 深井观测地震波的运动学与动力学特征	(147)
3 深井观测地震波的理论分析	(156)
4 深井观测地震波的分析	(167)
5 深井观测地震波的初步应用	(175)
第五讲小结	(185)

第六讲 诱发地震的地震波分析

1 天然地震与诱发地震	(186)
2 油田诱发地震	(189)
3 水库诱发地震	(194)
4 矿山诱发地震	(201)
5 中尺度地震预报实验场	(216)
第六讲小结	(219)

参考文献	(220)
------------	-------

第一讲 地震波动理论

地震波的激发和传播理论，是地震分析的基础。本讲重点就波的基本概念、地球内部结构、理想介质和实际介质中的波动现象加以介绍，最后就波在成层介质中传播的散射系数问题加以讨论。本章内容请参考书末所列文献[1]~[3]。

1 波的基本概念

1.1 固体的弹性、应力和应变

1.1.1 应力

应力是指物体的内部断面 ΔS 上受力为 ΔF ，当 ΔS 趋于零时 $\Delta F/\Delta S$ 的极限

$$P = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta F}{\Delta S} \right) \quad (1-1)$$

对物体任一点 p 的应力进行分析时，常用直角坐标系里 9 个应力分量来描述。例如，取一个四面体，所考虑的点 p 位于四面体的一角，如图 1-1 所示。该四面体的三个面平行于坐标面。因四面体处于平衡状态，故可用 3 个面的应力分量进行描述。3 个面上都存在着垂直于该面的正应力和平行于该面的剪应力，而剪应力又可沿两个坐标轴方向分解。9 个应力分量可写成如下的矩阵形式，称为应力张量：

$$\begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy} & P_{xz} \\ P_{yx} & P_{yy} & P_{yz} \\ P_{zx} & P_{zy} & P_{zz} \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

应力分量符号的第一个下标表示相应的平面，第二个下标表示应

力分量的方向。例如： P_{xx} 表示平面与 x 轴垂直，力的方向沿 x 轴方向，故表示法向力； P_{xy} 表示平面与 x 轴垂直，力沿 y 方向，故表示剪切应力。

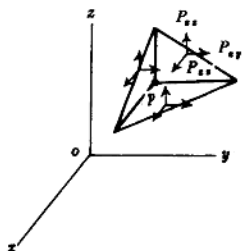


图 1-1 应力的描述

由于小体元无转动，因此 $P_{xy} = P_{yx}$, $P_{xz} = P_{zx}$, $P_{yz} = P_{zy}$ ，即 9 个应力分量中只有 6 个是独立的。

1.1.2 应变

物体的形变可以表示为某些线段的伸长或缩短及扭转时角度的变化。物体内部某点的形变称为应变。对物体内部任一点 p 的应变进行分析，也是用直角坐标系里的 9 个应变分量来描述的。例如，在 p 点取一个正平行六面微分体，如图 1-2 所示。那么沿 x 轴方向的应变分量为

$$\varepsilon_{xx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta u}{\Delta x} \right) \quad (1-3)$$

式中， Δx 是六面体沿 x 轴方向的长度， Δu 是 Δx 的伸长量。见图 1-3。除了沿坐标轴方向的应变分量外，还有剪切应变分量，例如：在垂直于 z 轴的平面上，由 Δx 和 Δy 组成的矩形的变形。在图 1-4 中，矩形 $ABCD$ 变形后为 $A'B'C'D'$ 。 $\frac{\Delta u}{\Delta y} = \sigma_x$ 表示 Δy 线段在 x 轴方向的偏转量， $\frac{\Delta v}{\Delta x} = \sigma_y$ 表示 Δx 线段在 y 方向的偏转量。

$$\tau_{xy} = \sigma_x + \sigma_y = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \left(\frac{\Delta u}{\Delta y} + \frac{\Delta v}{\Delta x} \right)$$

这样，可以类似地写出其它应变分量。把 9 个应变分量写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \varepsilon_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

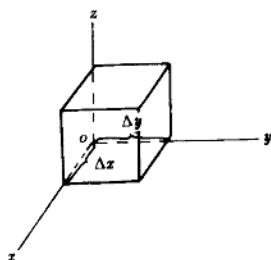


图 1-2 应变的描述

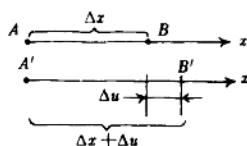


图 1-3 拉伸的描述

显然 $\tau_{yx} = \tau_{xy}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, 因此, 应变分量中也只有 6 个是独立的。

