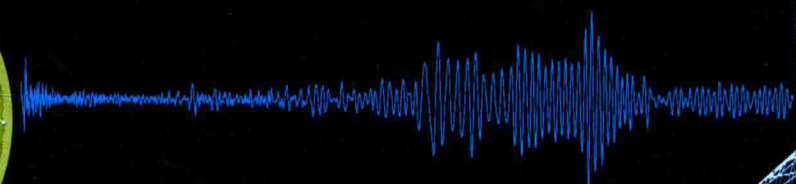
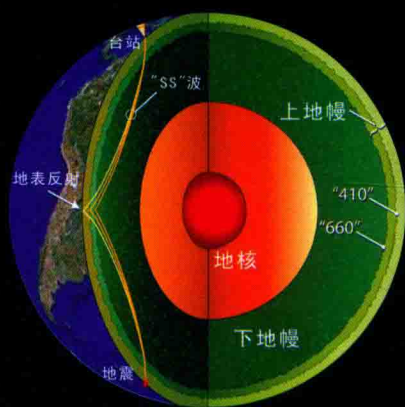


地震学导论

INTRODUCTION TO
SEISMOLOGY

万永革 编著



科学出版社

地震学导论

万永革 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书第1章介绍了地震学研究概况。地震学以弹性力学为基础,第2章对弹性力学的基本概念做一简单回忆,第3章则根据弹性力学的基本概念和定律得到一维和三维介质中传播的地震波动方程,探讨方程中各参数与地震震相的关系、地震震相的性质。第4章根据第3章地震波动方程的描述,研究平层介质中的地震波在地球表面、地球内部平层界面的反射、透射系数,根据传播因子矩阵与反射透射系数矩阵计算从震源到台站传播效应的理论地震图的基本原理;第5章,地震面波与地球自由振荡,论述地震面波类型和特点、频散方程及其观测,作为驻波的地球自由振荡振型和观测;第6章首先根据地震波动方程得到地震波传播可以看作射线的条件,然后研究平层介质射线理论的地震波走时和震中距的计算;作为远距离观测地震波,第7章介绍球层介质中射线形状、地震波走时和震中距计算;作为第6、第7章的延续,第8章讲解如何采用地震波走时和震中距的计算理论求解地下速度结构和地震参数;第9章,地震波的能量、振幅衰减与震级;第10章,讲解地震震源理论初步知识。

本书强调基本概念和基本数学推导,适合作为本科生、研究生学习地震学理论的教材,也可作为地震学相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地震学导论/万永革编著. —北京:科学出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-03-047926-6

I. ①地… II. ①万… III. ①地震学 IV. ①P315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 060286 号

责任编辑:张井飞 韩 鹏 / 责任校对:何艳萍 张小霞

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:30 1/4

字数:711 000

定价:148.00 元(含光盘)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

Preface

万永革教授编著的《地震学导论》行将付梓，日前送我一份书稿，邀我作文以序之。我得以先睹该书为快。阅读过程中，信手写下了一些意见和修改建议。阅毕掩卷，仍觉意犹未尽。遂写下我的读后感，权当为“序”。

顾名思义，地震学是研究地震动及其相关现象的一门科学。作为固体地球物理学的一个重要分支，地震学不仅研究发生地震的源（“震源”）本身的发生、发展与活动规律，也研究利用天然地震或人工方法激发的地震波探测地球内部结构、组成与演化等问题；既研究利用地震波作为探测手段勘探地下油气等资源（“兴利”），也研究如何预测、预防和减轻地震及其相关灾害（“避害”）等问题。地震学是集强烈的社会需求（防震减灾、资源勘探、公共安全、保卫和平等）与探索大自然奥秘的兴趣于一身的一门应用物理学。

和地球科学中的许多学科一样，对地震及其相关现象的研究具有多学科相互渗透、交叉融合的性质。作为物理学与天文学、地质学、大地测量学、工程科学、岩石力学、复杂系统科学、信息技术等诸多自然科学与技术科学的边缘科学，地震学产生了诸如月震学、金星震学、行星震学、地外震学、日震学、地震构造学、地震地质学、零频地震学（大地测量学中称为“地震大地测量学”）、数字地震学、计算地震学、地震水文学、工程地震学（工程学中称为“地震工程学”）等新兴交叉学科。作为一门自然科学，地震学与诸如经济学、政治学、法学、管理科学甚至哲学等社会科学乃至心理学的相互渗透与交叉融合，产生了诸如社会地震学（社会学中称为“地震社会学”）、法律地震学等交叉学科。当前，地震学已从以研究地震震源本身以及地球内部结构为主的“传统的”、“经典的”地震学（seismology）演化为现代的地震科学（earthquake science）。与此同时，“传统的”、“经典的”地震学也因地震观测技术的进步、现代数字技术的引进、计算技术的快速发展与高性能计算机的广泛应用，在地球结构和震源破裂过程反演、地震波场模拟、地震参数测定等地震学传统领域的研究取得了革命性的进步。地震学在地球内部精细结构探测、地震危险性评估、工程地震设防、核爆炸地震监测等领域起着越来越重要的作用，在地球物理学乃至地球科学广阔领域中占有显著的地位。在大学本科和研究生院，地震学已经不再只是固体地球物理学专业学生的专业必修课程，而且还是固体地球专业学生选修课程的主要选项之一。

