

# 石油物理勘探技术述评

(赴加拿大、法国石油考察团技术资料)

## 序 言

用来研究地震反射过程的模型，由下列基本部分组成：代表炸药或其它震源的单位脉冲输入；代表地球、检波器与仪器对该脉冲影响的模拟系统；代表地震记录的输出（图1）。

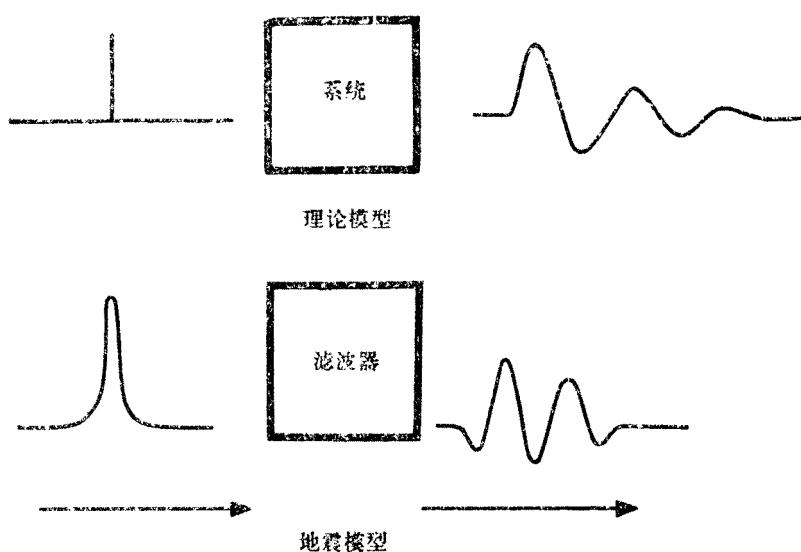


图1 由单位脉冲产生地震反射的系统模型

整个系统由一个传输函数进行模拟，该函数将输入脉冲变换成一个野外仪器接受到的讯号响应的合理复制品。

使用数字计算机作这种基本过程的模拟，包括传输函数（因子）与脉冲（输入讯号）褶积，产生输出（单位脉冲响应）。星号为公认的褶积数学符号。

基本模型的输入，可以是简单的数1.0——代表一个单位脉冲。

$$1.0 * \text{传输函数} = \text{单位脉冲响应}$$

上述模型的基本方程式为

$$\text{输入} * \text{传输函数} = \text{输出}$$

合成地震记录是该模型实际应用的一个例子。一组反射系数形成一串脉冲，而成为地层反射序列的一个模型，把它作为输入馈给系统。传输函数与该输入的褶积产生模型的输出，这就是合成地震记录。

