

地震学引论

K. E. 布 伦



科学出版社

地 震 学 引 論

[澳] K. E. 布伦 著

朱传镇、李钦祖 译

傅 承 义 校

科 学 出 版 社

1 9 6 5

K. E. BULLEN
AN INTRODUCTION TO THE
THEORY OF SEISMOLOGY

Cambridge
at the University Press
1963

內 容 簡 介

本书共分十八章,较详细地叙述了地震学的基本理论,并探讨了地球内部物理学问题以及地球外的震学问题,最后讨论一些地震预报问题。

前八章介绍了一些地震学基本理论,重点叙述了弹性理论、振动与波、弹性体波和面波,之后介绍了地球模型一些参数的关系;九——十一章介绍了地震仪器和地震观测台和走时表的制作与应用问题;十二——十六章,作者详细地讨论了地震学和地球上层的关系及地球内部物理学问题,并对地球的长周期运动和地震发生的能量、震次、震源深度、周期性进行了讨论;后两章简单地描述了月球、金星、火星和其他行星震学问题;最末一章讨论了海洋地震和地震勘探问题。

本书从内容上看,确是一本基础理论读物,适合于广大地球物理工作者和有关高等院校师生作为理论学习的参考书。

地 震 学 引 论

[澳] K. E. 布伦 著
朱传镇、李钦祖 译
傅 承 义 校

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可登记证出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1965 年 12 月第 一 版	开本: 850×1168 1/32
1965 年 12 月第一次印刷	印张: 10 13/16
印数: 0001—1,450	字数: 282,000

统一书号: 13031·2219

本社书号: 3371·13-15

定价: [科六] 1.60 元

第三版序言

本书来源于以往我在奥克兰、墨尔本和悉尼大学所做的一系列应用数学的讲演。对于数学比较多的部分，这一版保留了上一版的形式，不过有若干较大的改变，并增添了许多新的材料，特别是在本书的后半部分。

前面几章给出可变形介质力学的基础理论，包括相应于不同边界条件下波的传播。第二章至第八章的理论是这样写的，即希望它对学习物理和应用数学的一般学生，和对地球物理专业的学生一样有帮助。第九章至第十章讨论搜集和处理地震仪器数据的问题。其余各章，则将理论和观测结果用于解决各种不同的问题。

在第二版(1953)中，除增加了参考书目外，全书与第一版只有较小的改变。而这一版，在第一章、第二章和第四章中，只有很少，但却是重要的增添或更改。第七章中有几节按照著者近来所作有关地震射线的工作，已重新写过。总的来说，前八章的改变维持在最低限度，因为从现今讲授地震学理论的各个中心机构来看，本书这一部分的表达方式是有用的。在第九章和第十章中新增加了若干节，第十一章概述了国际地震组织最近的动态。

从第十二章开始，改变是相当大的，致使本书增大许多。第十二章关于近地震的地震学大部分都重写过或是扩充了。第十三章，关于地球深处的密度及其他物理性质的变化阐述得更加详细，而且明确地说明了地球模型A和B的性质。第十四章关于地球长周期振动则完全是新的。第十五章(代替以前的第十四章)关于震源附近的情况及其有关问题中包含了许多新的材料。第十六章和第十七章关于核爆炸地震学和地球以外的震学是新增的。在最末的第十八章中，包括了其他一些新的课题。

向我以前在悉尼的同事，B. A. Bolt 教授，在若干论点上所给予的有益批评和 Lillian Roffins 女士在准备手稿付印工作中的重大协助表示感谢。我亦想对剑桥大学出版社的职工所给予的一贯的巨大的帮助表示谢意。

K. E. 布伦

悉尼 1963.5.

目 录

第三版序言	iii
第一章 绪言	1
1.1 简史	1
1.2 1911 年以来的发展	2
1.3 本书的计划	4
第二章 弹性理论	6
2.1 应力分析	6
2.2 应变分析	11
2.3 完全弹性	17
2.4 非各向同性物质	29
2.5 由时间影响引起的与完全弹性的偏离	30
2.6 有限应变理论	38
第三章 振动与波	40
3.1 单自由度系统的振动	40
3.2 多于一个自由度系统的振动	43
3.3 平面波	50
3.4 波动方程	63
3.5 二维波动方程	64
3.6 射线理论和绕射	66
第四章 弹性体波	69
4.1 P 波和 S 波	69
4.2 初始条件的计入	71
4.3 地震以后的地面运动形式	73
4.4 重力变化的影响	75
4.5 非完全弹性的影响	77
4.6 热力学条件	78
4.7 有限应变理论	79

