

反射地震学 能源勘探的工具

〔美〕K.H.沃特斯 著

石油工业出版社

反 射 地 震 学

能 源 勘 探 的 工 具

[美] K.H.沃 特 斯 著

许 云 吴 荣 祥 译

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书着重论述地震勘探的新方法、新技术和新概念,比较全面地总结和反映了地震勘探方法当前的发展水平。论述内容主要是建立在数字记录仪器、多次覆盖技术及以计算机为手段之地震数字处理技术等三位一体基础上的反射地震学方法,其中包括野外设备技术、主要数字处理技术、双相介质理论、波动方程偏移、地震地层学、合成地震记录、拟测井技术、地震模拟技术、地层圈闭勘探方法等,也论述了正在酝酿之中的横波勘探、高频勘探、三维地震、彩色显示技术等。

REFLECTION SEISMOLOGY
A Tool for Energy Resource Exploration
KENNETH H. WATERS
JOHN WILEY & SONS
New York 1978

反 射 地 震 学 能 源 勘 探 的 工 具

[美] K.H. 沃特斯 著

许 云 吴 荣 祥 译

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)
水电印刷厂排版
大厂回族自治县印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 181/4印张 1插页 413千字 印1—3,000

1983年3月北京第1版 1983年3月北京第1次印刷

书号: 15037·2398 定价: 1.95元

译者前言

自从七十年代初期以来，地震勘探方法中广泛应用数字记录仪器、数字计算机、地震数字处理技术等等，经历了所谓“数字革命”的深刻变化，旧有的面貌已大大改变。技术发展日益迅速，地震勘探中与新方法、新技术、新概念有关的文献已经使人有浩若烟海之感，若非假以时日难以窥其全貌的。因而，对于从事地震勘探工作的人来说，有一本综合性新内容的书籍将是大有裨益的，本书可以说是适应这种客观需要的第一本书。

本书比较全面地总结和论述了地震勘探方法技术的当代发展水平，内容取舍偏重于“新”，既包括现有的和正在发展之中的主要地震数字处理方法、双相介质理论、波动方程偏移、地层地震学、合成地震记录技术、地震模拟技术、勘测地层圈闭的统计方法等等，也涉及了正在酝酿和开始成熟了的横波勘探、高频勘探、三维地震方法等等。作为一本“指南”式的书，这是一种优点。不过，本书写作的指导思想是追求论述范围的广度，而不着重问题论述的深度，偏重于定性描述而很少或缺乏必要的定量描述，所以，这又是一种缺点。对于喜爱深究的读者来说，必须直接阅读书中所引用的有关文献，才能对具体问题获得更深入的理解。

全书共十二章，前五章内容为基本理论、震源设备及特性、野外工作方法；后七章内容为地震资料数字处理及解释问题。第一、第三、第五等三章由吴荣祥翻译，其余九章由许云翻译。书中所用术语一般均按目前习惯常用的术语名称译出，个别少见的术语则均附有原文，以备查考。凡译者所能发现的印误之处以及认为文意不清易引起误解或认为有必要另加说明之处，译者均按自己的理解作了若干译注，附于页末。

译者

1980年2月

目 录

序言

第1章 绪论	3
第2章 基本物理原理——弹性固体中的波	7
2.1 关于波的一般性讨论	7
2.2 波前与射线	9
2.3 两种不同介质分界面对波传播之影响	10
2.4 弹性波	11
2.5 利用类比进行推广	14
2.6 分界面上不同波之间的能量分配	17
2.7 非完全弹性介质——地震波的衰减	20
2.8 界面波 (Boundary wave)	22
2.9 近地表地层内封闭能量形成的面波——乐甫 (Love) 波	24
2.10 近地表地层内封闭能量形成的面波 (伪瑞雷波)	28
2.11 总结	31
附录2A 佐普瑞兹 (Zoeppritz) 方程	31
附录2B 球面对称纵波	33
第3章 震源与接收器	35
3.1 弹性能量源的一般类型	35
3.2 方向性	37
3.3 地面震源	39
3.4 海上震源	43
3.5 对分布于地面面积上的驱动力的大地响应	46
3.6 震源组合的利用	48
3.7 接收器的类型	50
3.8 做为地面入射纵波和横波响应的垂直检波器运动	53
3.9 检波器组合的利用	54
3.10 二维组合	57
3.11 总结	58
附录3A 气垫振动器简化分析	59
附录3B 连续震源 (Vibroiseis) 系统	60
第4章 波列描述与反射过程特征	78
4.1 时间域与频率域概念	78
4.2 采样考虑	81
4.3 傅里叶积分——连续频率分布	82
4.4 脉冲概念——或 δ 函数	83