石油地物  
物理勘探

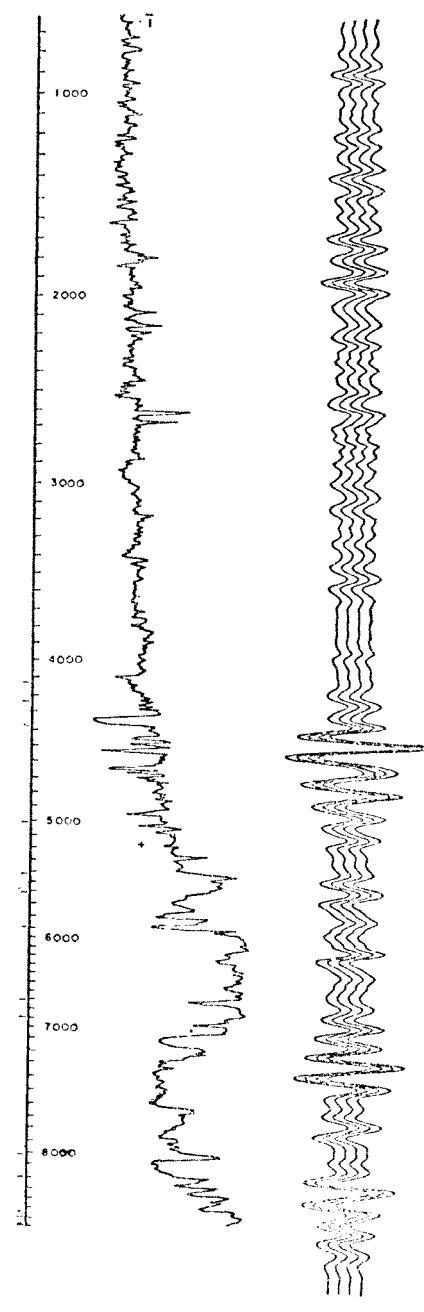
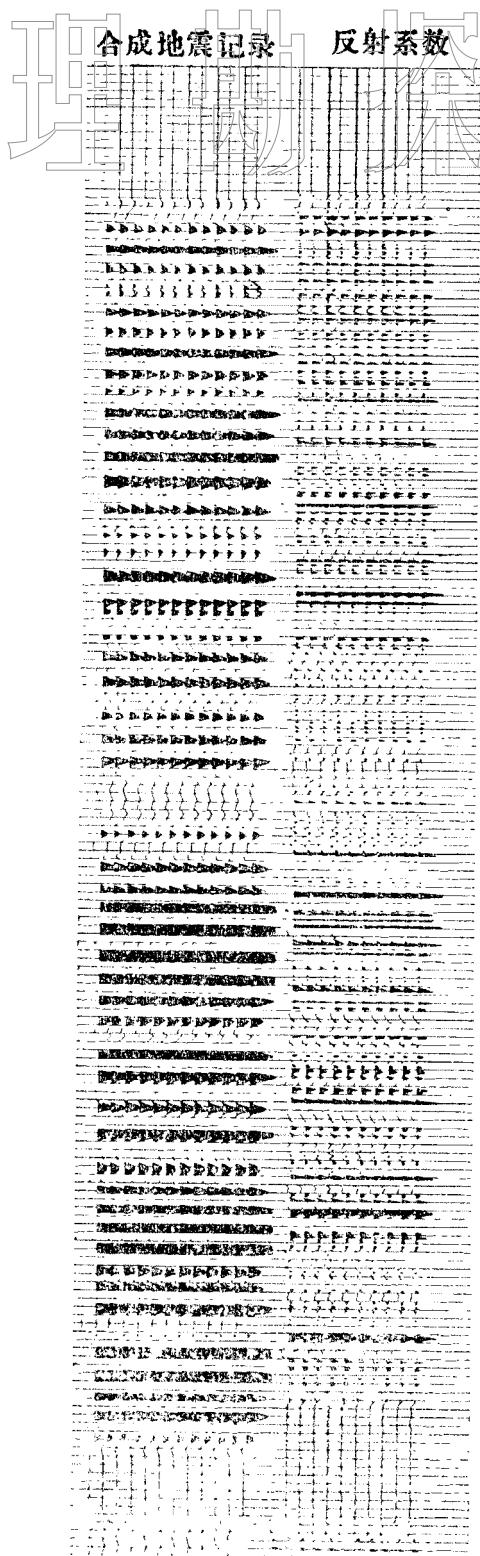


图 2 地层讯号与合成地震记录

# 石油地球物理勘探

运算可以颠倒，这是因为褶积过程遵从与乘法相同的法则。因此，如果输入与传输函数的褶积等于输出，则输出可被传输函数“除”（反褶积）而等于输入（图3）。然而，虽然褶积遵从与乘法相同的交换律，但褶积并非乘法，其逆过程反褶积也决不是除法。