第五章 弹性面波	81
5.1 沿两个均匀完全弹性介质平面界面上的表面波	81
5.2 瑞雷(Rayleigh)波	85
5.3 乐夫(Love)波	86
5.4 有一表面层存在时的瑞雷波	89
5.5 有两个和三个表面层存在时的表面波	90
5.6 地震表面波	91
5.7 Lg 和 Rg 波	93
5.8 地震面波的衰减	93
5.9 长周期地震波	93
第六章 弹性波的反射和折射	94
6.1 反射和折射定律	94
6.2 两种介质的一般方程	95
6.3 SH 波入射的情况	96
6.4 P 波对自由平面边界的入射	98
6.5 SV 波对自由平面边界的入射	99
6.6 地震波的反射和折射	100
6.7 频散波的折射	101
第七章 球状成层地球模型的地震射线	103
7.1 地震射线的参数 p	103
7.2 对给定射线族 p, Δ, T 之间的关系	104
7.3 相应于某指定的 v 随 r 变化的形式, Δ, T 关系间的特点	107
7.4 由 (T, Δ) 关系推导 P 和 S 的速度分布	112
7.5 特殊的速度分布	115
第八章 球状成层地球模型中地震波引起的表面运动的 振幅	119
8.1 出射波波前单位面积上的能量	119
8.2 能量和振幅的关系	121
8.3 由给定振幅的入射波引起的表面运动	122
8.4 振幅随 Δ 的变化	123
8.5 通过介质传递时能量的损耗	125
8.6 发生反射或改变类型的波	127

8.7	与走时曲线上的尖点相对应的振幅	128
8.8	地震面波的振幅	129
第九章	地震仪原理	130
9.1	水平分向地震仪	130
9.2	垂直分向地震仪	132
9.3	指示器方程	134
9.4	地震仪的阻尼	134
9.5	指示器方程的解	135
9.6	由给定的地震图推断地动实际形式	138
9.7	位移计和加速计	139
9.8	研究近震和远震的地震仪	139
9.9	其他类型的地震仪	140
第十章	走时表的制定	144
10.1	地震参数	144
10.2	震中距离和由震中到观测台方位角的计算	145
10.3	地震图的特征	146
10.4	主 P 震相走时表理论的发展	147
10.5	电子计算机的应用	155
10.6	非 P (体波) 震相走时表的演变	155
10.7	地球扁率的影响	161
10.8	面波的走时	163
10.9	数值结果	164
第十一章	地震观测台	170
11.1	在观测台内	170
11.2	国际地震组织	175
11.3	现代趋势	177
第十二章	地震学和地球上层	179
12.1	近震的走时理论	179
12.2	关于地壳构造的早期证据	186
12.3	P 和 S 波方面的较新证据	190
12.4	pP 和 sS 震相的利用	192
12.5	面波研究的利用	192

12.6	海洋和大陆地区的地壳构造	194
12.7	地壳上层的物理性质	196
12.8	莫孔(Mohole)计划	198
第十三章 地震学和地球内部的深处		200
13.1	地球内的间断面	200
13.2	P 和 S 速度分布	205
13.3	地幔和地核的状态	207
13.4	地球的密度变化	208
13.5	地球模型 A	213
13.6	地球模型 B	218
13.7	地球中等密度面的扁率	221
13.8	$k-p$ 假设的其他含义	222
13.9	地球内部组成问题	226
第十四章 地球的长周期振动		231
14.1	一般理论背景	231
14.2	特殊振型	234
14.3	某些数值结果	237
14.4	地球振动和面波	239
14.5	地球振动的观测	240
14.6	在地球内部构造问题上的应用	244
第十五章 地震的发生		246
15.1	地震释放的能量	246
15.2	地震的震级	250
15.3	地震的成因	252
15.4	震源区的大小	253
15.5	震源深度	254
15.6	世界的地震分布	256
15.7	震源附近的情况	259
15.8	前震、余震和有关现象	264
15.9	周期性、相关性和预告	266
第十六章 地震学与核爆炸		269
16.1	简史	269

16.2	核爆炸的震源状况	273
16.3	应用于地球内部的研究	275
16.4	核爆炸的侦察	277
第十七章 地球以外的震学		281
17.1	月震学	281
17.2	金星	288
17.3	火星	289
17.4	其他行星	290
第十八章 其他课题		291
18.1	地震的影响	291
18.2	宏观地震资料	292
18.3	由地震引起的海洋扰动	295
18.4	海底地震仪	297
18.5	脉动	298
18.6	地震勘探	300
18.7	模型地震学	302
18.8	抗震结构的设计	303
参考文献		304