1.1.3 应力与应变的关系

在微小形变情况下, 应力与应变成正比, 应力分量与应变分量可按下面的关系式互相表示, 这些关系式常称为本构关系,

$$\begin{cases} P_{xx} = \lambda\theta + 2\mu\epsilon_{xx} \\ P_{yy} = \lambda\theta + 2\mu\epsilon_{yy} \\ P_{zz} = \lambda\theta + 2\mu\epsilon_{zz} \\ P_{xy} = \mu\tau_{xy} \\ P_{yz} = \mu\tau_{yz} \\ P_{zx} = \mu\tau_{zx} \end{cases} \quad (1-5)$$

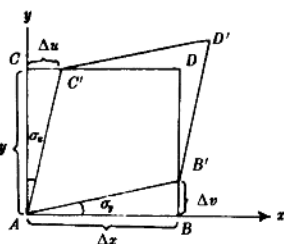


图 1-4 剪切的描述

式中, λ 是拉梅常数, μ 是切变模量, θ 是体积应变, 它表示物体在 x, y, z 轴方向上的膨胀或压缩之和

$$\theta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} \quad (1-6)$$

1.1.4 弹性常数

表示应变与应力之间关系的弹性常数, 仅与物体的物理性质有关。对于弹性性质的各向同性体, 只有两个独立的弹性常数。

常用的弹性常数有

$$\begin{cases} \mu = \frac{F/A}{\varphi} \text{ (切变模量)} \\ K = \frac{F/A}{-\Delta V/V} \text{ (体变模量)} \\ E = \frac{F/A}{-\Delta L/L} \text{ (杨氏模量)} \\ \nu = \frac{-\Delta d/d}{\Delta L/L} \text{ (泊松比)} \end{cases} \quad (1-7)$$

式中, F 表示应力, A 表示受力单元面积, φ 表示偏转量(角度), L 表示单元长度, V 表示单元体积, 因此 μ , K , E 三个常数的分子表示单元受力, 分母表示相对变形。 d 表示柱状单元体截面的直径, 泊松比 ν 表示柱状单元体受力后横向相对变形与纵向相对变形的比值。常用的换算关系有

$$\begin{cases} K = E/[3(1-2\nu)] \\ \lambda = \nu E/[(1+\nu)(1-2\nu)] \\ \mu = E/[2(1+\nu)] \end{cases} \quad (1-8)$$

其中的 λ , μ 称拉梅常数。对于实际的材料, 弹性常数 E 和 ν 可以直接测定。

1.2 简谐振动与简谐波

1.2.1 简谐振动

弹性物体受外力作用时, 内部产生的应力使质点在平衡位置的周围作往返运动。质点的受力与变形成正比

$$f = -kx \quad (1-9)$$

式中, x 表示质点与平衡位置的偏离量, “-”号表示受力方向总与偏离方向相反, k 为弹性常数。按照牛顿定律 $F=ma$, 上式可写成

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 x \quad (1-10)$$

其中, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, 表示自由振动的圆频率。方程的解为

$$x = A \cos(\omega_0 t + \sigma) \quad (1-11)$$

由此可知质点的位移量可表示成时间的余弦函数, 因而是简谐振动。

当质点振动受到阻尼 $f' = -\gamma \frac{dx}{dt}$ 时, 质点的运动满足

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = f + f' = -kx - \gamma \frac{dx}{dt}$$

质点运动方程为

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 x - 2\beta \frac{dx}{dt} \quad (1-12)$$

解为

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \alpha) \quad (1-13)$$

其中, γ 为阻尼系数

$$2\beta = \frac{\gamma}{m} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (\text{衰减周期})$$

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (\text{固有周期}) \quad (1-14)$$

