

赠阅

04554

区域地震观测仪器概述

陆其鹄 编著



地震出版社

区域地震观测仪器概述

陆其鹄 编著

地震出版社

1984

区域地震观测仪器概述

陆其鹄 编著

地质出版社 出版

北京复兴路68号

北京 丰华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

787×1092 1/32 4 印张 88 千字

1984年5月第一版 1984年5月第一次印刷

印数：6001—1100

统一书号：13189·227 定价：0.63元

内 容 简 介

本书对区域地震观测仪器作了简略介绍，并讨论了仪器的设置、组合、标定等问题。

本书可供地震仪器的研制人员、地震观测人员、从事工程振动测量工作的专业人员参考。

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 区域地震的研究内容及其对测震仪器的 要求	(1)
第二节 台基干扰和仪器特性	(4)
第三节 地震仪器的反应特性	(8)
第四节 区域地震仪的组成	(10)
第五节 区域地震仪的改进	(12)
第二章 振动系统、换能和放大	(17)
第一节 线性振动系统	(17)
第二节 换能器和有关参数	(30)
第三节 信号的放大	(37)
第三章 图线记录地震仪	(48)
第一节 拾震器和电流计直接耦合记录方式	(48)
第二节 笔绘记录的两个问题	(55)
第三节 测震仪器的组合	(66)
第四章 磁带记录地震仪	(84)
第一节 磁带记录方式简介	(84)
第二节 磁带记录方式在区域地震观测中的应 用	(92)
第五章 时间服务系统	(96)
第一节 时间的记录	(96)

第二节	时间的校准和检索	(102)
第六章	地震仪的标定	(106)
第一节	地震仪标定方法简述	(106)
第二节	相位特性和初动问题	(116)

第一章 概 述

第一节 区域地震的研究内容及其对 测震仪器的要求

地震是一种自然灾害，其实这只是指的强烈地震，大多数的地震并没有什么害处，而从地震震源传播出来的地震波却给我们带来了许多宝贵的信息。习惯上把地震按震中距离划分为远震、近震和地方震。一般震中距大于一千公里的叫“远震”，小于一千公里的叫做“近震”，而在一、二百公里以内的又可称为“地方性地震”或“区域性地震”。

地震波占有很宽的频率范围。广义地说，地震波的频率可以跨十个数量级，从岩石的微破裂到地球的自由振动，频率可以从 10^6 赫到 10^{-4} 赫。狭义的地震波所指的频段是 10^{-2} 赫到数十赫。随着研究工作的深入和技术的发展，狭义地震波频段的概念有所扩展。在长周期一端，现已观测周期为数百秒至数千秒的地震波；在短周期方面，也有许多人对频率高于 20 赫的极微震或所谓“高频地震”感兴趣。极微震的地震波频率一般在 10—60 赫。

地震波的强度也跨十几个数量级。曾经记录到的最大的地震是 8.9 级，而最小的极微震是 -3 级。按习惯上的分工，区域地震一般只是研究微弱地震，其震级在 1—4 级，再强一些的地震则属于强震的研究范围。现在有些区域地震仪也能测到中强震或强震。虽然目前区域地震的研究对象在强度

和频带上都较以往有所扩展，但主要的研究对象仍然是本地的微震。

地震波从震源产生，经过地球内部介质传播到各个观测台站，然后在台站上可以用仪器记录下来。利用这些记录资料来研究地震是一个重要途径。譬如：研究本地区地震活动的时间、空间和强度的分布，并找出统计规律；研究震源区的发展过程和地震机制；研究地震的发震背景和孕育过程；研究本地区地球内部介质的物理性质；作出本地区较大地震的震后速报；配合其他手段进行本地区强烈地震的震前预报。此外，基于对强震的观测，可以对本地区地震波的破坏效应、地表建筑物的反应特性以及强震的震源机制等进行研究。因此，较好地地震波记录下来就成为测震学的一个重要课题。前面已经说过，地震波具有很宽的频率范围，那么首先要确定的是，对于区域地震，仪器取怎样的工作频段较为合适。