4.5 根据测井记录特征制作合成地震记录	85
4.6 反射过程特性	91
4.7 总结与结论	96
附录4A 利用复速度的合成记录	96
第5章 地震资料采集方法	102
5.1 引言	102
5.2 现代线性地震反射方法	104
5.3 二维共深度点多次覆盖方法	106
5.4 辅助地震信息的观测	109
5.5 总结与结论	110
第6章 地震数据处理	112
6.1 引言	112
6.2 采样方法(多路传输)	112
6.3 解编方法	116
6.4 测线说明与重排	116
6.5 近地表延迟时间校正与炮检距几何效应校正	117
6.6 动校正及其对地震原始记录的影响	120
6.7 切除及记录道能量观测与叠加	121
6.8 扩展或增益控制	122
6.9 需要的或合意的增益变化	124
6.10 滤波与反褶积概要	124
6.11 连续震源记录的反褶积方法	129
6.12 递归滤波与时变滤波	131
6.13 同态反褶积	133
6.14 地震剖面二维滤波	135
6.15 总结与结论	138
附录6A 自适应滤波	139
第7章 辅助信息的计算与测定	144
7.1 引言	144
7.2 平均速度与层速度的观测	144
7.3 孔隙流体对岩石速度的影响	153
7.4 地震波在岩石内的衰减	156
7.5 相似性、相关性或相似系数的计算	159
7.6 总结与结论	163
附录7A 极大熵谱分析	164
第8章 分辨率与绕射	168
8.1 引言	168
8.2 地震分辨率	169
8.3 地震垂直分辨率	169
8.4 垂直分辨率与随机干扰	177

8.5	垂直分辨率与穿透深度	178
8.6	垂直分辨率与近地表速度层特性	180
8.7	反射不连续性产生的散射与绕射	184
8.8	横向分辨率	189
8.9	总结与结论	193
第9章	偏移——反射与绕射的正确归位	195
9.1	引言	195
9.2	早期的偏移方法	195
9.3	波阵面偏移方法	197
9.4	绕射扫描偏移(Kirchhoff求和法)	200
9.5	基于波动方程的有限差分方法	203
9.6	三维偏移及声学全息	207
9.7	总结与结论	211
附录9A	在给定速度深度函数情形下的绕射曲线计算	212
第10章	近地表校正	216
10.1	引言	216
10.2	利用爆炸井的简单方法	216
10.3	震源与接收点位于地面(共深度点方法)	218
10.4	高级叠代统计方法	226
10.5	利用面波观测的风化层测定	228
10.6	把近地表层做为广义滤波器的处理	231
10.7	总结与结论	233
附录10A	利用 $\sin x/x$ 方法对地震记录道进行内插	234
第11章	解释问题	236
11.1	引言	236
11.2	构造解释——早期阶段	236
11.3	构造解释——高级阶段的处理	237
11.4	构造解释技巧	240
11.5	计算机模拟——一维模拟及其实现	244
11.6	二维模拟——射线路程方法	246
11.7	地层圈闭勘测——传输函数的用途	251
11.8	地层圈闭勘测——一般方法论	252
11.9	二维模型在复杂速度问题中的用途	256
11.10	统计方法在地层圈闭测定中的应用	257
11.11	总结与结论	262
附录11A	超压带深度的勘测	263
第12章	正在酝酿之中的新工具	266
12.1	引言	266
12.2	利用横波提供补充资料	266
12.3	利用高频提高分辨能力	272
12.4	三维地震资料	278
12.5	有限差分模型——深入理解地震反射过程	279
12.6	新的或正在发展的显示方法和解释方法	284

序 言

虽然书名点出了本书的主题，但采用一个暗示论述风格富于哲理的副标题“所知越多，越需多知”（The more ye know, the more ye need to know），也许更好些。以此为基准来衡量，就某些读者而言，当他读完了本书的时候将会感到，我的任务尚未完成。

我的目的是介绍现代反射地震学的当前概况。勘探地震学是一门需要多种训练的科学。要把所有仪器、物理原理、地质方法以及数学背景的详细描述都包括在一卷书内，范围就过于广阔了，而且方面过多，也不是作者一人所能胜任的。我希望本书在我所选择的水平上将会为地球物理专业和地质专业的高年级学生或一年级研究生所能理解。在这个领域内工作多年的勘探工作人员也会发现本书可使他们对于反射地震学的力量与限度，或责任与未来展望能有一些认识，因而对他们的实际知识有所裨益。更高年级的学生也许会失望，因为本书数学水平业经缩减，颇有用处的矩阵方法和Z-变换方法的完整讨论均从略了。我只好指望每章所给出的参考文献或者第十一章文献目录中提出的几本书将能对追求知识的渴望起到权且充饥的作用。

