

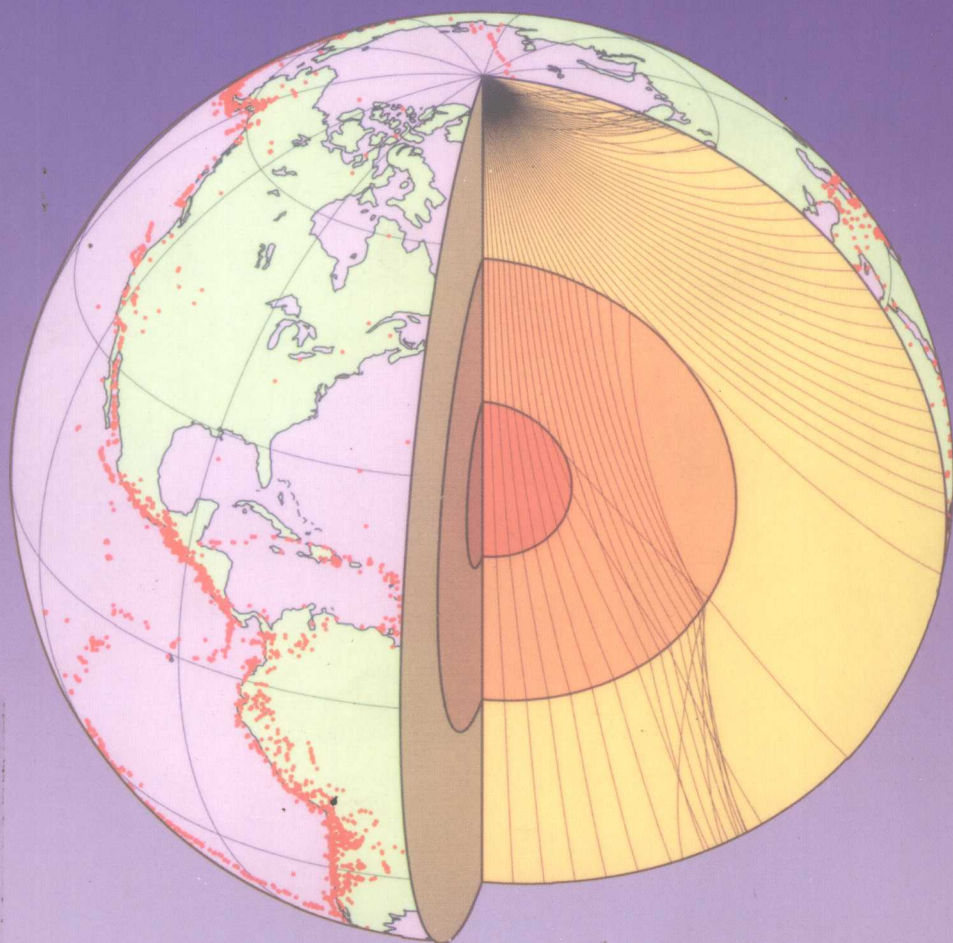
地震学引论

INTRODUCTION TO SEISMOLOGY

[美] Peter M. Shearer 著

陈章立 译

赵翠萍 王勤彩 华 卫 校



地震出版社

地震学引论

[美]Peter M. Shearer 著

陈章立 译

赵翠萍 王勤彩 华 卫 校

地震出版社

P315
X8

图书在版编目 (CIP) 数据

地震学引论/ (美) 希勒 (Peter. M. Shearer) 著; 陈章立译.

—北京: 地震出版社, 2008. 2

ISBN 978 - 7 - 5028 - 3138 - 7

I. 地... II. ①希...②陈... III. 地震学—概论 IV. P315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 089450 号

地震版 XT200600273

著作权合同登记 图字 01 - 2007 - 3168

Translation from the English language Edition:

Introduction to Seismology

By Peter M. Shearer

© Cambridge 1999

Published by the press syndicate of the University of Cambridge

First published 1999

Printed in the United States of America

ISBN 0521660238 hardback

ISBN 0521669537 Paperback

All Rights Reserved

地震学引论

[美] Peter M. Shearer 著

陈章立 译

赵翠萍 王勤彩 华 卫 校

责任编辑: 董 青

责任校对: 李 珺 樊 钰

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 68467972

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: 2008 年 2 月第一版 2008 年 2 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 352 千字