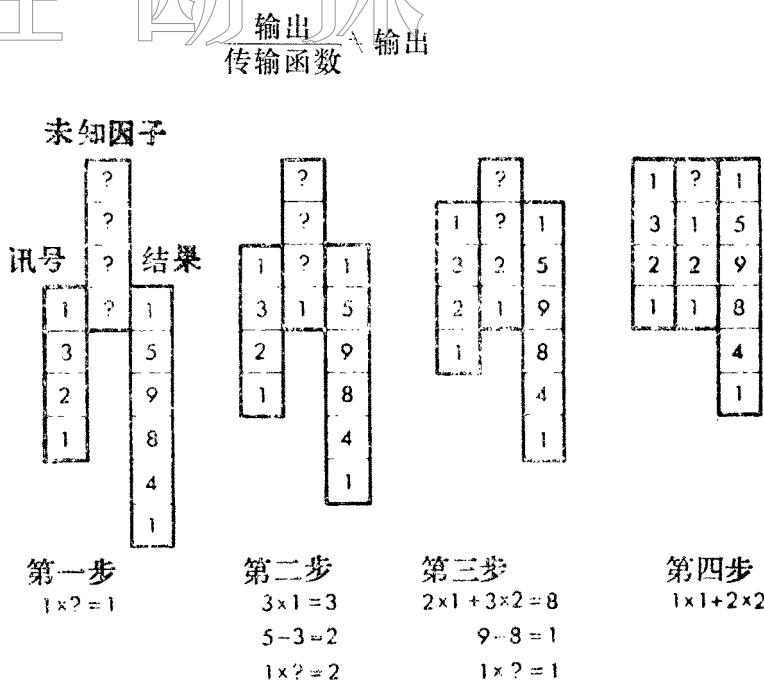


图3 褶积输出的除法程序

反褶积的实际应用过程，是输出讯号（地震记录）与传输函数之逆进行褶积来确定输入讯号。

$$\text{输出} * \frac{1.0}{\text{传输函数}} = \text{输入}$$

虽然尖脉冲输入完全是尖锐而宽带的，但单位脉冲响应却可以是某种长度的、窄带讯号。显然，输入在通过系统时受到了广泛地修正。单个输入脉冲是一个对称的、零相位讯号；而输出却是非对称的，因此是非零相位的。地震系统几乎一定产生某种相位移动。实际系统是实时系统。因此，在讯号输进去之前，决不会有任何东西出来。尖脉冲没有时间宽度，所以相位移动就是时间移动，因而任何相位移动必然是发生相位移动的那些频率成分上的时间延迟。

时间移动使响应展布在若干毫秒的记录时间上，模糊了讯号的细节，干扰了辨别讯号的能力。

因此，完整的反褶积必须既恢复输入讯号的振幅谱，又要恢复其相位谱，这常常是不可能的。

问题归结为确定几个需要的参数。系统的滤波效应是完全消除某些频率成分。那些失去的成分的振幅谱已被零乘过，这时，相位成分也就无从确定。如果要正确地刻划讯号，则需要确定所有讯号的相位成分。为重建讯号，仅仅将那些失去的成份加回到振幅谱上是不行的，除非相位是已知的。

# 石油地球物理阻抗反褶积模型

所有反褶积方案，都可以与产生地震记录过程的某种模型联系起来。在建立模型时作了许多基本假设，反褶积处理的成功取决于这些假设在实际条件下的有效性。例如，在用无噪声模型构成发展模型的基础时，附加噪声可能使这种模型的可靠性降低。可以把噪声加到模型上，这时，反褶积的质量就决定于记录到的噪声是否与假设的噪声类型相吻合。

多数反褶积理论所依据的理论模型，假定下列条件中的全部或其中几条存在：

1. 输入讯号已知；
2. 传输函数已知；
3. 单位脉冲响应是最小相位的；
4. 输出为宽带的；
5. 噪声为随机白噪声；
6. 地层讯号（地层反射系数）的谱为白噪声谱；
7. 输出是平稳的，即不随时间变化。

