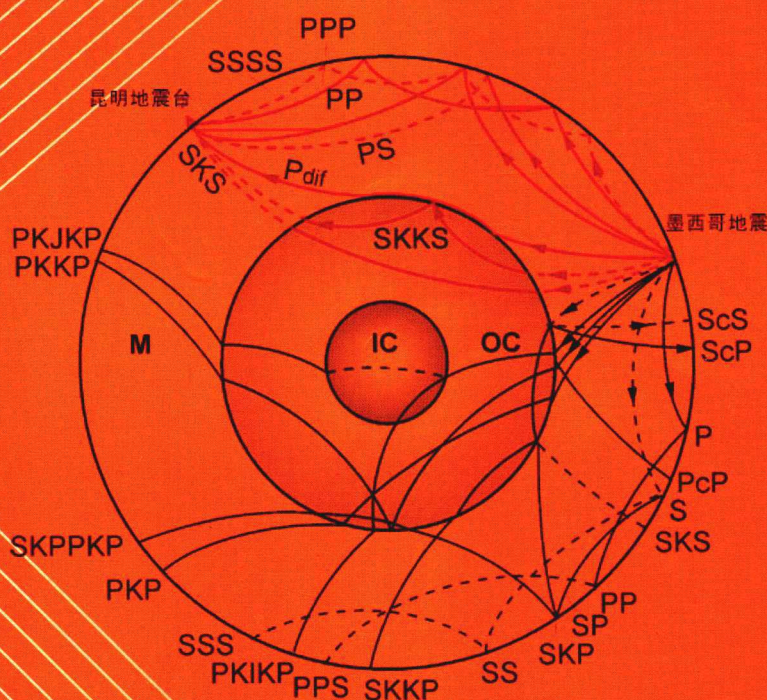


宽频带数字地震记录 震相分析

刘瑞丰 陈翔 沈道康 郑秀芬 杨辉 陈宏峰 著



地震出版社

宽频带数字地震记录震相分析

刘瑞丰 陈 翔 沈道康 郑秀芬 杨 辉 陈宏峰 著

地 震 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

宽频带数字地震记录震相分析/刘瑞丰等著. —北京:地震出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-5028-4441-7

I. ①宽… II. ①刘… III. ①宽频带—地震记录—震相分析 IV. ①P315. 63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 132622 号

地震版 XM3254

宽频带数字地震记录震相分析

刘瑞丰 陈翔 沈道康 郑秀芬 杨辉 陈宏峰 著

责任编辑:王秋月

责任校对:凌樱

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编:100081

发行部:68423031 68467993

传真:88421706

门市部:68467991

传真:68467991

总编室:68462709 68423029

传真:68455221

专业部:68467982 68721991

<http://www.dzpress.com.cn>

经销:全国各地新华书店

印刷:北京鑫丰华彩印有限公司

版(印)次:2014年8月第一版 2014年8月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:418千字

印张:16.75

印数:0001~3000

书号:ISBN 978-7-5028-4441-7/P(5131)

定价:80.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

前 言

自从1975年德国Gräfenberg宽频带数字地震台阵和国际加速度仪部署台网(International Deployment of Accelerometers, IDA)开始建设以来,数字地震台网的建设如雨后春笋,全球不同机构和国家相继投入了大量资金建设了不同尺度的数字地震台网,到2013年底全世界正式投入观测的地震台网都已是数字化的地震台网。从1996年起,在中央政府和各地方政府的大力支持下,中国地震局已经建成了由国家地震台网、区域地震台网和流动地震台网组成的数字地震监测系统,这一系统的建立被认为是我国地震监测工作和防震减灾事业的一次革命。

地震的震相就是具有不同振动性质和不同传播路径的地震波在地震记录上的特定标志,震相分析就是对地震记录的解释,是地震观测的重要任务之一,也是国家地震台网和各区域地震台网从事资料分析人员的基本技能。在传统教科书上所讲述的各种震相特征都是基于传统的模拟记录,本书的重点是讲述基于宽频带数字地震记录各种震相的基本特征及分析方法。

由于数字地震记录具有动态范围大、频带范围宽的特点,同传统模拟记录相比数字地震记录的信息更为丰富。在实际的震相分析中,我们已分析出一些明显的未知震相,在一个地震中我们最多能够识别出4个未知震相,现阶段凡是未知震相,一律标“i”,暂称为“i”震相,待收集到足够的资料时,以研究其性质。

在本书的编写过程中得到了云南省地震局的大力支持,陈飞高级工程师、张淑珍高级工程师、李海清高级工程师和王九洋高级工程师为本书提供了部分波形记录,赵仲和研究员、薛峰研究员、许健生研究员、赵永高级工程师、张立文高级工程师对本书的编写提出了许多很好地建议,部分图由徐志国、王晓欣、刘敬光和韩雪君绘制。在此作者一并表示衷心的感谢!

