

# 地球物理数据偏移

〔美〕 E. A. 鲁宾逊 著

汪贤驯 吴 晖 译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书是一本系统地论述地球物理资料(主要是地震资料)偏移处理的专著。它从简单的几何观点出发,对各类偏移包括深度偏移这样的最新发展作了详尽的论述。作者用几何论证的方法代替有关的数学推导,因而使内容深入浅出形象易懂,既适合于勘探地球物理专业人员使用,也适合非地球物理专业但对此专业感兴趣的科技人员阅读,本书也可作为地球物理专业教材。本书内容包括:概论;叠加和偏移的几何观点;常速偏移;层状速度偏移;深度偏移。

Ender s A. Robinson  
Migration of geophysical data  
International Human Resources Development  
Corporation Boston 1983

\*

### 地球物理数据偏移

〔美〕E. A. 鲁宾逊 著

汪贤驯 吴 晖 译

\*

石油工业出版社出版  
(北京安定门外外馆东后街甲36号)  
通县印刷厂排版印刷  
新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米 32开本 43/4 印张 102 千字 印1—3, 530

1985年5月北京第1版 1985年5月北京第1次印刷

书号: 15037·2541 定价: 1.00元

## 序

地球物理反演的目的，是根据地面得到的数据确定地球内部的构造。在石油勘探方面所用的数据，大多数是从反射地震勘探中得到的地震记录。本书中要讨论的并不是一般的反演方法，而是生产上用的偏移方法。偏移是一种数据处理技术，我们用这技术可以根据地面数据重建地下波场，然后再根据波场构成代表地下地质构造的图象。本书主要谈的是偏移的原理，它并不向你推荐在什么情况下应该用哪一种偏移方法。

我们在推导时用的是几何方法。其原因是，就我们所知，所有的地球物理家几何程度都不错。但是在今天，我们虽然一方面鼓励学地质和地球物理的年轻人发展对于物理现象的想象与直觉能力，与此同时在地球物理教育中又往往只采用最简单的几何方法。我们在运用数学工具时不能体会数学所包含的物理意义，可以说是近几百年来慢慢演变的结果。在古代直到中世纪，几何曾是当时科学家的重要工具，但自从笛卡特引出解析几何之后，在科学教育中研究几何的重要性便逐渐减少。在今日重视数字计算机算法的时代，许多学生和科学家常常都只学点几何学的皮毛。这种趋势从别的地球物理数据处理书中可以清楚地看出来。

在这本书中，我们教你用几何的也就是图画的方式来思考，这对培养地球物理学家的直觉是非常有帮助的。本书教的是地球物理而不是数学。我们觉得让读者培养起用图画方

式来思考关于偏移的观念，并能得心应手地使用几何方法，是至关重要的事。在应用数学式的时候，我们也试着把其中的几何想法清楚地提出来。我们要把一般的地震数据处理（尤其是偏移）的完美、细致、自然的特色，毫不掩饰地展示给大家。

E. A. 鲁宾逊

# 目 录

|                            |             |
|----------------------------|-------------|
| <b>第一章 概论 .....</b>        | <b>(1)</b>  |
| 1.1 地球物理的反演 .....          | (1)         |
| 1.2 全息图与波前重建 .....         | (3)         |
| 1.3 地震剖面与波前重建 .....        | (6)         |
| 1.4 波动方程式是偏移的基础 .....      | (11)        |
| <b>第二章 叠加和偏移的几何观点.....</b> | <b>(13)</b> |
| 2.1 地震数据的采集 .....          | (13)        |
| 2.2 叠加 .....               | (18)        |
| 2.3 偏移 .....               | (22)        |
| 2.4 绕射曲线与波前 .....          | (28)        |
| 2.5 经典的偏移方法 .....          | (35)        |
| <b>第三章 常速偏移.....</b>       | <b>(43)</b> |
| 3.1 平面波的分解与偏移 .....        | (43)        |
| 3.2 拉冬变换 .....             | (43)        |
| 3.3 傅里叶变换 .....            | (46)        |
| 3.4 机械偏移 .....             | (48)        |
| 3.5 谱偏移 .....              | (51)        |
| 3.6 倾斜叠加偏移 .....           | (51)        |
| 3.7 常速介质偏移 .....           | (55)        |
| <b>第四章 层状速度偏移.....</b>     | <b>(59)</b> |
| 4.1 普通(1.5维)偏移.....        | (59)        |
| 4.2 偏移的概念和技术上的讨论 .....     | (64)        |
| 4.3 偏移的基本问题 .....          | (71)        |
| 4.4 赫姆霍兹方程式 .....          | (73)        |