第一章 緒 言

1.1 簡 史

由地质学家的观察来看,地球上发生地震大概至少已有若干亿年。

远在公元前 1800 年,历史上就有关于地震的记载。古代的人们把地震归于超自然的原因;迟至公元 1750 年,还有一位作者在伦敦皇家学会哲学丛刊上认为应该向那些对把地震归于自然原因感到不快的人道歉。

然而值得注意的是亚里斯多德(Aristotle)按照观察到的地面运动的特性将地震分为六类,例如造成地面向上运动的地震,使地面左右运动的地震等等。公元 132 年中国的张衡曾发明了一架艺术性的探测地震首次主冲方向的仪器;据称这个仪器曾记录到若干非地方性地震,当时的中国政府还指派他专管地震的观测工作。

约在 18 世纪中叶,开始积累有用的地震效应的观测资料。1760 年英国的米切尔(J. Michell)发表了一篇论述地震的著名的报告,表现了对于地震与地球波动的联系有某些认识。18 世纪末到 19 世纪初,大部分地震工作是关于估计地震的地质效应及其对建筑物的影响。譬如,当时已注意到地震时,总的说来,松土上的建筑物比坚硬岩石上的建筑物损坏得厉害。19 世纪初叶,已有定期出版的地震报告,1840 年 V. Hoff 公布了一份世界地震目录。

约在 19 世纪中期 R. Mallet 建议在地球上建立一系列观测台站;这就给仪器地震学奠定了基础,意大利的 Palmieri 设计了一架能够觉察远震的地震仪,并能记录所导致的当地地面运动的某些特征。这一时期地震学的历史中载有以下一些人的名字: Nöggerath 和 Schmidt (德国),他们用等震线来估计震中及扰动传

播的视速度；Perrey 和 M. D. Ballore (法国)，他们编纂了重要的地震记录；还有 D. Rossi (意大利)和 Forel (瑞士)，他们两人共同制定了第一个众所熟知的，用以估计地震的地面效应和确定等震线的 Rossi-Forel 烈度表。

1892 年在日本，J. Milne (在其同事 Knott, Gray 和 Ewing 的协助下)发展了一种构造坚固而操作简便的地震仪，因而能在世界上许多地区安置和运用，使地震学向前迈进了一大步。从此就开始积累精确的地震数据，地震学开始由定性阶段向定量阶段发展。

与此同时，在数学“战线”上亦取得了许多进展。整个 19 世纪，在应用数学家中间，波动的研究是颇为盛行的，并产生了许多与地震学有关的数学理论。早在 1828 年，Cauchy 和泊松就确定了完全弹性体的运动方程，而且泊松还指出在完全弹性体内可能有两类传播速度不同的波(地震学中的 P 波和 S 波)。斯托克斯指出， P 波和 S 波分别为膨胀波和旋转波，而 Green 则研究了弹性波的反射和折射。以后有 Kirchhoff, Kelvin 和 Rayleigh 的工作，包括瑞雷关于均匀弹性介质界面上的波动理论。

19 世纪末(1897)，即在提出 P 波和 S 波的数学理论以后约 70 年，Oldham 从实际地震纪录中证实了这三种主要的地震波—— P 波， S 波和表面波。

1904 年 Lamb 研究了地震面波的激发问题。1911 年 Love 在其得到 Adams 奖的著名论文中，解释了没有包括在瑞雷理论中的一类表面波的发生，并对受重力作用的可压缩行星的振动作了渊博的研究。

1.2 1911 年以来的发展

从 1911 年到 1940 年这段时期，地震数据应用于地球内部构造的研究达到十分显著的程度。这个时期从一个熔融中心核的模糊概念开始，而以很好地测定整个地球的密度、压力、压缩性、刚性和重力值作为结束。

在仪器方面,这一时期地震仪有显著的进步,大森和 Wiechert 发展了一些新型地震仪,而最突出的是引进电流计记录的伽利津式地震仪。以后, Benioff 有出色的贡献。

这一时期出现了国际地震汇编机构 (International Seismological Summary) 并且发展了国际之间的合作,这种合作超过了任何其他的研究部门。走时表有了发展,从最粗糙的开始,经过 Zöppritz-Turner 走时表,一直发展到 1940 年的 J-B 和 Gutenberg-Richter 的走时表,在后两个表中,误差已由分的数量级减小到秒的数量级。

