

56.2578

03812

# 地震偏移 波场外推法声波成像

A. J. 别尔克豪特

石油工业出版社

# 地震偏移

## 波场外推法声波成像

A. J. 别尔克豪特

马在田 张叔伦 译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书是研究地震偏移的一本专著。书中全面地讨论了地震偏移的原理和方法，对现代偏移技术的各种方法如波数—频率域偏移、求和法偏移和有限差分法偏移都做了详细地分析，并提出了独特的一些方法。为了讨论偏移原理的需要，作者用了一定的篇幅概要地重述了波动理论及有关的数学知识。为了对比和更好地理解偏移问题，还讨论了正演模拟问题。本书可供地震数据处理专业人员参考和医疗声学、无源声纳、海洋学的技术人员及大专院校有关师生参考。

本书的前言、序、第5~10章由马在田译，第1~4章、11、12章和附录由张叔伦译。马在田并负责全书校订工作。

**SEISMIC MIGRATION**  
**IMAGING OF ACOUSTIC ENERGY BY**  
**WAVE FIELD EXTRAPOLATION**  
**A. J. BERKHOUT**  
**ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY**  
**Amsterdam—Oxford—New York 1980**

## 地 震 偏 移

### 波场外推法声波成像

A. J. 别尔克豪特  
马在田 张叔伦 译

石油工业出版社 出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

化工印刷厂排版

河北省大厂回族自治县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 9 $\frac{1}{8}$ 印张 252千字 印1—2,800

1983年5月北京第1版 1983年5月北京第1次印刷

书号: 15037·2402 定价: 1.20元

## 前 言

任何回声技术的目的都是在避免有害穿透的同时收集有关内部结构的信息。可以用声波对介质进行研究的例子有：地面以下的地层，海底过渡层，人体器官和组织等。

与回声系统有关的主要问题之一是改善空间分辨力。尤其是在许多不同的应用中，大量的精力花费在增加方法的横向分辨力方面。最大的横向分辨力是由波长决定的。声波传播速度相对是低的：

空气：	约3400米/秒
水、人体组织：	约1500米/秒
沉积岩：	约3000米/秒
变质岩、钢：	约6000米/秒

在相对低频上得到的波长是短小的，因此声学回声系统的最大横向分辨力原则上是高的。

在许多实用中实际的横向分辨力远比最大极限要低。这可能是由于不合适的采集条件或带有局限性的数据处理手段造成的。改善横向分辨力的技术以不同的名称用于各种领域。例如：

1. 聚焦（超声速成像）；
2. 像的重建（地形成像）；
3. 孔径合成（无线电天文学）；
4. 偏移（地震成像）。

地震偏移从来没有做为实时技术使用，而是在处理中心用数字方法实现。第一次数字应用是D. W. 洛克维尔在1965年公布的。在七十年代初期偏移理论的一个重要发展是由J. F. 克莱包特把压缩波波动方程引进到偏移中而提出来的。克莱包特和他的史坦福大学小组对偏移的现代方法做出了不可估量的贡献。此

外，斯图尔特，盖兹达格，谢聂德尔，拉纳尔和哈顿，洛沙以及许多其他人的工作也给我们提供了当代偏移的广泛知识。

在本书中偏移理论是根据第一种原则导出的。在这方面它具有教科书的作用。但是，相当大量的材料是新的，还没有发表过的。例如，本书的后半部特别具有研究专著的特点。通过引用传播矩阵和散射矩阵，求出了正演模拟和偏移理论的精巧公式，特别是叠前数据的公式。偏移矩阵的元素是从所研究的波动方程得出的。本书中所阐述的理论可以扩展到由标量波动方程定义的任何类型的波。在一定的条件下矩阵乘可由褶积来代替。由于大多数地球物理学家很熟悉褶积和反褶积的理论，所以充分利用了这一特点。

