

陈 颢等 主编



地球科学中的新技术

DIQIU KEXUE ZHONG DE XINJISHU

地震出版社



地球科学中的新技术

陈 颢 主编

地 震 出 版 社

1 9 8 9

内 容 提 要

随着地球科学的深入发展，其研究对象从海洋转向陆地、从地球浅部转向深部。面对这种转移，需要新概念的引进和新技术的应用。本书介绍了近年发展起来的一些新技术：如空间测量技术、显微分析技术、计算机辅助层析技术（CT）等。本书重点不在介绍这些新技术的细节，而在于介绍它们在地球科学研究中的应用。

本书系高级科普读物。它一方面能使从事地球科学研究的工作者扩大眼界，了解各种新技术的原理和在解决地球科学问题中的应用；另一方面可使从事新技术开发的技术专家和工程师们了解地球科学的现状和亟待解决的前沿问题。

本书适合于地质、地球物理、地球化学、大地测量等方面工作者阅读，也可作地球科学和技术科学专业的大专院校师生的参考读物。

地球科学中的新技术

陈 颢 主编

责任编辑：宋炳忠 俸苏华

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路 63 号

中国科学技术情报研究所印刷厂 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 8 印张 215 千字

1989 年 6 月第一版 1989 年 6 月第一次印刷

印数 0001—2000

ISBN 7-5028-0243-6 / P · 158

(631) 定价：3.60 元

序

地球科学正在不断地向纵横方向发展。

所谓“纵向”发展，是指向地球深部探测方向发展，当前人类已进入空间探测的时代，卫星及航天技术的应用已使得过去“上天无路”的情况变成了“上天有路”。然而，“入地无门”的情况仍然存在。对于地球的成因、演化和组成等基础问题，目前认识还远远不够，这主要是由于对地球内部所知不多。板块构造学说使地球科学发生了革命性的变化，但目前仍然不了解其驱动机制，人们也不清楚全球范围内大型地质过程随时间的变化，而许多地质、地球物理现象如地震、火山、成矿作用、地质史上灾变事件等都与地球深部发生的各种过程密切联系着，因此，利用现代科学的各种成就，探测地球深部的情况，是目前地球科学发展方向之一。

所谓“横向”发展，是指研究的重点由海洋转向大陆及其边缘。地球的大陆部分实际上为我们提供了几乎全部的矿藏和能源资源，以及人类的生存空间。研究重点转向大陆，这不仅是因为我们对大陆可以进行更多的直接研究，更主要的是，在地球 46 亿年的历史中，演化历史 95% 的记录都保存在大陆岩石圈之中。当然，与海洋相比研究大陆更为困难，这是由于大陆历史长远，经历了多次热作用的叠加和复杂变形过程的变迁，使它的演化之谜至今难以解开。鉴于这种考虑，80 年代国际地球科学的多学科研究计划——国际岩石圈计划——把研究大陆及其边缘的岩石圈性质、动力学成因和演化作为重点，以体现地球科学发展的这一方向。

为了促进地球科学沿着这些方向发展，一个十分关键的问题是应用各种现代技术，对地球科学的重大问题联合攻关。下

面简要回顾一下近几年在地球科学中新技术应用的情况。

空间技术应用于观测地表已可达到厘米级的精度，应用全球卫星定位系统（GPS）和甚长基线干涉测量（VLBI）等方法，现在已经可以直接测量板块的相对运动和大陆漂移的速度。观测在地质构造单元中的应变积累和释放过程，使得传统的大地测量和构造物理学出现了重大飞跃。

CT技术（计算机层析术）在生物医学方面获得极大的成功，1979年诺贝尔生理学 and 医学奖，1983年诺贝尔化学奖都授予与CT技术有关的研究。同一技术两次获奖，在科学史上是不多见的。70年代末期，随着全球测震技术的进步和计算机技术的发展，CT技术开始应用于地球科学，第一次得到了地幔的三维构造模式，揭示出地幔的横向不均匀特性，显示了在大陆边缘下面地幔的细微构造。

地球化学和同位素分析技术的迅速发展以及广泛应用，使我们通过地球内部到地表之间的板块俯冲、造山作用、岩浆活动等方式的物质转化，建立起全球的三维地球化学模式，开辟了岩石圈动力学和地质年代学方面的新前景。

固体物理的理论和概念，电子显微镜分析等方法应用到传统的岩石学中，使我们可以根据岩石矿物中重结晶颗粒的大小和位错密度等微观特性，去分析地质过程中的古代应力和古代热历史，结合地质纪年方法能为解决大陆演化历史提供新的线索。