作者

2014年3月

目 录

第一章 地震观测.....	1
第一节 地震台网.....	1
一、地震台网的类型.....	2
二、观测仪器配置.....	3
第二节 我国地震台网的建设和发展.....	5
一、早期地震台站.....	5
二、中强地震台网.....	5
三、全国基本地震台网.....	6
四、区域地震台网.....	7
五、数字地震台网.....	8
第二章 地震的震相	13
第一节 地球的结构	13
一、地壳	15
二、地幔	15
三、地核	16
第二节 地震波	17
一、体波	17
二、面波	20
第三节 震相及其命名规则	21
一、IASPEI 新震相命名	21
二、新旧震相名称差别	21
三、震相命名基本语法	21
第四节 近震震相	25
一、地震波传播路径	25
二、直达波	26
三、反射波	26
四、首波	27
第五节 远震和极远震震相	28
一、地震波传播路径	28
二、地幔震相	29
三、地核震相	35

四、深震震相	44
五、面波震相	44
六、振幅测量震相	45
七、声学震相	45
第三章 宽频带数字地震资料仿真	46
第一节 数字地震资料	46
一、数字地震资料的产出	46
二、数字地震记录“counts”的涵义	47
三、仪器传递函数	48
四、地震计的幅频特性和相频特性	51
第二节 数字地震资料的仿真	51
一、方法概述	51
二、仿真应用	54
第四章 震相特征与震相分析	60
第一节 地震波的记录特征	61
一、震相的基本特征	62
二、常见震相的特征	62
第二节 单台识别震相的方法	87
一、仿真	87
二、判断地震的性质	88
三、找出标志震相	90
四、利用到时差	90
五、应用实例	90
第五章 地方震与近震记录分析	99
第一节 地方震	99
第二节 近震	102
第三节 典型震例	106
一、2007 年 8 月 16 日云南澄江 $M_L3.4$ 级地震	106
二、2012 年 6 月 24 日云南宁蒗 $M_S5.7$ 级地震	106
三、2011 年 8 月 9 日中缅边境 $M_S5.2$ 级地震与 2011 年 5 月 27 日 中缅边境 $M_L3.8$ 级地震	109
四、2011 年 2 月 1 日中缅边境 $M_S4.9$ 级地震与 2011 年 2 月 5 日 中缅边境 $M_L3.9$ 级地震	109
第六章 远震与极远震记录分析	114
第一节 远震	114
第二节 极远震	126
第三节 典型震例	130
一、2011 年 9 月 18 日印度 $M_S6.9$ 级地震	130

二、2012 年 6 月 17 日菲律宾吕宋岛 $M_s 6.0$ 级地震	130
三、2011 年 8 月 27 日蒙古 $M_s 5.8$ 级地震	130
四、2012 年 8 月 12 日西藏 $M_s 6.3$ 级地震	130
五、2012 年 5 月 13 日阿富汗-塔吉克斯坦边境 $M_s 6.1$ 级地震	130
六、2012 年 6 月 18 日日本本州东岸近海 $M_s 6.3$ 级地震	139
七、2012 年 7 月 29 日新爱尔兰地区 $M_s 6.4$ 级地震	139
八、2011 年 10 月 23 日土耳其 $M_s 7.4$ 级地震	142
九、2011 年 9 月 2 日福克斯群岛 $M_s 7.1$ 级地震	144
十、2012 年 3 月 3 日洛亚蒂群岛东南 $M_s 6.6$ 级地震	147
十一、2011 年 3 月 31 日斐济群岛地区 $M_s 6.3$ 级地震	147
十二、2011 年 7 月 7 日新西兰克马德克群岛地区 $M_s 7.6$ 级地震	151
十三、2012 年 12 月 14 日墨西哥下加利福尼亚西岸远海 $M_s 6.4$ 级地震	152
十四、2012 年 3 月 20 日墨西哥格雷罗州沿岸近海 $M_s 7.7$ 级地震	155
十五、2012 年 9 月 5 日哥斯达黎加 $M_s 7.9$ 级地震	158
十六、2011 年 1 月 2 日智利中部沿岸近海 $M_s 7.4$ 级地震	163
十七、2010 年 2 月 27 日智利中部沿岸近海 $M_s 8.8$ 级地震	165
第七章 中源地震与深源地震记录分析	170
第一节 中源地震	170
第二节 深源地震	176
第三节 典型震例	181
一、2011 年 11 月 8 日台湾东北 $m_B 7.2$ 级地震	181
二、2009 年 9 月 30 日印尼苏门答腊岛南部 $M_s 7.6$ 级地震	181
三、2009 年 8 月 9 日日本本州东南 $m_B 7.1$ 级地震	185
四、2011 年 1 月 18 日巴基斯坦西南部 $m_B 7.3$ 级地震	185
五、2008 年 7 月 23 日日本本州东部 $m_B 7.0$ 级地震	189
六、2007 年 9 月 28 日日本火山列岛地区 $m_B 7.2$ 级地震	191
七、2005 年 3 月 2 日印尼班达海 $m_B 7.0$ 级地震	191
八、2011 年 12 月 14 日新几内亚东部地区 $m_B 7.1$ 级地震	195
九、2011 年 6 月 24 日福克斯群岛 $m_B 7.1$ 级地震	195
十、2007 年 8 月 1 日瓦努阿图群岛 $m_B 7.0$ 级地震	199
十一、2006 年 5 月 16 日新西兰克马德克群岛地区 $m_B 7.5$ 级地震	202
十二、2005 年 9 月 26 日秘鲁北部 $m_B 7.6$ 级地震	204
十三、2005 年 6 月 13 日智利北部 $m_B 7.8$ 级地震	208
十四、2011 年 5 月 10 日俄罗斯东部-中国东北边境地区 $m_B 5.7$ 级地震	211
十五、2010 年 7 月 29 日菲律宾棉兰老岛 $m_B 6.6$ 级地震	215
十六、2010 年 2 月 18 日俄罗斯东部-中国东北边境地区 $m_B 6.9$ 级地震	215
十七、2005 年 10 月 23 日日本海 $m_B 6.0$ 级地震	218
十八、2009 年 12 月 24 日俄罗斯东南沿岸近海 $m_B 6.5$ 级地震	218