|             |                    |              |
|-------------|--------------------|--------------|
| 4.5         | 速度不变时的解 .....      | (75)         |
| 4.6         | 水平速度层条件下的近似解 ..... | (77)         |
| 4.7         | WKB近似法 .....       | (78)         |
| 4.8         | 确定绕射点的位置 .....     | (80)         |
| 4.9         | 有限差分偏移 .....       | (82)         |
| 4.10        | 关于随机反射面倾角假说 .....  | (85)         |
| 4.11        | 拉纳深度偏移 .....       | (86)         |
| <b>第五章</b>  | <b>深度偏移 .....</b>  | <b>(89)</b>  |
| 5.1         | 波动方程的发展史 .....     | (89)         |
| 5.2         | 信息与介质 .....        | (94)         |
| 5.3         | 地震偏移作为一个反演问题 ..... | (99)         |
| 5.4         | 天然地震学 .....        | (102)        |
| 5.5         | 波动方程式 .....        | (103)        |
| 5.6         | 作为统计过程的普通偏移 .....  | (110)        |
| 5.7         | 普通偏移的失败 .....      | (112)        |
| 5.8         | 射线理论深度偏移 .....     | (119)        |
| 5.9         | 波动理论深度偏移 .....     | (129)        |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>       | <b>(135)</b> |

# 第一章 概 论

## 1.1 地球物理的反演

这本书是写来作为教科书用的，是特意为了帮助读者掌握地震偏移的基本概念而设计的。因此请你不要把本书当作这方面的高深论文，也别以为我们会把最新的结果综合介绍出来。你若对这些项目感兴趣，你可以在一些已出版的好书和述评文章内找到资料。在本书末列出了非常多的参考资料。要提醒你的一点是，许多参考资料中都用到相当高深的数学。你对本书中讲的基本概念有了充分的了解之后，再去读这些参考资料就容易了解得多了。

本书采用对读者个别教导的写法。有的读者也许觉得这本书太浅了。如果这样，则他们的程度太高了，应该去看别的书。我们的基本想法是一个人在学跑之前先要学会走。本书采用口语体的写法，目的在于加深读者对一些重要结果的印象，并在偏移这一地球物理数据处理方法方面补充并扩大读者的知识。

我们需要对“理想化”说上两句。我们把讨论的问题理想化，为的是简化教材的展开。如果在解地球物理问题时不用基本假设及各种近似方法而一个劲去硬算，则只能使学生更难明白解法的内在结构。在本书中我们只考虑怎样解这些理想化的问题。要解决非理想的实际问题，则需要各研究中心与各数据处理机构共同努力。正因为这个缘故，本书中作的许多假设和采用的许多技术，不见得能照搬到实际问题上去

用。这些理想情形中的许多性质都是在某些条件限制下才能成立，而这些限制多数是现实中所没有的。事实上，勘探地震学的从业人员在本书中可能找不到多少可以实际应用的资料。书中公式的推导都假设有理想的宽带信号，但实际上这是不存在的。当书中的模型有了畸变时，我们没有讨论书中这些算法的稳定性和收敛性，也没有指出需要什么预防措施才能得到有用的结果。我们希望你了解偏移是一个大题目，在这样一本导引性的书中是不可能什么都包括进去的。尽管加上了这许多简化的步骤，我们面对的仍是一个非常困难的题目，它依然包含了很多重要而有趣的问题和想法。学无止境，一本基础书籍只是在这漫长的旅途上帮你跨好第一步而已。

地球物理反演的目的，是要从地面得到的数据推断地球内部的构造。反射地震学中的问题，是要找到能从得到的地震记录给出构造、成分及信号源等参数的一种反演手法。在一般的反演方法方面，最初的工作是杰克·科恩(Jack Cohen)和诺曼·布莱斯坦(Norman Bleistein)在1979年完成的，他们的论文对于久未解决的地球物理问题的研究方向，产生了一种革命性的影响。本书不讨论这类通用方法，而要对偏移——一种用来把地震数据转换成地下地质图象的地震数据处理方法——加以细致的描述和解释。本书兼用了分析方法和统计方法，这样做而得到的地震数据处理的实用方法，可以求得地球物理反演问题的近似解。特别是我们在本书中提出了随机反射面倾角假说；根据这种假说，我们用统计方法就能得到今日常用的普通偏移方法(有限差分法，基尔霍夫相加法及频率-波数法)的理论证明。在最后一章，我们讨论拉纳(Larner, 1977)的深度偏移法。这是一种真正的反演方法，

