地震
分析基础

张　诚　编著

地震出版社

地 震 分 析 基 础

张　诚　编著

地 震 出 版 社

1 9 8 6

内 容 提 要

地震分析是地震学研究的基础。本书根据作者及同行三十年来的工作实践，以震相分析为主，介绍了地震分析的基础知识、原理和行之有效的工作方法，并简要地讨论了测定地震基本参数（时间、地点、震级）的方法，包括某些新近的进展。

本书可供地震观测台站和地震图的分析研究人员使用，亦可供大、中专院校有关专业师生教学和实验参考。

地震分析基础

张　诚　编著

责任编辑：蒋浩旋

地震出版社出版

北京复兴路63号

北京丰华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168　1/32　6.375印张　164千字

1986年3月第一版　1986年3月第一次印刷

印数 0001—2350

统一书号：13180·300　　定价：1.85元

前　言

地震发生时，从震源区向四周辐射出地震波。当波遇到地球内部不同的构造界面和地面时，又会产生折射、反射、绕射和转换等现象，形成多种多样的地震波。这些波携带着震源和传播路径上地球内部构造的信息到达观测点，被各种类型地震仪拾取和记录。地震分析的首要内容就是进行震相分析，其目的在于从地震图上辨认、研究各种地震波的运动学和动力学性质，确定波的运动学和动力学参数，然后由这些参数测定震源位置、发震时刻和强度，确定震源机制等。因此，地震分析在地震学和地震预报研究中具有十分重要的作用，它是深入研究震源性质和地球内部构造，研究地震的时、空、强活动图象，了解地震孕育、发生、发展的活动规律，寻求地震学前兆进行以震报震等工作的基础。

为了满足我国数以百计的地震台站及综合地震分析处理的需要，作者曾于 1972 年编写了«地震测震讲义(分析部分)»。当时正值此类资料青黄不接，因此它在我国西北及其它省区的地震台专业干部培训中受到欢迎。为了进一步适应读者对地震分析知识和技术的需求，作者在原«讲义»基础上做了较大增删，写就了本书。本书在理论和应用两方面的内容上都做了进一步的充实和提高，特别是结合我国地震台网的观测实际和作者及同行三十年来的分析工作，给出了多幅我国典型的板内地震图。书中介绍了近震、远震、浅震、深震波图的主要特征，着重叙述了识别震相的方法，举例说明了主要震相的判别，并简明扼要地讨论了近震、远震定位的基本方法、震级测定方法及地震强度标定新方法等。

地震学是一门边缘学科，属于这个学科的地震分析，与物理学、数学、地球物理学、地质学等都相关联。本书由于篇幅所

限，难于详细讨论各种问题，而只能简要地叙述有关问题。本书比较浅显，适于具有中等或中专文化程度的读者阅读。

地震分析是一项细致而繁杂的基本技术。一般来讲，需要较多的扎实的实践。有经验的地震分析工作者，他们具有识别来自全球各个地震带地震波特征的非凡本领和熟练的处理技术，这些都渊于“实践—理论—再实践”的过程。这是掌握任何一门科学技术的诀窍，要熟悉地震分析技术也绝不例外。

限于作者的水平和涉猎资料的局限性，书中错误和遗漏之处在所难免，敬请读者和同行们予以指正。

张 诚

1984.12

目　　录

第一章 地震波基础知识简介

地震波是弹性介质振动的传播，研究地震波采用了研究光波和声波的各种几何原理和定律，因而，在介绍地震波分析及其应用之前，首先扼要地介绍弹性形变、振动和波的一般原理。

第一节 弹性形变、振动和波

一、应力与形变的关系[1,2]

固体受外力的作用后，其内部的质点偏离原来的位置，物体表现出体积和形状的变化。外力消除后，物体内部产生的应力使质点又恢复到原来的位置，物体又恢复原有的体积和形状。物体的这种变化称为弹性形变。具有上述物理性质的物体，称为弹性体。对于各个方向上弹性性质相同的物体，当力和形变都很小时，它们之间的关系可由虎克定律确定，形变与力成正比。