印张: 13.75

印数: 0001 ~ 1000

书号: ISBN 978 - 7 - 5028 - 3138 - 7/P · 1329 (3827)

定价: 50.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

内容提要

这本书对地震学理论作了入门的、简明的介绍。对地震学所用的一些基本概念做了清晰的解释，与冗长的推导比较，这本书着重于直观的理解。

本书涵盖的内容包括了地震学基本课程的全部知识：应力-应变理论、地震波方程、射线理论、层析成像、反射地震学、面波、震源理论、各向异性和地震预报。每章后面都给出了详细的练习，便于学生用这些方法来学习计算感兴趣的结果和解释一些地震特性。在某些例子中，还给出了与这些练习有关的计算的子程序。在正文中附了许多插图，包括地震图的实例和全球地震波场图像。

这本教科书是在读的高年级大学生和一年级研究生学习地震学引论的理想课本，特别适合于一个为期半学年的地震学课程。

Peter M. Shearer 教授是位于圣地亚哥的加利福尼亚大学 Scripps 海洋物理学院的地球物理学教授。他发表了 50 多篇涉及地震学不同方面的论文，在 Scripps 教了近 10 年的地震学课程。本书就是基于此课程及为此课程设计的问题编写的。

译者的话

《地震学引论》是一本地震学经典教程，它简明扼要地讲授了地震学入门所必需掌握的所有概念和内容，包括应力-应变理论、地震波方程、射线理论、层析成像、反射地震学、面波、震源理论、各向异性和地震预报等。该书内容全面，深入浅出，既是年轻地震科技工作者学习地震学基础知识的理想教材，也是开展地震学研究的重要参考书。

为尊重原著，本译著的变量及公式表述均与原版书保持一致。另外，在翻译过程中，译者根据作者个人网页(<http://mahi.ucsd.edu/shearer/errata.html>)上的勘误列表对书中的多处错误进行了校正，并在相应的位置予以说明。

序

为什么要写另一本地震学的书？目前已经有几本很好的教科书，它们的内容涵盖了地震学领域的绝大部分内容。然而，没有一本书是导论类的。它们多数只是简单地介绍了许多内容，而不是适用于四分之一学年或半学年的素材。我的这本书对定量地震学提供一个易读的、简明的导论，是特别为课堂讲授而编写的，不像 Aki 和 Richards (1980) 和 Lay 和 Wallace (1995) 那么严谨和全面，我希望本书更适合于在有限的时间里讲授地震学概论。

为了加快进程，只对许多结果作了叙述，而没有对方程做详细的证明或推导。在这些情况下，读者要做更完整的解读，通常可参考 Aki 和 Richards 或其他书的出处。我通常希望对主要的概念及怎样用于研究地球结构做实用的描述。书中直接采用了物理学和矢量计算的一些知识，但为了使这本书自身完整，在附录中给出大多数关键的概念。

任何一本书都在某种程度上反映了作者本人的观点。就此而言，与内容均衡的书相比较，我的这本书或许比较多地包含了射线理论和体波走时的内容，而关于面波和简正模型的内容少一些。按我的理解，现代大部分的地震学研究仍然依赖于走时，走时理论更容易直观地帮助学生弄清其他更深的理论。虽然这里也介绍了一些新的研究结果，但我更着重于一些基本的原理和关键的数据，以避免在这本书出版后，这些结果很快就被废弃。

学生练习的重点不是推导方程（无论如何，只有少数地震学家在这方面花费许多时间），而是用课本中所解释的方法计算感兴趣的结果和解释地球的地震性质。由于计算机程序设计技能往往是进行地震学研究所必需的，所以我给的练习也包含了许多计算的练习。设计这些练习是为了使学生对实际研究问题有所体会，而这只要求中等水平的编程能力就可以了。附录 4 列出了帮助做练习的子程序。

