

40431

高等学校参考教材

反射地震資料 偏移处理与反演方法

王才經 李建朝
賀振華 何樵登 顧賢明 編著

重慶大學出版社

前 言

本书是根据地质矿产部原地震勘探教材编审委员会的建议编写的，并经地质矿产部地震勘探课程指导组审定的系列教学参考书之一。适合应用地球物理、石油地质与勘查、煤田地质、工程地质等专业的大学生、研究生和从事地球物理勘探工作及地震数据处理工作的工程技术人员学习、参考。

地震资料的偏移处理与反演是地震勘探新理论、新技术的重要组成部分，涉及到地震波传播的基本理论和地震勘探的根本目的，有较高的实用价值，因而受到了地质、石油、煤炭、工程行业(界)的生产、科研、教学等部门的高度重视，吸引了众多的科技人员、专家、学者去从事这方面的应用研究工作。大量研究成果和应用实例的问世，展示了它的很强大的生命力和光明的发展前景，但是，偏移处理和反演方法种类繁多，且有相当的研究难度，已发表的文献又过于分散，不便于自学。因此，对现有成果进行比较系统的归纳、总结，编写一本简明、实用(包括有原理、有方法、有应用实例、有比较分析)的书籍奉献给欲从事这一工作的读者，使他们能较易、较快地掌握波动方程偏移与反演的实质和最主要的方法，并进而找到今后发展的方向，是非常必要的。

编写本书时，我们力求做到：

1. 准确描述物理概念，注意地质、物探上的应用。既引入了必要的数学处理方法，但又不拘泥于数学上的严密叙述，以便具有工科大学数理基础的人能较顺利地阅读其中的大部分内容。
2. 理论密切联系实际。书中很多内容经过编者亲自检验或者是他们的研究成果。读者根据书中介绍的某一方法的原理、做法可发展成相应的计算机应用软件或容易地消化从国外引进的应用软件。
3. 取材丰富。既有基本内容，又有80年代中期的研究成果，体现了当前发展方向，具有一定的先进性。
4. 适合不同层次教学的需要。对于本科、专科大学生可参考以常规偏移处理为主的前五章内容，约需30学时。其它章节的内容，特别是第十章可供研究生教学参考，讲授全部内容约需60学时。

全书共十章。贺振华副教授编写了绪论、第一章、第二章§2-7、第三章、第四章、第七

章；王才经副教授编写了第二章§2-1~§2-6和第十章；李建朝副教授编写了第五章和第六章；何樵登教授编写了第九章；顾贤明副教授编写了第八章。全书由贺振华副教授主编，朱光明教授、聂勋碧副教授主审。

书稿草成后，地质矿产部地震勘探课程指导组对书稿进行审议并提出了许多有益的意见和建议，袁顺生、卢奇勋、刘明斌、韩卫江、周家纪、杜少青、余嘉顺和成都地院绘图室的同志们在编辑加工、文字校对、抄写、绘图等方面给予了大力支持，在此一并表示衷心感谢。

限于编者水平，书中错误、不当之处在所难免，诚望读者批评指正。

编 者

1988年2月于成都

目 录

绪 论	(1)
第一章 地震资料偏移处理基础	(5)
§1-1 偏移校正及射线理论偏移方法	(5)
一、偏移的概念	(5)
二、偏移脉冲响应及射线偏移方法	(7)
§1-2 波动方程偏移的成象原理	(10)
一、爆炸反射界面成象原理	(10)
二、测线下延成象原理	(11)
三、波场延拓的时间一致性成象原理	(11)
§1-3 波动方程式	(12)
一、运动方程和应力位移方程	(12)
二、声学近似方程	(13)
三、弹性波动方程	(14)
§1-4 单程波动方程延拓方法	(16)
一、平面波和斯耐尔波	(16)
二、波场延拓的单平方根方程式	(17)
三、双平方根方程式	(18)
§1-5 双程声波方程波场延拓	(19)
§1-6 双程全弹性波场延拓	(23)
一、弹性波矢量与弹性波延拓方程	(23)
二、全弹性双程波场延拓方法	(28)
参考文献	(30)
第二章 波动方程有限差分法偏移	(31)
§2-1 单程波差分偏移方程	(31)
一、Stolt隐式展开法求单程波方程	(31)
二、Claerbout显式展开法求单程波方程	(33)
§2-2 15° 方程偏移的差分解法	(35)
一、差分格式	(35)
二、快速算法	(37)
三、 β 的确定	(38)
四、 $\Delta\tau$ 的取法	(39)
§2-3 吸收边界条件	(40)
§2-4 15° 方程差分格式的稳定性	(42)
§2-5 差分解的频散分析	(44)
一、单程波方程的频散分析	(44)
二、空间差分和时间差分引起的频散	(45)