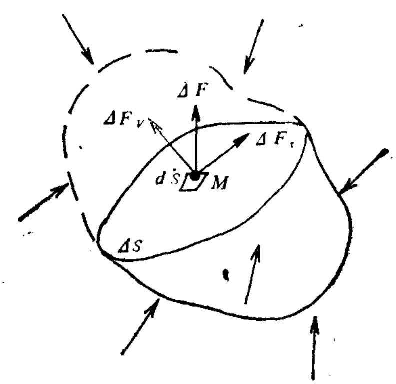

图 1-1 弹性体内任一点处的应力

1. *应力*

物体受力复杂时，如图 1-1，内部断面 ΔS 上的合力为 ΔF。各点受力是不均匀的，力是逐点改变的。当 ΔS 缩小于 M 点，即 ΔS 趋近于零时，$\Delta F/\Delta S$ 的极限 σ 称为 M 点的应力，

$$\sigma = \lim_{\Delta S \to 0}\left(\frac{\Delta F}{\Delta S}\right) = \frac{dF}{dS}. \tag{1-1}$$

合力 ΔF 在 ΔS 面的法线方向上的分量为 ΔF_V，在切线方向

上的分量为ΔF_{τ}， 所以，法线方向的正应力σ_{ν}和切线方向的切应力σ_{τ}为

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{\nu}&=\lim_{\Delta S\to 0}\left(\frac{\Delta F_{\nu}}{\Delta S}\right);\\ \sigma_{\tau}&=\lim_{\Delta S\to 0}\left(\frac{\Delta F_{\tau}}{\Delta S}\right).\end{aligned}\right\}\tag{1-2}$$

分析应力可取三度直角坐标系确定物体各点的位置，各点的应力可以用在各坐标轴上的分量来表示，各点的应力是不相同的；它是该点坐标的函数。对于物体中包围某点的正平行六面微分体，各面上的应力分量如图 1-2 所示，与物体各面垂直的是正应