致 谢

本书起初是我在美国加州圣地亚哥教一年级地球物理学研究生的地震学基础课程时的讲义稿，我感谢学生在这几年所做的评论和校正。第四章及第五章的一些内容和短时距方程这一节取自 John 和 Orcutt 写的地震学讲稿。第四章的许多图是与 Luciana、Stiz 和 Paul Earle 合作制作的。这本书大部分是在澳大利亚国立大学 6 个月的休假期间完成的，在我访问期间，Brian Kennet 为我的旅行和办公提供了慷慨的支持。

目 录

序

致谢

第一章 引言	(1)
1.1 地震学的简要发展历史	(1)
练习	(9)
第二章 应力和应变	(10)
2.1 应力张量	(10)
2.2 应变张量	(13)
2.3 线性的应力-应变关系	(16)
练习	(17)
第三章 地震波动方程	(20)
3.1 运动方程	(20)
3.2 地震波动方程	(21)
3.3 平面波	(24)
3.4 P 波和 S 波的偏振	(25)
3.5 球面波	(26)
练习	(27)
第四章 射线理论: 走时	(29)
4.1 斯奈尔定律	(29)
4.2 横向均匀模型的射线路径	(30)
4.3 走时曲线和时差	(33)
4.4 低速区	(36)
4.5 射线追踪方程总结	(37)
4.6 球状地球的射线追踪	(38)
4.7 地球的展平变换	(39)
4.8 射线命名原则	(39)
4.9 全球体波观测	(42)
练习	(49)
第五章 走时数据的反演	(53)
5.1 一维速度反演	(53)
5.2 线性拟合	(55)
5.3 $\tau(p)$ 反演	(57)
5.4 线性程序设计和规则化方法	(60)

5.5	归纳: 一维速度反演	(61)
5.6	三维速度反演	(61)
5.7	地震定位	(67)
	练习	(72)
第六章	射线理论: 振幅和相位	(74)
6.1	地震波的能量	(74)
6.2	一维速度模型的几何扩散	(76)
6.3	反射和透射系数	(77)
6.4	转折点和希尔伯特变换	(85)
6.5	模拟平面波的矩阵方法	(87)
6.6	衰减	(91)
	练习	(92)
第七章	反射地震学	(94)
7.1	零位偏差剖面	(94)
7.2	共中心点的叠加	(96)
7.3	震源和反褶积	(99)
7.4	偏移	(102)
7.5	速度分析	(105)
7.6	基尔霍夫理论	(106)
	练习	(113)
第八章	面波	(115)
8.1	勒夫波	(115)
8.2	瑞利波	(118)
8.3	频散	(121)
8.4	全球面波	(123)
8.5	面波观测	(125)
8.6	简正振型	(126)
	练习	(129)
第九章	震源理论	(131)
9.1	格林函数和矩张量	(131)
9.2	地震断层	(133)
9.3	辐射图像和沙滩球	(136)
9.4	远场脉冲形状	(140)
9.5	震源谱	(143)
9.6	应力降	(145)
9.7	震级	(146)
9.8	热流佯谬	(150)
	练习	(152)

第十章 地震预报..... (153)

10.1 地震周期 (153)

10.2 前兆探索 (157)

10.3 地震不能预报吗 (158)

练习..... (159)

第十一章 其他..... (162)

11.1 仪器 (162)

11.2 地面噪声 (168)

11.3 各向异性 (170)

练习..... (178)

附录 1 PREM 模型..... (180)

附录 2 数学复习 (183)

附录 3 短时距方程 (188)

附录 4 Fortran 子程序.....(192)

附录 5 时间序列和傅里叶变换 (198)

参考文献..... (202)

第一章 引言

全球每天都发生 50 次左右的局部有感地震，每隔几天有一次能使建筑物遭受破坏的地震。每个地震辐射的地震波在地球里传播，每天都有几次能在远距离产生地面运动的地震。虽然有些地震因太弱以致于远处无感，但可以用现代仪器在全球任何地方直接监测到。地震学是研究这些地震波和告诉我们地球结构及地震物理过程的科学。我们不可能在地球内部进行直接的观测，地震波是科学家们获取地球内部信息的首要手段，它使我们发现了我们所居住的行星的许多性质。

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和广泛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，能百分之百地得知。而另一些参数，如在地核里能量的耗损，我们的了解则是相当粗略的。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，地震定位和地震辐射图像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 地震学的简要发展历史