无论在国际上，还是在国内，迄今已有一些优秀的地震学教科书或专著问世。这些教科书或专著或者起点高、或者侧重各异、或者繁简不同，且多数卷秩浩大。对于我国目前

固体地球物理学专业的学生或对地震学感兴趣的其他读者，仍需要有一本简明的教材，作为通往飞速发展的现代地震科学前缘的初阶或桥梁。

《地震学导论》一书便是为这样的目的编著的。万永革教授积多年讲授地震学课程的经验，注意地震学基础知识与学科前缘的结合、理论与实践的结合，编著了适合于目前我国地球物理专业学生和对地震学感兴趣的其他读者学习和参考的《地震学导论》一书。他在书中比较详尽地给出了地震学理论的基本概念的引进和推演过程，为读者提供了一个从地震发生到地震波传播与接收的、理解地震学理论基本概念的途径。他在书中详尽诠释了他所开发的、对地震学理论基本概念进行模拟的 MATLAB 程序，把理论与仿真实验结合在一起，使读者得以在实践中逐步掌握地震学理论的基本概念，提高实际应用能力，达到学以致用目的。他还总结和扩充了地震学的大量习题并在该书所附的光盘中给出了习题的详细解答，这些习题和解答对于教师检查学生或读者自检对地震学理论知识的正确理解并将其应用于地震观测实践大有裨益，是传统地震学教材的有益的补充。

考虑到《地震学导论》一书对读者对象需求的定位，该书的选题仍不失系统性和代表性。该书对地震学某些专门问题亦有深入的解读，是一本可读性甚强的地震学专业书籍。相信地球物理专业学生和对地震学感兴趣的众多读者都可从阅读《地震学导论》受益。

我热烈祝贺《地震学导论》的出版，祝愿该书能够成为有志于地震学研究的读者通往博大精深的现代地震科学殿堂的桥梁。

陈运泰

中国科学院院士

发展中国家科学院 (TWAS) 院士

前言

Foreword

地震是一种自然现象。地震学就是研究地震现象的一门科学。它除了研究天然地震的发生过程以及活动规律外，人们还利用由地震激发并在地球内传播的波研究地球内部结构及动力学过程。19 世纪末以来，这门学科迅速发展成为一门独立的现代科学，在地震波理论、震源理论、地球内部结构等许多方面开展了深入探索，取得了很大发展。

国内已出版了相当数量的地震学教材，如中国科学技术大学徐果明、周惠兰教授 1982 年出版的《地震学原理》，刘斌教授 2009 年出版的《地震学原理与应用》，北京大学傅淑芳等教授 1991 年出版的《地震学教程》，1997 年出版的《高等地震学》，周仕勇、许忠淮教授 2010 年出版的《现代地震学教程》等。这些教材在地震学理论与应用的普及和推广方面起到了重要作用，并在今天仍可作为重要的教学参考书。然而，上述教材大部分是针对具有雄厚数理基础学生的精英教育而写，在一定程度上淡化了理论推导的具体细节，而对于现代的大众化教育则感觉跳跃性较大。其次，目前随着计算机技术的发展，采用模拟技术展示地震学较为抽象的规律是当前地震学教学的一个重要努力方向。最后，要掌握相应的地震学理论并将其应用于实际问题，做一定数量的习题是必不可少的。本教材在组织材料过程中尝试突出如下特点：

1. 突出地震学规律的详细推导过程，与目前高等数学、普通物理、数学物理方法等课程中知识点衔接起来，搭起地震学规律与大学所学数理知识的“桥梁”。

2. 采用 MATLAB 程序实现地震学规律的模拟，学生可以进行人机交互式学习，自主认识地震学的基本规律。学生既可以通过公式推导，也可以通过阅读 MATLAB 代码，并改变输入参数进行模拟来理解地震学知识。这样也有助于提高学生运用地震学知识的能力。