十九、2003 年 7 月 27 日俄罗斯东南沿岸近海 m_B 6.6 级地震	222
二十、2011 年 8 月 30 日印尼班达海 m_B 6.4 级地震	224
二十一、2004 年 11 月 7 日鄂霍次克海 m_B 6.1 级地震	226
二十二、2012 年 8 月 14 日鄂霍次克海 m_B 7.2 级地震	228
二十三、2011 年 2 月 7 日所罗门群岛 m_B 6.2 级地震	230
二十四、2009 年 11 月 9 日斐济群岛 m_B 6.8 级地震	232
二十五、2010 年 4 月 11 日西班牙 m_B 6.1 级地震	235
二十六、2011 年 9 月 15 日斐济群岛地区 m_B 6.9 级地震	238
二十七、2011 年 11 月 22 日玻利维亚中部 m_B 6.3 级地震	240
二十八、2011 年 1 月 1 日阿根廷圣地亚哥-德尔埃斯特罗省 m_B 6.8 级地震	242
第八章 地震记录上的干扰	244
第一节 地脉动	244
第二节 大风（台风）	246
第三节 车辆	250
第四节 施工振动	250
第五节 爆破	252
第六节 滑坡塌陷	255
参考文献	257

第一章 地震观测

地震是一种会给人类生命和财产带来严重损害的自然现象，它是在地球内部特定的条件下，由其内部和外部的作用力引起的构造运动所导致的物理过程。本章主要介绍地震学的发展与地震台网发展的关系、地震台网的类型以及我国地震台网的建设和发展。

第一节 地震台网

地震学是一门以观测为基础的科学，是研究地震的发生、地震波的传播及地球内部构造的一门科学。纵观地震学的发展史，可以毫不夸张地说，没有地震观测仪器和地震台网的发展，就不可能有地震学今天的研究成果。

19 世纪 80 年代以前，地震学主要以宏观观测和定性研究为主；从 1875 年意大利科学家切基（Cecchi）发明第一台近代地震仪器以后，随着科技的发展，使得地震仪器能够记录完整的地震记录图，即由地震产生的地震波传播所引起的地面运动记录。与此同时地震学家开始对地震记录图进行分析解释，能够准确地测定地震发生的时间、位置（经度、纬度和深度）和震级等地震基本参数，并在板块构造学说的建立、地球内部构造研究、俯冲带概念的提出以及震源机制测定等方面都取得了突破性进展，使得地震学逐步发展成一门定量科学，即定量地震学。

自 1975 年数字地震仪器诞生以来，世界上不同国家和机构投入大量资金建设了不同尺度、类型的数字地震台网，虽然只有 30 多年的时间，但在地震波的传播和地球内部结构、地震震源过程等方面的研究都取得了令人瞩目的成果，为地震学注入了新的活力，从而促进了一门新的学科的诞生和发展，即数字地震学。

在地球内部结构方面的研究已从单纯利用走时数据反演地球内部速度结构，发展到利用波形、频谱、相位等动力学参数建立地球三维速度结构的图像并研究介质的衰减、散射、孔隙度等特性参数和各向异性等问题。在利用短周期地震波研究中、小尺度结构，以及利用长周期面波研究全球大尺度结构等方面的研究都取得了很多成果。在中、小尺度的地球内部结构方面，致力于研究一些特定地区的区域性地质、地球物理事件，如震源区的深部构造背景、介质应力状态、地震过程、火山地热异常区的深部结构等；在地球内部大尺度不均匀性和各向异性方面的研究成果，为全球构造和地球动力学，如板块俯冲、消减带、缝合线以及地幔对流等提供了证据。

在地震震源过程方面的研究主要集中在地震震源特性、地震矩张量反演、非均匀震源面的描述、地震震源的时-空过程、区域应力场的变化等科学问题。对于震源的研究工作则由到时、波形振幅、部分振动波形拟合向全波形拟合发展；对震源的描述从简单的剪切位错点

源发展到地震矩张量；对地震破裂过程的描述从有限移动源发展到复杂的破裂时-空过程。由于从事地震震源研究的科研人员可以实时或准实时获取地震波形数据，在中强地震发生后约 30 分钟内产出矩震级、震源机制解和地震矩张量等震源信息，在震后约 2 小时内给出震源破裂过程，使得地震震源过程研究成果在地震趋势判断、地震灾害快速评估和地震应急救援中发挥了越来越重要的作用。

在地震参数测定方面，从人工交切地震定位到计算机自动定位和参数测定，对于国内地震可以在 2 分钟内完成地震参数测定，并自动将测定结果以短信的方式发送到相关人员手机上，为地震应急和救援赢得了宝贵的时间。

一、地震台网的类型

地震观测就是用地震仪器观测和记录地震，其主要任务就是在地震发生时用地震仪器拾取地面振动，将振动过程加以放大，并记录地面振动的整个过程，然后进行地震分析和地震基本参数的测定。

地震产生的地面震动的幅度和频率范围都很大，由地震所产生的地面位移的振幅，小到纳米（ $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$ ），大到 10 m，跨越 11 个数量级，而频率跨越约为 7 个量级，即从周期达 10^4 s 的固体潮、 10^3 s 的地球自由振荡、 10^2 s 的长周期面波、 10 s 的长周期体波，到 1 s 的短周期体波、在震中地区 10^{-1} s 的强地面运动、 10^{-2} s 地壳的小地震（陈运泰等，2000）。到目前为止还没有一种单独的地震仪器能够记录如此宽的范围，因此根据地震观测的不同需求，需要建设不同类型的地震台网。