地震学是一门相对年轻的科学，其定量研究只有 100 年左右的时间。正如人们所料想的，早期关于地震的说法是迷信的，人们注意到地震与火山往往同时发生，地震与地下爆炸有共同的解释。在 19 世纪的初期，Cauchy, Poisson, Stokes, Rayleigh 和其他一些人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型。这些波包括因在固体体积里传播而称之为体波的压缩波和剪切波，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，故往往称之为初至波或 P 波。反之，后到达的剪切波称为第二波或 S 波。这一时期，地震学理论超前于地震观测，很久以后，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 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努力，他描述了这样的想法，即地震由一个焦点（现在称为震源）出发，辐射地震波，可把这些波反向投影到原点去确定焦点的位置。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 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 设计了水平摆，记录在熏烟玻璃的旋转的圆盘上。在此基础上，日本的 British 研制出了质量较高的地震仪器。第一个远距离的地震记录或远震观测是 1889 年在 Potsdam 记录的日本地震。1897 年在加利福尼亚 San Jose 附近的 Lick 观象台安装了北美洲的第一个地震仪。该装备后来记录到 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，E. Wiechert 研制了第一台有粘滞阻尼的地震计，可提供在整个地震持续时间里有用的记录。1900 年初期，B. B. Galitzen 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。

获得在不同范围记录的地震图使确定地球地震波速度结构取得了快速的进展。1900 年，Richard Oldham 报道在地震图上识别出 P 波、 S 波和面波。稍后（1906 年），他根据震源—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，发现了地核的存在。1909 年，Andrija Mohorovicic 报道了存在把地壳和地幔分开的速度间断面的观测结果（这个分界面现在常被提及，多少有点不礼貌地称之为“莫霍”）。把到时列成表，从而建立了走时表（到时是地震距离的函数）。1907 年，Zoppritz 做出了第一个被广泛应用的走时表。1914 年，Beno Gutenberg 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（2900km，与现代的 2889km 的值很接近）。1936 年，Inge Lehmann 发现了固体内核。1940 年，Harold Jeffreys 和 K.E. Bullen 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模型仅差几秒。

可以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，这主要是过去 50 年里完成的。地壳的厚度从海洋底下的 6km，变化到大陆底下的 30~50km。地壳之下，深部主要分为三层：地幔、外核和内核（图 1.1）。地幔是固态的多种岩石的外壳，占地球体积的 84%、质量的 68%，它的特征是约在上地幔 300km 和 700km 深度，速度的增大相当快。称此区域为过渡区，在该区域出现若干的矿物相变（包括在 410km 和 600km 深度地震波速度不连续面的相变，如图 1.1 中虚的弧线所示）。在约 700km 到核幔边界（CMB）附近，速度随深度逐渐增大，这与组分均匀的晶体结构的岩石由于压力和温度变化所预期的结果基本上一致。

在核幔边界（CBM）， P 波速度从差不多为 14km/s 急剧地降到 8km/s 左右， S 波的速度从 7km/s 降到零。这种变化（比地表速度的悬殊差别还要大）是在把固态的地幔与液态的外核分开的分界面上急剧地出现的。在外核里， P 波速度重新逐渐增大，其速率与在均匀混合流体的情况下所预期的速率一致。然而，在半径为 1221km 左右，地核变成固态， P 波速度略有增大，剪切波的速度不为零。地核主要是由铁组成的，内核的分界面（ICB）是铁与其他不同晶体结构之间相变的结果。

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，K.E.Bullen 指出，运用速度与密度的可能的定标关系和已知的地球质量及惯性矩，可以推论类似图 1.1 所示的密度剖面。现代简正模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），总体上与过去的密度剖面是一致的。