3. 给出了六百多道题目的课后习题，并在光盘中给出了解答每一步所依据的方程或假定。这些题目由易到难，并对应于相应章节的知识点，便于学习某章节后检查对知识的理解。

作者一直担心，这样一本地震学讲稿的付印是否有些为时过早。地震学学习基于高等数学、大学物理、数学物理方法等课程的较强的数理基础，地震学知识体系的调整与完善、教学模拟软件的研制等研究正方兴未艾。对其进行总结和系统化是一项重要的、艰苦的、富有创造性的工作。以作者的学识水平和能力要胜任这项工作几乎不可能。但目前地震学理论和模拟相结合的教材的奇缺使得作者不得不冒着风险将这份讲稿呈献给读者。由

于本人水平有限,加之时间仓促,“突击”出来的这份教材肯定存在很多问题,殷切希望广大读者和同行提出宝贵意见。

从理论体系上,不同于其他地震学教材,本书将弹性理论、地震波动方程、平层介质中地震波、面波及自由振荡作为第一部分,这是由于这些知识均以弹性理论和波动方程为基础;将射线理论(平层和球层)及其应用(定位和速度结构反演)作为第二部分;虽然震源理论初步和地震波能量及衰减也用到地震波动的相关知识,但它们同时又要基于射线理论,因此将这两章内容作为最后一部分。

作为地震学的一本入门书籍,作者假设读者没有任何地震学知识,将一维问题、平面成层介质、液体介质等简单模型作为例子来介绍基本概念和基本理论的详细推演,逐渐过渡到实际地球模型。虽然如此,读者需要一定的微积分、常微分方程和偏微分方程、向量和张量分析、笛卡儿坐标、球坐标、柱坐标及其相应的 Legendre 函数和 Bessel 函数等数学知识以及连续介质的基本力学知识。确定作为地震学的入门书籍讲解到什么程度是很难的,本书仅选择地震学最为基本的问题进行较为详细的推演。对于特定地震学问题的详细研究,请读者参考已经发表的相关文献。

为满足不通层次读者学习地震学的需要,本书尽可能详细地讲述了地震学公式的推演过程,希望对需要详细理解地震学规律的读者有帮助,而仅限于地震学应用的读者,可以略过详细推导过程及某些理论性较强的章节,专注于公式中各参数的意义及其蕴含规律的理解(采用本书所附带的 MATLAB 程序进行模拟),并将其应用于实际。

作为地震学的基础读物,本书是作者在多年讲授地震学的过程中及科研实践中逐步完善的。一些基础内容是早期很多地震学家逐步完善的,现在无法在引用处一一注明,书后所列参考文献也不够完善,请读者谅解,并向为地震学奠定基础的地震学家表示由衷敬意。

本教材的编写得到防灾科技学院各级领导的鼓励和支持。出版经费来源于河北省地震科技星火计划项目(DZ20140404002)、中央高校科研业务费专项(ZY20110101)、防灾减灾特色教材建设专项、防灾科技学院研究生课程建设与改革项目和河北省高等学校百名优秀创新人才支持计划等多个项目。台湾中央大学马国风教授和台湾大学龚源成教授无私提供了他们的教学材料供我们参考,我的研究生黄骥超、李祥、高熹微等在绘图方面给予大力协助。谨向他们表示衷心感谢!虽然本书所述及的地震学理论为较为成熟的知识,然而,本书所进行的推演和所设计的程序也是作者费了一定心血编出来的,如用到该程序,请注明引用本书。

万永革

2016年1月25日

目 录

Contents

前言

第 1 章 引言	1
1.1 地震学简史	1
1.2 全球地震活动分布与板块构造	7
1.3 中国的地震分布与块体构造	11
1.4 地壳	14
1.5 全球平均速度模型	15
习题	22
第 2 章 应力和应变	27
2.1 应力	27
2.1.1 应力张量	27
2.1.2 任意一个面上的应力可以由应力张量表示	28
2.1.3 坐标变换及脱离坐标系的任意截面上的剪应力和正应力表示	30
2.1.4 主应力和应力主轴	33
2.1.5 应力值	37
2.2 应变张量	38
2.2.1 位移场表示	38
2.2.2 应变的物理解释	39
2.2.3 本征值和本征向量	42
2.3 线性的应力-应变关系	42
2.3.1 弹性常数的引入	42
2.3.2 弹性参数的物理意义	44
2.3.3 弹性系数之间的关系	45
2.3.4 弹性模量的单位	46
习题	46