有关文献汗牛充栋。有两种科学杂志（“地球物理” Geophysics与“地球物理勘探” Geophysical Prospecting）是完全致力于这门科学的。应用论文散见于地球物理研究杂志（Journal of Geophysical Research）、美国地震学会通报（Bulletin of Seismological Society of America）、皇家天文学会地球物理杂志（Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society），以及其他刊物。从高度深奥的关于弹性波传播的数学论文和数据处理原理至油田发现史，新的材料继续不断源源而来。工业中的竞争使得创新成为必然。随着时间的推移，必须要精细地重新审查的——使之修正以应需要——还远不仅只限于一种概念，事物的发展状态就是如此。若干年时间以来，利用具有形形色色特性的不同仪器设备对同一地区进行重覆勘探的野外工作，现在使解释人员陷入了一种需要调整校正各种特性的复杂过程；或者迫使勘探经理必须作出不是全部放弃至少也得是部分放弃以前的工作，并以最现代化的工具再一次对该地区重新进行勘探这样一种棘手而又代价昂贵的决策。

本书头六章论述了对于一个构造的地震剖面的初步基本要求。在其余六章内，我们对详尽解释细致地质现象时所需要的一些新颖独创概念进行了进一步加工修正的探索。某些概念对我们通常的理解提出了异议，这是不足为奇的。竞争始终是人类据以取得进步的手段，这点并非仅只在历史研究中才如此。

在最后一章中，指出了最新的发展方向。读到这一章的时候，一些读者就会真正充分意识到：要妥善处理地层圈闭油田的勘探问题或者煤层的扰动问题，还得需要其他工具才行。有几章增加了一些附录，这些附录通常是为了给出比初读时所需内容更为详细一些的

细节。

我衷心感谢先后与我共事的一些同事们，几年来同他们进行了许多富于启发的有益讨论。他们中间有许多人具有克服某些困难问题的杰出能力；另一些人具有比我敏捷的洞察问题本质的能力。为求解释清晰简洁，还得到了其他人的不少帮助。书中，我荣幸地引用了他们在其个人研究过程中所提出的一些迄今尚未公开发表过的例子。所以，我必须对这些同事表示感谢。（以下略）

肯尼恩.H.沃特斯

1977年10月

第1章 绪 论

绪论这一章的任务不涉及各章所讨论的某些困难问题，只简略地论述地震勘探的任务。因为以后各章的主题之间均有内在联系，对总体没有一般性了解，是难于论述某一主题的细节的，所以要有绪论这一章。这样就能在一定程度上摆脱各章安排顺序所加的限制；至于绪论的其余部分，我们仅论述简化了的概念。以后，读者进行一些更动，就能把这种理想概念转变为合乎现实情况的概念。

地球是由一系列岩层组成的。在简单的天然地震学中，我们可认为岩层厚度是按几公里或几百公里，甚至几千公里计的，这些岩层呈同心球状排列在球形内核四周。最简单的排列顺序便是外地核、地幔与地壳。不过，为勘测烃类——这是我们的目的——差不多无需乎去讨论除地壳以外的任何其他岩层，即使如此，所讨论的也只是地壳的一小部分。尽管有可能进行这种简化，但由于所有油气储集均与生成烃类的沉积岩有关，所以还是会形成很复杂的情况。就其本质而言，这些沉积岩都是次生的，它们出现于世界各地，那里不是原生岩受侵蚀，就是在过去的某一地质历史时期内存在过海洋，海底沉积有动植物群体碎屑或者其中含有盐类。这些情形大部分形成于这样一些地区：那里在地球漫长历史的某一时期内发生了一系列地质作用，导致地壳在不同深处形成一系列特征与性质各不相同的岩石沉积，一层重叠在另一层之上。沉积速率是多变的，特定沉积形式各有其发生的时间。我们现在看到的就是这些沉积盆地内的层状模型。

但是，整个盆地的沉积速率并不是恒定的，盆地本身在其发育的整个历史过程中也不是稳定的。在盆地开始固结，受到大范围的力作用时，形成垂直隆起，同时又受到压缩应力和切变应力的作用，发生褶皱；作用力有时超过了岩石强度，还会形成不同种类的断裂——断层——这种作用在大面积范围内破坏了地层特征的平稳变化。

在这几百万年的演变历史时期中间，海生动物群，其次是陆生动物群的残骸受到压力、热和细菌等作用，使其基本组分发生分解，首先是形成石油生成前的固体物质（油母页岩等），然后形成液态烃类，在某些情况下，经过高温作用，生成了烃类气体和二氧化碳。

岩石孔隙中含有的水以及水中溶解的盐类，与岩石颗粒有时是紧密结合在一起的，有时，在岩石有一定渗透性的情形下，由于差异流体静压力的作用，水还能在孔隙中流动。水从页岩中流出，进入和流经多孔岩层，这多半就是造成烃类在岩石孔隙中运动和富集的原因。