地震波的卓越频率(或周期)是与地震的大小和远近密切相关的。定性地说，地震越小、越近、频率越高；地震越大、越远，频率越低。例如对于3—5级地震的体波，在震中距 Δ 小于100公里时，记到波的卓越频率约为3—5赫； Δ 为100—1000公里时，卓越周期约为1—3秒；而 Δ 为1000—5000公里时，卓越周期约为5—7秒。另一方面，地震波周期还与地震的大小有关，对于小一些的地震，其卓越频率就要高一些，譬如：数十公里以内的2—3级地震，卓越频率约为7—10赫；而—1级的极微震，卓越频率可达到30—40赫。如果仪器的灵敏度再提高，而且观测点的干扰情况也许可的话，使用在数十赫频段范围具有数千万倍放大率的仪器，一般可以记录到—2级地震，这种地震的卓越频

率约为 50—60 赫。有人把某一地区这类小震的卓越周期和地震大小的关系归纳为一个经验公式,即 $\lg T(\text{秒}) = 0.26 M - 1.32$, 尽管这种公式对于其他地区未必很适用,⁴ 但通过对地震波大致频率范围的定性了解,对于设计仪器,适当地选择仪器的工作频段,仍然是有帮助的。区域地震观测,主要是记录一、二百公里以内的微弱地震,根据这些参考数值,一般取仪器的工作频段为 1—20 赫。

对于区域地震观测来说,希望仪器有较高的灵敏度。但是由于地面脉动干扰的影响,仪器灵敏度的提高受到一定限制,所以仪器往往需要在干扰较小的野外现场工作。因此,对仪器的性能结构也应有相应的要求,主要是:轻便低耗,稳定可靠,记录精确,灵敏度高。

轻便低耗:一般地说越是偏僻的地方,地面干扰越小,仪器能够使用的灵敏度也越高。但是目前许多偏僻的山区和野外现场,未必都能方便地用工业电网供电,一般仍需使用直流电源,省电应作为野外观测仪器设计的重要指标。野外仪器还要求体积小,重量轻,便于携带和运输,而且操作也要求尽可能简便。

稳定可靠:这包括如下几个方面:要求仪器的温度效应小,防潮措施好,结构坚固耐震,故障率低,能长期连续工作。

记录精确:在地震信息的分析处理中,主要用到地震波的两方面特征,一是运动学特征,一是动力学特征。譬如测定震中或震源,研究地震波速度的变化,用走时^{4b}、波速等研究地震波的反射、折射问题,主要是用运动学特征。研究运动学特征,关键在于时间服务。例如根据地震波的走时,远震台网测定一个数千公里以外的地震,震中位置差一、二十

公里关系不大，但如果测定一、二百公里以内的本地地震，震中差一、二十公里就是不能允许的了。所以对区域地震时间服务的要求比较高。至少应保证 10^{-1} 秒，争取 2×10^{-2} 秒或 10^{-2} 秒。要求仪器能在现场用简单的方法标定，并能保证必要的准确度。

灵敏度高：这里所说的仪器灵敏度高，是相对于一般远震观测而言的。在区域地震研究中，希望能用许多小地震的信息作为研究问题的工具，所以总是希望观测到的地震越多越好，也就是希望仪器灵敏度越高越好。但是仪器使用的灵敏度能提高到什么程度，并不仅仅依从于仪器设计，而且还要依从于地面干扰背景。

第二节 台基干扰和仪器特性

为了尽可能多地观测到地震，就需要对地面干扰谱有所了解，以确定适当的仪器特性，使仪器能够取用较高的灵敏度。但是要注意的是，仪器灵敏度越高，未必观测到的地震就越多，这还要看台基的信噪比。

地面干扰是限制仪器灵敏度的关键因素，在一般地震观测频段，地面干扰谱如图 1.1 中的虚线所示。一般在周期 2 秒至 6 秒的范围内存在着由于台风、海浪等引起的所谓第一类脉动，形成地面干扰的一个峰值，这种地脉动象人的脉搏一样在不停地振动着，幅度能达到数微米。当地震信息比它小时，用一般的观测方法是无法检测出地震信号来的。在这个频段，如果仪器灵敏度取得很高，记下的也只是幅度很大的地脉动，并不能提高观测地震信息的效能。在这个频段仪器的位移放大率 V 一般只能取几千倍，例如基本台所用的仪器，其频率特性如图 1.1 中的 1 所示。而在 30—40 秒范围，