第3章 地震波动方程	50
3.1 一维波动方程	50
3.1.1 一维波动方程的导出及求解	50
3.1.2 一维波动传播的模拟	52
3.1.3 描述地震振动和波的基本概念	54
3.2 三维波动方程的导出	57
3.3 体应变和剪切应变的波动方程	59
3.4 地震波的势	61
3.5 三维波动方程求解	62
3.6 P波和S波的振动方向	64
3.6.1 P波的振动方向	64
3.6.2 S波的振动方向	66
3.6.3 P波和S波振动方向的空间表示	70
3.7 三维方程的球坐标下求解: 球面波	72
3.8 有限差分求解二维声波传播方程	75
习题	78
第4章 平层介质中的地震波	83
4.1 地震波传播的连续性条件和势函数	83
4.1.1 平层介质中地震波传播的连续性条件	83
4.1.2 P波、SV波与SH波的波场是分离的	84
4.1.3 P-SV系统和SH系统的势函数	84
4.2 地球自由表面地震波的反射	84
4.2.1 P波在自由界面的反射	85
4.2.2 SV波入射到自由表面	90
4.2.3 SH波在自由界面上的反射	94
4.2.4 自由界面上的位移, 视入射角	95
4.3 地震波在内部平层界面的反射和透射系数	98
4.3.1 SH波的反射和透射系数	98
4.3.2 P-SV系统的反射、透射系数	102
4.4 模拟平面波的矩阵方法	106
4.4.1 Haskell 矩阵	106
4.4.2 反射透射系数矩阵	107
4.4.3 Haskell 矩阵在平层介质中的传递	109
习题	110
第5章 地震面波和地球自由振荡	114
5.1 Love 波	114

5.1.1	Love 波频散方程	114
5.1.2	截止频率和最长波长	117
5.1.3	频散曲线计算一例	118
5.1.4	位移分布	119
5.2	Rayleigh 波	125
5.2.1	均匀半空间中的 Rayleigh 方程	125
5.2.2	均匀半空间中的 Rayleigh 波的质点运动	127
5.2.3	液体层覆盖在半空间介质上的 Rayleigh 波方程	132
5.3	Love 波为 SH 波相长干涉的结果	133
5.4	地震波频散	135
5.4.1	频散的直观解释	135
5.4.2	面波衰减较慢的解释	139
5.5	根据地震图得到面波群速度和相速度的方法	140
5.5.1	群速度	141
5.5.2	相速度	160
5.6	全球面波	166
5.7	多层介质中面波的频散曲线的计算	169
5.8	简正模型	174
5.8.1	弦的振动	174
5.8.2	均匀液体球的自由振荡——地球自由振荡的模式	179
5.8.3	球型振荡和环型振荡	184
5.8.4	地球自由振荡的观测	185
	习题	189

第 6 章 平层介质中射线理论 195

6.1	波动方程向射线理论的过渡	195
6.2	平层介质中的 Benndorf 定律和 Snell 定律	198
6.2.1	Benndorf 定律	198
6.2.2	Snell 定律	199
6.3	平层介质的射线方程	200
6.3.1	速度随深度增加的平层介质地震波传播路径的形态	200
6.3.2	参数方程	201
6.4	速度梯度为常数的地震波传播	203
6.4.1	单层走时和震中距	203
6.4.2	速度梯度为常数的介质中的射线路径	205
6.5	速度随深度指数增加的走时和震中距计算	207
6.6	震源在地表的成层介质地震波走时计算举例	208
6.6.1	速度随深度逐渐增加的地震波射线震中距、走时的计算	208

6.6.2	速度陡变带的地震波走时	212
6.6.3	含低速层的地震波射线路径	216
6.6.4	含高速夹层的地震波射线路径	219
6.7	天然地震的震相走时	221
6.7.1	单层地壳介质模型中地震波震相与走时曲线	221
6.7.2	多层地壳介质模型中地震波走时曲线	226
6.8	地震射线在斜界面的反射与折射	243
6.8.1	反射波	243
6.8.2	首波	244
习题		247

第 7 章 球层介质中的射线理论 254

7.1	球层介质中的 Snell 定律和 Benndorf 定律	254
7.1.1	Snell 定律	254
7.1.2	Benndorf 定律	255
7.2	射线方程	256
7.3	几种特定速度分布的球层中的地震波走时和震中距	257
7.3.1	恒速球层	257
7.3.2	幂函数分布变速层	259
7.3.3	速度线性变化的变速层	260
7.4	射线的曲率	261
7.4.1	射线曲率的推导	261
7.4.2	不同速度分布的射线路径	262
7.4.3	目前地球速度模型的射线路径的讨论	272
7.5	远震震相及其观测	280
7.6	按 PREM 模型模拟的地震波走时	286
7.6.1	P 波射线路径及走时模拟	286
7.6.2	PP 和 PPP 震相的路径模拟	288
7.6.3	PcP 和 PcS 的路径模拟	292
7.6.4	PP, PPP, PcP, PcS 的走时模拟	295
习题		297