三、空间采样率和频散的关系	(46)
§2-6 大倾角差分方程偏移	(47)
一、单程波方程系数的优化方法	(47)
二、三阶方程的张关泉算法	(49)
三、差分解法	(50)
§2-7 串联偏移	(51)
一、串联偏移的基本原理	(51)
二、低速偏移的优点	(52)
三、串联偏移计算量比较小的原因	(54)
参考文献	(54)
第三章 波动方程偏移的频率-波数 (F-K) 域方法	(56)
§3-1 二维F-K偏移	(56)
一、基本公式	(56)
二、变量置换及插值	(57)
三、F-K 偏移的若干实际问题	(57)
§3-2 垂向变速相位移波动方程偏移	(61)
§3-3 速度纵、横向可变的相位移加插值波动方程偏移处理	(64)
一、波场插值原理	(65)
二、相位插值方法	(66)
三、 k_z 的标定	(67)
§3-4 平面波前地震记录的偏移	(68)
一、平面波前记录的单步 F-K 波动方程偏移	(68)
二、平面波前记录的相移法波动方程偏移	(70)
附录 二维sinc插值(以频率波数域的插值为例)	(71)
参考文献	(73)
第四章 克希霍夫积分偏移	(74)
§4-1 克希霍夫绕射积分及其简化方程	(74)
一、克希霍夫绕射积分方程 ⁽¹⁾	(74)
二、瑞利(Rayleigh)积分与克希霍夫积分的简化方程 ⁽³⁾	(76)
§4-2 克希霍夫积分偏移	(80)
一、常速、零炮检距地震资料的偏移处理	(80)
二、横向变速克希霍夫积分偏移	(81)
§4-3 克希霍夫积分偏移与其它偏移方法的比较	(85)
一、克希霍夫积分偏移与 F-K 法的等价性	(85)
二、克希霍夫积分偏移与绕射扫描偏移	(86)
参考文献	(87)
第五章 三类常规时间偏移方法的比较	(88)
§5-1 三类常规时间偏移方法的比较	(88)
§5-2 常规时间偏移方法归位误差分析	(88)
§5-3 常规时间偏移方法的横向分辨率特性 ⁽²⁾	(91)
参考文献	(97)

第六章 深度偏移和全声波波动方程偏移	(98)
§6-1 深度偏移问题的提出	(98)
§6-2 成像射线深度偏移	(99)
§6-3 波动理论深度偏移的分裂算法	(102)
一、频率-波数域方法 ⁽²⁾	(102)
二、时间-空间域方法 ^{(8)、(10)}	(104)
§6-4 逆时深度偏移 ⁽⁶⁾	(105)
§6-5 全程波动方程偏移	(106)
一、全声波波动方程偏移 ⁽¹²⁾	(107)
二、双程无反射波动方程偏移 ⁽⁷⁾	(110)
§6-6 线性变换全程波动方程偏移 ^{(15)、(16)}	(111)
参考文献	(115)
第七章 波动方程叠前偏移	(116)
§7-1 F-K波动方程叠前偏移	(116)
一、多次复盖地震资料叠前偏移的成像原理	(116)
二、算法公式	(117)
§7-2 共炮点及共接收点记录的叠前偏移	(118)
一、成像原理	(119)
二、基本的偏移算法	(119)
三、相位移加插值方法(PSPI)的引入	(120)
§7-3 共中心点倾斜叠加偏移	(120)
一、倾斜叠加原理	(120)
二、频率-波数域倾斜叠加剖面的偏移	(121)
三、偏移叠加的实现	(122)
§7-4 DMO与等效叠前偏移	(123)
一、NMO的倾角滤波作用	(123)
二、克服NMO倾斜滤波作用的方法 ⁽²⁾	(124)
三、DMO的计算及等效叠前偏移的实现	(125)
§7-5 全弹性波动方程叠前偏移	(127)
一、基本原理	(127)
二、计算流程	(130)
参考文献	(130)
第八章 有限元法正演及偏移	(132)
§8-1 有限元波动方程	(132)
§8-2 有限元波动方程解法	(137)
§8-3 有限元法正演计算	(139)
§8-4 有限元法偏移	(140)
参考文献	(141)
第九章 VSP偏移	(142)
§9-1 引言	(142)

§9-2 反射点作图法 ⁽¹⁾	(143)
§9-3 多偏移距克希霍夫偏移法 ⁽²⁾	(144)
§9-4 利用激励时间成象条件的逆时间偏移法 ⁽³⁾	(149)
§9-5 采用波恩(Born)反演的F-K偏移 ⁽⁴⁾	(152)
一、波恩近似	(152)
二、频率-波数域中的散射	(152)
三、方法原理的几何解释	(154)
参考文献	(155)
第十章 地震勘探参数反演	(157)
§10-1 散射反演模型和波恩近似方法	(157)
一、Green函数与Green函数法	(158)
二、一维声波方程波恩速度反演	(158)
三、散射反演模型在实际应用中的主要困难	(160)
§10-2 三维声波方程Born速度反演	(160)
§10-3 地震散射反演的不适定性	(163)
一、适定性的概念	(163)
二、地震散射反演的不适定性	(164)
§10-4 弹性波方程多参数反演的广义脉冲谱技术(GPST)	(166)
一、脉冲谱技术简介	(166)
二、线性弹性波方程的多参数反演 ⁽¹²⁾	(166)
三、有关GPST算法的几点说明	(168)
§10-5 一维声阻抗反演的变形脉冲谱方法	(169)
§10-6 一维声阻抗反演的特征线积分法	(171)
§10-7 地球物理参数识别的最优化方法	(172)
一、一维声波方程速度反演的阻尼最小二乘法	(173)
二、层状介质叠前资料速度反演变尺度法	(175)
三、一维声阻抗反演的逐层递推算法	(177)
§10-8 脉冲变分原理及其在地震反演中的应用	(179)
一、广义函数的有关知识	(179)
二、脉冲变分原理	(181)
三、脉冲变分原理在声阻抗反演中的应用	(182)
§10-9 地球物理CT反演	(185)
一、代数重构技术	(186)
二、程函方程	(187)
三、射线追踪技术	(188)
§10-10 声阻抗线性规划反演	(190)
参考文献	(191)