圈闭是有各种不同形式的，其中有些实质上是纯静压圈闭，即石油被水挤压到处于局部极小势能的位置，有些圈闭则是流体静压力和渗透圈闭或孔隙圈闭的综合作用。

从物理学的观点看，我们的任务就是利用不同岩石性质的变化来找出这些圈闭。再者，就是利用地表上或地表附近所进行的观测来确定这些变化。各种物理参量始终都是在通过岩层的钻井中测定的，地质学家们对于电阻率与自然电位综合电测井曲线、以及表示

密度、地震波速度和放射性等变化的测井曲线，都是很熟悉的。在反射地震法中具有一定意义的是密度与地震波速度的变化。如果我们认为有可能使某种微小地震冲击波通过岩层而传播，那么，这些波一定是以某种速度传播，这种速度与岩石本身性质有关，而且还与岩石孔隙中可能含有的流体性质有关。

在两种不同岩层接触的情形下，一个在地面被激发而通过一个分界面或为该分界面所阻拦的波，有一部分就在该分界面上发生反射，有一部分则是透过该分界面，因而波能在第二种岩层内传播。这些反射波最后还是返回到地表，根据其旅行时间就可以获知关于波传播了多远的信息，且有可能获知关于发生反射的岩层分界面的某些信息。由于地下岩层之间的分界面很多，所获得的信息显然是颇复杂的，因而其地质解释也颇不容易。因此，作为本书唯一主题的反射地震学就是一门研究激发弹性波并进行地面观测，然后解释这些观测结果，获取有关岩层产状及岩层之间关系的信息的学科技术。此外，不论什么时候，只要有可能，都要对岩石类型和孔隙流体等方面的横向变化进行一些解释推断。

经过四十余年的地震勘探积极活动业已证实，即使是小到一平方公里（230 英亩）的面积也必须要进行调查，因为如此之小面积的油田在非常良好的条件下也是具有经济价值的，而且还必须要获得深度从几十米直到超过五公里深的岩层的信息。某些油田之所以可能存在，是因为油是含在厚度小到3米的某种多孔隙砂岩内，所以观测需要有高度的灵敏度，要求具有很高的地震分辨能力。

虽然早期有些油田是用所谓折射地震方法发现的，这些方法在勘探地球物理学家协会（Society of Exploration Geophysicists SEG）所出版的《折射法地震勘探》一书中有详细叙述；但是本书对这类折射方法将不再赘述，我们的重点是放在人工激发微弱地震弹性波的反射方法的利用方面。

还应指出，我们所论及的主要是关于获取和显示尽可能不掺杂有令人误解之人工信息的反射资料问题，采集这种人工信息有时会把它们错误解释成是来自地下岩层的真正反射波，不过我们在本书中仅能够用很小的篇幅来描述这引人入胜的实际地质解释问题。实际上，单从物理学的观点出发，解释很少是单值的。把已经完全证实了的地质原理搞清楚，才可以达到一定程度的单值性。因此我们可以寄希望于对方法机理的论述，十分重要的是要透彻理解这些原理，以便今后能够正确评价作出精确地质解释所需要的反射地震学与地质学之间的紧密关系。

图1.1是一张表示这种技术要求的简单剖面示意图。必须设想出一种可使地层横剖面具有足够详细程度的显示方法，能使我们发现像A、B或C之类可能存在的油气藏。产生地震能量的震源与接收器必须位于地表或地表附近。反射方法是用一种类似于雷达或声纳中所采用的方式，记录下能量脉冲从爆炸开始时刻至回声时间之间的时间间隔，但与雷达、声纳截然不同之处是：能量所通过的介质不是均匀层状介质，而且还受图中所示不整合的不连续性影响，或者因断裂而发生的突然位移影响。此外，风化层是低速和低密度的地层，其厚度与成分都是多变的，且与下伏固结岩石呈假整合关系，甚至地层性质还受到季节变化的影响。