1. 能够观测远距离地震的大尺度地震台网

由于地球深部结构研究的需求，需要建立均匀分布的大尺度地震台网，从而能够记录远震和极远震，能够记录到穿过地幔和地核的地震波波形。为达到此目的，美国从 1957 年起开始规划建立覆盖全球的大尺度地震台网，从 1960 年起陆续在全球建立了由 120 个台站组成的世界标准地震台网（World Wide Standard Seismic Network, WWSSN），每个台站都配置相同的三分向短周期仪器（Short Period, SP）和长周期仪器（Long Period, LP）。WWSSN 在地震学研究上引起了一场革命，该台网测定的全球地震目录勾画出了板块边界，对 20 世纪 60 年代末地球科学中的海底扩张、大陆漂移和板块构造学说的发展起到关键性作用；根据 WWSSN 的观测资料，地震学家可以准确地测定出中强地震的震源机制，使震源机制的不确定性从 20% 降低到 1%。WWSSN 资料，特别是中周期和长周期资料，极大地推动了地震波传播路径上的构造研究（周公威等，2007）。几乎与此同时，前苏联及其加盟共和国建立了统一的地震观测系统，该系统约有 100 个地震台，配置基尔诺斯（Kirnós）短周期和长周期地震仪器。结合 1957 年国际地球物理年（International Geophysical Year, IGY）的工作，一些国家也都开始规划建设覆盖各自国家的较大尺度地震台网，从 20 世纪 60 年代初，中国、日本、英国、德国等国家相继建立了各自的国家地震台网。

1984 年，美国 57 所大学联合成立了美国地震学研究联合会（Incorporated Research Institutions for Seismology, IRIS），IRIS 既定的目标是：建立一个 100 个以上台站实现全球均匀覆盖的全球地震台网（Global Seismographic Network, GSN），每个台站应具有高保真、宽频带、大动态范围记录性能，并具备向台网中心实时传输地震数据的能力。经过 30 多年的迅速发

展, GSN 的建设已经远超过原设计目标, 到 2013 年底已有 171 个台站。GSN 的观测资料在推动震源机制测定、地震矩张量反演、地震震源破裂过程、岩石层和软流层中的各向异性和地球自由振荡等方面的研究中发挥了重要作用。

2. 能够记录小地震和近震的区域地震台网

为了尽可能多地记录高频度的小震和近震, 需要建设台站密度较高的区域地震台网, 配置高灵敏度、高采样率的短周期仪器。由于小地震激发的地震波随距离增加衰减很快, 因此要求台站之间的间距要小, 而且要尽可能地覆盖所监测的区域。从 1920 年起, 美国在南加州建立了由 12 个地震台组成的区域地震台网, 配置伍德-安德森 (Wood-Anderson) 短周期地震仪器, 到 1935 年已经记录了几百个地震, 地震的大小变化范围很大, 从几乎是无感地震直至大地震, 美国地震学家里克特 (Richter) 利用这些地震观测数据, 最先提出了地方性震级标度, 也称作里氏震级 (Richter magnitude), 奠定了地震定量研究的基础。20 世纪 60 年代末, 日本、中国、新西兰和前苏联相继建立了监测微震的高增益区域遥测地震台网, 到 20 世纪 70 年代初, 世界不同国家建立了 100 多个区域地震台网。这些区域台网的地震台站由几十个到几百个, 基本都配置有短周期地震仪器。区域地震台网在监测全球不同地区的区域地震活动性方面发挥了重要作用。

3. 能够记录近场强地面运动的强震动台网

间隔几十公里或几百公里的台站不能给出满足地震工程所需要的近场强地面运动的地震记录信息。从 20 世纪 70 年代起, 很多国家为了满足近场强地面运动研究和工程建设的实际需求, 在自由场和结构物中建立了强震动台网。从 1971 年起美国开始大规模建设强震动台站, 到 1973 年已在全国布设了 500 台强震动仪器, 到 2013 年美国在全国各地布设的强震动仪器在 5000 台左右; 日本虽然是最早提出要开展强震动观测的国家, 但由于战争等原因, 使这一工作中断了几十年, 但近二十年来日本强震动观测发展迅速, 投入大量资金建立了由 669 个台站组成的基岩强震台网 (KiK-Net) 和由 1031 个台站组成的自由场地强震台网 (K-Net)。近十几年来, 强震动台网发展迅速, 很多国家强震动台站的数量已超过国家地震台站, 并在强地面运动监测、工程抗震和地震预警等方面发挥了越来越重要的作用 (周雍年, 2011)。

在以上三种台网中, 一般把前两种称为地震台网或测震台网, 第三种称为强震动台网。根据台网尺度和功能的不同, 地震台网又可以分为全球地震台网 (Global Seismographic Network)、国家地震台网 (National Seismographic Network)、区域地震台网 (Regional Seismographic Network) 和地方地震台网 (Local Seismographic Network)。

二、观测仪器配置

在地震台网建设方面, 首先要进行规划, 根据地震台网所承担的任务, 合理设计台站数量和台站布局。在台网规划设计时往往容易忽略台站的环境噪声背景, 图 1-1 是在基岩上典型地震台环境噪声的速度功率谱, 不同频率的地噪声差别很大, 地噪声在 $0.1 \sim 0.2$ Hz 处有一个峰值, 地震学家最终分别在 $0.01 \sim 0.1$ Hz 和 $1 \sim 10$ Hz 测量地面震动, 以避免地面噪声 (安艺敬一等, 1986)。对于模拟地震仪器, 把 $0.1 \sim 1$ Hz 这个噪声频谱当成了短周期地震仪器和长周期地震仪器的分界线, 而对于数字地震仪器, 也把 $0.1 \sim 1$ Hz 这个噪声频谱当