实际上可能存在的是如下条件：

1. 输入讯号不是良好确定的；
2. 传输函数是未知的；
3. 单位脉冲响应为混合相位；
4. 输出是窄带的；
5. 噪声可能是周期性的；
6. 地层讯号谱不是白噪声谱；
7. 输出是随时间变化的。

（理论与实际）存在这么大的差异的事实，一点也不贬低讯号处理方面先驱者的工作，相反地，形成了许多巧妙的方法以处理某些差异问题，余下的常常足够好地符合假设，以至获得相当大的成功。要点在于条件是变化的，除非解释员能认出特定区域具有的情况，知道那些处理是适用的及其对数据有什么影响，否则就不能得到期望的输出。实际输出与期望输出间的差别，表示基本假设中误差的影响。因为毫无例外的是基本假设并非完全正确，从而总是存在某种程度的误差影响。

运用最广的反褶积方法，假设一个模型，其中岩性剖面是纯随机的，互不相关的一系列事件，具有纯粹的白噪声谱。地震爆炸激发一个脉冲，它几乎马上衰变成一个阻尼的子波。该子波通过剖面传播并与相应于岩性序列的地层讯号相褶积。在每个界面上将产生新子波，最后记录到的波形，将由大批这种小的、互相重迭的子波之和组成（图4）。

单位脉冲响应，即传输函数是未知的。但是，如果岩性剖面的频率成分是纯白噪声的，噪音也是白噪声或干脆没有，则地震记录道上子波的频率成分可以取该段记录的自相关推断出来。自相关将所有子波整理成一个零相位的子波，它表征剖面上所有脉冲响应子波的平均平方振幅。如果响应子波具有零相位子波的形式，如像带通因子或雷克子波

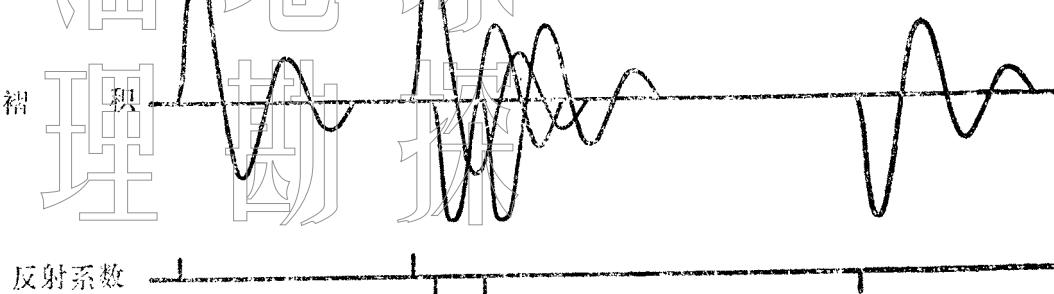


图 4 地震记录的脉冲重迭响应

(两种都是完全对称的)，则除中心点外，该子波的形状完全可以由自相关确定。其中心点含有该子波自相关中心值与噪声和或地层讯号自相关中心值之和。如果响应子波是非对称的，由于非零相位的特征，自相关给出子波的频率成分，但失去其相位成分。

谱的白噪声部分，即地层讯号和噪音也影响自相关，但是，如果这些成分确实是白噪声，则它们的影响只存在于一点，那就是自相关的中心点。白噪声用自相关零时移点处的单个尖脉冲表示。白噪声讯号的富氏变换为一条平的直线，响应子波的谱就展布在上面。

通过谱的因式分解或自相关的多项式除法，可以取得一个反因子，如果推导正确，反因子与自相关褶积时，可使自相关恢复成尖脉冲。如果这个反因子与地震道褶积，它就是和构成信号的所有子波依次褶积，因而将每个子波转换为尖脉冲，从而大大改善分力辩。这种输出尖脉冲的振幅便正比于子波的振幅，其尖锐度为频带宽度的函数。尖脉冲不可能比适用带宽的最佳近似更尖锐。