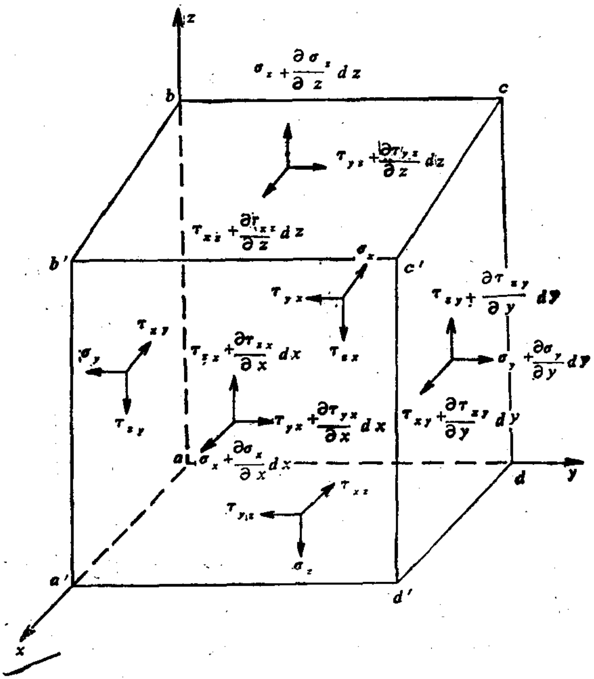

图 1-2 正平行六面体各面上的应力分量

力，与各面平行的是切应力。物体中任一点的应力状态，由包围该点的各个面上的 9 个应力分量表示，即由式(1-3)表示，该式称

为应力张量。因对它的主对角线对称的切应力相等[式(1-4)]，为对称张量，因此 9 个应力分量只有 6 个是独立的。

$$
T=\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \tag{1-3}
$$

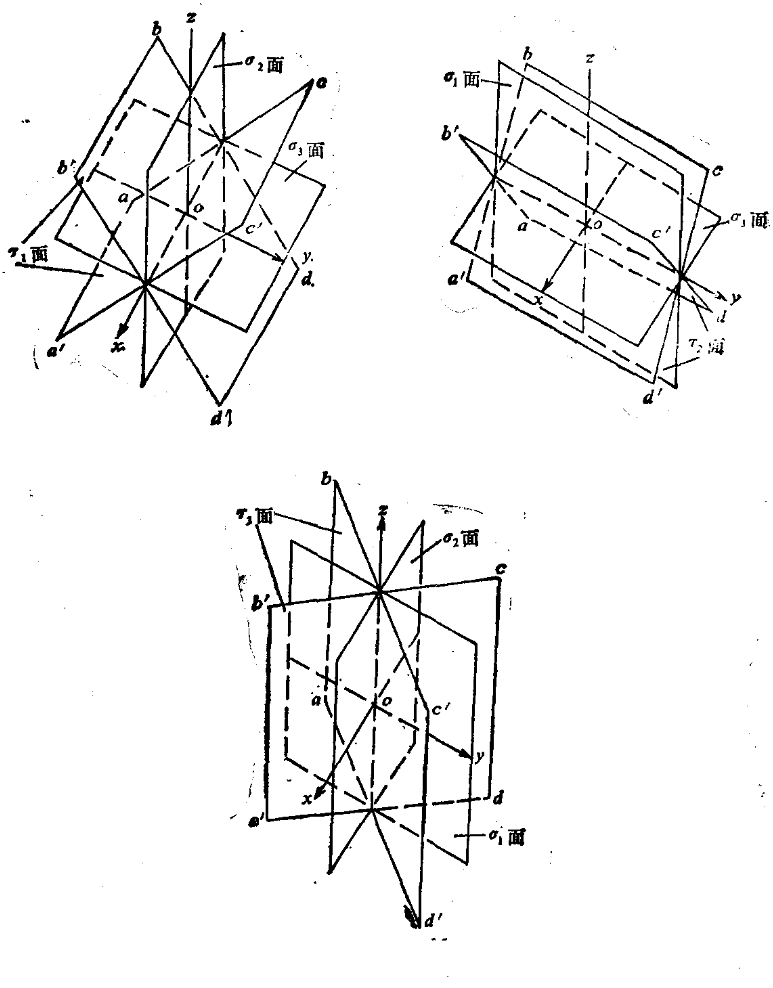

图 1-3　最大切应力面及相应的主面

$$\left.\begin{aligned}\tau_{xy}&=\tau_{yx},\\ \tau_{xz}&=\tau_{zx},\\ \tau_{yz}&=\tau_{zy}.\end{aligned}\right\}\tag{1-4}$$

在切应力等于零的面上的正应力，称为主应力。主应力是应力分量中的极值，有最大主应力(张应力)、最小主应力(压应力)和中等主应力。主应力作用的面称为主面，三个主面是互相垂直的。最大切应力面共有三对，它们分别通过 x、y、z 轴，并且平分相应的主面间的夹角。图 1-3 表示出最大切应力面及其相应的主面。最大切应力等于相应的主面上的主应力差之半，即

$$\left.\begin{aligned}\tau_1&=\pm\frac{1}{2}(\sigma_2-\sigma_3),\\ \tau_2&=\pm\frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_3),\\ \tau_3&=\pm\frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_2).\end{aligned}\right\}\tag{1-5}$$

2. 形变

物体的形变总可以表示为某些线段的伸长或缩短，及某些角度的变化。我们先来看三种简单的形变。

(1) 线形变

如图 1-4，两条构造相同的棒，其长为 L，横截面积为 S，在棒两端加拉力 f_n，结果棒的长度增加一量 ΔL(图 1-4 a)。ΔL 为绝对伸长，这种形变称为纵向伸长。若取 f_n 为压力，则 f_n 为负，棒缩短 ΔL，ΔL 为负(图 1-4 b)。同一力施于不同长度的棒上，产生的纵伸长也不一样，所以，用 $e=\Delta L/L$ 表示形变，称为相对伸长，它表示物体的线增长。

(2) 角形变

如图 1-5，弹性体的下面被固定，施力 f_t 于物体的上表面，则物体内层与层发生相对移动，垂直于作用力的任一平面，例如 ab 面都转动一微小角度 φ，这种形变称为切变。切变时可以近

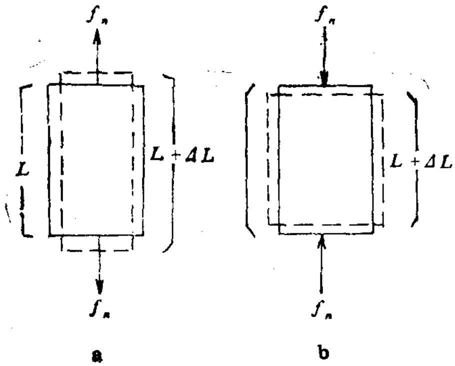

图 1-4 线形变

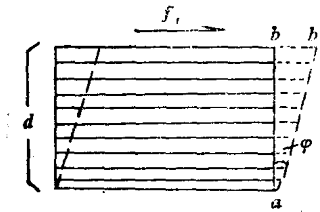

图 1-5 角形变

似地认为物体的体积不变，只改变其形状。φ 角微小，它表示相对的角形变，

$$\varphi=\frac{bb'}{d}. \tag{1-6}$$

(3) 体积形变

体积形变是指物体只发生体积变化，不发生形状变化。如图1-6，在活塞上加力f_n，活塞向下压时，物体在液体中受到各方向上的等压力，体积缩小了ΔV，它是体积的绝对形变。$\Delta V/V$ 是物体体积的相对形变。