在地界各地的数据处理中心里正在迅速地取代各种普通偏移方法。

## 1.2 全息图与波前重建

一种学科中的重大进展常对其它学科发生巨大影响。在光学领域里全息图或波前重建的发展就是一个很好的例子。在我们讨论它对地球物理的影响之前，让我们看看在光学上用到的全息图的主要性质。

我们都知道，一般的照片是视界内的各种现象的永久记录。当我们拍照时，我们把照相机的镜头聚焦在视界内的某个平面上，并且只记录下这个面上的景物，所有其它平面上的景物，则或多或少有模糊不清的现象。为什么呢？因为照片上记录的是光的强度分布。如果我们来想象一种光波，它是有一定频率、振幅及相位的一种正弦波，则它的强度是与其振幅的平方成正比的。因此照片中没有任何相位的信息。但是我们如果能把某平面上的振幅和相位分布全记录下来的话，则根据基尔霍夫积分定理，我们就能得到其它任一平面上的振幅和相位分布。这样做，我们可以对任何平面上的视界进行完整的探讨。简单地说，全息照相术把一个面上的振幅和相位记录成全息图，于是从全息图我们可以把整个三维图象画出来(波前重建)。

全息照相术是1948年由丹尼斯·盖伯(Dennis Gabor)发明并命名的。全息图是一张平面相片，然而我们从它可以看到三维景象的逼真重演。普通的相片只记录了强度(振幅的平方)，而全息图上保存的是振幅和相位。重建三维景象主要是靠保存的相位。全息图的英文名是hologram，holo是希腊文“整个”的意思，gram则是希腊文的“信息”。全息图中包含了所有的信息，或整幅图象。

现在让我们来看看全息图的原理。它的原理和通过无线电传播信息的原理相同，只是把时间函数换成了空间函数。无线电台发出的载波是频率、振幅和相位都不变的正弦波，它所播送的讲话及音乐信息，则是用调节振幅(调幅, AM)或频率(调频, FM)的方法加在载波上。无线电载波是时间的函数，而全息图用的载波则是空间正弦波。图上的物体引起载波的调制。所以全息图的照相记录，只是把强度分布记录下来。但是，由于信息是以调制载波形式出现的，因此我们可以证明，全息图毫不含糊地记录了与物体有关的光波的振幅和相位。所以我们说全息图包含着可以用来重建物体三维图象的信息。

普通的照相机用透镜把物体的影象映在底片平面上(见图1—1)。从物体某点上反射的光线,经过透镜的折射后,成像于底片上相对的一点。因此物体所在平面上的点与底片上的点是一一对应的。来到底片上的所有光线都来自物体,此外没有其它光源,也就是没有载波。在全息照相术中则不同,照全息图时,不用透镜成像。这样一来,物体上每一点反射的光线,就照到整个全息底片上,因此物体上的每一点所对应的不是全息底片上的某一点而是底片上的所有点。即全息底片上任一部分上都被物体所有各点反射的光线照到。除此之外,还有一点不同:照到全息底片上的光,来自两个不同地方,一部分由物体反射而来,另一部分从光源直接照射。从光源直接照来的光即是全息图上的载波。这里所用的光源是激光发出的相干光。