如图所示，可能的一种纵波传播路程是从震源至R，再到接收器。显而易见，由于

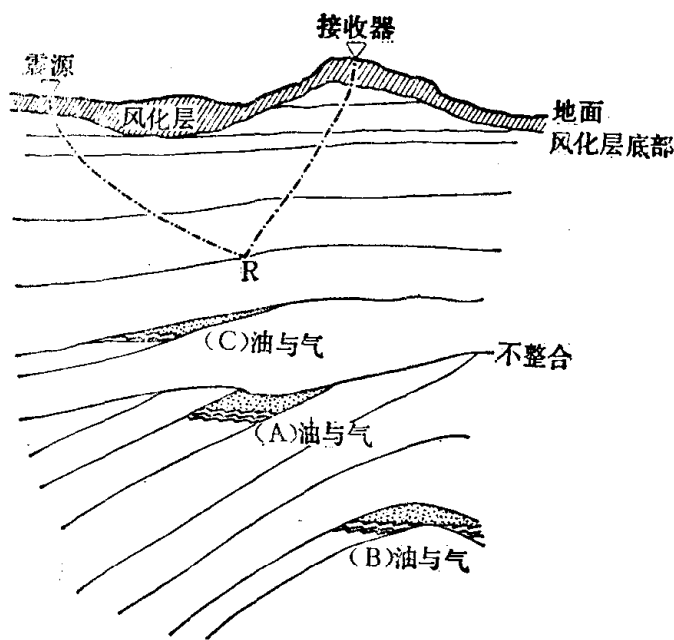


图 1.1 岩石孔隙油气圈闭模式的剖面示意图

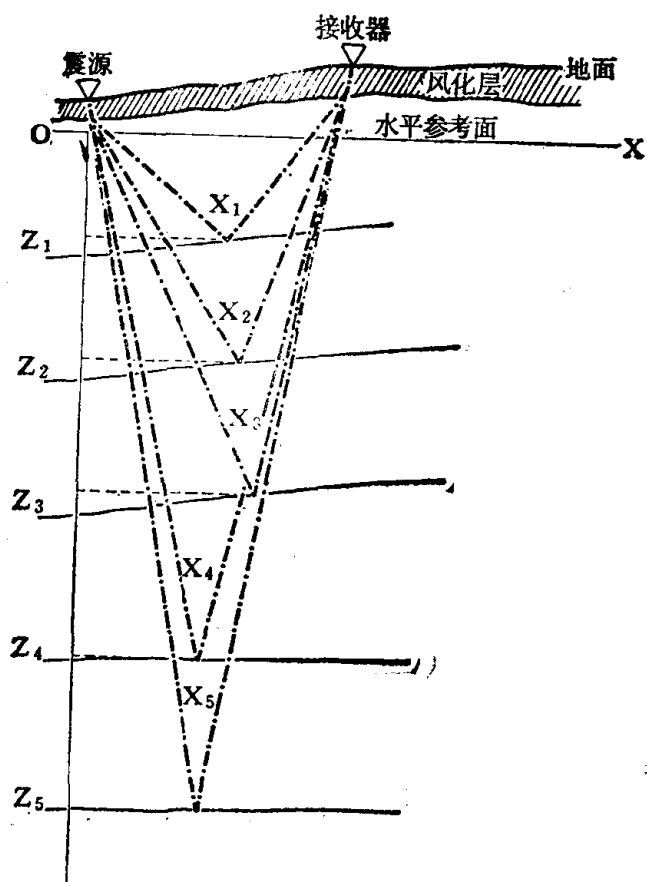


图 1.2 用反射法地震勘探确定反射点的坐标

岩石弹性性质的每一种变化都应产生一个回声反射，所以接收器所接收到的并不只是输入脉冲的一个回声反射，这情形就同一系列若干个雷达目标回声反射全都是由同一个传播着的电磁脉冲所产生完全一样。另外，还存在有产生多次散射的可能性，即一个目标的散射波又为另外一些目标所散射的可能性。

在大多数情形下，图1.1所示剖面由于垂直比例尺大于水平比例尺而被夸大，换言之，垂直方向上的岩层层系的变化不如图上所示水平方向上变化那样快速。因此，大多数勘探问题，但不是所有的勘探问题，首先可以看作是对位于试验仪器正下方的岩层分界面的位置进行观测的问题，试验仪器可沿地表逐点移动，然后根据一系列相似的观测结果就可以逐步画出剖面。于是，就这些地面试验位置中的每一个位置来说，问题就转化为如图1.2所示的确定逐个反射点坐标 (X_i, Z_i) 的问题。这意味着，原始的反射时间 T_i 一定得经过高程校正、风化层时间校正以及因震源与接收器不在地面的同一点上而必须进行的时差校正。图1.3 (见插页) 是地震时间剖面，它由大量垂直的地震记录道组成，其中每一道都表示所接收反射能量随时间 (亦即垂直座标) 而变化的情况。在图示情形下，反射能量变化等级是用彩色显示的。图中最右部的数字是表示以秒计的反射时间。

水平方向上地震记录道相距很近，所以各个记录道反射能量随接收时间的变化也就转换成二维彩色变化了，这种彩色显示向观测者表明了岩层深度是如何随着观测点沿地表的移动而变化着的。在剖面水平座标轴上的数字是表示地表上已知点的序号，任何时刻根据地面测量结果就能得出这些序号。所以，适合于石油聚集条件的任何显示标志 (比如说 R