第 8 章 走时数据的反演 302

8.1	球层介质的速度反演	302
8.1.1	拐点法(古登堡法)	302
8.1.2	Hergloz-Wiechert 方法	303
8.1.3	地球表面震源震中距的计算	309
8.2	地球内部密度、重力加速度与压力的估计方法	312

8.2.1	地球内部密度的估计	312
8.2.2	地球内部重力的估计	313
8.2.3	地球内部压力的估计	315
8.3	单台地震定位及均匀介质中地震的多台定位	316
8.3.1	单台定位法	316
8.3.2	三站求取震源位置的石川法	322
8.3.3	四个台站(或以上)求解地震位置的 Inglada 算法	323
8.3.4	多台(四个或以上)求解地震发震时刻的和达直线法	325
8.4	地震定位结果与台站分布的关系	327
8.5	迭代定位方法	330
8.5.1	迭代定位方法的基本思路	330
8.5.2	迭代方法的具体实现	331
8.6	相对定位方法	342
8.6.1	主事件定位	342
8.6.2	双差定位法	342
习题		343
第 9 章 地震波能量及衰减, 地震震级		347
9.1	地震波的能量	347
9.2	一维速度模型的几何扩散	351
9.3	地震波的衰减	359
9.3.1	品质因子	359
9.3.2	Q 值与复数弹性模量的关系	364
9.3.3	地球品质因子的测量	366
9.3.4	地球内部的品质因子	367
9.4	地震震级及烈度	368
9.4.1	地震震级	369
9.4.2	地震烈度	374
习题		381
第 10 章 震源理论		384
10.1	格林函数和矩张量	384
10.1.1	格林函数	384
10.1.2	矩张量	386
10.1.3	地震矩张量与地震波位移的关系	387
10.2	地震断层与地震矩张量	388
10.2.1	断层参数	388
10.2.2	地震矩张量的物理意义	389

10.2.3 断层面参数与地震矩张量的转换公式 393

10.3 震源机制参数的相互转换 395

10.4 震源的辐射图像 402

10.4.1 P波辐射花样 402

10.4.2 S波的辐射花样 406

10.5 震源机制参数的图形表达——海滩球 409

10.5.1 Wulff 投影 410

10.5.2 等面积投影 422

10.6 P波初动测定震源机制（断层面解） 431

10.6.1 断层错动产生的P波初动的四个象限 431

10.6.2 采用P波初动求解震源机制的思路 432

10.6.3 求解震源机制的计算机实现 433

10.6.4 根据P波初动符号分布猜测震源机制解的一个程序 439

10.7 由体波资料反演矩张量 442

10.8 由面波波形资料反演地震矩张量 444

10.9 有限尺度震源产生的地震波 447

10.9.1 单侧破裂移动源 447

10.9.2 双侧破裂移动源 452

10.10 全球矩心矩张量计划简介 454

10.10.1 矩心矩张量方法和算法概述 454

10.10.2 矩心矩张量目录文件（ndk）格式 457

习题 459



第1章 引言

地震和刮风、下雨一样，是一种常见的自然现象。全球平均每天发生 50 次左右的局部有感地震，几天有一次能使建筑物遭受破坏的地震。全世界 6 亿多人生活在强震带上，20 世纪约有 200 万人死于地震，随着人口密度的增大，预计 21 世纪将有 1500 万人死于地震。我国是一个多地震的国家，地震活跃区的居民一般都有切身体验，甚至是出生入死的亲历险境。20 世纪以来，我国发生了 800 多次 6 级以上的地震，平均每年约 8 次；历史记载全球死亡超过 20 万人的地震有 6 次，其中在中国就有 4 次（分别是 1303 年 9 月 17 日的山西洪洞 M8.0 地震，死亡 27 万人；1556 年 1 月 23 日的陕西华县 M 8.5 地震，死亡 83 万人；1920 年 12 月 26 日的宁夏海原 M 8.6 地震，死亡 28.5 万人；1976 年 7 月 28 日唐山 M 7.8 地震，死亡 24 万人）。强烈的地震会直接或间接造成破坏。然而任何事物都有两面性，地震虽然是一种自然灾害，但迄今为止，人们对地球内部的了解主要来自地震带来的信息，因为地球的不可入性，我们不可能在地球内部进行直接观测，其内部结构只能靠地震激发的地震波来研究。地震相当于一盏照亮地球内部的明灯，它使我们发现了我们赖以生存的行星的许多性质。