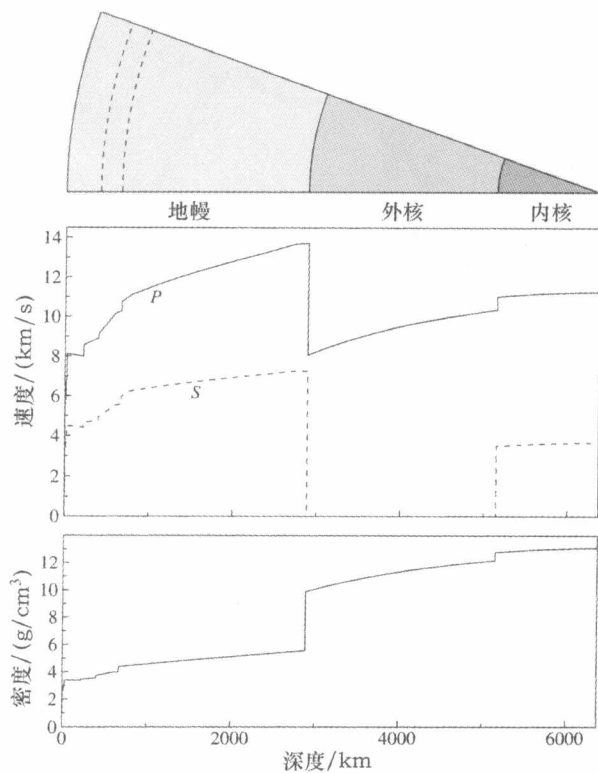


图 1.1 地球 P 波、 S 波速度和密度与深度的函数关系按 Dziewonski 和 Anderson (1981) 初步的地球参考模型 (PREM) 画出的值。除在上地幔有某些差别外，所有现代地球模型所给出的值都与此接近。附录 1 把 PREM 列成表

20 世纪 20 年代和 30 年代为了勘探墨西哥和美国石油生成区，发展了爆炸和其他人工源的地震勘测方法。早期的工作致力于测量不同距离的 P 波走时来确定深部的地震波速度。后来的研究集中于分层界面的反射（反射地震学）。当仪器在空间上密集分布时，有较高的分辨率。1956 年反射地震资料的共中心点道集 (CMP) 方法获得了专利。该方法降低了噪音水平，可得到质量较高的剖面。20 世纪 50 年代还提出了振动源方法，该方法把信号处理技术用于处理记录的长时间振动源数据。

20 世纪早期，地震台站数量的增加使得确定大地震的位置成为常规工作，并由此发现地震不是随机分布的，而是沿一些清晰的带（图 1.2）发生。然而，在 20 世纪 60 年代前，地球科学对这些带作为板块构造造山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在地质时期缓慢漂移的少数相对坚硬的板块（图 1.3）的运动所决定的。相邻板块之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（1915 年 Alfred Wegner 提出了大陆漂移的假定）。板块在海沟和环太

平洋边缘的消减带重新返回到地幔里。像加利福尼亚圣安德烈斯断层这样的大的剪切断层是板块之间剪切运动的结果。大陆之间的板块边界往往更分散些，并由地震活动的分布所标志，例如朝北运动的印度板块与欧亚板块之间的喜马拉雅地区就是这样。

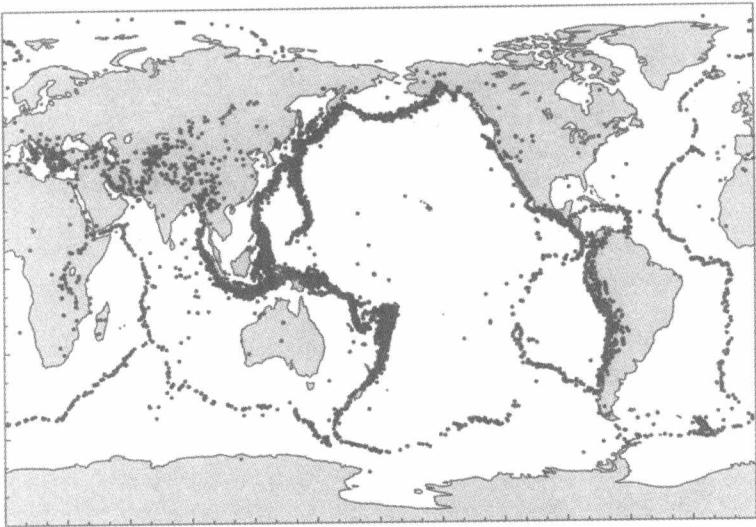


图 1.2 选取的 1977~1994 年全球的地震（取自 PDE 和 ISC 目录），地震沿一些清晰的带发生，沿太平洋边缘和中洋脊尤为突出。现在我们已经知道，这些带是地球坚硬的外层的构造板块的边缘（见图 1.3）