我感谢许多朋友和同事的帮助。特别是范·乌尔夫登·巴尔德教授的评论是对我的最大帮助。他的帮助为使数学公式做出好的安排方面也是很重要的。

与埃利奥·巴基格利奥尔米的关于声波理论的地震问题和分辨力极限的讨论，是很有帮助的。我感谢他的许多建议。

我与东·洛克维尔和东·拉尔逊有过许多富有成效的谈话。特别是关于实用问题的讨论对我是更重要的。

与鹿特丹埃拉斯姆斯大学的超声速成像实验室的工作人员交换的意见告诉我如何从聚焦的观点来考虑偏移。

还要感谢雅·里德，代迪梅·德·夫里斯和朗·范·德·瓦尔，在把很多“缺陷”从本书中删除方面他们给予很多的帮助。我也赞赏巴尔·德·蓉的帮助，他绘制了有限差分法一章的图幅。最后我要感谢维尔玛·范·达姆夫人持续不断的热情，一遍又一遍地反复打印手稿。我还赞赏制图部分的A. S. G. 德·聂格特先生，照像部分的A. R. 休特尔斯先生和奎利太普服务社的昂热利娜·德·维特夫人在准备最后手稿中的专业支持。

A. J. 别尔克豪特

1980年2月

# 目 录

绪论 .....	1
<b>第一章 向量分析的基本结果 .....</b>	<b>15</b>
1.1 引论 .....	15
1.2 标量积, 梯度, 旋度和散度 .....	16
1.3 斯托克斯定理, 高斯定理和格林定理 .....	22
参考文献 .....	25
<b>第二章 离散谱分析 .....</b>	<b>26</b>
2.1 引论 .....	26
2.2 狄尔塔脉冲和离散函数 .....	26
2.3 周期时间函数的傅立叶级数 .....	28
2.4 瞬变过程的傅立叶积分 .....	33
2.5 离散性与周期性之间的关系 .....	41
2.6 时间和频率的采样和假频 .....	46
参考文献 .....	48
<b>第三章 二维傅立叶变换 .....</b>	<b>49</b>
3.1 引论 .....	49
3.2 基本理论 .....	49
3.3 空间假频 .....	52
3.4 二维傅立叶理论和平面波分析 .....	54
参考文献 .....	55
<b>第四章 波动理论 .....</b>	<b>56</b>
4.1 引论 .....	56
4.2 波动方程的推导 .....	56
4.3 平面波和 $k$ - $f$ 图 .....	70
4.4 球面波和方向特性 .....	79
4.5 柱面波 .....	88
4.6 反射系数与角度的关系 .....	93

参考文献 .....	99
<b>第五章 波场外推: 正问题</b> .....	100
5.1 引论 .....	100
5.2 克希霍夫积分的推导 .....	100
5.3 瑞雷积分 I 式 .....	103
5.4 瑞雷积分 II 式 .....	106
5.5 空间-时间域的正向外推 .....	115
5.6 空间-频率域的正向外推 .....	118
5.7 波数-频率域的正向外推 .....	121
参考文献 .....	126
<b>第六章 用波场外推法进行模拟</b> .....	127
6.1 引论 .....	127
6.2 一个物理实验的模拟 .....	127
6.3 一个物理实验的聚焦 .....	134
6.4 平面波响应的模拟 .....	135
6.5 用双程传播矩阵进行模拟 .....	137
6.6 多记录数据集的模拟 .....	139
参考文献 .....	150
<b>第七章 波场外推: 反问题</b> .....	151
7.1 引论 .....	151
7.2 用空间褶积法进行多记录数据集的向上外推 .....	152
7.3 用空间反滤波进行多记录数据集的向下外推 .....	154
7.4 克希霍夫求和法和匹配滤波 .....	156
7.5 存在干扰时的向下外推 .....	158
7.6 二维最小平方法向下外推 .....	160
7.7 用双程传播矩阵的逆进行一个震源道集的向下外推 .....	164
7.8 用双程传播矩阵的逆进行一个检波点道集的向下外推 .....	167
7.9 用正、反向联合外推法进行一个震源道集或一个检波点道集 的向下外推 .....	168
7.10 平面波数据的向下外推 .....	169
7.11 零炮检距数据的向下外推 .....	172
7.12 成像 .....	174
参考文献 .....	177