地震学是关于地震的一门科学，其英语单词 seismology 是由希腊语 seimos（地震）和 logos（科学）两个词组成的。地震学在地球物理和地球科学的更广阔领域里占有显著的位置。它涉及了许多有趣的理论问题，包括分析弹性波在复杂介质里传播的问题，但它又可以作为一种工具被简单地用于对所感兴趣的不同区域进行探查。应用范围从地下几千公里的地核的研究，到为寻找石油所进行的浅层地壳结构的勘测。许多基本的物理过程没有超出牛顿定律 ($F=ma$)，但实际的震源和结构的复杂性使得必须做很复杂的数学处理并使用高性能的计算机。观测及仪器的改进促进了地震学的发展，数据的获取已经使我们在地震学理论及对地球结构的认识上都有了突破性进展。

地震学所提供的信息正广泛地改变不确定性的程度。有些参数，如经过地幔的压缩波的平均走时，可能百分之百地得知。而另一些参数，如在地核里能量的耗损，了解的相当少。在过去 50 年里，对地球的平均的径向速度结构已有了相当好的了解。现在，地震定位和地震震源机制确定已经作为日常的测定工作，但对地震物理过程本身的许多重要方面，仍然没有搞清楚。

1.1 地震学简史

地震学是一门建立在地震观测基础上的，并且是在对地震观测结果的解释和研究过程中不断完善和发展的科学。因而地震观测是地震学的基础，它在地震学乃至整个地球科学

的发展中都起着非常重要的作用。用仪器观测地震，最早始于我国东汉时期。公元 132 年我国东汉科学家张衡设计并制造了候风地动仪（图 1-1-1），史书记载：“阳嘉元年，复造候风地动仪。以精铜铸成，员径八尺，合盖隆起，形似酒尊，饰以篆文山龟鸟兽之形。中有都柱，傍行八道，施关发机。外有八龙，首衔铜丸，下有蟾蜍，张口承之。其牙机巧制，皆隐在尊中，覆盖周密无际。如有地动，尊则振龙，机发吐丸，而蟾蜍衔之。振声激扬，伺者因此觉知。虽一龙发机，而七首不动，寻其方面，乃知震之所在。验之以事，合契若神。自书典所记，未之有也。尝一龙机发而地不觉动，京师学者咸怪其无征。后数日驿至，果地震陇西，于是皆服其妙。自此以后，乃令史官记地动所从方起。”史书记载的地震即公元 134 年 12 月 13 日在当时的首都洛阳测到一次发生在陇西的地震。这是人类第一次用仪器测到远处发生的地震。这时的地震仪实际上是验震器，即用于指示地震发生的装置，不可能像现代地震仪一样记录地震所引起的地面震动过程。尽管如此，候风地动仪仍是一项值得我们中国人骄傲的伟大发明，它不但表现了古代灿烂的科学文明，在当时通信极为困难的情况下，如果能测出远处发生了大地震，对中央政府组织赈灾，减轻地震造成的灾害和社会动乱，无疑也是很有意义的。

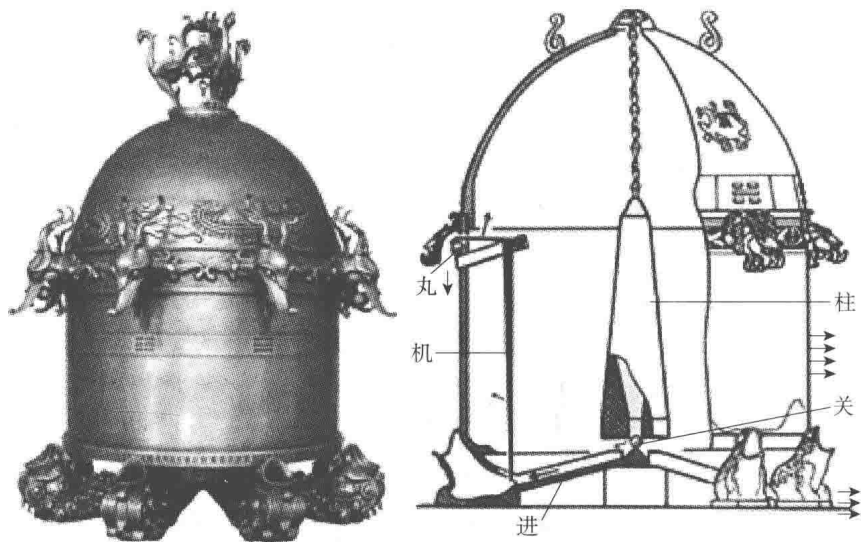


图 1-1-1 复原的公元 132 年我国东汉科学家张衡设计制造的候风地动仪

早期对地震的认识大多局限于地震现象的定性描述，文献记载也多是伤亡人数和财产损失的危害描述。对地震的定量研究只是近百年以来的事。在 19 世纪初期 Cauchy、Poisson、Stokes、Rayleigh 等科学家开始研究弹性波传播理论，依其描述在固体介质中可能预期的波相。这些波包括因在整个固体里传播而称为体波的压缩波和剪切波，以及沿自由表面传播的面波。因为压缩波的传播比剪切波快，先到达，故往往称为初至波或 P 波。反之，后到达的剪切波称为次至波或 S 波。在这个时期，地震学理论超前于地震观测，待地震仪具有足够的观测精度后才辨认出这些波。