近年来发展的深部探测的新方法，起源于地球物理勘探。现已应用于研究广泛的地学问题。例如美国首先发展了大陆地壳反射地震剖面法，建立了以COCORP为代表的合作计划，开展大陆基底的地震反射剖面法探测。对软流圈电导性研究的国际合作等计划也已提出。

为了验证地壳深部探测的结果，苏联在科拉半岛钻了一口井，旨在穿透大陆地壳，目前已钻进了12 km。对取出的岩芯进行鉴定并与地表进行的深部探测结果对比，得到了许多出乎预

料的结果。例如过去把下地壳的高速层认为是玄武岩层，而实际岩芯资料表明，该层局部为长英质。目前有 10 余个国家计划应用最先进的科学技术，投资数亿美元，开展深钻计划，可以预料，这将对过去关于大陆深部构造和物质成分的认识提出新的挑战。

综上所述，新技术的广泛应用，各学科领域的相互交叉、渗透，以及大规模的合作攻关是当前地球科学发展的特点。

本书的几位编者多年来从事研究生的培养工作。我们感到在研究生培养方法方面存在着不足，一是对新技术的重视不够，对现代技术对科学发展的推动作用重视不够；二是研究生的知识面普遍不够广阔。这些不足显然会影响研究生的成长。于是产生了一个想法，由在不同领域的专家，共同开设一门课程，概括地介绍目前各种新技术的应用情况。这个想法得到了中国科学技术大学研究生院领导的支持，从而一门新课程诞生了，其讲义就构成了本书的内容。

本书主要介绍的是国际上的情况，“他山之石，可以攻玉”，我们相信，对于我国地球科学的发展，它将起到参考作用。

由于编者们的学识浅薄，编书时间亦紧促，不当之处，敬请指正。

陈 颢

目 录

测震技术及其应用	陈 颢(1)
空间技术在地球动力学和地震研究中的应用	赖锡安(25)
变形岩石显微构造分析的应用	
——深地壳和上地幔物理性状的研究	何永年(47)
年轻地质体系的年代测定	陈文寄(69)
地壳上地幔电导率探测	刘国栋(96)
CT 技术	陈 颢(121)
我国地壳变动连续观测技术	蔡惟鑫(148)
地球科学中的电子显微技术	林卓然(173)
遥感技术及其在地球科学中的应用	沈梅琴(195)
高精度重力仪及其应用	胡国庆(224)

测震技术及其应用

陈 颢

(国家地震局)

一、什么是测震技术

测震技术对于地震学家来说，就象望远镜对于天文学家；加速器对于物理学家一样重要。这是因为地震产生的地震波，可以穿透地球或沿地球表面传播很远的距离。地震波携带了有关地球内部结构、状态和构造等大量信息（图 1），有人把地震比喻成照亮地球内部的一盏明灯。目前，在其他形式波动很难深入地球内部的条件下，测震技术则成为研究地球内部问题量重要的一种技术。

测震技术是指测量地面震动的一门技术，通常包括三个方面的内容（图 2）：

1. 换能技术

测量各种地面震动参数(地面某一点运动的位移、速度和加速度等)，并将这些参数转换成电信号输出。测震技术中担任换能任务的叫做拾震器或摆。拾震器有很多不同的种类，但基本原理都是一样的——基于惯性原理。

我们以最简单的记录垂直运动的拾震器为例来说明拾震器的工作原理。拾震器由固定在地面上的支架与悬挂在弹簧上的质量块 M 组成（图 3）。当地面垂直位移为 $z(t)$ 时，质量块 M 与支架之间距离变化了 $x(t)$ ，显然 $x(t)$ 与 $z(t)$ 之间应满足运动方程：