绪 论

地震勘探是地球物理勘探中的主要方法之一。它用人工爆炸等方法产生振动和波，向地下深处传播，碰到地质界面或地下弹性不均匀体后，产生反射和绕射返回地面，用专门的仪器将返回的波接收记录下来形成地震数据或记录。其中，除包含着激发点、接收点的空间坐标外，还含有波的到达时间和波形特征（振幅、频率、相位、延续度）等有用信息以及各种各样的干扰噪音。记录中的有用信息与波的传播速度、反射点的位置，同岩性有关的吸收、衰减等特征密切相关。因此，从干扰记录中提取有用信息，利用它反推地下地质结构、地层岩石性质、矿产资源分布就构成了地震勘探和解释的主要目标。而反射地震资料的偏移处理与反演是地震勘探处理和解释新技术的重要内容和方法。

偏移校正、射线偏移、波动方程偏移等统称偏移处理。偏移校正用于将等 t 。（地震波沿界面法向方向的传播时间）图换算为等深度图，使其更接近实际的地下构造形态。偏移校正有较长的历史，几乎与反射波法地震勘探同时在本世纪20年代就开始应用了，直到今天仍在继续使用。它的计算比较简单，但需要手工完成，效率较低。

射线偏移，以几何地震学和波的绕射理论为基础，在计算机上自动实现反射波和绕射波的空间归位处理。在速度变化平缓的情况下，能使绕射波、弯曲界面上的迴转波，陡倾界面或断层面上的反射波收敛到正确的位置上，大大方便了波的对比和解释，避免了解释人员的主观随意性，有助于提高解释的有效性与可靠性。射线偏移方法出现在70年代初期，了解它的基本原理对于从物理概念上理解偏移处理的现代方法——波动方程偏移技术很有帮助。1974年我国学者李庆忠等人发展的绕射扫描叠加⁽²⁾是这类技术的典型方法之一。

波动方程偏移，以波动方程式的数值解为基础，目的和作用同偏移校正和射线偏移类似，但是理论上比较严格，有可能获得精确的结果。除归位作用外，偏移处理对提高地震勘探的空间分辨率，提取速度参数、消除多次波和利用转换波等都有重要意义。

波动方程偏移最初由J.F.Claerbout提出和实现⁽³⁾，他首先完成了15°有限差分偏移，为偏移技术的发展作出了重要的贡献。

解波动方程式需要给出边界条件和初始条件，在地震偏移处理中还要给定作为方程系数的波的传播速度参数，以使方程有确定的解。由于速度的分布与地层结构密切相关，而求解的目的又是为了弄清地下的构造形态。于是在数学上就出现了为了求答案必须先给出答案的令人不可思议的格局，这一矛盾贯穿在波动方程偏移和反演的始终。但是通过其它资料（例如测井资料，先前做过的地震资料等）的收集可建立一个粗略近似的答案，将近似答案作为已知条件，最后得到较为精确的解，使上述矛盾得到解决，甚至较全面的解决。

波动方程的求解还与方程式的类型选择及解的方法有关。由于地震波在非均匀的岩层中传播，其传播过程远较在速度单一的空气和水中波的传播复杂。因此波的类型多，描述这些波的方程式也各不一样。所有这些因素使波动方程偏移类别很复杂，且每一种方法只能解决有限的问题，否则有一种“权威”性的方法就足够了。目前使用较多的是声学方程，其中又分为二阶全程声波方程和简化了的只包括上行波（或下行波）的单程声波方程。使用声学方程

的偏移方法有相当的近似性，因为地壳结构本来并非声学结构。但是它的算法简单，误差也常常在容许范围之内。

弹性波波动方程，特别是既包含纵波又包含横波和转换波的全弹性波动方程的求解比较困难，以全弹性波动方程为基础的偏移方法，尚处于研究阶段，暂时还很少有实用性的生产程序。但是，它能将各种类型的弹性波正确归位并能求得纵、横波速度的前景却是非常有吸引力的。

就求解波动方程的数学方法而言，波动方程偏移可分为有限差分法偏移，积分(求和)偏移，频率-波数域(F-K)偏移，有限元偏移等等。

有限差分偏移继J.F.Claerbout的开创性工作之后，又出现了很多能做大倾角地层偏移的差分方法。我国学者马在田的高阶有限差分法偏移⁽¹⁾，张关泉的低阶大倾角有限差分偏移⁽⁴⁾，李志明的线性变换偏移方法⁽¹³⁾等都是这一领域中比较出色的工作。

F-K法最初由R.H.Stolt⁽¹¹⁾提出，该方法的主要优点是给出了波的传播速度且速度为常速时能得到方程的精确解。与有限差分法相比，该方法的偏移结果好，精度高，稳定性强，噪音低，不受地层倾角大小的限制且运算速度快，成本低。该方法一出现，就很快受到工业界的欢迎。有人认为：“F-K方法简单而又精确，它不亚于发明快速傅氏变换的先进性”⁽⁶⁾。但是F-K法有一个根本弱点：它要求地层中波的传播速度恒定。这个要求太苛刻且不现实，为此，J.Gazdag等人先后提出了相位移法及相位移加插值方法，解决了速度的变化问题，代价是计算效率降低了。

克希霍夫(Kirchhoff)积分偏移，以波动方程的积分解为基础，原理与绕射扫描叠加偏移相似，不同之处在于该方法考虑到了波的振幅随传播距离和传播方向不同的影响，保持了波的振幅特性。同时，在计算公式中有高频提升因子，可弥补积分(求和)过程中高频成分的损失。Kirchhoff积分偏移由W.J.Schneider于1978年提出⁽¹²⁾，随后很快发展成主要的偏移方法之一。多数三维偏移以及不规则地震测线资料的偏移都以Kirchhoff方法为基础。