1857 年那不勒斯发生了一次破坏性地震。一个对地震感兴趣的爱尔兰工程师 Robert Mallet（罗伯特·马利特）到意大利研究此次地震所造成的破坏。他的工作是在观测地震学方面第一个有意义的尝试。他描述了这样的想法，即地震由一个焦点（focus，现在称

为震源)出发,辐射地震波,可把这些波反向追踪来确定焦点的位置。Robert Mallet 认为地震是爆炸,只产生压缩波,这样的分析是有欠缺的。不过,他提出建立观测台来监视地震和用人工震源实验来测量地震波速度,则是合理的。

早期的地震仪器设备以无阻尼摆为基础,虽然有时可测量初动时间,但没有连续的时间记录。Filippo Cecchi (菲利普·切奇)于1875年在意大利研制了第一台有时间记录的地震仪。这之后不久,James Ewing (詹姆斯·尤因)设计了水平摆,记录在熏烟玻璃的旋转的圆盘上。第一个远距离地震记录是1889年在波茨坦记录的日本地震波形。1897年在加利福尼亚圣何塞附近的 Lick 观象台安装了北美的第一个地震仪。该仪器后来记录到1906年的旧金山地震。这些早期的仪器是无阻尼的,只能提供振动开始后短时间的地面运动的精确估计。1898年,Wiechert (维歇尔特)研制了第一台有黏滞阻尼的地震计,可提供在整个地震持续时间里有用的记录。1900年初期,Galitzen (伽里津)研制了第一台电磁式地震仪,其运动的摆使线圈产生电流。他用这种仪器在俄罗斯建立了一系列的台站。因为电磁式地震仪有许多优点,超过了早期纯机械设计的仪器,因此现代所有地震仪都是电磁式的。

地震仪器的改进使得地震图的识别取得了快速进展。1900年,Richard Oldham (理查德·奥尔德姆)报道在地震图上识别出P波、S波和面波,验证了地球可近似按弹性体处理的正确性。1906年,他根据震源到接收器的距离约超过 100° 时没有直达的P波、S波的观测事实,发现地核的存在。1909年南斯拉夫地震学家莫霍若维奇(Mohorovicic)在近地震观测中,发现了Pn和Sn震相(详见第6章)。他假定地下几十公里的深处存在着一个地震波速度的间断面,界面下介质的速度突然增加。Pn波和Sn波就是以临界角入射又以临界角出射这个面的地震波。这个间断面现在称为莫霍面或M-面。这个面以上介质称为地壳,以下称为地幔。地壳这个词给人一个内软外坚的印象,这是因为在现代地球物理学诞生前,人们普遍认为地球内部是熔融液体,表面凝固着一层硬壳。这个概念显然是错误的,现代观测表明地球内部大多数深部介质一般比钢还硬。然而“地壳”一词已沿用许多年,不宜再改。我们只须记住,它仅仅是指地球的最上层,并无硬壳的涵义。1907年,左普里兹(Zoppritz)做出了第一个被广泛应用的走时表(走时作为地震到台站距离的函数)。1914年,Gutenberg (古登堡)公布了地核震相(穿过地核或从地核反射的波)的走时表,报道了对液态地核深度的第一个精确的估算(2900公里,与现代的2889公里的值很接近)。1936年,Lehmann (莱曼)发现了固体内核,1940年,Jeffreys (杰弗瑞斯)和Bullen (布仑)公布了他们的有大量震相的走时表的最终版本。这个JB表直到今天还在使用,其中所列出的时间与现代有了核爆炸精确位置事件记录的模型仅差几秒。用地震波的走时表来确定地球内部不同深度的平均速度结构则主要是过去50年里完成的。

由于P波和S波走时没有直接提供有关密度的约束,所以确定地球内部的密度分布比确定速度结构困难得多。然而,Bullen (布仑)指出,运用速度与密度的定标关系和已知的地球质量及惯性矩,可以推测地球内部的密度。现代简正振型地震学的结果对密度给出了较直接的约束(虽然仅限于垂向分辨率),总体上与过去认识的地球内部密度是一致的。