可见, $T > T_0$, 说明有阻尼时的衰减周期大于自由振动时的固有周期。

1.2.2 简谐波

振动沿空间的传播即为波动, 比较如下:

$$\text{振动方程} \quad u(t) = A \sin \omega t$$

$$\text{波动方程} \quad u(x, t) = A \sin \omega(t - \frac{x}{v_x})$$

式中, u 表示位移, 在波动方程中 v_x 表示沿 x 轴方向的传播速度, 若把方程中的 x 换成 y 或 z , 把 v_x 换成 v_y 或 v_z , 则分别表示沿 y 或 z 方向的波动。振动方程描述质点位移随时间的变化, 而波动方程除此之外还有空间的概念, 描述空间各点的质点振动随时间的变化。

波速实际上表示能量、位移、加速度等质点振动信息的传播速度。对于频率单一的振动的传播称为单色波, 其波速称为相速度。

在上列波动方程中, 若把正弦函数的相角记为

$$\psi = \omega(t - x/v)$$

当 $u(x, t)$ 改变为 $u(x + dx, t + dt)$ 时

$$\psi = \omega(t + dt - \frac{x + dx}{v}) \rightarrow v = \frac{dx}{dt}$$

当空间位置不变而时间增加 T 时, 即 $u(x, t)$ 变为 $u(x, t + T)$, 那么相角正好改变

$$2\pi\psi + 2\pi = \omega(t + T - \frac{x}{v}) \rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega}$$

当时间不变(同一时刻)而位置改变 λ 时, 正好相角改变 2π , 那么

$$\psi + 2\pi = \omega(t - \frac{x}{v} + \frac{\lambda}{v}) \rightarrow \lambda = \frac{2\pi v}{\omega} = Tv$$

以上推导出的 v 就是波速, T 是质点振动的周期, λ 是波长, 相距为 λ 的质点, 在波的传播过程中, 质点的振动具有同步性。

1.2.3 振动的合成与分解

设有两个互相垂直的振动, 具有相同的频率 ω , 振动方程为

$$x = A_1 \cos(\omega t + \alpha_1)$$

$$y = A_2 \cos(\omega t + \alpha_2)$$

可导出

$$(\frac{x}{A_1})^2 + (\frac{y}{A_2})^2 - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\alpha_2 - \alpha_1) = \sin(\alpha_2 - \alpha_1)$$

合成的结果如下:

当 $\alpha_2 - \alpha_1 = 0$ 或 $\alpha_2 - \alpha_1 = \pi$ 时, 有

$$y = \pm \frac{A_2}{A_1} x \quad (\text{质点作直线运动})$$

当 $\alpha_2 - \alpha_1 = \frac{\pi}{2}$ 或 $-\frac{3}{2}\pi$ 时, 有

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1 \quad (\text{质点作顺时针椭圆运动})$$

当 $\alpha_2 - \alpha_1 = -\frac{\pi}{2}$ 或 $\frac{3}{2}\pi$ 时, 有

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1 \quad (\text{质点作逆进椭圆运动})$$

复振动也能够分解为许多振幅及频率不相同的简谐振动。如周期为 2π 的函数 $x = F(\omega t)$ 可以用傅里叶级数分解为

$$x = A_0 + A_1 \cos \omega t + A_2 \cos 2\omega t + A_3 \cos 3\omega t + \cdots + \\ B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + B_3 \sin 3\omega t + \cdots$$

当 x 是奇函数时, 系数 $A_1 = A_2 = A_3 = \cdots = 0$; 当 x 是偶函数时, 系数 $B_1 = B_2 = B_3 = \cdots = 0$, 这些系数可按一定公式算出。这种分解方法也称 FT 方法。随着计算机应用的发展, 实际计算时采用快速傅里叶变换方法, 简称为 FFT 算法。对于 FT 和 FFT 方法的详细介绍, 可查阅有关的专著。

1.3 波的传播、波的干涉、相速度与群速度

1.3.1 波的传播

由本构关系和牛顿第二定律 $F = ma$ 可以导出波动方程

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \\ \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \\ \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \end{cases} \quad (1-15)$$

其中

$$\theta = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (\text{体应变})$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1-16)$$

u, v, w 表示直角坐标系里三个方向的位移, λ, μ 是弹性常数, ρ 是密度。

以上方程的左边是描述质点的运动, 而右边描述质点的受力状况。

由波动方程可以导出如下结果:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = v_p^2 \nabla^2 \theta \quad (1-17)$$

和

$$\frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} = v_{s_i}^2 \nabla^2 w_i \quad i = x, y, z \quad (1-18)$$