除了根据波动方程的类型和求解方法对波动方程偏移进行分类之外，还有如下的划分方法：

按所处理的地震资料是否做过水平叠加划分为 { 叠后偏移(或叠加偏移)
叠前偏移

按处理过程中是否考虑了波传播速度

横向变化的影响或波的折射效应划分为 { 时间偏移
深度偏移

按空间的维数划分为 { 二维偏移
三维偏移

在以上众多的偏移方法中比较有前途的，代表发展方向的是叠前的、三维的，以全弹性双程波动方程为基础的深度偏移方法。但是在实际工作中对偏移方法进行选择时，除了考虑解决问题的能力 and 精度外，还要权衡计算成本和效率。估计在相当长的时间内，多种偏移方法并存的局面是不会改变的。

地震资料的反演与地震勘探的目的，数学方法、地下地质模型的假设三者密切有关。在油、气勘探工作中，地震勘探的目的、任务主要有：

(1) 查明含油气盆地中地层的埋深、层厚、层序、构造(背斜、向斜、断层等)的展

布, (1) 查明地下构造形态, (2) 查明地层接触关系、地层岩性和岩性的变化规律, (3) 查明储油岩层的孔隙度以及孔隙流体的成分和含量。

广义地说, 地震勘探的目的本身就是地震反演的任务, 在此情况下, 人们分别称完成上述三个目的的反演方法为构造反演、参数反演和油气藏反演。

到目前为止, 查明地下构造形态一直是地震勘探的首要任务和特长之一, 偏移处理、水平叠加都是构造反演的重要内容。构造反演方法的使用已有相当长的历史。但是构造反演这个词远没有水平叠加、偏移处理那样广为人知, 这可能与构造反演这个词侧重于学术意义, 而水平叠加和偏移处理的应用又非常普遍有关。

参数反演和油气藏反演, 以求取地层岩性参数和油气储层参数为主要目的, 相似点很多, 统称为参数反演。纵波、横波在岩层中的传播速度, 介质的密度、地层对波的吸收衰减特性, 岩石孔隙率等都是直接和间接反映岩性和岩性变化的参数。这些参数除了反映岩性之外, 同时还反映了地层的构造形态, 因为各种参数的空间分布本身已经包含着构造形态信息。因此, 参数反演又称为完全反演, 它是地球物理工作者长期追求的目标。如果参数反演很成功, 很彻底, 那么地下的一切奥秘都将为人们所掌握。事实上反演的难度很大, 目前只能取得非常有限的结果。

反演的第一个困难是空间信息量的不足。已知的观测资料是地面的实测地震记录, 待求的有传播速度等参数和地下构造(几何形态)的空间分布。已知条件少, 未知参数多, 造成多解性。在数理方程的求解中是不适定的。为此往往要做附加的假设, 设想地球是某种易于求解的特定模型, 例如散射模型, 水平层状模型等等, 并往往给定一部分控制参数, 求另一些参数, 或参数的微小变化, 以便得到唯一解。

地震波的有限频带往往与反演中的全频带(脉冲波)假设相悖是参数反演的另一个困难。展宽实测资料的频带或减小频率采样间隔是值得考虑的办法, 但效果总是十分有限, 而且又会引出新的问题。

第三个问题是地震有效信息往往淹没在规则噪音和随机噪音之中, 不设法除掉这些噪音, 反演结果将伴随着许多假异常。必须对原始记录进行滤波、偏移等一系列数字处理之后才能做反演处理。

尽管反演的难度很大, 但由于它具有很重要的理论价值和实际意义, 国内外学者研究它的热忱却有增无减, 相信在不远的将来会取得突破性的进展。

参 考 文 献

- [1] 马在田, 高阶方程偏移的分裂算法, 地球物理学报 Vol 26, No4 1983
- [2] 胜利油田, 绕射扫描叠加, 石油地球物理勘探, 1974, No5
- [3] 张关泉、张叔伦、汪映星、刘超颖, 大倾角差分偏移的一种新算法, 中国石油学会物探委员会与美国SEG联合学术讨论会论文集, 北京, 1985
- [4] 张关泉, 利用低阶偏移微分方程组的大倾角差分偏移, 地球物理学报, Vol 29, No3 1986
- [5] 陈玉等译, J. F. Claerbout 著, 地球物理数据处理基础, 石油化学工业出版社, 1979

- [6] 秦政译, R.O. 林赛思著, 地球物理资料数字处理, 石油工业出版社, 1984, p165
- [7] 杨文采, 反射地震数据的反演, 地质信息技术 1986, No3
- [8] 唐权钧, 地球物理反演中若干解法, 油印讲义, 成都地质学院翻印 1987
- [9] Gazdag, J. Wave Equation Migration With the Phase-Shift Method *Geophysics* Vol.43, pp.1342~1351, 1978.
- [10] Gazdag, J and Sguazzero, Migration of Seismic Data by Phase Shift Plus Interpolation, *Geophysics*. Vol.49 pp.124~131, 1984
- [11] Stolt, R. H. Migration by Fourier Transform *Geophysics*, Vol.43 pp. 23~48, 1978
- [12] Schneider, W. A. Integral formulation for migration in two and three dimensions, *Geophysics*. Vol, 43 pp.49~76, 1978
- [13] Zhiming, Li. Wave-field extrapolation by the Linearly transformed Wave equation, *Geophysics*, Vol.51, pp.1538~1551, 1986