如果承认上述基本假设是正确的，则影响这种运算效果的主要因素在于设计因子的方法。因子必须设计成有限程度的，并可证明其反函数是否可能很快的收敛。如果反函数不能很快地收敛，则因子的简单截断可能引起严重地舍去误差，并因此使褶积不能有效地工作。换句话说，反函数不是完全确定的。

### 维纳最小平方法

一个较好的、应用最广的方法，利用诺伯特·维纳建立的基本理论。从统计学的观点研究问题，并用最小二乘法推导出可能的数学意义上的最佳因子。运用最小二乘法，保证在因子有定义的长度内，反因子与自相关的褶积，产生尖脉冲输出函数可能的最佳近似。这种方法的建立，以及后来通过许多工作者，特别是鲁宾逊与垂得的应用、修正成为整个地震讯号改进方面的基础。

此方法的巨大优点，在于总是可以得到在数学意义上可能的最佳答案。当与基本假设有任何偏差时，其它方法可能得出完全错误的输出，否则就需要那些得不到的资料。统计最小二乘法将提供最小的误差，这仍然是指数学意义上讲的，这个最小误差可能还是相当大的。

这个方案的有效性决定于基本假设的可靠性。在某些情况下，可以修正它们，使之

符合实际情况，此外别无其它容易地补救这种偏差的办法。假设岩性剖面为纯白噪声便是一例。遗憾的是这种假设并不总是正确的，实际上它也很少是完全正确。假设与实际条件间的差异是确定方法效力的一个量度（图5）。