<b>第八章 波数-频率域偏移</b> .....	178
8.1 引论.....	178
8.2 向 $k_x$ - $k_y$ 域映射的偏移 .....	179
8.3 $k_x$ - $k_y$ 域的递归偏移.....	181
8.4 在 $k_x$ - $k_y$ 域偏移平面波数据.....	184
8.5 在 $k_x$ - $k_y$ 域偏移零炮检距数据.....	185
参考文献 .....	186
<b>第九章 求和法偏移</b> .....	187
9.1 引论.....	187
9.2 空间-频率域的求和法 .....	187
9.3 空间-时间域的求和法 .....	191
9.4 平面波和零炮检距数据的求和法.....	194
9.5 递归偏移的实用求和法.....	195
9.6 多层外推法.....	203
参考文献.....	205
<b>第十章 有限差分法偏移</b> .....	206
10.1 引论 .....	206
10.2 用泰勒级数做波场外推 .....	207
10.3 浮动基准时间.....	209
10.4 $z$ 方向空间导数的近似式.....	211
10.5 延迟压力场波动方程的近似式.....	214
10.6 空间-频率域有限差分偏移.....	215
10.7 有限差分偏移的误差.....	218
10.8 三维有限差分法.....	230
参考文献.....	231
<b>第十一章 不同偏移方法的比较</b> .....	232
11.1 引论 .....	232
11.2 地震模型的回顾.....	232
11.3 反演原理的回顾.....	238
11.4 泰勒级数和波动方程.....	240
11.5 用乘法进行外推.....	241
11.6 用一维褶积代替乘法.....	242
11.7 用二维褶积代替乘法.....	243



11.8	褶积算子的级数展开式	245
11.9	外推方法概述	248
11.10	成象方法概述	250
11.11	实际情况的可能性和局限性	253
11.12	一些结论性注记	254
	参考文献	255
<b>第十二章</b>	<b>横向分辨率的极限</b>	<b>256</b>
12.1	引论	256
12.2	横向分辨率的最大极限	256
12.3	实际情况的横向分辨率	260
12.4	有限孔径的影响	261
	参考文献	266
附录A	流体和固体的虎克定律	267
附录B	均质固体中压缩波的线性方程	274
附录C	非均质流体的波动方程	281
附录D	瑞雷积分中格林函数的空间傅立叶变换	289
附录E	小外推步长的求和算子	292
附录F	用褶积表示微分	297
	一些名词的中英文对照表	300

# 绪 论

在寻找石油和天然气过程中地震方法的使用已成为必不可少的了。这不仅用于勘探新的油气田，也包括评价新发现的和已知的油气田在内。现在，用于评价和开发的钻探工作完全是根据地震资料和钻井数据的综合专业知识做指导的。

## 地震勘探的目的

地震反射法是一个声波成像技术，其目的是用测量和分析的方法收集来自地下的对地面震源响应的信息。实际应用中所要求的信息基本上是从以下三个特征引导出来的。

### 1. 到达时间

反射波的到达时间曾是多年来所唯一感兴趣的项目。根据到达时间可以求出地下的构造特征。同时可求出不同地质层的传播速度的信息。

### 2. 振幅

在六十年代晚期，认识到了来自未固结好的含气沙层的反射波具有非常大的振幅。这个观察结果是广泛地研究振幅这个领域的开始。

今天，根据地震资料预测岩性和孔隙充填物时地震振幅起着基本的作用。

### 3. 特征

在多数情况下地震波的特征是由带宽不足所造成的几个不可分的地震反射波的干涉图象决定的。到达时的微分变化或振幅变化将改变波的形状。特征的这个概念主要是被解释员用做定性对比。

## 地震处理技术

从六十年代早期开始，地震数字处理在勘探地震学中就起着重要作用。特别是，当人们弄清楚了除构造细节外还可以从地震资料中获取岩性和孔隙充填物的信息（地震地层学）时为设计有效的处理手段花费了很大的力量。

今天，精细地处理过的地震资料，在评价和开发油气田方面是一个有价值的成果（开发地震学）。

地震处理技术可分为四个范畴：

1. 信噪比改善技术：

混波；

叠加；

长周期鸣震和多次波的衰减；

带通滤波，速度滤波。

2. 垂直分辨力改善技术：

最小平方反滤波（白化）；

最小平方预测误差滤波（有间隔的反褶积）；

子波反褶积；

最小熵反褶积，微观模型等。

3. 横向分辨力改善技术：

高度定向特性的应用（远场成像）

偏移（近场成像）。

4. 从地震资料提取解释信息技术，如：

声阻抗；

趋势速度，层速度；

岩性和孔隙充填物的概率曲线。

近年来，在地震勘探的所有处理技术中偏移受到了很大的重视。现代偏移技术，由于它所具有的横向分辨力和真振幅，给出相当好的结果。这个新发展的一个重要作用是使地震学家对基础知识，如标量波动方程和绕射理论重新产生兴趣。因此，许多与