成了短周期地震仪器和宽频带地震仪器的分界线。

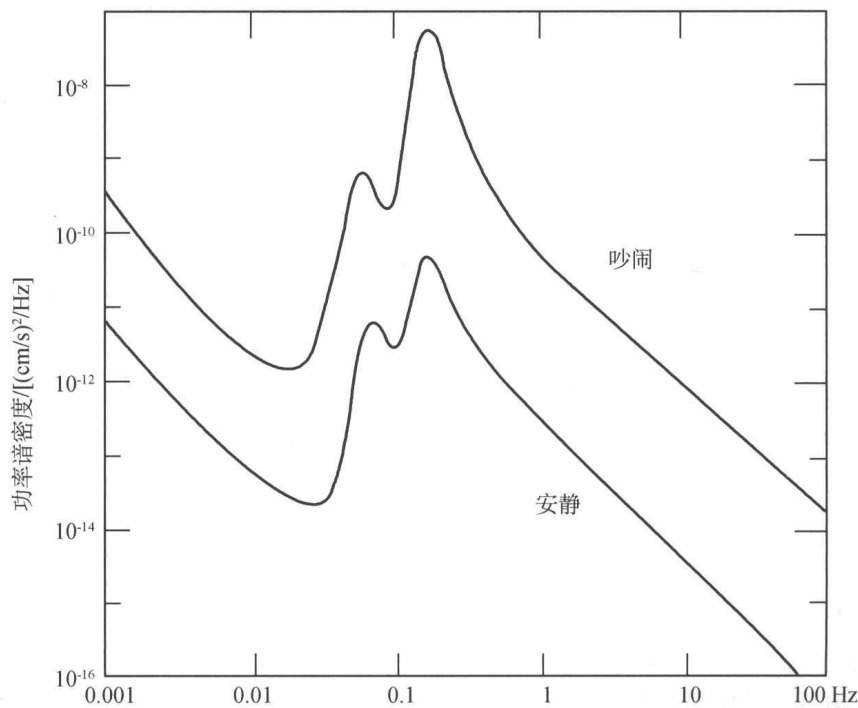


图 1-1 基岩上典型地震台站环境噪声速度功率谱（引自安艺敬一等，1986）

在台网规划设计时，要根据地震台网的任务，综合考虑各个台站台基背景噪声、仪器对观测环境要求、建设成本和运行成本等因素，不同观测任务的地震台网要合理配置不同的地震仪器。对于数字地震仪器，仪器频带范围很宽，从 360 s 到 50 Hz，甚至可以更宽，并且可以做到速度平坦型，但由于地面环境噪声的限制，使得甚宽频带地震仪器记录当地的小地震就不如短周期仪器效果好。

随着电子技术和光学技术的迅速发展，数码照相机的设计与制造技术要比地震仪器成熟得多，对于一般摄影爱好者来讲，使用一个普通镜头就可以满足拍摄需求，而专业摄影师在拍摄远景、近景或不同场景时还需要更换不同的镜头，以达到最佳拍摄效果。同样的道理，不同类型的地震台站要根据任务的不同合理配置地震仪器，这样才能达到最佳的观测效果。对于区域地震台网如果主要监测网内及周边地震，最好以短周期仪器为主，并配置适量的宽频带仪器，这样既节约建设成本，又便于运行维护，同时可以达到很好的观测效果。例如在国家地震台网中，JCZ-1 甚宽频带地震仪器只配置 16 个地震台站。也就是说对于区域地震台网并不是所有台站仪器的频带越宽就越好。当用一个小孔径地震台网记录远震时，如果台站之间的距离小于所记录地震波的波长，则不同台站记录的远震波形基本相同，所记录的信息就基本一样，几个台站几乎相当于一个点。

第二节 我国地震台网的建设和发展

我国是开展地震观测比较早的国家，早在公元 132 年我国东汉时期的张衡就发明了候风地动仪，公元 138 年设置在河南洛阳的一台候风地动仪检测到了一次发生在甘肃省内的地震，这是人类历史上第一次用地震仪器检测到在远处发生，而在仪器所在地无感的地震。

一、早期地震台站

我国早期的地震台站建设于近代 20 世纪初，从 1904 年开始由法国、俄国、日本和德国的地震学家相继在上海徐家汇、大连、沈阳、青岛和长春等地建立地震观测台。1872 年，法国天主教耶稣会为适应长江口船舶航行的需要，在上海徐家汇建立了气象与天文观测站，并于 1874 年开始地磁观测，1904 年增设地震观测，这是中国大陆第一个地震台。

1904~1908 年间，俄国人与日本人相继在大连、营口、旅顺、沈阳及长春等地建立地震台；伪满时期，又于 1933~1936 年分别增设了长春（新京）和延吉台；1909 年德国人在青岛设置了地震台，1924 年该台由中国接管，一直工作到 1948 年，这个地震台是中国大陆记录时间比较长的一个台。这些地震台曾经记录了一些非常有价值的地震，如上海徐家汇地震台记录到了 1906 年美国旧金山 7.8 级大地震，目前这张珍贵的地震图保存在上海市地震局资料室（中国地震局监测预报司，2005）。

1930 年由李善邦先生等老一辈地震学家在北京建立了鹫峰地震台，这是第一个由中国人自行建设并管理的地震台，然后又相继建立了南京北极阁地震台、重庆北碚地震台。中国大陆早期的地震台有上海徐家汇、大连、长春、青岛、北京、南京、重庆和沈阳 8 个地震台，这些地震台站安装的地震仪器主要有大森式（Omori）地震仪和维歇尔（Wiechert）地震仪，采用熏烟记录，上海徐家汇地震台于 1915 年增加了伽利津（Galitzin）光记录地震仪。由于当时经济落后，再加上多年战乱，这些台站的观测时断时续，时而搬迁，没有积累连续的观测资料，但这些历史地震图十分珍贵，它见证了中国地震监测和地震学研究发展的历史，同时这些资料是开展地震学、地球物理学和地震预报的宝贵资料，这些历史地震记录具有重要的历史价值和研究价值（丁国瑜等，1993）。