第一章 地震资料偏移处理基础

偏移是一个普通词汇,有偏离和移位的意思,本书中它又是一个主题词,本章将从地震资料偏移的内涵入手阐明波动方程偏移的物理、地质意义和数学处理的基本方法。

§1-1 偏移校正及射线理论偏移方法

一、偏移的概念

1. 偏移的直观描述 地震勘探的基本步骤是用人工的方法激发弹性地震波,这些波从震源发出,经地下地质异常体(波阻抗分界面或弹性不均匀点)反射后返回,被地震仪器接收下来形成地震记录,利用这些记录反推地下地质构造和岩性分布,得到地震地质图或地下深度剖面,这些图件是找矿勘探和地下地质研究的重要依据。我们称地震记录(包括进行过共中心点叠加处理的时间剖面)所定义的空间为数据空间或象空间。地下深度剖面或地震地质图为地质空间或目标空间。数据空间或象空间包括时间在内,若用函数符号表示波场值(记录振幅),记为 $P(x, y, t)$,其中 x, y 为空间坐标, t 为时间坐标。地质空间或目标空间记为 $P(x, y, z)$,其中 P 为表征地质结构的特性参数(如界面的反射系数,弹性参数等)。一般说来,人们总是希望地震记录和地质剖面中所反映的同一地质体应当尽可能地一致,以便直接利用地震记录作地下地质解释,但实际上由于地震记录方式、观测系统的选择,地下界面的形态和波的传播特征等因素的影响,象空间和目标空间总是存在着很大的差距,使得直接利用地震记录或时间剖面作地质解释变成一件风险很大的事情。下面举一个具体例子。设地下存在一个反射界面 BD (见图1-1-1),采用零炮检距观测系统作地震观测,得到来自 BD 界面的反射波同相轴 $B'D'$,由前面的叙述, $BD, B'D'$ 应当分别定义在目标空间和象空间里。为了方便起见,再假定 BD 以上介质中波的传播速度为常数,通过 $h = Vt/2$,将时间转化为深度,则时间剖面(象空间)和地质界面(目标空间)就可统一在一张图上(图1-1-1),但是 $B'D'$ 和 BD 并不重合。由 B 点引 BD 的垂线交水平轴 x 于 A 点,则 $AB = h$ 代表由 A 点激发并在 A 点观测的来自 B 点的反射路径,按记录的习惯, B 点反射波应放在 A 点的正下方 B' ,设反射波的单程传播时间为 t_0 ,则有 $AB' = t_0 V = AB$ 。同理,自 D 点引 BD 的垂线交 x 轴于 F 点,得 $FD = FD'$ 。显然,对倾斜界面 BD 而言,它的象 $B'D'$ (反射同相轴)和它本身在位置、倾角、长度上都是不一致的,通俗地说,这种不一致就叫做地震数据的偏移。当地质形体比较复杂时,偏移作用会产生很多假象,使地震剖面的地质解释变得十分困难,为得到正确的解释结果,必须进行偏移校正或偏移处理,具体地说就是将反射 B' 归位到 B

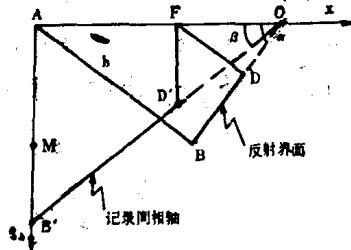


图1-1-1 自激自收条件下,反射同相轴 $B'D'$ 相对它的反射界面 BD 沿下倾方向移动了,长度加大,与地面的夹角变小,并且存在关系式 $\sin\alpha = \tan\beta$,这些变化统称为偏移

处, D' 归放到 D 处。为了进一步对偏移处理进行研究, 引入偏移距和偏移角度转换的概念。偏移距是指反射点(例如 B 点)和该点反射(B')之间的距离, BB' 在水平方向的投影 MB 称水平偏移距, 在垂直方向上的投影 MB' 称垂直偏移距。若将 BD 和 $B'D'$ 延长, 则必相交于地面(x 轴)的 O 点, 这是因为 O 点既是反射点又是反射波归放的位置(此时波的传播时间为零)。

设 BDO 与 x 轴的夹角为 α , $B'D'O$ 与 x 轴的夹角为 β , 则按简单的几何关系得

$$\sin \alpha = \tan \beta \quad (1-1-1)$$

此式描述了偏移处理前后同相轴视倾角和界面真倾角的关系。上例适用于自激自收(零炮检距)观测系统情况下的偏移问题, 如果采用非零炮检距系统, 则偏移的描述方式不同, 例如平直界面共炮点反射地震记录是一条反射双曲线, 它与直线状的平直界面在形态和位置上完全不同, 将双曲线变为平直界面也是一种偏移处理问题。

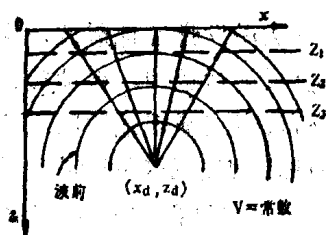


图1-1-2

均匀介质中的绕射波及假想观测面

$$(z=0, z_1, z_2, z_3)$$

2. 波的传播特性与偏移 设均匀介质中存在一个绕射点(或散射点), 波自绕射点出发, 以球面波的形式向地面传播(见图1-1-2)。二维情况下波的传播方程式为

$$(x-x_d)^2 + (z-z_d)^2 = V^2 t^2 \quad (1-1-2)$$

式中 x_d, z_d 为绕射点坐标, V, t 为传播速度及旅行时间。当 t 固定时, 波前轨迹是一个圆, 因为 $V^2 t^2 = R^2 = \text{常数}$ 时 (1-1-2) 变为圆方程。当观测面固定 ($z = \text{常数}$), (1-1-2) 式可改写为