这两组波前发生的干涉图象记录下来就是全息图。一组波前是从光源来的参考波(载波),另一组波前是从物体来的反射光,因此全息图上的影象是载波被物体反射波调制的结

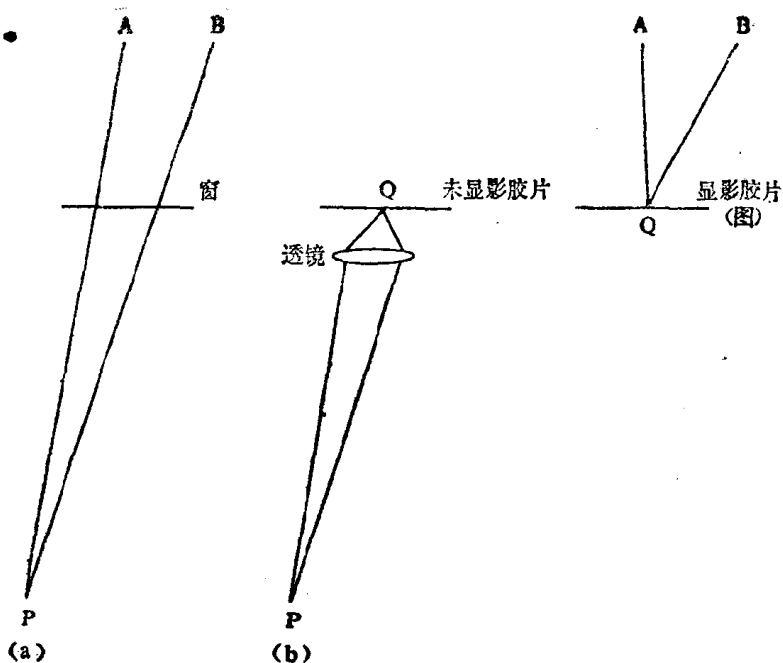


图1-1 图片不是一个窗口a-通过窗口观测，从A和B以不同的透视看到点P，b-在拍摄照片时，全部光线从P点经过透镜射到照片上的Q点，c-观察图片时，从A和B以相同的透视看Q点

果。如果用肉眼看全息图，是看不出什么东西的。全息图上暗的地方，物体波和参考波的相位同相；图上亮的地方，两种波的相位异相。因此全息图上的明暗强度，代表的是物体波与参考波的相位差（绝对值）。我们可以说全息图是微细的干涉条纹的照片，看上去是一团杂乱无章的弯曲线条。

当我们以激光照射全息图时，全息图将光线弯曲成和当初物体反射光完全一样的光线。用肉眼看时，这些弯曲（或

绕射)光线造成的效果和原来的反射光线的效果是相同的。我们透过全息图看到的是整个真实的三维虚像,就象我们透过窗子看到原来的物体一样。如果我们左右或上下移动我们的视线的位置,也会象观看实物时有同样的视差现象。若我们用激光照射全息图,就能在全息图的另一面重建整个波场。虽然当时的物体已经不存在了,但是仍然可看到它的虚像(见图1-2)。

### 1.3 地震剖面与波前重建

在地球表面的规则网点上作地震勘探,以测定地面下的三维结构。为了讲解的方便,我们假设地震资料是沿着地面的一条直线测得的,同时假设地下为二维构造。在二维空间里,上节的全息底片缩成一条线,全息图上的值就是这条线上的调制载波的强度。我们可以这样了解全息图上在某点记录的强度:在这张底片曝光的时间内,这点上接受的光波可视为时间序列形式的振动。在底片上记录的不是这时间序列而是时间序列的强度。用时间序列分析的术语说,强度就是零延迟自相关系数。所以,全息图是图上各点接受的时间序列的零延迟自相关系数的记录。因为强度是所接受的时间序列振幅平方对时间的平均值,所以强度永远是正值。全息图上需要储存大量信息,由于这个原因,全息底片的析像能力必须远远超过一般所用的微粒照相底片。我们的一维全息图(也就是说全息底片只是一条线)所包含的信息,足以重建一个平面波场。全息照相技术确实是一项了不起的发明。

现在让我们回来看看地震的情形。首先,在地震中用的是声波而不是电磁波(光波)。激光波是带宽极窄的波,事实上几乎纯粹是正弦波,而声波则是宽带的。换句话说,声波看上去就象每个时间序列分析家所熟悉的时间序列。在地震