Herglotz 和其他一些人的工作使有可能从走时数据导出 P 和 S 的速度,因而给大部分地球提供出压缩系数-密度比以及刚性系数-密度比的资料。

1914 年 Gutenberg 发表了他的十分精确测定的地球中心核边界的深度,这是在他长年而杰出的学术生活中早期的结果之一。

就在这个时间前后,Jeffreys 开始注意到地震学,并且应用了精炼的数学和统计方法以及更广泛的地质力学问题的知识。他对科学方法和统计细节的注意是使地震学达到它现有精确水平的主要推动力之一。本书对于他的卓越贡献将有所说明。

1936 年 Lehmann 女士提出了存在地球内核的第一个证据。

到 1940 年,已有可能将地球内部从地表到中心的范围内粗略划分为若干区域。这些区域用 A, B, C, D', D'', E, F 和 G 来表示(见 13.1.4 节)。对于地球模型 A 的主要工作大致是在这段时间完成的。

利用近地震的研究,表面波的研究和以后的爆炸地震学的方法,对地球表层问题作了重要的研究。从 1909 年 Mohorovičić 的工作开始,所有莫霍间断面以上的各层平均厚度都得到很好的测定,同时还得出许多关于层内 P 和 S 波速度的资料。已经很好的确定大陆的地壳厚度要远大于海洋的地壳厚度。

另一个重大的发展是在相当于地幔上部的温度和压力条件下物质性质的实验和理论研究,特别是美国的 Bridgman, Adams, Williamson 和 Birch 的工作。

这个时期中,在许多国家内,特别是日本,还可看到理论和实践方面的许多其他重大的进展。

1.2.1 1940 年以后的时期

第二次世界大战后,投入地震研究的力量有了显著增长。新的巨大的研究中心,例如, Lamont 和莫斯科的研究中心,由开始的默默无闻而发展到有相当的名气,论著的总数是很可观的。在 1957—1958 年国际地球物理年的推动下,使得世界第一流地震观测台的数目有很大的增加。

在已可作出评价的成就中,最值得注意的是记录地震波的频谱范围有很大的扩充。在一个极端,勘探地震学的方法已可测出周期为 0.001 秒数量级的地面运动。而在另一个极端,新仪器不仅可以记录观测周期达 10 分钟的表面波,而且还可以记录周期超过一小时的整个地球的自由振动。在周期数量级为 1 或 2 分钟的表面波振动与数量级为 1 小时的固体潮振动之间的频谱间隔现在已被连接起来了。

爆炸地震学的方法已大大地发展了,并且核爆炸已转用于地球深部的研究。行星地震学也已迈出了实际的步骤。

1.3 本书的计划

在 1.1 节中,我们已经指出,波通过地球的传播是地震现象的一个基本特征。因此,在较详细地研究地震学之前,有关变形体(如地球)力学和波动理论的一些知识是必需的。于是,紧接下来的第二和第三章就着重于弹性和振动与波的数学理论。这两章的目的是简要地叙述与地震学广泛问题有关的主要结果。为简炼起见,书中利用了笛卡尔张量及求和约定,但是读者并不必预先具有张量的知识。

以下的五章,即从第四章到第八章,讨论了将波动理论应用于弹性体的波动问题。所论述的问题对于地震学有直接的重要性。除此而外,这几章所包括的大部分理论在数学物理中也有一定的

重要意义。这几章给出了纵波和横波的理论,包括反射和折射理论和有关的能量讨论;同时初步提出了表面波的理论,包括瑞雷波和乐夫波。

第九章至第十一章特别注重于地震学有关的结果的推导。第九章讨论了地震仪的基本原理;第十章叙述了处理仪器数据的方法;第十一章简短谈谈地震观测站的组织。

第十二章和十三章说明如何从地震数据来确定地球内部的性质。在第十二章中,地震体波及面波的研究用于揭示地壳的构造;并提到在高温高压条件下所进行的实验。第十三章给出了整个地球在地壳以下的 P 波和 S 波的速度,并以此为基础,将地球内部明确的划分为1.2节已提到的八个区域。联系到地震数据研究了地球内部密度、压力、弹性和重力的变化,并且也多少涉及到地球内部的物质成分。讨论了地球模型A和B的性质。

第十四章讨论了地球基本自由振动的理论和最近的重要观测结果。

第十五章讨论了震源情况的问题。由于震源的初始扰动比以后的地动对于仪器观测说要晚一些,所以在从地震资料做推论时,震源情况问题必处于较后的地位。这一章的讨论包括对有关问题的推论,诸如一次地震释放的能量,震源的地理分布,余震的发生等等。

第十六章和十七章初步考虑了两个新的发展,即核爆炸地震学和行星地震学。

最后的第十八章涉及若干处于理论地震学边缘上的课题:大尺度或“宏观”的地震效应和地震对海洋的影响;由非通常地震所造成的地面微小振动——脉动;抗震结构的设计问题;地震勘探和测定冰覆盖层的厚度;以及其他的特殊课题,如模型地震学和海底地震仪等。