$$t = \sqrt{\frac{(z_1 - z_d)^2}{V^2} + \frac{(x - x_d)^2}{V^2}} \quad (1-1-3)$$

式中 $z_1 = 0, z_1, z_2, \dots, z_d$, (1-1-3) 是一双曲线方程, 对不同的 z_i , 双曲线形状与位置不同, 见图1-1-3, 但是有一个共同特征: 曲线顶点的水平坐标 x_d 与绕射点水平坐标 x_d 总是一致的。另外还可注意到, 当 $z = z_d$ 时, x_d 点的观测时间为零。这给我们启示: 当观测面设在 z_d 时, 找出波的传播时间为零的地方也就找到了绕射点 (x_d, z_d) 。实际上, 几乎不可能在地下某一深度 z_d 进行观测, 但是通过数学运算可以将地面观测的记录 $P(x, z=0, t)$ 换算到地下某一深度 $z = z_d$ 处, 得到记录 $P(x, z_d, t)$, 然后再令 $t = 0$, 即得 $P(x_d, z_d)$, 它就是要找的绕射点。一般说来由 $P(x, z=0, t)$ 推算出 $P(x, z, t)$ 的过程称为延拓(或外推), 由 $P(x, z, t)$ 求 $P(x, z)$ 称为成象, 延拓与成象是波动方程偏移处理的两个重要步骤。以上讨论的是点绕射的情况, 但对一般的反射界面也适用, 因为反射界面可视为绕射点的集合。每一个绕射点对应着一条双曲线, 双曲线簇的渐近线就是反射同相轴(见图

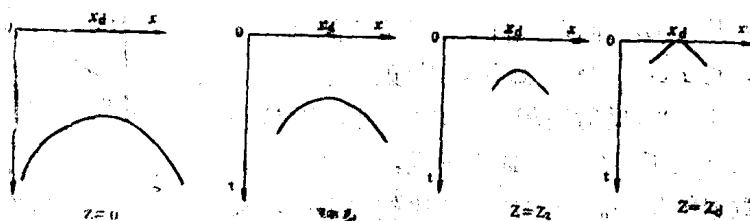


图1-1-3

绕射点位于 (x_d, z_d) 处, 观测面在 $z \neq 0, z = z_1, \dots, z = z_d$ 时测得的时距图, 注意: $z = z_d$ 时, 时距曲线变为顶点在 $t = 0$ 的直线

1-1-4) 因为

$$\tan \beta = \frac{dz}{dx}$$

$$\sin \alpha = \frac{dz}{dx} = \frac{V dt}{dx} = V \cdot P_{\alpha} \quad (1-1-4)$$

式中 P_{α} 为射线参数。由于 dt/dx 是双曲线斜率，当地层倾角 α 和传播速度 V 为常数时，斜率 P_{α} 不变，各绕射双曲线的渐近线相同，构成了反射同相轴。这样就将图1-1-4和图1-1-1联系起来了。综上所述，对偏移和偏移处理做如下定义：地震记录上的反射同相轴因为受波的传播特性的影响和记录方式的限制往往与其相应的反射地质体在形态和位置上不一致，这种不一致性称为偏移，设法消除偏移影响的方法叫偏移处理。值得注意的是，在实际工作中，为了简单，常将偏移处理也称为偏移。

二、偏移脉冲响应及射线偏移方法

1. 输入剖面的脉冲响应 当输入剖面(象空间)中仅有一个脉冲，其余全为零时经过偏移之后它所对应的地下空间(目标空间)中的图形称为输入剖面的偏移脉冲响应。如果波的传播速度不变，输入为自激自收剖面，其偏移脉冲响应为半圆形构造(见图1-1-5)。道理很简单，地下界面如果是圆心在地面的一个半圆形构造，采用自激自收观测系统进行测量，反射波将会聚成一个脉冲波呈现在观测时间剖面上。一般说来，地震数据由象空间变换到目标空间的过程称为偏移处理或地震反演，由目标空间变换到象空间称为地质模型或正演模拟。

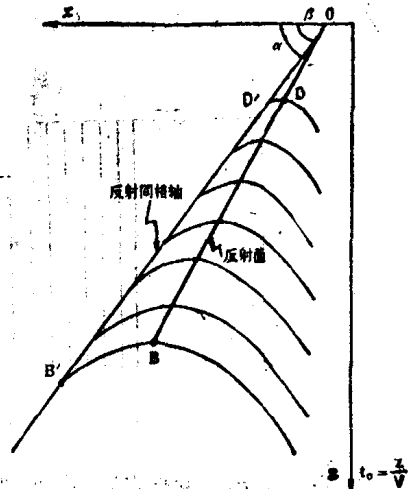


图1-1-4

反射界面、反射同相轴和绕射点及绕射双曲线的关系图。

反射界面 BDO 由许多单个的绕射点组成，各绕射双曲线的渐近线构成了反射同相轴 $B'D'O$ 。

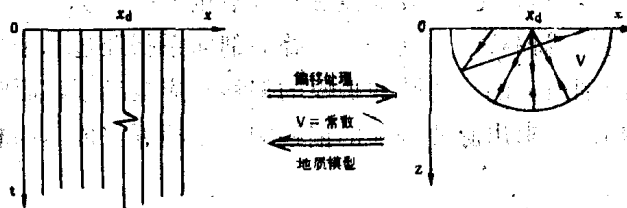


图1-1-5

a. 输入的自激自收时间剖面(象空间)；

b. $V = \text{常数}$ 时，偏移脉冲响应为半圆，只有在圆心 x_d 激发时，才能在 x_d 点接收到半圆构造上的反射波，在记录上形成一个反射脉冲而在 x_d 以外的其它地点激发的波经半圆构造反射之后都不能回到原来的激发点，记录上为空白或零值。

如果输入剖面是用非零炮检距观测系统测得的(有炮检距剖面)，且速度 V 不变时，其脉冲响应为椭圆，它以发射点 S 和接收点 R 为焦点，以 Vt 为定长，长半轴 $a = Vt/2$ ，短半轴 $b = \sqrt{a^2 - (l/2)^2}$ ，其中 l 为炮检距(见图1-1-6)。