附近的粉红色反射标志)的地面位置可以直接确定,从而有利于采取措施,以钻井进行适当的检查。

目前,单色地震剖面还是比这类多色剖面更为常见,其原因以后再讨论。再者,这里提供的地质图像还并不是在所有方面都是真实的情况,关于这种现象产生的原因也将在以后各章中指出。总而言之,定性地看来,这种地震剖面还是一系列测点下面的地质构造的一种初步反映。以时间或以深度作为垂直变量制作这些地震时间剖面,并把这些剖面处理成更为精确的地质信息的工艺技术,这就是本书其余部分的研究对象。

第2章 基本物理原理——

弹性固体中的波

勘探有商业价值烃类资源的应用地震学科学是渊源于天然地震学科学的，天然地震学在十九世纪下半叶即已证实，波的能量可以沿地表面以及通过大地而传播。同时，在地面上把这样的波记录下来，然后就可逐点追踪。这些波都是自然原因所产生，通常是因地球内部特定位置上有应变能量累积，直到超过弹性极限发生断裂而形成的。

本章讨论的用于经济目的勘探工作的波，是人工产生的波，其振幅非常小，并具有远较天然地震波为高的频率。除一些差别之外，关于波传播的物理原理则都是相同的，本章讨论的就是这种基本原理。

2.1 关于波的一般性讨论

以某种方式在流体介质内特定点A上产生一个扰动，通过介质向外传播。图2.1所示就是此类波的一种典型代表。此图假设可以把波的某一种性质，画成是与离开震源的距离有关的图形，在这种情形下，与离开震源距离有关的性质就是偏离静止位置的位移 ξ 。图中，上部直线上所示波形代表位移的波形，波形上的某特定点O在时间 t_1 时到达B点。在图形下部，取不同的时间 t_2 ，我们看到一个类似的波形，振幅已减小但传播距离增加了 d 。既然波形相似，那就有可能在该波形上挑选出相应的点O¹，使得看起来似乎点O已经在时间 $t_2 - t_1$ 之内移动了距离 $r_2 - r_1$ ，因而该点之速度必为

$$c = \frac{r_2 - r_1}{t_2 - t_1} \quad (2.1)$$

同波形的某一具体特征，例如与某一特定波谷或零交点等特征有关的这种速度，称之为相速度。只要波是运动而又不改变其形状，整个波束以该速度运动，那就说这个波是无波散的波。我们现在集中注意的就是这种波。

也可按 ξ 对时间的关系绘图，而距离则保持恒定不变，这种图形如图2.2所示。必须注意，我们现在所画的是与图2.1中相同的波形，但水平比例尺现在是时间而不是距离，

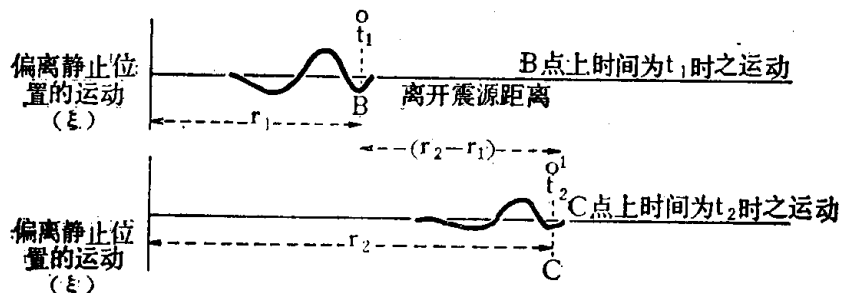


图 2.1 在远离震源的两个不同位置 r_1 与 r_2 上所取的波剖面

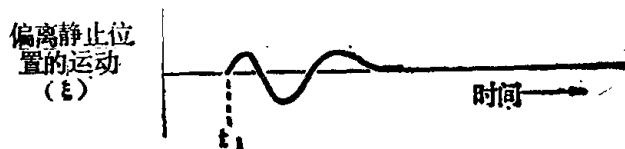


图 2.2 点的运动是时间的函数

而且波形在水平方向上被倒置过来了。我们在一张图中保持参考系在空间中固定不变，而在另一张图中则使参考系随波束而运动。所以有可能利用下列公式

$$\xi(r, t) = A(r) \xi\left(t - \frac{r}{c}\right) \quad (2.2)$$

将波束的波形表示为距离与时间二者的函数。以后就会知道，波形 ξ 与引起扰动的输入应力有关，而 $A(r)$ 则是与介质所能允许的波的传播路程有关的一个因子。

有一个重要事实要注意，经过物质而传播的是抽象化了的“波”，而不是该物质本身在传播。当有波通过的时候，任意的特定微小质点将偏离其本身的静止位置，在该位置附近作简单振动，然后返回静止位置，并保持静止不动。由于偏离静止位置的运动是波运动的必要特征，因而形成该波动的初始能量是随波而一起传播的。所以，在某种更受约束的情形下，有可能对函数 $A(r)$ 赋予一种近似形式。在均匀流体中，有一个具有总能量为 E_0 的波产生，总能量分布于球面波阵面上（表面面积为 $4\pi r^2$ ），这样一来，每单位面积上的能量就是 $E_0/4\pi r^2$ 。以后将认为能量密度与振幅平方成比例