第二章 弹性理论

弹性理论是研讨应力作用于变形体时所产生的应变。在这一章里所谈到的理论，就研究地震学中的广泛问题而言是必需的。我们将假定物体是由足够密集的质点所组成，以致在本章中出现的各种函数都可认为是连续的。

2.1 应力分析

设 P 为给定物体內任一点，在任一时刻，通过 P 在任一方向上作一单位向量 ν 。设 δS 为物体內通过 P 并垂直于 ν 的面积单元，考虑过 δS 面分别作用于物体两部分上的力；特别是作用于以 ν 为外法向部分上的力。这些力在静力学上等价于作用在 P 点上的一个单力连同—个力偶。这个单力称为通过 δS 面的曳引力(traction)。若 δS 趋于零，则我们将通过 δS 面的曳引力与 δS 面积之比的极限称为在 P 点相应于方向为 ν 的应力；在一般的问题里，这个极限是有限的，有意义的。而力偶(它的矩多含一个长度的因次)通常可不予考虑。

2.1.1 应力张量

通常 P 点的应力随所考虑的小面积法线方向 ν 的不同而改变，而且一般与法线方向成一角度。我们将进而证明，通过 P 点任一小平面上的应力都可用 9 个分量来表示。

取两组正交轴，我们将分别称为 1, 2, 3 轴和 $1', 2', 3'$ 轴。任一向量平行于第一组正交轴的分量将称为 1-, 2-, 和 3-分量；对另一组正交轴也类似。考虑包含 P 点在内的一个小四面体(图 1)，其中三面分别具有与 1, 2 和 3 轴平行的內法向，而第四面具有与 $1'$ 轴平行的外法向。令相应于四个面的面积各为 $\delta S_1, \delta S_2,$

δS_3 和 $\delta S_{1'}$. 以 p_{12} 表示垂直于 1 轴面上的应力在 2 轴上的分量; 其他相应的分量可类似地写出. 以 $a_{12'}$ 表示 1 轴与 $2'$ 轴之间夹角的余弦等.

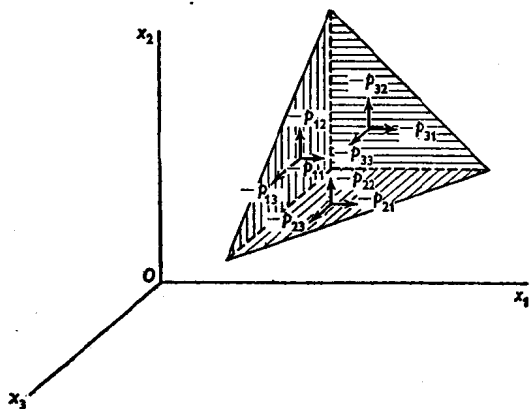


图 1

小四面体在体力(如重力), 界面上的曳引力和构成物体的质点的惯性力作用下是平衡的. 考虑平行于 $2'$ 轴的分量. 除面力以外, 其他所有的力均与四面体体积成正比. 因此, 若取 l 为四面体的线尺度, 则有

$$\begin{aligned} p_{1'2'}\delta S_{1'} - p_{11}\delta S_1 a_{12'} - p_{12}\delta S_1 a_{22'} - p_{13}\delta S_1 a_{32'} - \\ - p_{21}\delta S_2 a_{12'} - p_{22}\delta S_2 a_{22'} - p_{23}\delta S_2 a_{32'} - \\ - p_{31}\delta S_3 a_{12'} - p_{32}\delta S_3 a_{22'} - p_{33}\delta S_3 a_{32'} = O(l^3). \end{aligned}$$

两边分别除以 $\delta S_{1'}$, 并令 $l \rightarrow 0$, 得

$$\begin{aligned} p_{1'2'} &= p_{11}a_{11'}a_{12'} + p_{12}a_{11'}a_{22'} + p_{13}a_{11'}a_{32'} + \\ &+ p_{21}a_{21'}a_{12'} + p_{22}a_{21'}a_{22'} + p_{23}a_{21'}a_{32'} + \\ &+ p_{31}a_{31'}a_{12'} + p_{32}a_{31'}a_{22'} + p_{33}a_{31'}a_{32'} \\ &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{i1'}a_{j2'}p_{ij}. \end{aligned}$$

显然, 对法线方向为 k' 的小面积上的应力, 在 l' 方向上的分量有类似的结果, 这里 k 和 l 可各取 1, 2 或 3. 此外, 为方便起