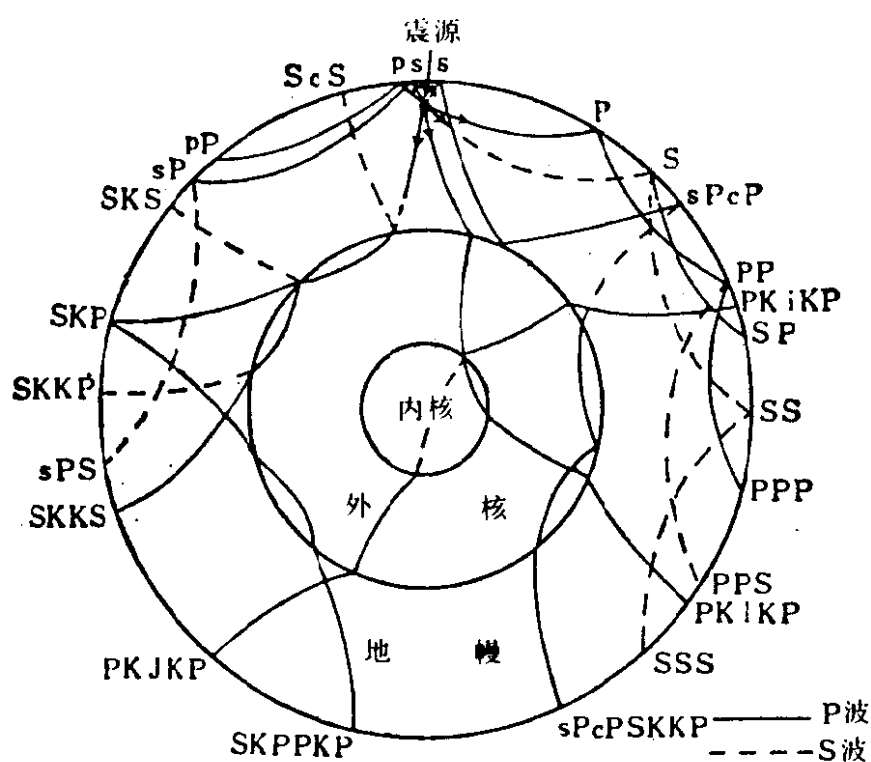
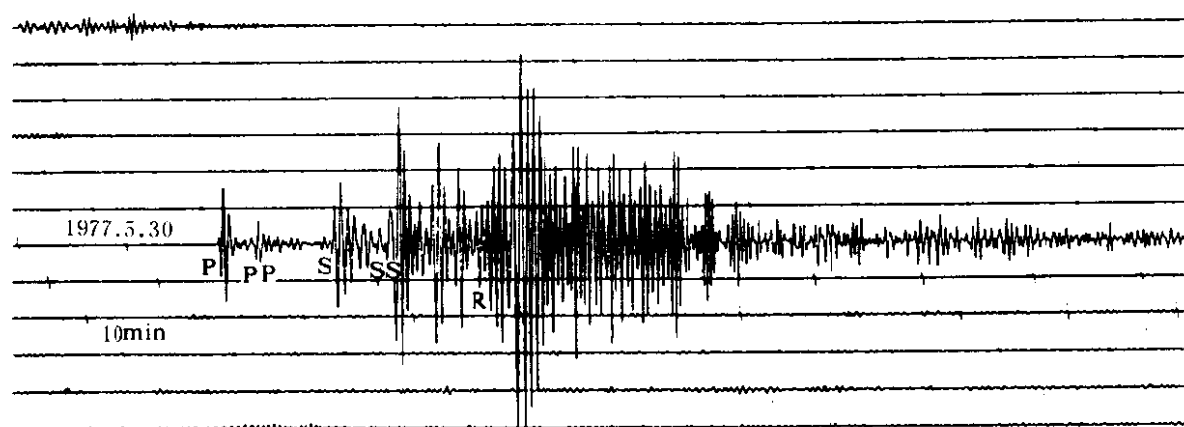


图1 典型的地震记录图

这是瑞士苏黎土地震台的一张长周期地震仪的记录图(在周期 33 s 时仪器记录为放大 2 万倍后的地面位移)。该地震图记录了 1977 年 5 月 30 日 15 时 16 分发生在阿留申福克斯群岛的一次 5.9 级地震。从图中可以清楚地看到各种震相，其中：P——地震体波；PP——经地面一次反射的 P 波；S——S 波；SS——经地面一次反射的 S 波；R——瑞利地震面波。这张地震图，无论是各震相的到时，还是记录到地面震动的幅度均与地震震源和地球结构有关，因而携带了大量有关地球的信息。