$$\frac{E_0}{4\pi r^2} = k[A(r)]^2$$

$$A(r) = \left(\frac{E_0}{4\pi r^2 k}\right)^{1/2} = \frac{A_0}{r} \quad (2.3)$$

对于球面发散波，式 (2.2) 变为

$$\xi(r, t) = \frac{A_0}{r} \xi\left(t - \frac{r}{c}\right) \quad (2.4) \bullet$$

而且波束的振幅都是随离开震源的距离而呈反比减小。

第二种可能是颇为重要的情形与基本上局限于均匀半无限介质表面上的波有关，在这种情形下，总能量局限在半径为 r 的环形区域内，于是

$$\frac{E_0}{2\pi r} = k[A(r)]^2$$

$$A(r) = \left(\frac{E_0}{2\pi r k}\right)^{1/2} = \frac{A_0}{r^{1/2}} \quad (2.5)$$

因此，对于分布在地面上的波，式 (2.2) 变为

$$\xi(r, t) = \frac{A_0}{r^{1/2}} \xi\left(t - \frac{r}{c}\right) \quad (2.6)$$

波束的振幅按距离的平方根而作反比减小。由于正数的平方根的倒数，在该正数增大时，较之该正数本身的倒数减小更慢，所以对局限于平面表面上的面波来说，振幅随距离之衰

● 译注：原书误印为 $\xi\left(t - \frac{t}{c}\right)$ 。

减比在物体内部传播的那些体波的衰减要慢一些。

有时为方便起见，认为震源能够发射出恒定频率的波。在此情形下，可以测出介质内正弦波形相似点之间的距离，即波长。任何已知频率均有相应的波长。如果波的频率为每秒 n 周（或称赫，缩写为 Hz）而波长为 λ ，则在已知时刻所产生的波形上面的某一已知点，显然应在一秒钟之内行经 n 个单位的距离。但是，根据定义，一秒钟之内行经的距离在数值上应等于速度值 c ，因而我们得到关系式 $c = n\lambda$ 。波的频率不同，却按恒定速度传播，这种现象经常是不成立的，但是对于任何频率为 n 的已知类型的波总是可应用与频率有关的速度 $c(n)$ 。所谓各向同性介质，就是一种波在其中传播的速度 $c(n)$ 与波传播方向无关的介质。

幸运的是，通过大地而传播的波，它所具有的速度几乎是与频率无关。假如不是这种情况，那解释地震剖面就会非常困难。可是，波同时又是由近地表震源产生的，因为近地表地层速度变化迅速，所以波沿地表传播的速度与频率强烈有关——就是说，它们存在有波散现象。这种波散现象引起波束在传播过程中发生分散，因而形成波束任何一部分的振幅衰减比简单理论预言的振幅衰减要快一些。

在应用地震学中，大多数勘探工作都是用仪器在地面上进行的，仪器既受沿地面传播的那些波的影响，又受已在大地上内部传播而又返回地面的那些波的影响。除非震源点上的能量分配情形已知，否则通常都必须采用消除面波的某种方法，以免与携带大多数所需信息的体波比较起来，面波显得过强。

2.2 波前与射线

当波离开震源向外传播时，任何已知时刻，都存在一种由所有即将开始运动的许多点联结组成的面，这样一种面称为波前。在物性与传播方向及所在位置均无关的介质中——均匀各向同性介质——波前是一组以震源为球心的同心球面。不过，以后就会知道，波前的形状是由波的速度分布决定的。如图 2.3 所示，能量可设想是分布在大量角锥形无限小剖面内而向下传播。任何一个角锥体的中心线都可看作是一射线，射线方向是任意时刻波前的法线方向。如果由于不均匀速度分布而波前发生畸变，则射线亦应随之弯曲，恒保持射线垂直于该瞬时波前。在很多情形下，这种关于射线的约定是一个必须遵循的方便约定，因为这样作总比处理波前的复杂结构要简单一些。然而，这仅是一种方便约定而已，每当波前法线不可能唯一地规定时，那就会带来困难。这个问题留待以后再仔细考虑。为易于理解其他问题，特殊类型的波前特别有用处，这种特殊类型波前就是平面波前，它虽然不是物理上可实现的，但可以把它看成是由无限远距离处的点震源所产生的波，而同时沿波前仍保持有限振幅。这是一种人为的概念，但却不失为很有用处的一种概念。