声学 and 光学所共同的原理现在被地震学家发展了。

自从克莱包特把有限差分技术引进以来，对波动方程的注意力显著地增加了。增加的新方法有：克希霍夫求和法（弗兰其，1975；谢聂德尔，1978）和k-f偏移（斯图尔特，1978；盖兹达格，1978）。别尔克豪特和范·乌尔夫登·巴尔德（1979）提出了偏移可看做是频率空间域的空间褶积过程。

### 偏移——合成聚焦技术

地震偏移的最重要的目的之一可表示为：‘把地震波送去聚焦’。

在一个物理聚焦点上不同的旅行路径的波是同相位到达的。聚焦可以用沿着波前的求和过程来描述。可将应用分为三个范畴：

1. 固定聚焦技术（实时）；
2. 动态聚焦技术（实时/非实时）；
3. 合成聚焦技术（非实时）。

在特殊情况下，如果一个固定位置的震源的波场要被聚焦，则检波器可放在固定波前面上或者用一个声学透镜（见图1a）。但是在回声技术中要聚焦的波场是由许多具有不同（未知的）位置的（二次的）震源产生的，因此应当使用动态聚焦。这表明，在求和前应当做时间校正，而这个校正是随聚焦深度而变化的。用动态聚焦时，检波器被正规地放在平面上（见图1b）。借助于波场外推的理论我们将看到，对

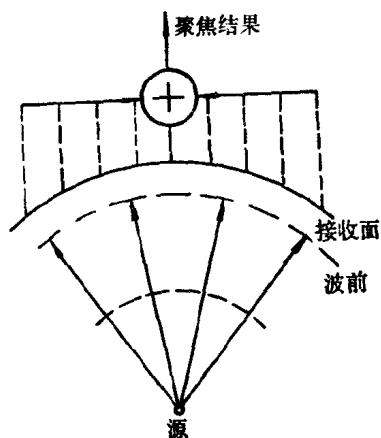


图 1a 如果一个固定位置的震源的波场要被聚焦，则检波器可放置在固定的波前面上（固定聚焦）

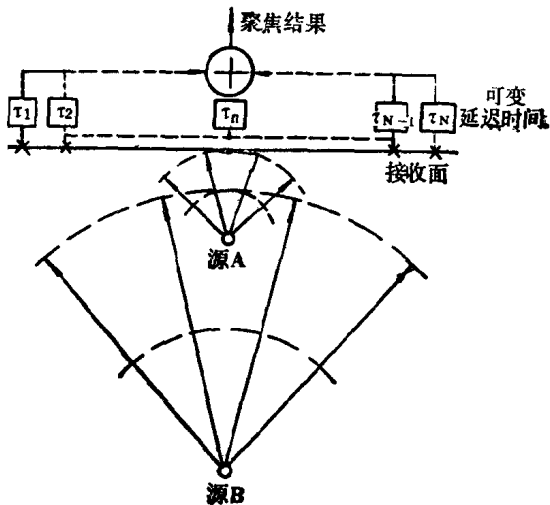


图 1b 如果不同位置 (未知的) 的许多 (二次的) 震源的波场要被聚焦, 则应该应用动态聚焦

最佳聚焦来说, 除了时间校正之外还应当使用一个与频率有关的加权函数。

在回声技术中成像过程可分为两个不同的步骤 (图 2):

1. 在发射期间

在介质内的某个位置上各原始震源得到这样的一个延迟, 它使得不同原始震源在该点上的全部贡献是同相到达的。

2. 在接收期间

在介质内部波所经过的位置起着次生震源的作用。各接收器得到这样的一个延迟, 它使来自次生源的反射波场能够同相地叠加起来。

当我们考虑“叠前偏移”(第 7 章) 时, 在偏移算法中可清楚地看到这两个步骤。

在高频技术中聚焦阵列是很普遍的。当阵列的维数空间不大 (波长  $\lambda$ ) 小时, 聚焦多是实时进行的。此外, 如果 (二次的) 源和阵列之间的距离 ( $z$ ) 比阵列的尺寸 ( $d$ ) 大时:

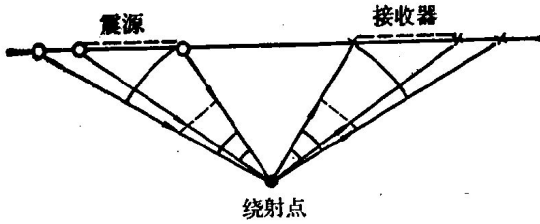


图 2 可在两个不同步骤上，即在发射期间和接收期间进行聚焦

$$z > \frac{d^2}{\lambda} \quad (1)$$

则波前在阵列上的曲率可以忽略，所以相加前的时间校正沿着阵列是线性的（夫琅和费近似）。这在实时应用中有很大的实际优点。

不等式（1）说明的是众所周知的远场条件。图 3 表示两个

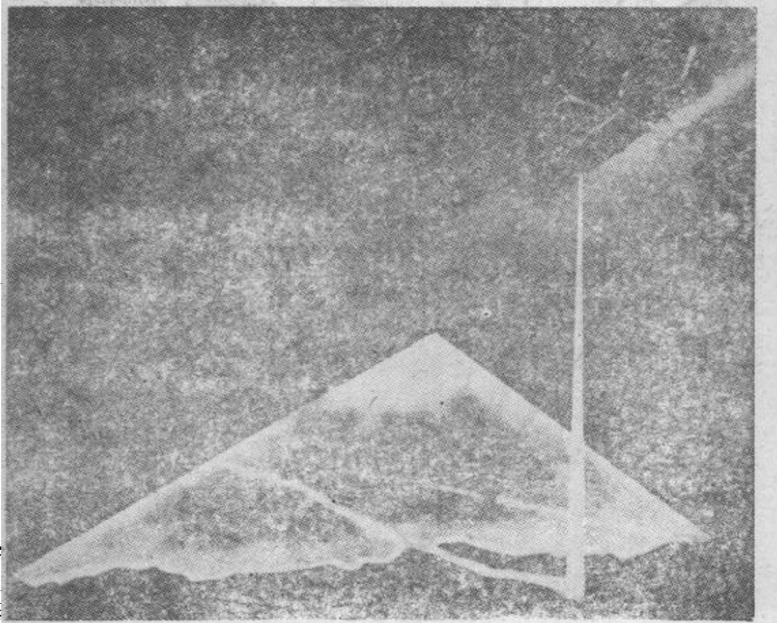


图 3 实时远场聚焦的两个例子，即侧向扫描声纳（二维）和深度探测（三维）

远场聚焦（“束射控制”）的实时例子：侧向扫描声纳（二维）和深度探测（三维）。图 4 表示一个用于医疗声学（回声心动记录仪）的实时动态聚焦系统。

到现在为止我们讨论了由一个物理实验所产生的波场的聚焦技术。在人工合成聚焦中，由一系列按顺序做的物理实验所产生的多于一个的波场做出聚焦像。所以聚焦阵列不再代表一个实物阵列；它是一个人工合成的，在数据收集之后在计算机上构造出