地面干扰有一个谷值，一般长周期地震仪的放大率峰值取在此频段，其频率特性如图1.1中的曲线 II 所示。区域地震的卓越频率是高于1赫的，基本上避开了第一类脉动的影响，于是可以把放大率取数万倍至数十万倍，如图1.1中的曲线 III 所示。还有另一类所谓本地脉动干扰，这种干扰的频率一般为2—5赫，在工矿区附近可能更高一点。本地干扰的幅度一般为数十毫微米至数百毫微米。如果

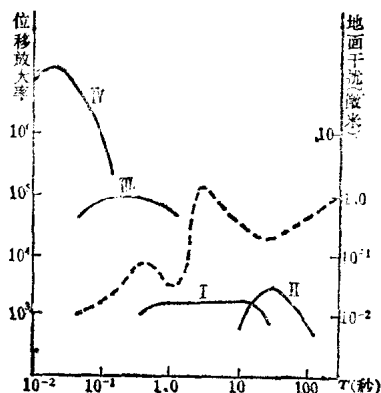


图 1.1

果避开第一类地脉动和本地干扰，而在数十赫的范围内观测极微震的话，仪器放大率可取数百万倍至数千万倍，其频率特性如图1.1中的曲线 IV 所示。限制这种灵敏度提高的因素主要在于局部性频率更高一些的干扰。

频率不同的干扰的波及范围也不相同，在上述各种干扰中，频率越是高的干扰波及范围越小，周期越是长的干扰波及范围越大。例如观测点移动数十公里，假定地基的其他条件一样，对于第一类脉动的反应几乎是一样的，但本地干扰情况则可能不同，而如果要选择一个合适的极微震观测点，也许挪动几公里就可以了。

地面干扰因地区而异，也随地基而异。如果在同一地区，那么一般基岩上干扰小，风化岩上较大，而黄土上就更大。所以一般总希望把观测点放在基岩上。

地面干扰也随观测点深度而异。一般地表干扰大，井下

干扰小，而且越是频率高的干扰随深度的衰减越是显著。

地面干扰除了随空间变化外，还随时间而变，白天和夜间，夏天和冬天，干扰情况都不一样。例如在有台风季节，第一类脉动就很大。本地干扰则一般夜间比白天小。所以选择仪器灵敏度时，可以参考平均干扰水平，也可以根据需要在不同的季节和时刻取用不同的灵敏度。

图 1.1 只是一个示意图，至于具体干扰情况，是因时因地而异的，所以，要根据具体情况选择适当的观测台址。

一般选台最好得到三份资料，一份是当地具体的干扰曲线，一份是干扰情况随时间的变化，还有一份是台基的信噪比。下面着重谈一下关于台基信噪比的问题。

一般来说，使用相同频率响应但灵敏度不同的仪器，在哪个台能记到的地震多，哪个台的台基信噪比就高。这里往往会有产一种简单的看法：即认为某个台的地面干扰越小，允许使用的仪器灵敏度越高（通常也就是位移放大率越高），记录到的地震就越多。其实并非完全如此。一个仪器放大率用十万倍的台不一定就比五万倍的台能多记到地震。这就是说，评价一个台基的优劣，不能仅从它的干扰水平来判别，还要注意到在不同台基时地震信号的水平。对于同一个地震，在震中距基本相同的两个观测点接收到的信号大小一般是不完全相同的，这一方面是由于地震波传播路径不同，介质状况不同，另一方面也与台基的状况有关。同一个地震，按照不同台的记录，定出来的震级不完全一样，主要就是台基的差异。