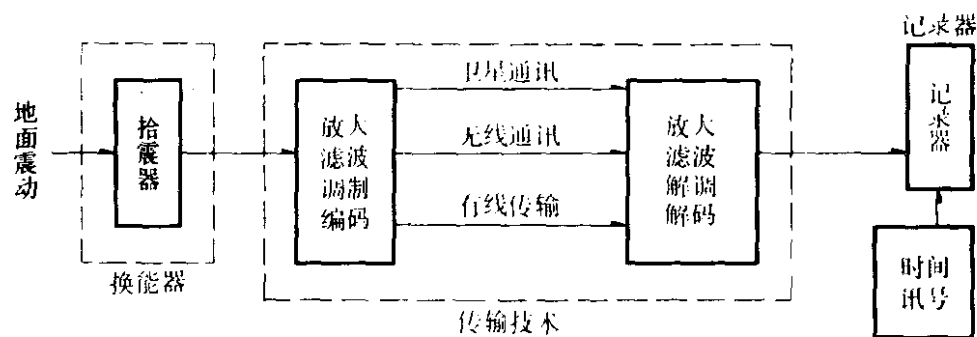


图2 测震技术的主要内容：换能器；传输技术；记录技术

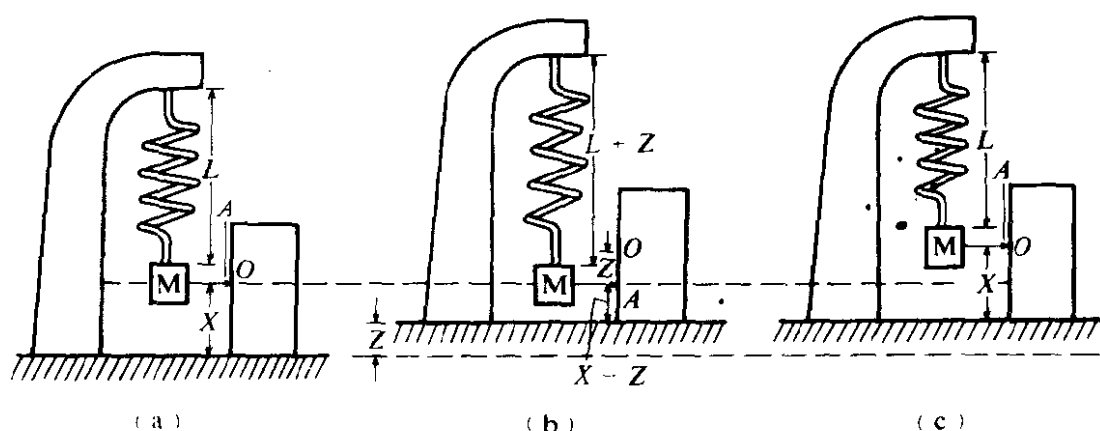


图3 拾震器工作原理图

当地面运动时，尽管支架随之运动，但质量块 M 因惯性作用保持不动，支架与质量块之间的相对运动就反映了地面运动。这种运动也就是地震波的信号

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = -m\ddot{z}, \quad (1)$$

式中 $b\dot{x}$ 代表了质量块运动过程中的阻尼力， kx 代表了弹簧的恢复力。 $m\ddot{z}$ 是惯性力。引入

$$b/m = 2\varepsilon, \quad \text{称为阻尼系数；}$$

$$k/m = \omega_1^2, \quad \text{为拾震器的固有振动频率。}$$

式(1)可以写成

$$\ddot{x} + 2\varepsilon\dot{x} + \omega_1^2 x = -\ddot{z}. \quad (2)$$

为了分析拾震器记录位移 $x(t)$ 与地面真实位移 $z(t)$ 之间的关系，

我们可以将 $x(t)$ 与 $z(t)$ 在频率域进行 Fourier 展开:

$$z(t) = \int Z(\omega) e^{-i\omega t} d\omega,$$

$$x(t) = \int X(\omega) e^{-i\omega t} d\omega,$$

式中 $Z(\omega)$, $X(\omega)$ 分别为 $z(t)$ 与 $x(t)$ 的 Fourier 频谱。代入运动方程 (2), 可以得到

$$\frac{X(\omega)}{Z(\omega)} = U(\omega) e^{-i\gamma\omega},$$

其中 $U(\omega) = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + 4\varepsilon^2\omega^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - u^2)^2 + 4Du^2}};$

$$\gamma(\omega) = \text{tg}^{-1} \frac{2\varepsilon\omega}{\omega^2 - \omega_1^2} = \text{tg}^{-1} \frac{2Du}{1 - u^2};$$

$$u = \frac{\omega_1}{\omega} = \frac{T}{T_1}, \quad D = \frac{\varepsilon}{\omega_1}.$$