二、中强地震台网

旧中国仅给中国大陆留下来两个台站：上海徐家汇地震台（1952 年迁往佘山）和南京北极阁地震台。在这样的基础上要建立全国的观测台网困难很多，最重要的是没有观测仪器。1951 年，以李善邦设计的机械杠杆放大地震仪为基础，经过试验改进，研制了 51-1 式地震仪，这是新中国成立后我国自行研制的第一台地震仪器，接着又试制了 51-2 式地震仪。

新中国建立初期，国家把建设的重点首先放到了黄河流域诸省市，这些区域地震活动水平较高，曾发生过多次破坏性地震，为了判定这些重点建设地区的地震危险性，中国决定在黄河流域使用自己试制成的 51 式仪器布设一批中强震观测台。1954 年建立了西宁、武威、兰州、银川、包头、太原、临汾和西安等中国第一批地震台，以后又陆续建立了玉门、张掖、天水、潼关等地震台。此外，还协助水利电力部门建立了佛子岭、官厅、陕县、禹门口

等地震台,与中国科学院长春机电研究所合作建立了长春、大连、哈尔滨、绥化等地震台。加上原有的南京、佘山等台站,在全国初步形成了一个中强地震观测台网,这是中国有史以来第一次设立规模较大的地震观测台网。这些地震台站虽然只配置有水平向机械记录地震仪,缺少垂直分向,不能记录垂直地面运动,但它们为现今地震活动提供了大量资料,为工程建设场地烈度鉴定增加了新的依据,改变了以前仅有历史地震资料的状态。这批地震台的建立,使中国开始有了比较系统的地震观测资料,对监测当地的地震活动性起到了一定的作用,标志着中国第一个大尺度地震观测台网的诞生(丁国谕等,1993)。

三、全国基本地震台网

为了迅速发展中国的地震科学事业,仅靠 51 式台站是不够的,为了既能够记录近震,又能够记录远震,迫切需要建设全国性的高灵敏度地震台。1955 年,应中国科学院邀请来华的苏联地震仪器专家基尔诺斯和台站技术管理专家柯里达林指导并参与了中国地震观测系统的建设工作。1956 年,根据中苏科技合作协议,中国决定采用当时比较先进的苏联基尔诺斯式地震仪(基式地震仪,又称 SK 地震仪)作为中国基本地震台网的主要仪器。经过对其记录和时间服务系统进行改进和研制后,于 1956 年下半年开始在国内试制。

根据 1956 年制订的《1956~1967 年科学技术发展远景规划》要求,并结合 1957 年国际地球物理年(IGY)的工作,1957 年 3 月到 5 月采用中国生产的基式地震仪先后建立了昆明、成都、兰州、南京、佘山、拉萨、广州和北京 8 个基本地震台。1958 年前后,又在原有的长春、西安、包头等中强震台站上配备了基式地震仪,还增设了武汉台。至此,全面完成了在全国兴建第一批 12 个基本台的任务。该台网的建成,大大提高了中国的地震观测水平,促进了中国地震科研事业的发展,为研究地震成因及其他地球物理问题提供了不可缺少的资料。20 世纪 60 至 70 年代初,又新设了乌鲁木齐、喀什、泰安、高台、牡丹江、海拉尔、泉州、呼和浩特、贵阳、琼中、沈阳等基本台,并在太原、大连等台增设了基式地震仪。这样,地震基本台站遍布全国,可监测中国大部分地区 5 级以上地震和全球 7 级以上地震,大大提高了对国内外地震的监测能力。

1971 年国家地震局成立后,这些地震台成为国家地震局所属全国性基准台,也是其所在省、自治区、直辖市地震局的中心台站。经过多年整顿和充实,这些台站不仅装备了先进的地震仪器,有些还增设了地倾斜仪、地应力仪、地磁仪、地电仪、地形变仪等各种仪器,使之成为地球物理和地震预报综合观测台站。20 世纪 70 年代初期,除熏烟记录和照相记录仪器以外,我国又研制了 DD-1、DD-2 短周期地震仪器和 DK-1 中长周期地震仪器,采用墨水记录;1974 年研制了 763 长周期照相纸光记录地震仪器。到 1978 年共建成了北京、兰州、广州、长春、武汉、乌鲁木齐、拉萨、佘山等 24 个基准地震台(国家 I 类台)和南昌、桂林、红山、合肥、洛阳等 62 个基本台(国家 II 类台),形成了全国基本地震台网,国家 I 类台配置了 DD-1、DD-2 短周期地震仪器,DK-1、SK 中长周期地震仪器和 763 长周期地震仪器,国家 II 类台基本上配置短周期地震仪器。

1978 年,根据当时全球地震监测的实际需要,经国务院批准我国 24 个基准地震台的观测报告开始进行国际资料交换,1980 年 9 月,国际地震中心(International Seismological Centre, ISC)在维也纳召开指导理事会,国家地震局派秦馨菱教授参加了这次会议,并当选为

理事,从此我国正式加入 ISC,我国 24 个基准地震台的观测报告开始进行国际资料交换。经过 30 多年的努力,我国已同国际地震中心、美国地质调查局 (U. S. Geological Survey, USGS) 国家地震信息中心 (National Earthquake Information Center, NEIC) 等 5 大洲 45 个国家的近百个单位建立了正常的国际资料交换关系,这标志着中国的地震台站开始为全球的地震监测做出贡献。