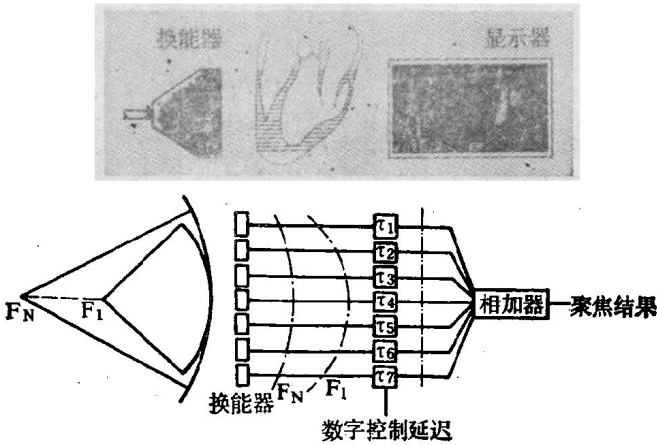


图 4 用于回声心动记录仪的实时动态聚焦技术

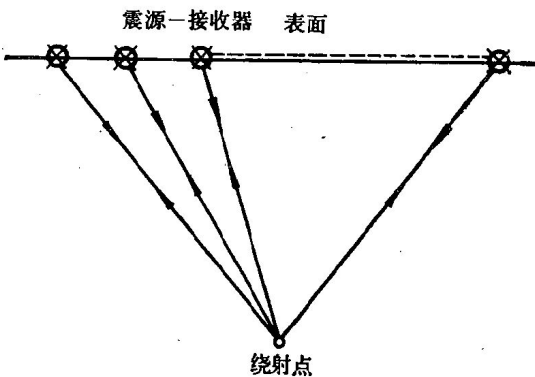


图 5 在偏移过程中用许多个顺序爆炸的波场来聚焦（偏移）一个深度点（合成聚焦），这里表示一个零炮检距的例子

来的（非实时的）。

地震偏移是一个典型的人工合成聚焦技术。用许多个顺序爆炸的波场来聚焦（偏移）一个深度点。图 5 表示一个零炮检距的例子。合成聚焦的优点是合成聚焦阵列的尺寸（ $d$ ）（合成孔径）可以做得很大。在地震偏移中（ $d^2/\lambda$ ）的一个具有特征的值等于  $10^4$  米，因此远场条件（1）完全不能满足。对这个问题需要说明，当假设波前曲率在阵列上是抛物型的时候，在地震中甚至费涅尔近似也是不能应用的。

### 偏移——一个反模拟过程

在正向模拟问题中波动方程提供一个波在地下传播的物理模型。在第六章中我们将看到，模拟可用三个线性系统来精确地表示（图 6）。



图 6 用矩阵乘表现模拟， $\vec{P}_r = [W_r R W_i] \vec{P}_i$  在很多情况下也可以用空间褶积来表示

- $\vec{P}_i$  = 代表地面上的下行波向量
- $W_i$  = ‘地面→反射面’的传播矩阵
- $R$  = 散射矩阵
- $W_r$  = ‘反射面→地面’的传播矩阵
- $\vec{P}_r$  = 代表地面上反射波的向量

在很多实际情况下论述散射矩阵  $R$  是复杂的，并且应当借助绕射理论来进行。在地震模拟中一般的实现是用局部反应这样的假设，即  $R$  是对角矩阵。这不可能是完全实际的，因此，多数地震模拟方法应当认为是计算传播效应（ $W_i$  和  $W_r$ ）的工具，而不是模拟地下声学响应的技术。现在，偏移的一个最好的定义可表示如下：

“偏移是一个在某种最佳意义下消除地下传播效应的多道方法，”



也就是说偏移的目的是在相位和振幅上补偿 $W_1$ 和 $W_2$ 。因此，偏移涉及到使用一个可以认为是正向传播函数的逆算子。

在本书中值得提到的是，用正向模拟描述一个由波动方程给出的物理过程。但是，偏移表示一个纯粹的计算机过程。从正问题导出的有关算子及其应用在某种最佳意义下会消除记录平面以下每层中的传播特性。

在第七章中提出一个从正向传播函数推导反模拟算子的最佳公式的最小平方准则。

如果我们把反模拟与聚焦做比较则指出，用聚焦技术只能补偿由 $W_1$ 和 $W_2$ 给出的相对传播时差。振幅校正没有包括在内。

## 偏移——基本特征

在实际情况下，波动方程偏移的直接结果可用下列特征来概述：

1. 改善横向分辨力；
2. 校正反射层的不正确的位置；
3. 校正反射波的不正确的振幅；
4. 正确处理多次覆盖数据；
5. 在叠前成像之后散射矩阵成为可用的。

在地质学中偏移主要是用来校正反射层的位置。可能是由这一特征才产生了“偏移”一词。今天，用偏移改善横向分辨力（即断层清晰度）至少认为是重要的。因此，偏移不再只是用于处理构造复杂情况下的数据。偏移在研究地层储层时也起着基本的作用。在第七章中将说明，偏移可用空间反滤波（横向反褶积）来表示。需要指出，偏移算子的振幅校正特性也是重要的。例如，在背斜和向斜反射上可能看到的低振幅和高振幅的假象将被偏移所校正。

共中心点（CMP）叠加仍然是常规地震处理程序的主要工作量。但是，众所周知，对横向变化的介质（倾斜反射层，横向速度变化）来说，常规的CMP叠加就会失败。此外，应当说明，