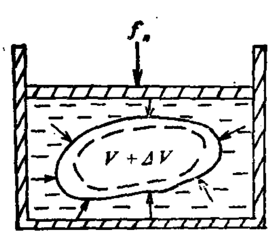

图 1-6 体积形变

物体内部各个质点的位移是不相同的，是点的坐标的函数，可由 x、y、z 轴向的位移分量 u、v、w 表示。图 1-7 表示物体中一正平行六面微分体及它的形变在各坐标面上的投影。各形变分量表示为

$$
\left.\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x},\\
\varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y},\\
\varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z},\\
\gamma_{xy} &= \alpha_{yx}+\alpha_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y},\\
\gamma_{yz} &= \alpha_{zy}+\alpha_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z},\\
\gamma_{zx} &= \alpha_{xz}+\alpha_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}.
\end{aligned}\right\} \tag{1-7}
$$

ε_x、ε_y、ε_z 为沿各坐标轴的相对伸长。$\varepsilon_x>0$，$\varepsilon_y>0$，$\varepsilon_z>0$ 时，表示沿各轴伸长，反之，是缩短。γ_{xy}、γ_{yz}、γ_{zx} 是与各坐标面平行的平面内的形变角，当 $\gamma_{xy}>0$，$\gamma_{yz}>0$，$\gamma_{zx}>0$ 时，各坐标轴正向间的夹角被减小。

物体的转动分量由转角的两倍表示，为

$$
\left.\begin{aligned}
\omega_x &= 2\,\beta_x = \frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z},\\
\omega_y &= 2\,\beta_y = \frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x},\\
\omega_z &= 2\,\beta_z = \frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}.
\end{aligned}\right\} \tag{1-8}
$$

若 $\alpha_{zy}>\alpha_{yz}$，$\alpha_{xz}>\alpha_{zx}$，$\alpha_{yx}>\alpha_{xy}$，则转角 β_x、β_y、β_z 为正，物体的对角线 og、oe、ob 呈逆时针转动(图 1-7)。

物体中任一点的形变状态可由位移分量 u、v、w 的 9 个一阶偏导数表示，即

$$
\begin{vmatrix}
\frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z}\\
\frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z}\\
\frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z}
\end{vmatrix} \tag{1-9}
$$