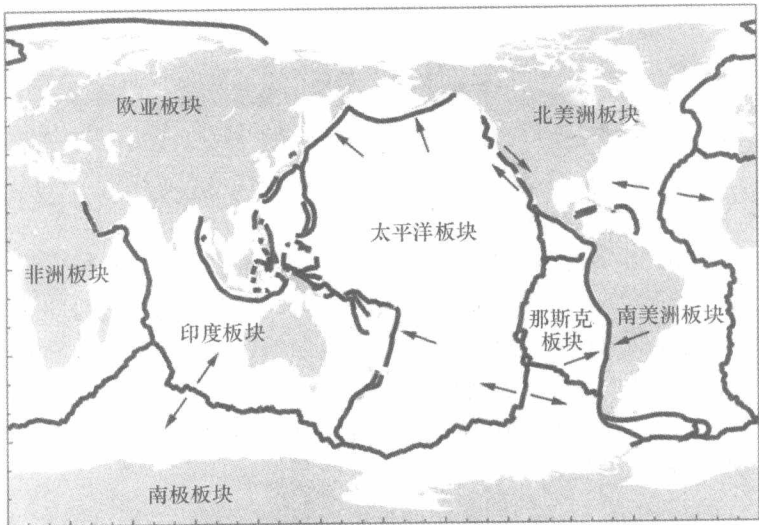


图 1.3 地球主要构造板块。箭头表明在一些板块的边界板块的相对运动。板块沿扩张中心，如大西洋洋脊拉开，在扩张中心形成新的地壳。沿西太平洋消减带，太平洋板块是朝地幔俯冲的滑动块体。加利福尼亚的圣安德烈斯断层是太平洋板块与北美板块之间剪切运动的结果

在 20 世纪 60 年代,地震学家已经指出,全球多数地震的震源机制(根据辐射的地震能量推断的断错类型)与板块构造理论所预期的一致,这有助于证实仍不断出现的模式。然而,鉴于图 1.2 和图 1.3 走向的相似性,地震学家们为什么没有在更早些的时候提出板块构造理论?部分原因可能是与现代的情况比较,早期地震定位的分辨率较低。而一个更重要的原因是,与多数的地球物理学家一样,当时地震学家没有认识到大陆漂移有充分的物理依据。因此,他们不能完全正确地评价地震定位的重要性和含义,倾向于用局部或区域的构造而不是用统一的全球理论来解释他们的结果。

1923 年 H.Nalano 提出了双力偶震源的地震辐射理论(尽管实际上理论已指出,单力偶震源在物理上是不可能的,但在这之后约 40 年的时间里,关于地震震源究竟是单力偶还是双力偶更合适的问题的争论仍然很激烈)。1928 年 Kiyoo 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。在这之前 9 年, H.H.Turner 已经测定了一些值得注意的深震,但他的解释没有被普遍采纳(主要是因为他也定了一些深度在地表之上的空气里的地震)。观测到的深源地震,典型地分布在延伸至 700km 左右深度的倾斜的地震活动面上(往往称之为 Wadati-Benioff 带)。这些带标志了多数环太平洋海洋岩石圈消减板块的位置。图 1.4 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。深震的存在是惊人的发现,这是因为在这样的深度,很高的压力和温度使多数物质发生延性变形,不能像在地壳里的浅源地震那样产生突然的脆性破裂。关于深震的物理机制至今还没有弄清楚,其成因仍存在着争论。

1946 年 Bikini Atoll 附近地下水的一次核爆,得到了关于核爆炸的第一个详细的地震记录。至少对西方政府为地震学提供资金支持来说,一个更重要的促进或许是 1949 年苏联的核爆。这使美国军方对地震学在检测爆炸、估算当量、识别爆炸与地震方面的能力给予强烈的关注,出现了为地震学提供资金的巨浪,这促进了地震仪器设备的改善和政府及大学地震学计划的扩展。1961 年建立了由精确标定的短周期和长周期地震计等仪器组成的世界标准地震仪器台网(WWSSN)。可迅速得到的地震仪器记录使许多地区的地震学得到快速的发展,包括更完整和精确的地震定位目录及长期以来期待的对双力偶震源地震辐射图像的识别。