图1-1-6的椭圆方程为

$$\frac{(x - x_d)^2}{(\frac{1}{2}Vt)^2} + \frac{Z^2}{(\frac{1}{2}Vt)^2 - (\frac{1}{2}l)^2} = 1 \quad (1-1-5)$$

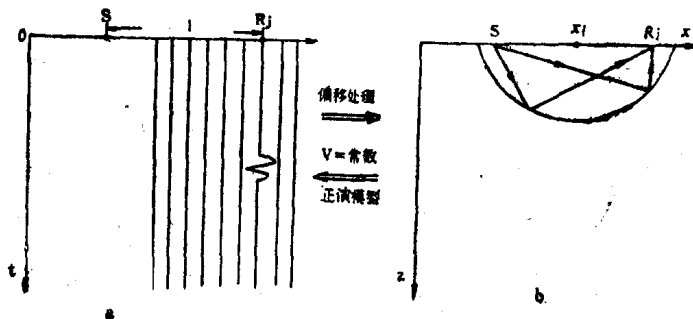


图1-1-6

- a. 共炮点脉冲时间剖面;
b. 偏移脉冲响应剖面为椭圆, 其两个焦点分别为激发点S和接收点Rj

2. 输出剖面的脉冲响应 设目标空间有一个脉冲(或绕射点), 在一定观测系统情况下, 地面上得到的观测数据(象空间, 时间剖面)称为输出剖面的脉冲响应或地质模型响应。显然, 当采用自激自收观测方式且地下介质的地震波传播速度不变时, 其脉冲响应为一绕射双曲线(见图1-1-2及图1-1-3)。绕射双曲线方程式为

$$t = \sqrt{\frac{4z_d^2}{V^2} + \frac{4(x - x_d)^2}{V^2}} \quad (1-1-6)$$

式中 $2z_d/V = t_0$ 是用双程传播时间定义的。

若使用非零炮检距系统(例如共炮点观测系统)其脉冲响应仍为双曲线, 方程式为

$$t = \frac{1}{V} \sqrt{(x_d - x_s)^2 + z_d^2} + \frac{1}{V} \sqrt{(x_r - x_d)^2 + z_d^2} \quad (1-1-7)$$

式中 x_d, z_d 为绕射点坐标, x_s, x_r 为发激点和接收点的水平坐标。

3. 叠后时间剖面的射线偏移——圆法 叠后剖面系指经过水平叠加的剖面, 与自激自收剖面相似。由于时间剖面上的一个脉冲振幅的偏移响应是半圆, 而时间剖面上的同相轴可看成由许多脉冲振幅构成, 求出脉冲振幅的偏移响应, 即可完成该同相轴的偏移。做法是:

(1) 将输入的叠后时间剖面离散化, 每个方格上的值(不论是零, 或值的大小如何)都视为脉冲;

(2) 按公式(1-1-5)在输出剖面(目标空间)上画半圆, 半圆轨迹处的振幅值与输入剖面中相应的脉冲振幅值成正比;

(3) 输入剖面上每一个格点对应输出剖面上的一个半圆, 在半圆相交点, 振幅值都是叠加的, 于是叠加后的强值或各个半圆的包络线就是偏移后的反射界面。这与常规解释中用圆法画地震剖面极为相似。故称圆法偏移。图1-1-7示出了圆法偏移的基本原理与方法。

4. 叠后时间剖面的射线偏移——绕射扫描叠加 前面已经提到目标空间上的点(x_d, z_d)与象空间的绕射双曲线对应, 利用此特性可将输出剖面离散化, 每个网点上假设都有一个绕射点, 按绕射双曲线公式可在象空间找到一条对应的双曲线, 沿双曲线轨迹取波的振幅

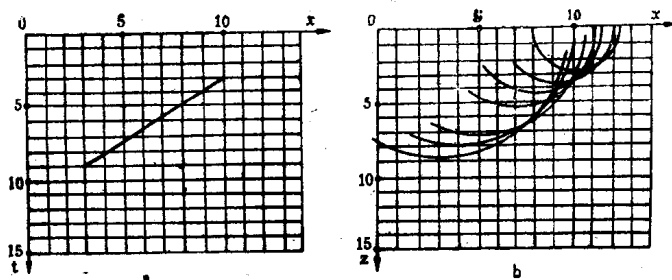


图1-1-7

- a. 离散时间剖面上的一个倾斜反射同相轴；
- b. 以时间剖面a上所选同相轴的各个振幅值的水平坐标 x_i 为圆心， $Vt/2$ 为半径画圆，圆簇包络线即为偏移后的反射界面。

并叠加起来，将叠加和置于目标空间相应的网点上。当绕射点不存在时，双曲线也不存在，这时波的振幅叠加和为零，如果目标空间上确实存在一个绕射点，波的振幅叠加和有较大的值，将这些值显示在目标空间相应的网点上就得到偏移剖面。绕射扫描叠加方法能使绕射波能量归位，同时也能使反射同相轴偏移归位，因为反射同相轴可看成无数个相关绕射双曲线的渐近线，沿渐近线波的振幅能量是相干的，可得到同相叠加的效果，这些相干能量应置放在各绕射双曲线的顶点，各顶点的连线就是反射界面的真实位置(见图1-1-4。)