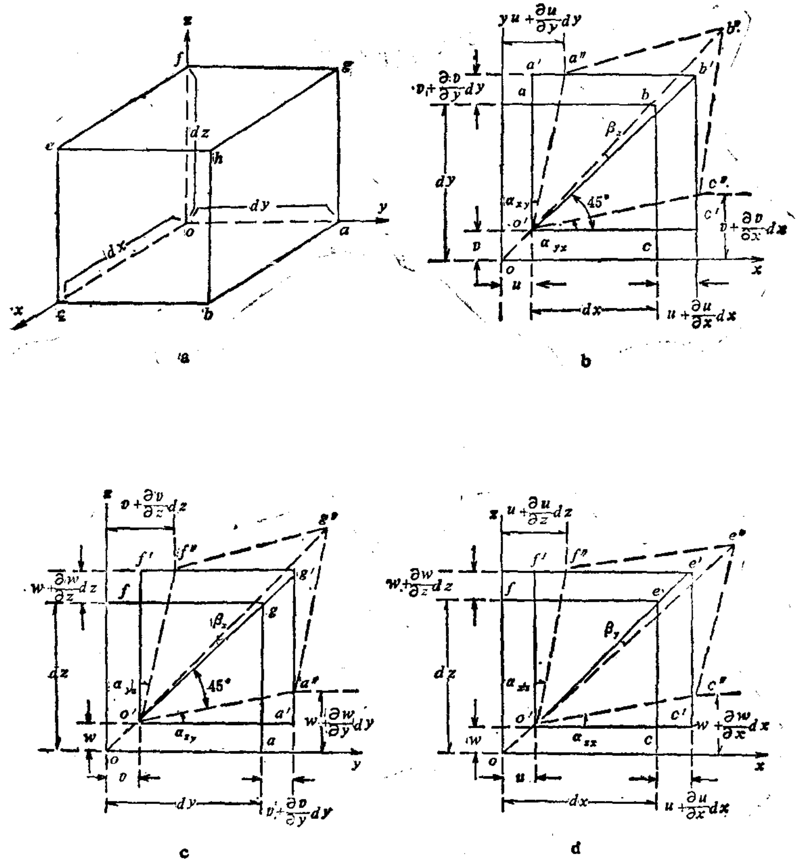

图 1-7 物体内一正平行六面微分体及形变分量的投影

上式是一个不对称张量，它是物体纯形变的对称张量与转动的反对称张量之和。

3．应力与形变的关系

物体在微小形变情况下，应力与形变成正比。用应力分量表示形变分量和用形变分量表示应力分量的关系式如下：

$$
\left.\begin{aligned}
e_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \\
e_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)], \\
e_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]; \\
\gamma_{xy} &= \frac{1}{\mu}\tau_{xy}, \\
\gamma_{yz} &= \frac{1}{\mu}\tau_{yz}, \\
\gamma_{zx} &= \frac{1}{\mu}\tau_{zx}.
\end{aligned}\right\} \tag{1-10}
$$

$$
\left.\begin{aligned}
\delta_x &= \lambda\theta + 2\,\mu e_x, \\
\delta_y &= \lambda\theta + 2\,\mu e_y, \\
\delta_z &= \lambda\theta + 2\,\mu e_z; \\
\tau_{xy} &= \mu\gamma_{xy}, \\
\tau_{yz} &= \mu\gamma_{yz}, \\
\tau_{zx} &= \mu\gamma_{zx}.
\end{aligned}\right\} \tag{1-11}
$$

式中：E是杨氏模量；ν是泊松比；μ是切变模量；λ是拉梅系数；θ是体积形变量，它表示为物体在x、y、z轴方向上的膨胀或压缩之和，

$$\theta = e_x + e_y + e_z. \tag{1-12}$$

4．弹性常数

表示形变和应力之间关系的弹性常数，仅与物体的物理性质有关。对于弹性性质在各个方向上不相同的各向异性体，有 21 个常数；对于任何方向上弹性性质相同的各向同性体，只有两个独立的弹性常数。通常用下列五个弹性常数中的任何两个表示形变和应力之间的关系，这些常数与纵波速度V_P和横波速度V_S及物体的密度ρ之间的关系[14]表示如下：

$$
\left.\begin{aligned}
E&=\frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}=\rho\,\frac{3V_P^2-4V_S^2}{(V_P/V_S)^2-1},\\
\nu&=\frac{\lambda}{2(\lambda+2\mu)}=\frac{1}{2}\left[1-\frac{1}{(V_P/V_S)^2-1}\right],\\
\mu&=\frac{E}{2(1+\nu)}=\rho V_S^2,\\
\lambda&=\frac{E\nu}{2(1+\nu)}=\rho(V_P^2-2V_S^2),\\
K&=\lambda+\frac{2}{3}\mu=\rho\left(V_P^2-\frac{4}{3}V_S^2\right).
\end{aligned}\right\}\tag{1-13}
$$

式中：E 为杨氏模量，与单位截面积的柱体的体伸长及缩短有关；ν 为泊松比，是柱体截面的相对缩短与柱体长度的相对伸长之比，$0<\nu<0.5$；μ 是切变模量，与弹性体的纯切变有关；λ 称为拉梅系数；K 是体积膨胀系数，与弹性体的体积变化有关。

二、振动的衰减和叠加[3]

1．振动

物体受外力作用，如果在某平衡位置周围反复运动，这种运动形式叫做振动。例如，“摆”的振动。与此类似，弹性物体受外力作用，内部产生的应力使质点在平衡位置的周围作往返运动，叫做弹性振动。例如，震源力引起周围岩石内部质点的振动。

不受到阻尼作用时(例如在真空中和无内摩擦的情况下)，物体就会在其平衡点附近在一定的位移幅度内连续不停地振动，其作用力 f 与物体离开平衡位置的位移 x 成正比，与位移的方向相反，即

$$f=-Kx,$$

K 为弹性系数。考虑到力等于物体运动的加速度 $\frac{d^2x}{dt^2}$ 与质量 m 的乘积，可以得出

$$\frac{d^2x}{dt^2}=-\omega^2x,\tag{1-14}$$

式中 $\omega=K/m$。这个二阶微分方程表示物体运动的加速度与离