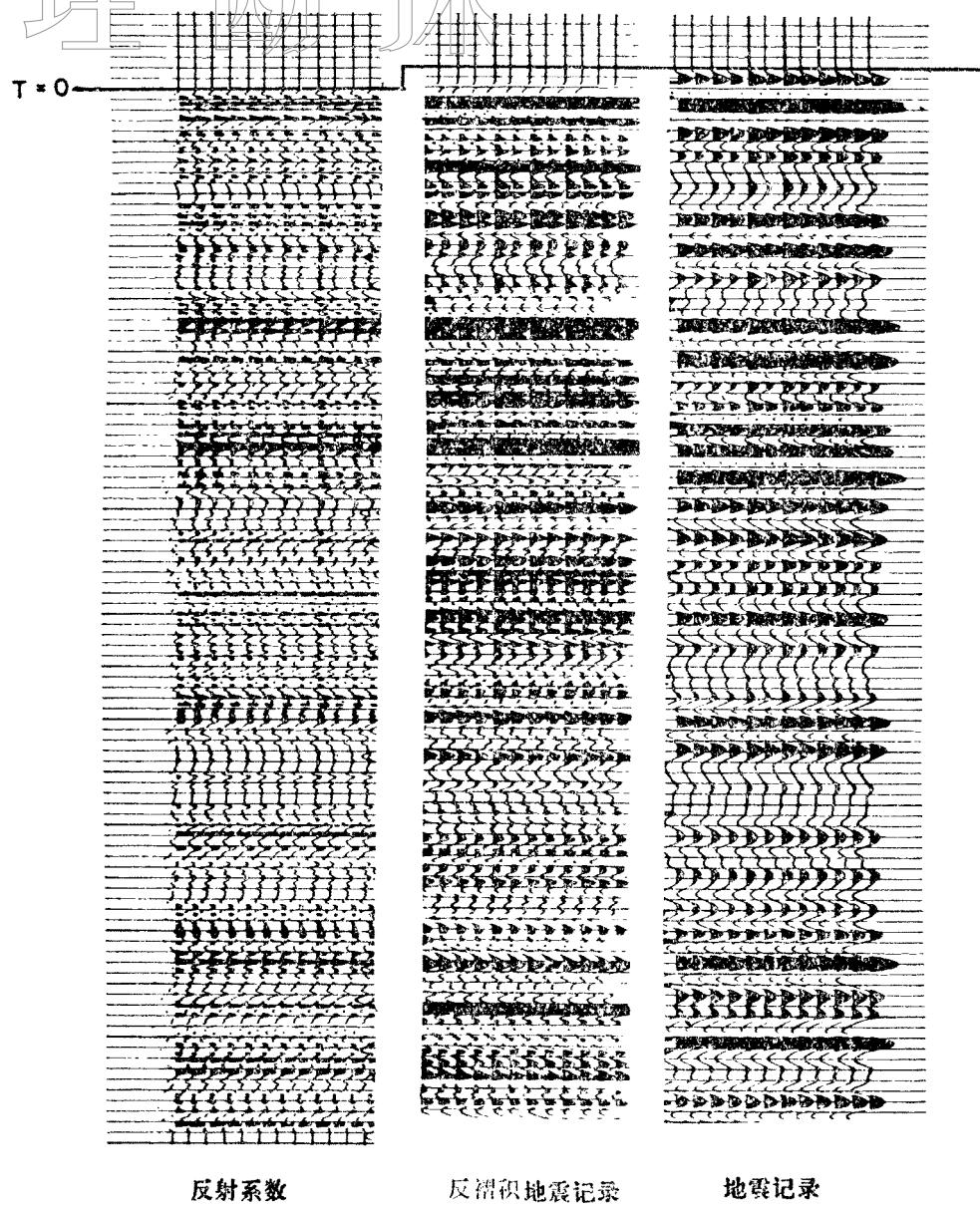


图5 反 褶 积

在某种意义上幸运地是最终输出并非纯粹的白噪声讯号。纯白噪声宽带讯号含有大量的高频成分，这就产生一个尖锐的，常常是低振幅而无明显对比特征的波形。事实上剖面通常并没有纯粹的白噪声谱。在地层讯号中存在着明确的优势频率成分，以及周期性单元，它们造成反射振幅和反射特征的差别。这些振幅和特征是若干个地震道固有的，提供了用于标志反射面的连续性。岩性剖面振幅谱的频率成分与特征变化极大，在某些地区，很符合白噪声讯号这样的描述，而在其它地区却远远不同。