$U(\omega)$, $\gamma(\omega)$ 分别叫做拾震器的幅频特性与相频特性, 如果把拾震器看作是一个线性系统, 把地面运动 $z(t)$ 看作系统的输入, 而把拾震器的相对位移 $x(t)$ 看成系统输出的话, 它们则分别代表当地面运动频率为 ω 时, 单位地面运动引起的拾震器的输出位移振幅和输出相位的偏移。图 4 给出了不同阻尼 D 情况下拾震器的幅频特性 $U(\omega)$ 与相频特性 $\gamma(\omega)$ 。

由图 4 可以看出, 当拾震器固有频率 ω_1 远小于地面运动频率 ω [即地面运动周期 $T(=2\pi/\omega)$ 比拾震器固有周期 $T(=2\pi/\omega_1)$ 小很多] 时, $U(\omega)=1$, $\gamma(\omega)=0$, 这时有 $x(t)=z(t)$ 。我们称这种拾震器为位移摆。另一方面, 当 $\omega_1 \gg \omega$ 时, 运动方程 (2) 近似为: $\omega_1^2 x = -\ddot{z}$, 这时拾震器记录的是地面运动的加速度。这种拾震器叫做加速度摆。第三种情况是拾震器具有很大的阻尼, 方程 (2) 近似为 $2\varepsilon \dot{x} = -\ddot{z}$, 积分以后为 $2\varepsilon x = -\dot{z}$, 这种拾震器称为速度摆。所谓位移摆、加速度摆或速度摆, 是指拾震器记录的幅度 $x(t)$ 分别与地面运动的位移, 加速度或速度成正比。因此只要适当地选取仪器参数, 拾震器便具有不同的反应特性。拾震器的位移可以通过电磁、电容式和压电型换能器, 变成