所得到的 1960 年智利大地震的记录,第一次提供了有关地球自由振荡的确定性的观测结果。任何有限的固体都仅产生一定振动频率的共振。这些简正模型提供了除行波描述外的新方法表征固体内部变形。从地震图功率谱峰值可以看到大地震后几天的地球“钟”和它的简正模型。20 世纪 60 年代和 70 年代简正模型在地震学领域有了明显的发展,为大尺度的结构,尤其是地球内部密度的确定提供了很好的约束。简正模型数据的分析也使地球物理反演理论等许多重要概念得到发展,为评估由间接观测得到的地球模型的唯一性和分辨率提供了方法。

1969~1972 年间,阿波罗(Apollo)宇宙飞行员把地震计安放在月球上,第一次得到了月震记录。这些观测记录包括表面的影响、顶部 100km 内的浅震、约 800~1000km 深度的深震。月球上的地震图似乎与地球上的地震图很不相同,高频散射能量的波列很长。这使其解释变得复杂,但可辨别出月球的地壳和地幔,地壳厚度约为 60km(见图 1.5)。1976 年把一个地震计用探测飞船安放在火星上,但记录受风噪声的干扰,只识别出一个可能的火星地震。

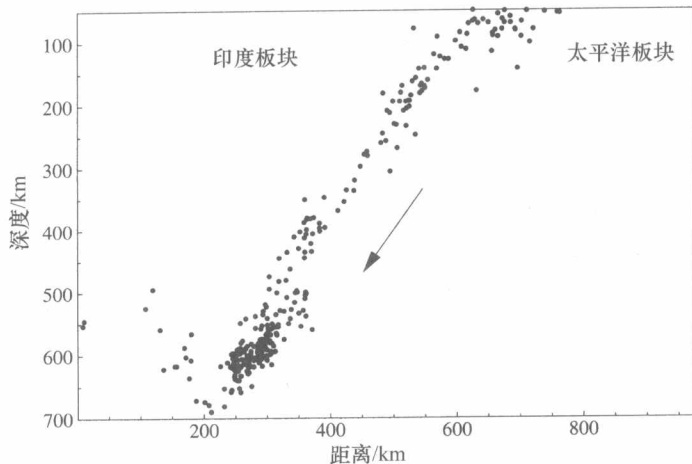


图 1.4 汤加消减带深震活动的东—西向垂直剖面。所选用的地震取自 PDE 和 ISC1977~1994 年的目录。地震活动标志着太平洋板块岩石圈消沉到地幔里

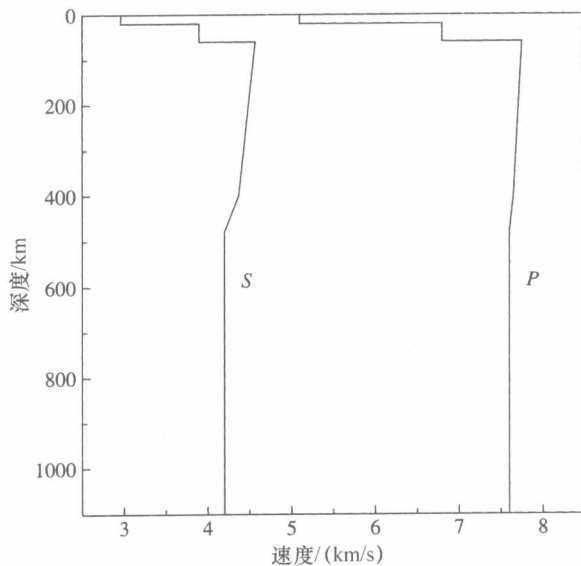


图 1.5 由月球地震观测得到的近似的地震速度模型和表面影响（根据 Goins 等人，1981）。在较大的深度（月球的半径为 1737km）速度显然没有约束，这是因为在阿波罗数据中没有深部的地震波