四、区域地震台网

为了详细研究地震活动性,除了建立全国基本地震台网以外,还需要建立台站间距较小的区域地震台网,并配置专门记录地方震和近震的高灵敏度短周期地震仪。另外,由于当时国家经济建设的需要,需要对一些重点地区,特别是大型水库场址区域地震活动性进行监测,可以说区域地震台网的建设与国家的经济建设密切相关。20 世纪 50 年代末,在北京周围布设了一组区域地震台站;1956 年国家计划在长江三峡地区建设巨型水利枢纽工程,中国科学院地球物理研究所于 1958 年在湖北宜昌建立了该区第一个地震台站,1959 年又在巴东、火烧坪、兴山、三斗坪建立了地震台,主要仪器是仿前苏联哈林式 (SH) 短周期地震仪,建成了三峡地震台网;1960~1964 年,为了监视广东河源新丰江水库的地震活动,中国科学院地球物理研究所先后在双下、回龙、碉楼、洞源、湖羊角、杨梅坑等地建台,组成了河源区域地震台网,其中部分台站一直工作至今,为研究新丰江水库地震积累了丰富的资料;为了开发西北、建设西南的需要,20 世纪 60 年代中期,又先后在甘肃玉门昌马堡附近和四川渡口地区分别建立了区域地震台网。

1966 年以后,我国处于 20 世纪以来中国大陆地震活动的第四个活跃期,频频发生的强震从客观上极大地推进了我国的地震监测工作。1966 年 3 月邢台地区发生的一系列强震,引起了党中央、国务院领导的高度重视。在周恩来总理直接关怀下,科技人员仅用十天左右的时间,就建成了中国第一个遥测地震台网—北京遥测地震台网,该台网包括白家疃、平谷、喇叭沟、下花园、桐柏、周口店、车耳营和马道峪 8 个地震台,采用实线传输单分向短周期地震信号。该台网的建立不仅提高了北京及邻近地区地震活动的监测能力 (监测能力可以达到 $M_L \geq 2.0$ 级),而且为区域地震台网的建设取得了宝贵的经验。邢台地震后,各省地震部门先后建立了所属的区域地震台网。

1975 年海城地震以后,地震活动的严峻形势促进了区域地震台网的建设,北京遥测地震台网由原来 8 个台扩充到 21 个台,又相继建设了上海、沈阳、兰州、昆明和成都电信传输地震台网。1976 年初,《电信传输地震台网观测分析处理系统总体设计书》正式提出,经过论证后国家地震局于 1976 年 8 月正式启动该项目,这就是“768 工程”。“768 工程”在上海、北京、沈阳、兰州、昆明和成都 6 个台网实施,并投入实际运行。“768 工程”为区域遥测地震台网的建设积累了宝贵的经验,后来利用“768 工程”所研制的设备,还架设了安徽蚌埠台网 (信号通过中继传输至合肥)、江苏苏南台网 (信号传输至南京) 等 13 个区域无线遥测地震台网,加强了区域地震活动的观测。

1976 年唐山大地震发生后,进一步促进了区域地震台网的迅速发展,到 1976 年底,中国大陆地区 29 个省、自治区、直辖市均建立了区域地震台网,全国区域地震台站达 260 多个。1985 年以后又在一些地震频繁发生的大中城市、人口稠密地区建立了 17 个遥测地震台

网,全国大部分地区测震的监测能力达到 $M_L 4.0$ 级以上,一些重点地区监测能力达到 $M_L 2.0 \sim 3.0$ 级。至此,我国地震监测系统已初步形成,并在炉霍、昭通、海城、龙陵、唐山、松潘等多次强震的监视预报过程中经受了考验,提供了宝贵的资料依据,对我国地震学迅速的发展发挥了重要的作用。到 1984 年底,全国区域地震台站增加到 435 个(丁国瑜等,1993)。

五、数字地震台网

随着地震观测技术和电子技术的发展,从 20 世纪 80 年代开始,我国开始建设数字地震台网。1983~1986 年,国家地震局和美国地质调查局(USGS)合作建成了我国第一个国家级数字地震台网—中国数字地震台网(China Digital Seismograph Network, CDSN),1986 年 8 月建成了北京、兰州、恩施、昆明、琼中、余山、乌鲁木齐、海拉尔和牡丹江共 9 个数字化地震台以及设在北京的台网维修中心和数据管理中心,后来又增设了西安台和拉萨台。1992~2001 年,中美双方执行了 CDSN 二期技术改造,使台网的硬件、软件系统符合美国地震学研究联合会(IRIS)建设全球地震台网(GSN)的技术要求,由于台基的原因撤消了兰州地震台,使 CDSN 台站数量变为 10 个。从 2012 年到 2013 年中美双方又对 10 个 CDSN 台站进行了改造,配置了性能更好的 STS-2.5 地震计和 Q330 数据采集器。

从 1996 年开始,在中央和地方政府的大力支持下,通过“中国数字地震监测系统”、“中国数字地震观测网络”和“中国地震背景场探测”3 个项目的实施,中国地震局进行了大规模数字地震观测系统建设,经过十几年的努力,所有模拟记录地震台站全部实现数字化改造,并新建设了一些数字地震台站,现在我国所有运行的地震台站都是数字化台站,地震监测系统实现了数字化、网络化的历史突破,到 2007 年底由于所有地震台站均配置有数字地震仪器,这样在数字地震台网的名称中去掉了“数字”二字。根据台站均匀分布的原则,同时又要保证对于一些重点地区的加密观测,我国已建成了由国家地震台网、区域地震台网和流动地震台网组成的数字地震观测系统(刘瑞丰等,2008)。