5. 叠前射线偏移——椭圆法 叠前射线偏移可在共炮检距道集，共中心点或共炮点道集内进行。现以共炮点道集为例说明椭圆法叠前射线偏移的实现过程。任取记录上某道的一个样值 a ，它是记录时间 t ，炮检距 x_i 的函数，记为 $a(x_i, t_j)$ 或 a_{ij} ，由于 a 可视为一个脉冲，它的偏移脉冲响应为一个椭圆。因此按公式(1-1-5)在输出剖面上确定炮点 S ，接收点 R_i 的位置，以 S, R_i 为焦点，以 Vt 为定长计算椭圆轨迹，将振幅值 a_{ij} 沿椭圆轨迹布放即完成了一个样值的偏移处理。对记录上所有的样值重复上述步骤，并将落在同一网点上的振幅值叠加。显然它是一个先偏移后叠加的处理过程，所以叠前射线偏移又称偏移叠加。图1-1-8示出了一个反射同相轴的偏移处理方法。椭圆簇的包络线 AF 就是所求的反射界面段，波的旅行路径(射线)说明，包络线与真实反射界面段是完全一致的。

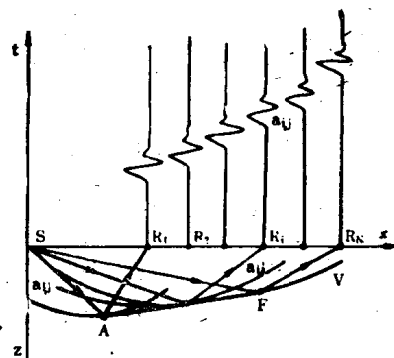


图1-1-8

一个反射界面的叠前射线偏移方法。沿双曲线取振幅值 a_{ij} ，以 S, R_i 为焦点， Vt 为定长画椭圆，沿椭圆轨迹布放 a_{ij} ，则椭圆簇的包络线(用同一点 (X, Z) 上的振幅值之和表示)就是所述的反射界面

6. 叠前绕射扫描偏移 这种偏移方法所用的道集与椭圆法所用的道集类同，由于输出剖面的脉冲响应也是双曲线，所以偏移方法与叠后剖面的绕射扫描方法非常相似，只是此时要使用公式(1-1-7)而不是公式(1-1-6)。

§1-2 波动方程偏移的成象原理

前面曾经提及波动方程偏移处理有两个基本步骤：延拓与成象。延拓又称外推，它将地面记录的波场值通过运算，换算到地下，好像是把观测面布置在地下某一深度处所得到的观测波场值，为什么向下延拓能达到偏移归位的目的呢？首先用一简单例子直观说明这一重要概念。如图1-2-1所示，设地面（ $z=0$ ）处安放了一个激发点和一个接收点，两者位置重合，接收到来自界面A点的反射波，当波的传播速度 V 在界面以上保持恒定时，射线为直线。此反射波放在 S 的正下方 B 点处，旅行时间 $t=2SA/V$ ， $SB=V \cdot t/2=SA$ ，记录位置 B 和反射点之间的距离称为偏移距。如果将测线布置在地下某深度 $z=z_1$ 处，为得到A点的反射，激发点和接收点必须放置在 S' 处，此时波的旅行时 $t'=2AS'/V$ ，反射波应置放在 B' 处，且 $S'B'=AS'$ ，新的偏移距为 AB' ，同样，如果将观测面布放在 $z=z_2$ ，则相应的偏移距为 AB'' 。由图1-2-1可清楚地看到，随着观测面向地下深处移动，有两个明显的特征：

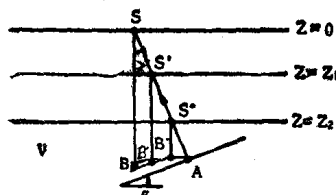


图1-2-1 延拓与偏移关系图
当测线向下延拓时，A点反射波的旅行路径 AS 逐步减小，偏移距 AB 也逐步减小

(1) 偏移距愈来愈小；

(2) 旅行时间愈来愈短。这意味着将反射波场向地下延拓时，总可使偏移距缩小到零，从而实现偏移归位的目的。偏移距 AB 与波的旅行路径 AS ，地层倾角 α 的关系为

$$AB = 2AS \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right) \quad (1-2-1)$$

当观测线向下延拓到A点时，路径 $AS=0$ ，偏移距 $AB=0$ 。地层倾角 α 为零时，偏移距 AB 恒为零，此时根本用不着进行偏移处理。

一、爆炸反射界面成象原理

波场延拓是找到反射点或绕射点正确位置的必要条件，但是要把所有的反射界面或绕射点自动找到并显示出来，还需要利用成象原理。爆炸反射界面成象原理就是最常用，最简单的一种成象原理，它是由D. Leowenthal⁽⁵⁾最先提出来的。该原理把地下反射界面想象成具有爆炸性的物质或爆炸源，爆炸源的形状、位置与反射界面的形状和位置一致，它所产生的波为脉冲波，其强度、极性与界面反射系数的大小和正负一致。并且假定在 $t=0$ 时刻，所有的爆炸反射界面同时起爆，发射上行波到达地面各观测点，波的传播速度为 V_e 。若利用波动方程式将地面测得的波场（地震记录）作反时间方向传播（向下延拓）则 $t=0$ 时的波场值就正确地描述了地下反射界面的位置，自动实现偏移成象。

此成象原理适用于水平叠加后的地震资料的偏移处理，因为叠加后资料相当于零炮检距地震剖面，自炮点发出的下行波到达反射点的路径与自该点反射返回地面的上行波的路径完全一致，这样，可以只考虑上行波而不必考虑下行波。但是实际记录上的反射波到达时间都是双程时间，若仅考虑上行波，波的到达时间将减少一倍，为使两者匹配，在爆炸反射界面成象原理中还假设波的传播速度 V_e 等于实际速度 V 的一半，即 $V_e = V/2$ 。爆炸反射界面成象