虽然把地震计安放在太阳上是不现实的，但可能通过测量谱线的多普勒位移来检测太阳表面的振荡。1960 年，Robert Leighton 第一次做了这样的观测，他发现太阳表面以约 5 分钟的周期连续地振动，且在小的空间波长里是不相干的。这些振荡最初被解释为是由太阳表面附近局部的气体运动所造成的，但在 20 世纪 60 年代后期，一些研究提出，这些振荡是在太阳里捕获的声波所造成的。这种设想在 1975 年因观测的振动图像展示出与预测的太阳自由振荡图像一致而得到进一步证实，太阳地震学领域也由此产生。与地球不同，由于很少观测到类似地震那样的脉冲源，且声的能量激发是一个连续的过程，因此，分析是很复杂的。然而，所提出的简正模型地震学的许多分析方法仍然可以用。现在关于太阳径向速度结构已经有了

较好的约束（图 1.6）。仪器设备和目标明确的实验的不断改进可能使关于太阳速度结构时空变化分辨率的研究得到进一步的突破。最近几十年太阳地震学已经成为探索太阳结构的最重要的手段。

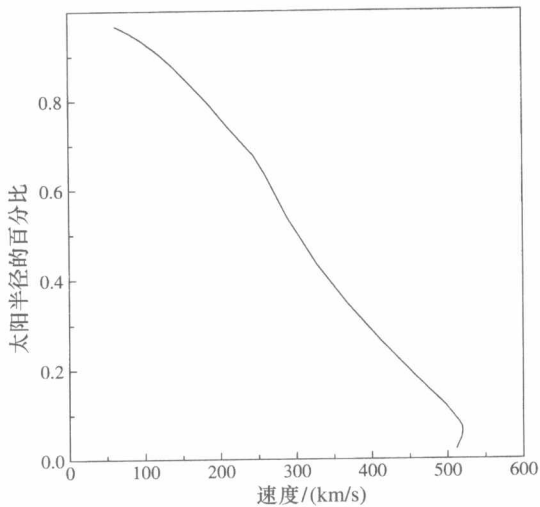


图 1.6 太阳内部声音速度（取自 Haruey, 1995）

随着 20 世纪 60 年代计算机的出现，可分析大量的数据和更复杂的问题，从而改变了地球地震学的研究状况，使地震定位成为日常的计算工作。这时开始计算第一张复杂速度结构的理论地震图。计算机时代也使得用人工源进行地震成像的技术持续迅速地发展，石油行业广泛使用这种技术编制浅层地壳结构图。从 1976 年起，开始可以得到数字形式的全球地震数据，这大大促进了定量的波形对比。近几年，全球许多台站增加了宽频带、大动态的地震计，并部署了新的地震仪器，填补了全球覆盖区的间隙。大量的便携式仪器也开始应用于部分地区专门的实验研究。现在的地震数据比早期的记录好得到的多，并有数据汇聚中心在互联网上提供标准格式的地震数据。

1970 年，较好地建立了地球平均的径向速度和密度结构，包括在上地幔 410km 和 660km 附近存在的较小的速度间断面。之后，把注意力转到分辨速度结构的横向差异上来，首先是制作不同地区的速度与深度关系的剖面图。近年来，发展为用地震数据直接反演三维速度结构。后面这种方法类似医学的成像技术，称为“层析成像”。近几年分辨率不断提高的层析成像方法开始提供有关地球地壳和地幔结构的引人注意的图像（图 1.7）。在比较浅的深度，用可控源所作的反射地震实验给出了陆地和海洋下面地壳结构的详细图像（图 1.8）。三维结构成像技术大大扩展了地震学的功能，有助于解决地球科学的许多突出的问题，包括断层带深部的结构、大陆深部的根基、消减板块的消失、海洋扩展中心的结构、地幔对流的性质、核幔边界和内核结构的详细情况。

以前的讨论多数集中于地壳地震学，或用地震波记录来研究地球内部结构。地震物理学本身的研究也取得一些进展。1906 年，Francisco（旧金山）地震后，研究出现了转折。美国工程师 H.F.Reid 对地震前后的跨断层测线进行了研究。他的分析导出了震源区缓慢的剪切应变积累和由于沿断层的运动，应变即刻释放的弹性回跳理论。以后的工作进一步证明这个机