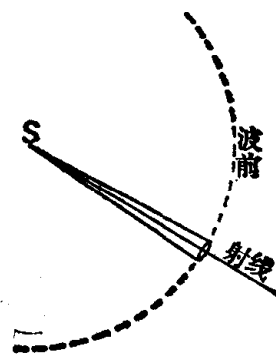


图 2.3 射线与波前之间的关系

2.3 两种不同介质分界面对波传播之影响

如果有图2.4所示特定时刻的波前A，那么当我们把这个波前上每一个点看成是新的能量源，即二次震源，并对各该二次震源绘出其稍后时刻的波前，那就能预测出波前A在稍后时刻时的位置。这种概念就是著名的惠更斯原理（Huygen's principle），它证明新波前B就是所有这些新球面波前的包络面（即共切面）。

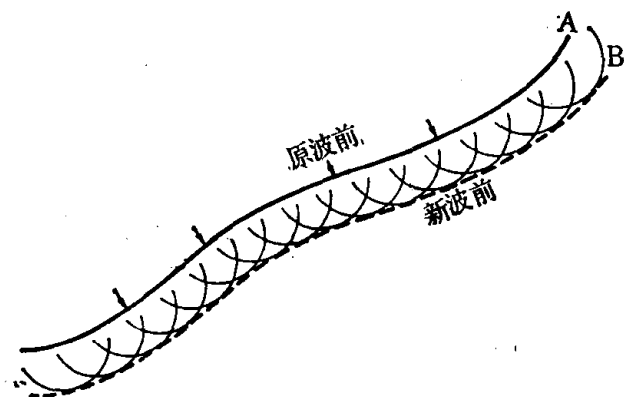


图 2.4 利用惠更斯原理预测波传播的图解说明

在均匀各向同性介质内，新波前要平行于老的一个波前，例如，一个平面波前变成另一个平行于前面第一个平面波前，一个球面波前产生另一个具有相同球心的球面波前等等。这虽颇为简单，可是，像图2.5所示，在波前遇到两种不同波速之间的平面分界面

面或者在更为复杂的情形下，惠更斯原理的用处就会显露出来。

图2.5中，具有速度为 c_1 的介质1内的入射波前 I_1 沿正向传播，在此后相继的微小时间间隔 Δt 上各占据位置 I_2 、 I_3 、 I_4 等等。这些位置之间的间距显然是 $c_1 \Delta t$ 。当波前继续传播时，一部分波前到达分界面（在A、C、E等点）。利用惠更斯原理形成既有正向进入介质2（速度为 c_2 ）的新波前，也有反向进入介质1的新波前，由此可知，在分界面上会产生一个反射，该反射将一些能量传送返回介质1，而且反射射线与分界面所夹角度等于分界面与入射波射线所夹角度。

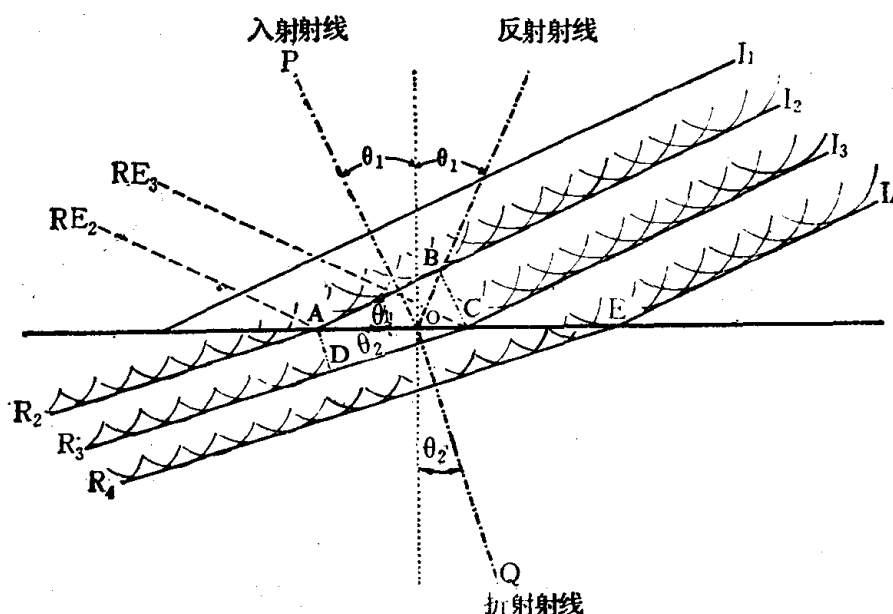


图 2.5 利用惠更斯原理导出斯涅尔（Snell）定律