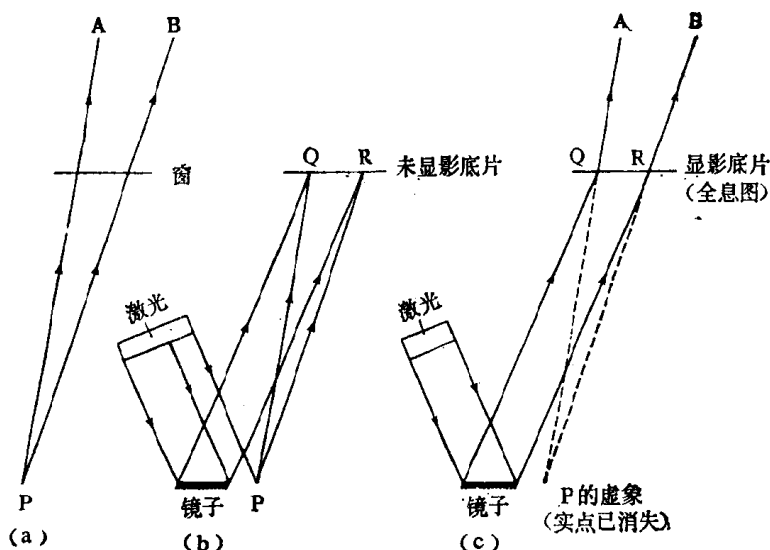


图1-2 全息图是一个窗口。a-通过窗口观测，我们从A和B以不同的透视看到点P；b-在拍摄全息图时，从P射出的光线照在底片的所有点上，如Q点和R点；c-显影的全息图使激光射线发生绕射(也就是弯曲)，从而形成P的一个虚象(实点P已在事先消去)。这样，我们观察全息图时，能从A和B以不同透视看见虚象

勘探时，我们从震源向地下发射声波，但是地下没有一个高质量的反射镜，所以不能像全息照相那样得到参考波。在地面的记录线只能收到从地下地质体(即地质构造)反射的波，这条地震记录线即相当于上面的全息图。作了以上的比较，我们现在可以说明这两种情形的主要区别。在全息图的照相底片每一点上，记录的只是接收到的时间序列的零延迟自相关系数，而在地震测线的每一点上，地震仪器记录的是接收

到的整个时间序列。因此，收到的地震数据是二维的：一维是水平的地面地震测线，另一维是时间。根据这些数据，我们希望重建地下的二维构造，其中一维是地震测线，另一维是深度。地震记录仪器记录的并不只是强度(振幅平方的时间平均值)，而是能够记录下作为时间函数的整个地面波动。因为波穿透的深度与它的传播时间，是和地震波的速度有关的，所以深度轴和时间轴也有着同样的关系。因此记录到的地震数据(称为地震剖面)虽是水平座标和时间的函数，但我们从它同样可以看出地层剖面(它是水平座标和深度的函数)的大致情形。这样说来，地震剖面可以看成地下地质构造的畸变图像。全息图中包含着高度压缩的资料，在地震剖面中则没有这种性质。

反射地震学是从二十年代开始发展的。到三十年代，在石油勘探上已经大量使用这技术。在四十年代，许多将地震剖面加以变换以获得较清楚的地下结构图像的方法出现了。这些方法被人称为偏移。利用它们可以将地下界面从地震时间剖面上看到的视位置移到它们真正所在的位置上。哈格杜恩(Hagedoorn)在1954年发表了以波动方程式为基础，以波前曲线及绕射图型的形式表示的地震偏移方法的统一理论。哈格杜恩的研究工作中经常用到射线路径理论。到了六十年代，随着能得到高质量的光学全息图的激光技术的应用，掀起了在地震学中应用类似的波前重建技术的热潮。这方面的研究工作以彼得森(Peterson, 1969)为先导，斯坦福大学的古德曼(J. W. Goodman, 1968)写的书也发生很大的影响。这本书用工程上的术语，清楚地解释了应用波动方程的多种方法，诸如基尔霍夫积分，平面波角频谱，菲涅尔(Fresnel)绕射与近轴(抛物线)近似法，波前重建及成像法等。

在提到任何数据处理方法之前,我们必须先描述所用的模型。从各种方法的发展史上看,并不是一开始就提出模型,而是对这些方法的实际效用方面有了较深的了解之后才慢慢成型的。因此模型可以帮助你了解方法。在一般地震偏移技术里用的基本模型,叫做爆炸反射面模型(exploding reflectors model)。虽然这是一个十分直观和简单得不用说明的模型,它却能帮我们搞清楚偏移的观念。除了太阳、电灯泡等自己会发光的物体之外,我们所以能看到任何物体都是因为反射的缘故。我们看得见月亮是因为它反射了阳光。但是在我们的脑子里把看到的反射光处理成象的时候,我们会觉得光是月亮发出的。同样的,我们“听”到的地质物体(地震波是地下的声波),是因为它们反射了在反射地震勘探中我们从声源发出的能量。但在偏移这个数据处理方法中,我们把地下反射面当成自己能发出能量的源,这样就更容易想象。这样的模型就是爆炸反射面模型。