电信号输出。

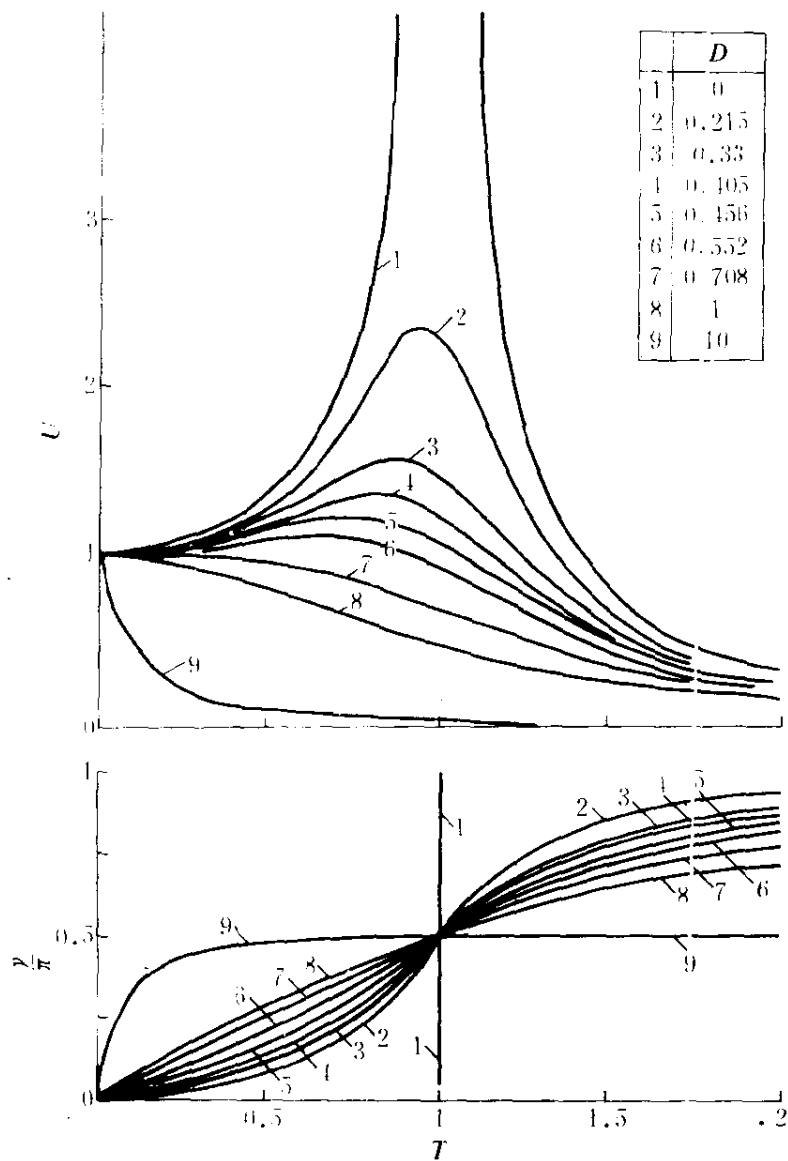


图 4 拾震器的幅频特性 $U(\omega)$ 与相频特性 $\gamma(\omega)$

2. 传输技术

将拾震器（或摆）的输出信号，传输到记录器的技术。信号可以通过有线电缆、无线电波或卫星通讯来传输。按传输过程中信号的形式，传输可以分成直接传输、调频模拟信号传输和数字化信号传输。在地震学发展的早期，地震拾震器的输出，通过一

根不长的电缆，传至记录器进行记录。拾震器和记录器基本上是放在同一地点，这种观测点我们称之为地震台。后来，科学家们把拾震器放在受干扰较小的无人地区，而信号则通过某种方式传输到另一地点进行集中记录，我们称之为地震台网。

3. 记录技术

地面震动信号经传输系统送到记录系统后，被记录下来并长期保存。承担这种任务的仪器统称记录器。按记录方式，记录器可分模拟记录器和数字记录器两大类，模拟记录器有多种，如熏烟记录器、照像记录器、（墨水）笔绘记录器和模拟磁带记录器等。而数字记录器则有数字磁带、固态存贮记录器等多种。地震记录器都配套有精确的时间服务系统，可以标出地震事件发生的时间。

以上三部分组成的整体，叫做地震仪或地震观测系统，其基本任务就是提供地面运动的真实记录，表1和图5给出了几种常用地震仪的性能指标和特性。

在这里，我们假定大多数读者的兴趣在于了解这种技术，从而应用测震技术于地球科学的各个领域，而不是准备从事测震技术本身的研究与开发。因此，我们叙述的重点不在于测震技术的细节和某些专门的技术问题，而致力于介绍其应用。本文第二部分介绍国内外测震技术（台站和台网）的情况，强调使用好国际和国内测震资料方面的问题。最后一部分，根据地震科学发展趋势的估计，对测震技术的发展作一展望，对从1985年开始的全球性测震技术更新换代——有人称之为测震技术的现代化时期，国际大规模合作计划作一概括的介绍。