一个台基除了前面讲的地面干扰情况不一样，地震信号大小也不一样。因此单从地面干扰这一项指标来评定台基的优劣是不全面的，还应同时考虑信号的水平。用台基信噪比

来反应一个台基的观测效能，比单单依据干扰水平要全面一些。

一般来说，干扰水平较低的台基，信号水平也低一些，于是在选台时除了观测地面干扰而外，还要观测地震，而且要在两个以上被选择的点同时观测。这样在被选点观测到了同一时间的地面干扰水平，也观测到了同样的地震，然后比较各个点同一时刻的地面干扰位移值和地震引起的地动位移，这些位移值可以通过仪器的记录推算出来。譬如有甲、乙、丙三个点，它们的地面干扰位移值平均分别为 30，50，80 毫微米，而地震引起的位移则分别是 600，1100，1200 毫微米，这三个点的信噪比则分别是 20，22 和 15。可见，若仅按干扰水平来判定，甲台最好，乙台次之，丙台最差；而按台基信噪比来判定，则乙台最好，甲台次之，丙台最差。所以用信噪比来评定较为合理。

当然，按台基信噪比来选台的工作量要大得多，也未必每个台基都需要这样去选，在许多情况下看看干扰水平也就可以了。但是关于台基信噪比的概念却是重要的，而且在有些场合也是实用的。譬如井下观测，未必越深越好，井太深了，成本、设备等方面困难就会增多，所以要对不同深度时的信噪比作些观测研究，综合考虑选怎样的井深最为有效又较为经济。

选台用的仪器，要根据对台基的要求而定。如果选择远震观测台就要在远震波频段来观测，主要是考虑第一类脉动的影响；而选区域台，则主要考虑短周期干扰。一般选台用的仪器与该台将要装设的仪器应取相同的频段，但灵敏度应比日常使用的观测仪器高。

第三节 地震仪器的反应特性

地震波传到观测点，被地震仪记录下来，但地震仪的记录和地表运动并不完全一样。要从地震记录反演到地动的情况，就必须知道仪器的反应特性。

一份地震记录，无论它是采用模拟记录的连续波形，还是采用数字记录的一系列数值，都是幅度随时间变化的函数，并且可以把它看成是无数不同频率的简谐振动的合成。从记录反演到地动的常用方法是按下述步骤进行的：首先从记录波形 $y(t)$ 算出记录波形的频谱 $Y(\omega)$ ，按仪器的复数频率特性 $I(\omega)$ 求得地动的频谱 $X(\omega)$ ；再将 $X(\omega)$ 反变换到时间域里，就可以得到地动的波形 $X(t)$ 。在这个反演过程中可以看出，一是要进行一些运算，也就是时间域和频率域的变换；二是在运算过程中运用了仪器复数频率特性，因此必须把它先求出来。

现在使用的地震仪系统，都由若干个环节组成，要写出整个仪器的复数频率特性的解析表达式往往是困难的，而且也未必实用。通常是对整个系统复数频率特性进行实测，测出复数频率特性的模和相角，也就是仪器的幅频特性和相频特性。因此，在地震记录反演的问题上，测出地震仪器的幅频和相频特性就成为一个重要的内容。

假定地震仪的各个环节都是线性系统，也就是说它的每一个环节都可以用线性方程来描述，若每个环节的幅频特性和相频特性分别为 U_i 和 γ_i ，那么包括 n 个环节的总的幅频特性 $U = \prod_{i=1}^n U_i$ ；而 $\gamma = \sum_{i=1}^m \gamma_i$ 。这是很有用的关系。譬如一个包括拾震器、放大器和记录笔的系统，当观测较小的振动和不超出电路的线性动态范围时，各个环节可以认为是线性

系统。于是 $U = U_1 U_2 U_3$ ，而 $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$ 。这里 U_1 、 U_2 、 U_3 和 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 分别为拾震器、记录笔以及放大器的幅频特性和相频特性。

图 1.2 表示了某一地震仪系统的幅频和相频特性曲线。从图 (a) 可以看出，对于周期为 T_A 的振动， U 值为 2.1，也就是记录的幅度是地动的 2.1 倍，而 γ 为 0.5π ，即记录波形的相位比地动波形的相位超前 0.5π ，其记录波形如图 (b) 所示。而对于周期为 T_B 的振动，则有 U 为 1.0， γ 为 0.75π ，相应的记录波形如图 (c) 所示。也就是说，对于振幅相同而频率不同的外界振动，仪器记录波形的幅度和相位均产生了变化。上面讨论的是单一频率的情况。如果不是单一频率，则可以把地震记录分解成许多简谐振动的和，如图 1.3 中 II 组所示。每个频率的波分别按照它们相应的幅频和相频特性值反演到 I 组去，于是 I 组的各频率的波对于 II 组的相应频率的波而言，在幅度和相位上都产生了变化。将 I 组的波按同一时刻叠加起来就得到地动的波形。这就是关于非单一频率地震波记录反演过程的一个形象解释，如图 1.3 所示。