20世纪早期,地震台站数量的增加使得确定大地震位置成为常规工作,并由此发现地震不是随机分布的,而是沿一些清晰的带发生。全球地震目录的著名网站为国际地震中

心 (International Seismological Center, ISC)。从后面的内容可以看到全球地震分布并不是随机的,而是按一定规律进行分布的(图 1-1-2)。然而,在 20 世纪 60 年代前,地球科学对这些带作为板块构造运动的一部分的含义并不完全清楚。当时认为地球表面的特征主要是由地质时期缓慢漂移的少数相对坚硬的板块运动所决定的。相邻板块间的相对运动使地震沿边界发生。板块沿中洋脊拉开,形成新的海洋岩石圈。这是欧洲和非洲与美洲分开的原因,板块在海沟的消减带返回到地幔。有些断层,如加利福尼亚圣安德烈斯断层,是板块之间剪切运动的结果,这些断层呈现走滑运动。

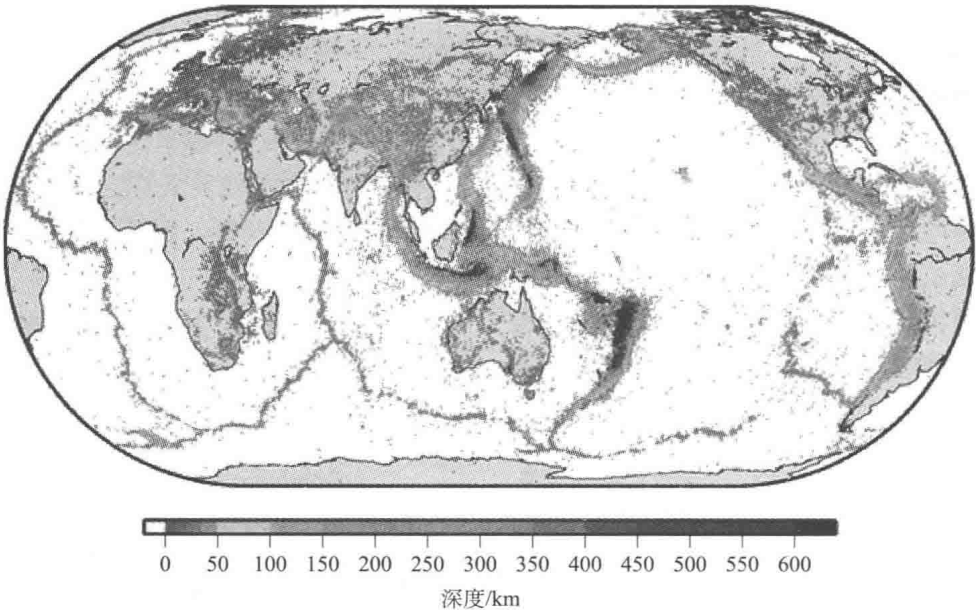


图 1-1-2 ISC 给出的 1960~2014 年的地震分布

1928 年 Wadati 报道了第一个令人信服的深源(深度在 100km 以下)地震的证据。1919 年 Turner 已经发现了深震的存在,但他的结果没有被普遍承认[主要是因为他的定位结果也有一些发生在地表之上的空气震 (air quake)]。观测到的深震,主要分布在延伸至 700km 左右深度的倾斜的地震活动面上(往往称为 Wadati-Benioff 带)。这些带大多为环太平洋海洋岩石圈消减板块的位置。采用 1960~2008 年的地震目录求得汤加地区的深度地震剖面,如图 1-1-3 所示,该图展示了位于太平洋西南的世界上最活跃的深震区,汤加消减带地震位置的剖面。深震的存在令人吃惊,因为地壳中的浅源地震为低温下的脆性破裂,而数百公里的深度,压力和温度的增加使多数物质发生延性变形。至今深震发生的物理机制依旧是没有解决的科学问题。

人类对地球自由振荡的认识也是从理论研究开始的。1829 年法国泊松 (Poisson) 最早研究了完全弹性固体球的振动问题。此后,英国的开尔文 (Kelvin) 和达尔文 (Darwin) 也有重要贡献。尽管理论工作延续多年,但只是在 20 世纪,地震学的发展使人类对地球内部构造的认识更加清楚后,理论模式才比较接近真实地球。1952 年 11 月 4 日堪察加发生大地震,美国贝尼奥夫 (Benioff) 首次在他自己设计制作的应变地震仪上发现周期约为 57 分钟的长周期振动。1960 年 5 月 22 日智利大地震时,贝尼奥夫和其他几个研究集体都观测到多种频率的谐振振型。地球长周期自由振荡的真实性被最后证实。至今已观测