我们现在来描述这个能源。反射地震学是一种回声测距技术,和雷达、声纳及其它各种超声方法有同样的原理。通常在回声测距中所用的源是一个极短极强的信号,这样的信号又叫脉冲或尖峰信号。发出去的信号碰到物体就反射回来。我们可以记录下双程传播时间,即传到物体再传回接收器的总时间。如果源和接收器是在同一点上(象雷达上的发射器和接收器使用同一个天线),则单程传播时间是双程时间之半。在地震勘探时,源和接收器在不同的位置上,但我们把数据处理后,可以得到共中点(CMP)剖面。这个剖面对每条时间序列(地震道)来说可以当作源和接收器是在同一点的。如果我们将CMP剖面上的时间刻度除以2,就得到单程时间。这样的CMP剖面就可以当作是由爆炸反射面模型所

产生的。在爆炸反射面模型里，每个地下反射面(即在两个地质层之间的每个界面)都当作由连续分布的源所组成，源的强弱决定于界面的反射系数。所有的源都同时(即零时间)激发，产生的波传到地面时被记录下来。在地面上每一点都记录下一个时间序列(叫做一个地震道)。所有的记录道组成了CMP地震剖面。

现在假设地球是由一系列水平地层所组成，就象千层糕一样。每个界面上都布满了源，在零时间所有的源一同发出脉冲信号。这些尖峰信号都垂直向上传播，因此在地面上任一点收到的时间序列都是一样的(即相同的地震道)。让我们来看看这是怎样的一个时间序列。它由一连串尖峰信号所组成。第一个传到的尖峰信号是由第一个(最浅的)界面来的；第二个尖峰信号是由次深的界面来的，其余类推。当这些一模一样的时间序列排在一起构成地震剖面时，所有从第一界面来的同相轴排成一条整齐的直线。同样，由第二界面引起的同相轴也排成一条直线。因此，地面上记录的地震剖面是地层横截面的真实影象。关于水平地层情况，没有什么别的可说了。

我们现在来看看倾斜地层模型。假设地球由一系列相互平行的平地层组成，这些地层有相同的倾角。界面上的源在零时间同时发出脉冲信号。由弗马(Fermat)最短时间原理，射线路径是垂直于各界面的，因此波不是垂直传播上去而是沿射线方向斜着上传的。记录下来的各地震道在这情形下仍然是由与各界面对应的尖峰信号所组成。当我们把这些时间序列一条条依次排好时，得到的地震记录剖面上所有的尖峰信号将按对应界面排成直线。但是，在地震剖面上的同相轴线的斜率现在和地下界面的斜率不同了，因此地震剖面虽然

仍是地下构造的图象，但这图象现在有了畸变，并不是正确的图象。地震偏移的目的，就是要使这畸变的图象恢复成地下地层的真正图象。我们对平行斜地层的讨论到此为止。

石油和天然气通常都是在沉积盆地发现的。在地质时期沉积物慢慢沉积在浅海区，因此地球上的沉积岩层往往是平缓的和水平的。但在许多有石油的地区，这些水平地层已被褶皱、倾斜、侵蚀并发生了断层。当地质构造与平行水平层相差越来越大时，在地表记录到的地震剖面与地层构造的差别也就越来越大。这一点说明了偏移这种数据处理技术为什么在勘探工作中有这样重要的地位。偏移把波动倒向投射到分布于地质界面的源上，从而消除了各种畸变。为了达到倒向投射的目的，我们必须应用波动方程式。

#### 1.4 波动方程式是偏移的基础

波动是一种统一了几乎所有物理科学的现象，它可用各种波动方程式来描述。这里的物理实验是波从地下源传播到地表的接收器。波向上传播时时间是向前走的。如果已知源的资料，我们可以根据波动方程式算出地表接收到的波场（即地震剖面）。这个物理过程可以在计算机里模拟。我们可以用计算机的存储器代表物理空间，让时间从最初的零时间向前走。这样我们从最初分布在界面上的源的初值开始，让计算机随着时间的增加模拟波场的变化。这样的模拟是和真正的物理现象相符的。波场的演变是由初值条件决定，按照波动方程式变化的。一般来说，初值条件和模型规格中的小误差并不会随着波的传播而恶性增加。因此从代表地层结构的源的最初分布，可以计算空间任何点的波场，这当然也包括了地球表面的波场。这地面波场就是接收到的地震剖面。从地下构造得出这波场的过程即是波场建立。