二、国际和国内的测震系统， 测震资料和数据利用

本世纪以来，许多国家和地区都开展了地震观测工作。50

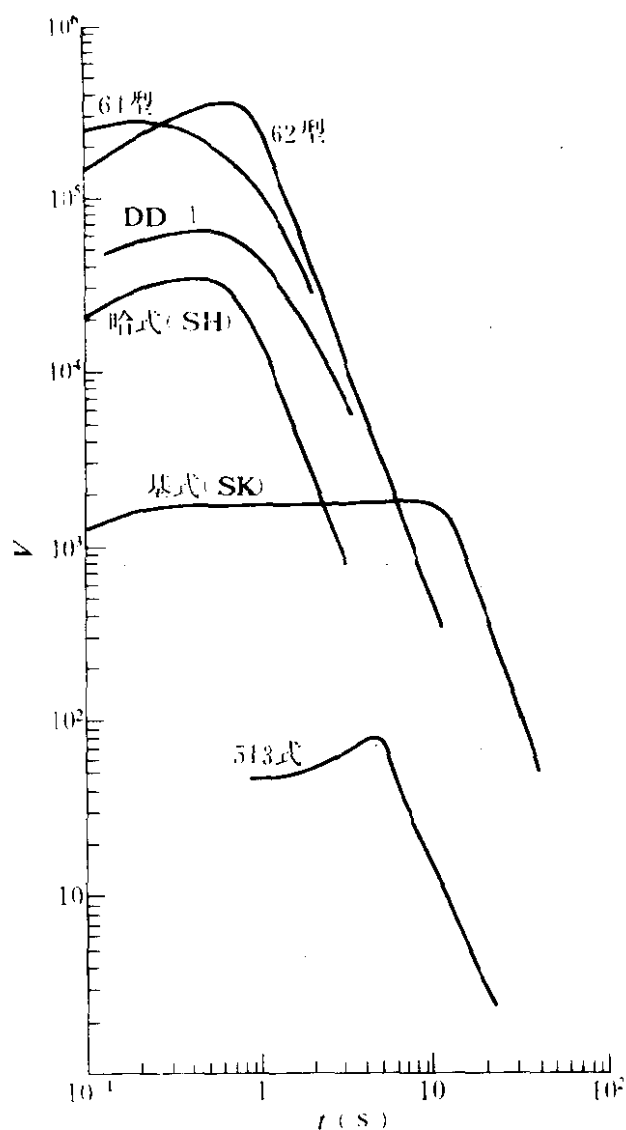


图 5 几种常用地震仪的放大倍率曲线

年代以前，观测工作是各自分别进行的，使用的仪器型号及其性能各不相同，时间服务也不统一。在全球范围内用统一的仪器有组织地进行地震观测，形成所谓的观测系统，开始于 50 年代初期。1958 年为了促进地下核爆破的侦察和鉴别，美国政府成立了一个专家委员会，根据该委员会提出的研究报告（即著名的 Berkner 报告），提出了维拉计划（Project Vela Uniform）。按

照这个计划，1960 年至 1967 年，陆续建成了 120 个“标准”地震

表 1 常用地震仪器的性能简表

仪器名称 (简称)	拾震器		电流计		放大倍率 ($\times 10^3$)	记录速度 (mm / s)	记录形式
	周期 (s)	阻尼	周期 (s)	阻尼			
513 强震仪	5.0	0.3			0.05	30	熏烟
DD-1	1.0	0.45			20-500	120	墨水
64 型	1.5	0.5	0.1	5.0	20-300	60-120	照象
维开克(VGK)	1.0	0.5	0.1	4.0	20-100	120	照象
Wood-Anderson	1.0		0.75				
基式 SK(H)	12.5	0.45	1.2	5.0	1.5	30	照象
基式 SK(Z)	12.5	0.45	1.2	5.0	1.0	30	照象
DK-1	12.5	0.45			1-2	30	墨水
Ewing-Press	15-30		100				
763 型	15	1.0	100	1.0	0.75-3	6	照象

台，分布在全世界 50 余个国家（图 6）。每个标准台装备有一台三分量的长周期地震仪（Ewing-Press 型仪器，见表 1）和一台短周期地震仪（Wood-Anderson 型仪器，见表 1）。仪器都经过严格标定，放大倍数和频率响应定期予以测量。地震台配置有无线电标定的石英钟作为时间服务系统，记录采用照相方式，1976 年以来采用了缩微技术保存并使用这些记录。这 120 个台组成了世界标准台网，简称 WWSSN（World-Wide Standard Seismograph Network）。这 120 个地震台的仪器已运转了 25 年，一直由美国地质调查局（USGS）进行管理，资料由美国国