1. 国家地震台网

国家地震台网是一个覆盖全国的地震监测台网,台站布局采用均匀分布的原则。从 1996 年起“中国数字地震监测系统”项目开始实施,到 2000 年底建成了 48 个国家地震台站,其中:成都、格尔木、高台、广州、黑河、呼和浩特、和田、沈阳、泰安和武汉 10 个台站使用我国生产的 JCZ-1 甚宽频带地震仪器,安西、宾县、昌都、长春、长沙、大连等 28 个台站使用我国生产的 CTS-1 甚宽频带地震仪器,10 个 CDSN 台站使用美方提供的仪器设备,记录的波形数据通过卫星实时传输到国家地震台网中心。所有台站数据字长均 24 位,JCZ-1 甚宽频带地震仪在 $360\text{ s} \sim 20\text{ Hz}$ 频带内采用速度平坦型设计,在 $360\text{ s} \sim 3000\text{ s}$ 频带内采用加速度平坦型设计,仪器的动态范围是 140 dB。CTS-1 甚宽频带地震仪采用速度平坦型设计,频带宽度为 $120\text{ s} \sim 20\text{ Hz}$,动态范围是 140 dB。

“中国数字地震观测网络”项目从 2001 年开始设计,2003 年开始实施,到 2007 年底建成了由 152 个台站(含境外 7 个台站)和和田、那曲 2 个小孔径台阵组成的新一代国家地震台网,除青藏高原部分地区外,全国大部分地区国家地震台站间距达到 250 km 左右,观测场地相对比较好,大多数台站有观测山洞。其中在国家地震台站中增加了库尔勒、安康、灵

山、乌加河、长白山、会昌 6 个甚宽频带台, 使用 JCZ-1 甚宽频带地震仪器, 使该甚宽频带台增加到 16 个, 其余台站使用国产的 CTS-1 和英国生产的 CMG-3ESP 甚宽频带地震仪器, 这两种仪器的频带宽度均为 $120\text{ s}\sim 20\text{ Hz}$ 。

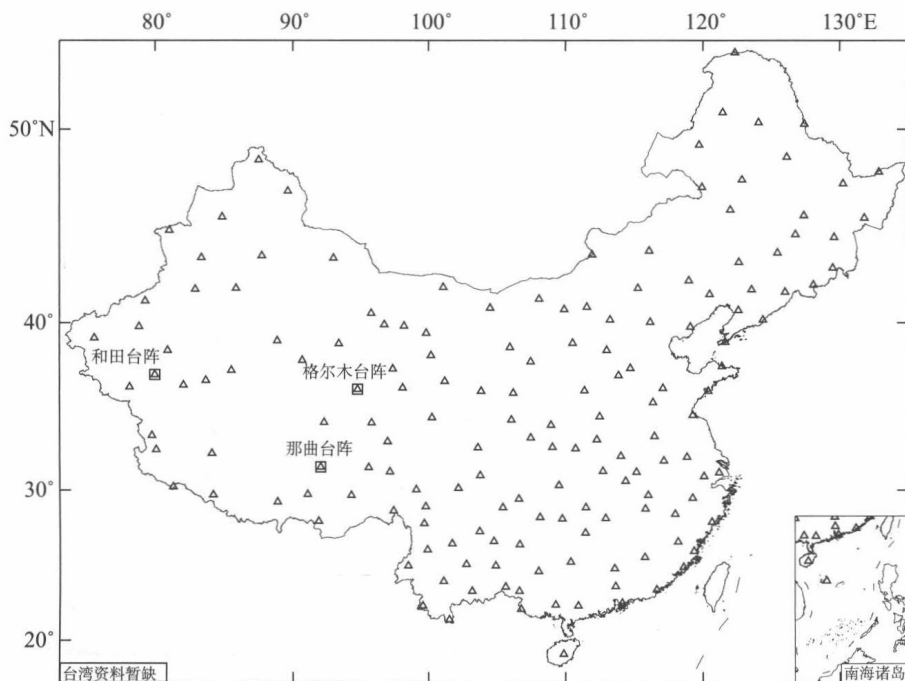


图 1-2 国家地震台站分布图

“中国地震背景场探测”项目从 2007 年开始设计, 2008 年开始实施, 2014 年 12 月完成, 该项目新建 18 个国家地震台站, 这些台站均使用甚宽带地震仪, 新建格尔木 1 个小孔径台阵, 该台阵由 1 个甚宽频带主台和 9 个短周期子台组成, 甚宽带地震仪频带宽度 $120\text{ s}\sim 40\text{ Hz}$, 短周期地震仪频带宽度 $1\text{ s}\sim 40\text{ Hz}$ 。

到 2014 年 12 月, 国家地震台网共有 170 个台站 (图 1-2) 和 3 个小孔径台阵, 每个台阵各有 10 个子台, 共 30 个子台。

2. 区域地震台网

“中国数字地震监测系统”项目建成了北京、上海、辽宁、昆明、成都、兰州、江苏、天津、大同、太原、浙江、呼和浩特、乌鲁木齐、山东、合肥、海南、河北、广东、西安、福建和首都圈 21 个区域数字地震台网, 共包括台站 353 个, 其中井下台 53 个, 主要分布在河北、北京和天津地区, 地面台 300 个。福建地震台网是中国大陆第一个覆盖全省的区域地震台网, 广东区域地震台网是我国第一个采用国产设备建成的 24 位区域地震台网, 天津地震台网是我国第一个深井区域地震台网 (阴朝民, 2001)。

首都圈地区 (包括北京市、天津市及河北省) 是中国防震减灾重点示范区。为了加强对首都圈地区的地震监测和应急快速反应能力, 在中央、北京市、天津市和河北省政府的支持下, 从 1999 年到 2001 年, 建设了实时传输的首都圈数字地震台网 (图 1-4)。该台网由