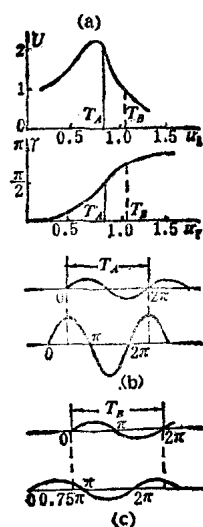


图 1.2

这里应指出的是：把地震近似地看作一个单频率的简谐振动是有条件的。一般要在地震波到达一段时间之后才可以做这样的近似，而对于地震的起始则不适用，因为起始波形是一个跃变，它包含很丰富的高次谐波分量。如果要将地

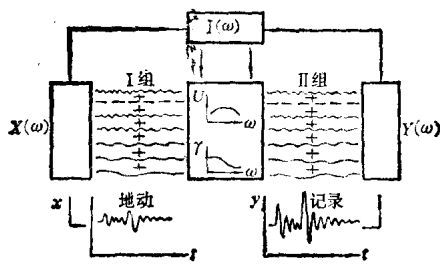


图 1.3

震波的起始（初动）反演为地动，就要用富里叶分析的方法或其他的方法来处理。

第四节 区域地震仪的组成

要检测地震，首先要有一个地震波的拾取装置。两千多年以前，我国张衡发明了候风地动仪，首次解决了拾震的问题。他当时所采用的惯性原理至今仍然为测震仪器设计者们所遵循。

区域地震仪和其他频段的地震仪一样，主要包括拾震、换能、放大、记录几个环节。在一个地震台站上还要加上时间服务装置。

常用的拾震和换能装置主要是电动型拾震器。变电容型换能器也有所应用，但其拾震部分仍然要用一个弹性悬挂系统。晶体换能器一般无需附加悬挂系统，用于声频观测比较有效，在区域地震的观测频段中用得不多，但由于它的电压输出是正比于振动加速度的，所以在强震记录方面有所应用。在信号的放大方面直接机械放大已经用得不多，电流计放大方式仍在应用，而一般采用电子放大。

常用的电动型拾震器在结构上大体有两种类型：一种是

“摆”式的，即它的弹性悬挂系统是一个转动系统；另一种则是“直线型”的。参数选择基本上都是一样的，一般取固有周期为 1 秒，阻尼常数为 0.5 左右，这是根据总的仪器通频带应为 1—20 赫考虑的。

至于放大器，关键在于要求低噪音。此外，在野外操作需要低功耗和良好的温度特性，其他指标，例如阻抗、频率响应、增益、线性等等都可以根据要求作相应的设计和调整，这些在技术上并不困难。现在一般均采用线性集成电路的运算放大器组件，使得电路大大简化，体积和重量也可以大为减小。

在记录方式上大体有以下几种：

一、直接记录：拾震后通过机械系统放大，例如用杠杆或弹性元件放大，然后直接笔绘记录，一般是记在熏烟纸上。这种记录方式现在已很少采用，在我国只是在中强震观测方面还有一些这样的仪器，例如 513 型地震仪。

二、电流计记录：拾震后用机电换能器将地动转变为电信号，然后用电流计（或称之为振子）记录，记录是靠电流计镜片将光线反射在感光纸上的。这种记录方式在我国基准台上还普遍应用于中长周期的地震观测中，例如基式地震仪。少数地区还有使用维开克拾震器加 FC 6-10 振子记录的区域地震仪。

三、电子放大，笔绘记录：拾震后经换能、电子放大，然后用记录笔记录在纸上。这种类型的仪器是我国区域地震台目前使用的基本观测手段，数量比较多。

四、模拟磁带记录：拾震后经换能、放大，把信号记录在磁带上。模拟磁带记录回放出来的电信号一般分成两路，一路经模拟数字转换器转换成数字信号由计算机处理，或转