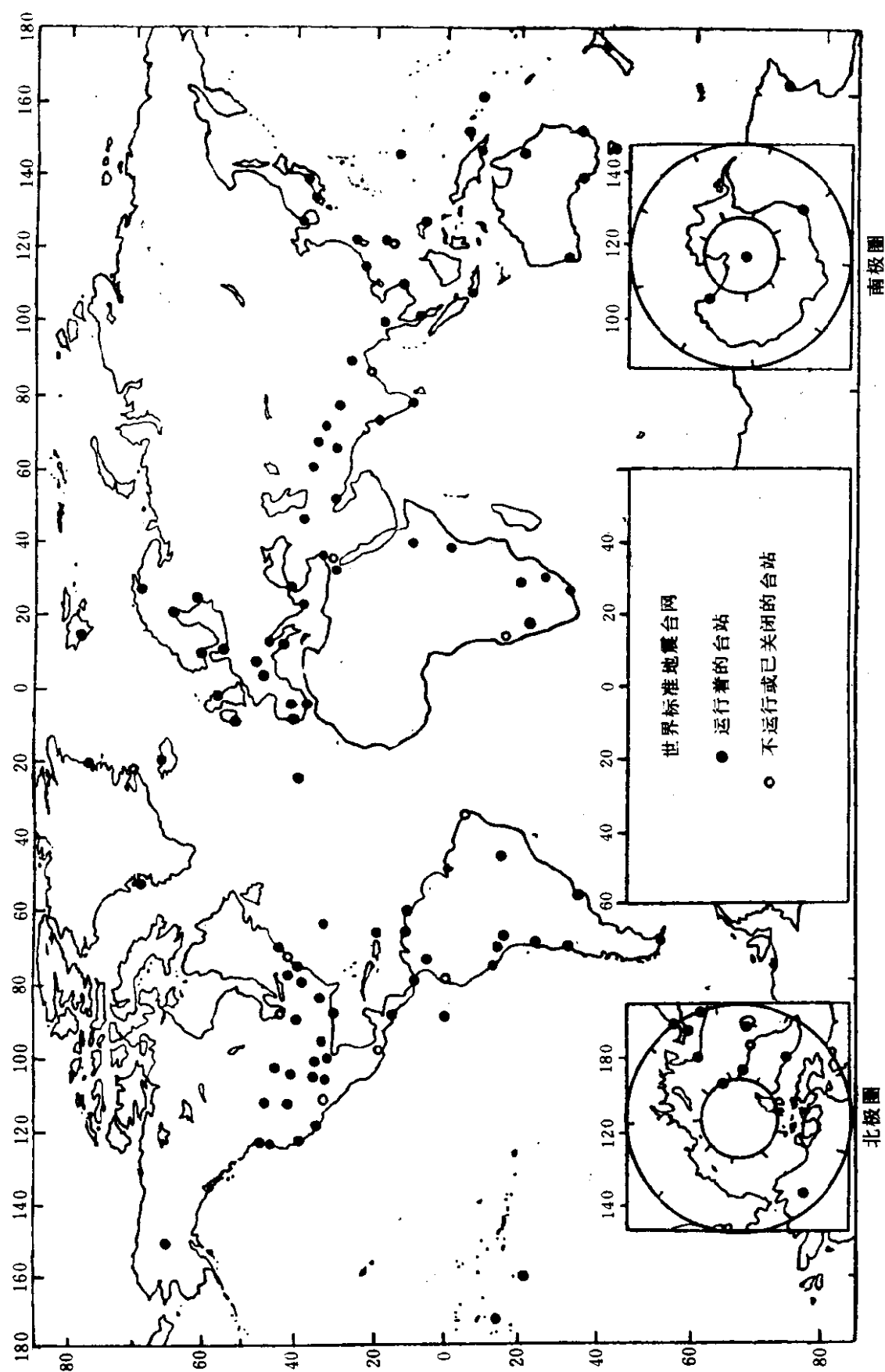


图 6 世界标准地震台网(WWSSN)分布图

家海洋和大气管理局 (NOAA) 进行分配。世界标准台网建立后, 全球地震定位精度提高了 3—5 倍, 确定地震震源机制的不一致程度由 20% 下降到 1%, 这个台网提供的资料成为近 20 年来地球科学在海底扩张, 大陆漂移和板块构造等发现中的观测基础。

从 60 年代末期开始, 全世界范围内陆续出现了新一代的数字化地震台站。首先出现了放置在钻孔中拾震器周期为 30 s (可调) 的数字化地震观测台站 (Seismic Research Observatory), 称为 SRO 台站, 从 1974 年建立开始, 目前全球有 15 个 SRO 台站。SRO 台站所用拾震器是宽频带, 力平衡式的加速度计, 输出信号在 0.02 至 1Hz 频带内, 加速度特性是平坦的。而且经过滤波分别产生长周期和短周期的垂直向信号。另一种数字化地震仪 (ASRO) 是 Savino 等人于 1972 年提出的高增益长周期仪的改进型, 从 1976 年开始安装, 1978 年安装完毕。目前正在运行的 5 个 ASRO 台站的记录道数和数据安排格式与 SRO 相同, 不同之处是 ASRO 使用了通常的短周期摆和长周期摆作为拾震器, 而不是用井下地震计。70 年代后期, 一些 WWSSN 台站在维持模拟量记录的同时, 补加了数字记录器。补加数字记录器的台站大多数分布在 SRO 台站记录覆盖能力空白的区域, 这类台站共有 13 个, 用 DWWSSN 表示。所有的 SRO、ASRO 和 DWWSSN 都由美国地质调查局管理, 这三类台站统称全球数字地震台网——GDSN。GDSN 的性能见表 2。综上所述, 在全球范围内已有全球 (模拟或数字的) 地震台网; 各国亦有自己的地震台网; 各地震活动地区还有区域性的地震台网。表 3 列出了我国目前地震台站和地震台网的基本情况。

如此之多的地震资料和数据要进行交流, 以供更多的研究人员使用, 这成为测震技术中的一个特殊的问题。目前地震资料的交流主要有三种形式: 地震数据报告, 缩微地震图, 数字地震资料磁带。下面就按这三种形式将测震技术提供的成果予以介绍, 旨在希望更多的地球科学家熟悉这些资料和数据。