其中

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (\text{纵波速度}) \quad (1-19)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (\text{横波速度}) \quad (1-20)$$

1.3.2 波的干涉(合成)

波的干涉或者说波的合成, 其实是振动的叠加, 叠加的结果或相长或相消, 或发生谐振。主要的干涉现象有:

(1) 频散现象。这是波在成层介质中传播时, 由于反射、折射形成的在成层介质中或分界面处的干涉现象。例如: 正频散现象, 表现为长周期的波速度大, 提前到达; 而短周期的波速度小, 滞后到达。

(2) 聚焦现象。这是在介质强弱速度梯度带交错区发生的干涉现象, 犹如放大镜使太阳光线聚焦一样使波的能量聚集。例

如：地震波 PKP_1 、 PKP_2 、 PKS 、 SKP 在震中距 $146^\circ \sim 187^\circ$ 的变化，表现为聚焦区的地震波振幅比正常时大得多。

(3) 衍射现象。这是在界面上发生的干涉现象。例如 P_{diff} 波就是发生在地幔底面的衍射波。

1.3.3 群速度与相速度

面波是纵波、横波遇地层界面干涉而成的合成波。合成振动的传播，是以最大峰值的传播速度为特征。最大峰值的传播速度称为群速度，它是不同频率和不同速度的振动的叠加结果。各简谐波的速度称为相速度。例如，两个频率接近 $(\omega \pm \Delta\omega)$ 和速度接近 $(v \pm \Delta v)$ 的波的叠加可以得到

$$f(x, t) = 2A \cos \Delta\omega \left[t - \frac{x}{G} \right] e^{i\omega(t - \frac{x}{v})}$$

其中

$$G = \frac{\Delta\omega}{\Delta(\omega/v)}$$

由上式可以看出， v 是相位的传播速度， G 是最大振幅的传播速度，分别称为相速度和群速度。用微分代替增量，群速度

$$G = \frac{d\omega}{d(\omega/v)} = \frac{d(vk)}{dk} = v + k \frac{dv}{dk} \quad (1-21)$$

式中， $k = \omega/v$ 是波数。

1.4 波的偏振

P 波是质点沿着射线方向(波传播方向)振动和传播的波，S 波是质点在垂直于射线的平面内振动的波。S 波质点的振动是由 SH 和 SV 两个振动分量合成的，这两个分量称为 S 波的偏振。图 1-5 是 S 波偏振的示意图。SH 是垂直于入射面的水平振动，SV 是在入射面内的振动，它与 SH 和射线都垂直。研究表明，在孕震区内 SH 和 SV 的速度有分离现象。

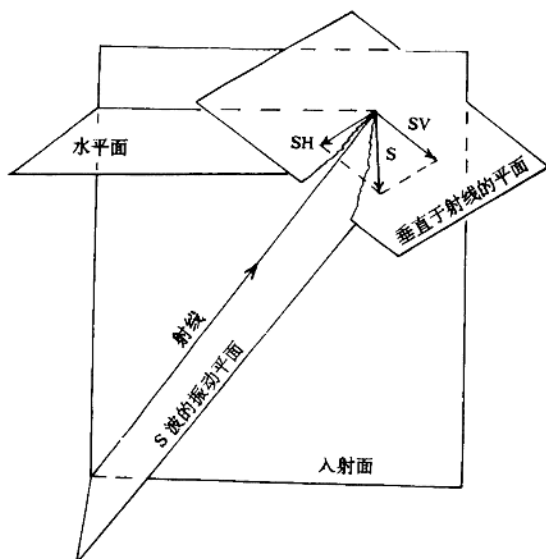


图 1-5 S 波偏振示意图

1.5 射线方程

射线理论是波动理论的高频近似，表征波的行进方向。

1.5.1 平界面射线方程

$$\frac{\sin i}{v} = \frac{\sin i'}{v'} \quad (1-22)$$

方程表示入射波的入射角 i 及波速 v 与反射(或折射)波的反射(或折射)角 i' 及波速 v' 间的关系，参见图 1-6 所示。

1.5.2 球界面射线方程

$$\frac{r_1 \sin i_1}{v_1} = \frac{r_2' \sin i_2'}{v_2'} = \dots = p \quad (1-23)$$