石  
物

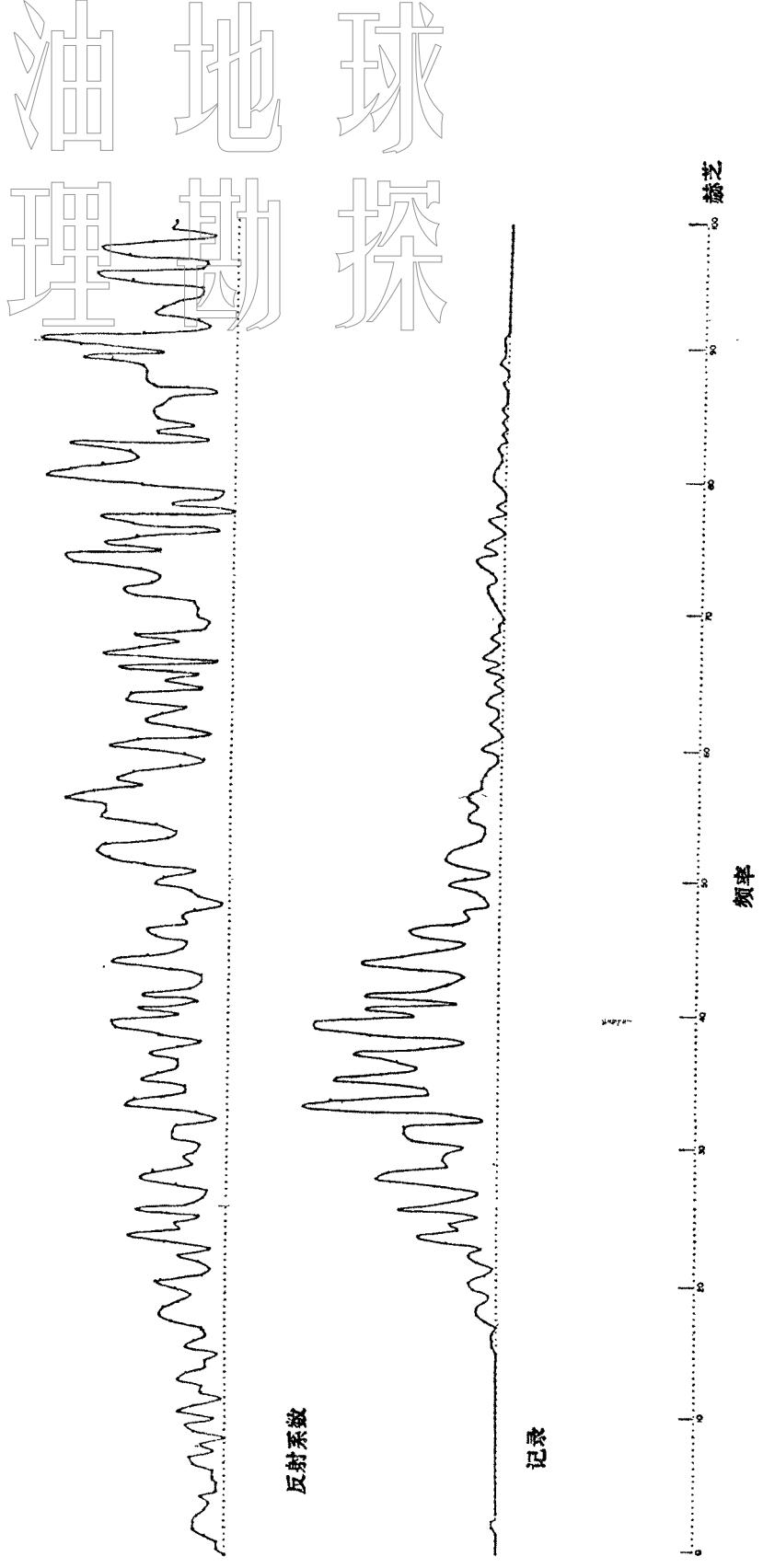


图 6 振幅谱

一般地说，完全随机分布的沙页岩层序，很好的符合假设。另一方面，由确定的岩性单元与鲜明的速度差异所构成的、类似于加拿大西部的剖面，可能有周期性因素。自然，这就使振幅谱和自相关谱具有明显的、与白噪声谱不同的特征。如果假讯号中存在的特征就是因子的特征，并以此为根据设计反因子，则其净效应可能是实际上削去某些反射波，而不是增强它们。

上述假设的一种最简单的检验方法，是取一个反射系数序列，用于在野外工作的同一地区制作合成地震记录并考察振幅谱（图6）。如果振幅谱纯粹是白噪声，那么显然，过程就是纯随机性的，并且地层讯号类似于纯白噪声。但是，如果有强的优势波峰存在于谱上，代表优势频率成分，它们在记录上造成某些周期性的起伏。当出现这种情况时，处理数据的方法应该不同，然而方法却不易得到。

例如，具有随机地层讯号的记录，其自相关直接给出因子的谱。其次，在非随机性地层讯号的情况下，输出讯号的自相关应等于岩性剖面谱与因子谱的平方乘积。在第一种情况下，这自然也是对的，然而那里输出谱为因子谱乘上一个常数。如果用通常的方法反褶积处理的因子，因子就力图产生一个纯粹的白噪声谱。当发生这种情况时，地层谱中期望要的成分可能受到压制，其结果，就是实际上压制或削弱实际反射波振幅。

第一种模型，假设振幅中的任何不规则性完全是由因子谱造成的；第二种则说明，输出道的谱是地层讯号的不规则谱与因子不规谱之积。这就可导至一种极端的情况，即谱的不规则性完全是由地层造成的，而因子谱是均匀的。这就是为简单的振动法（Vibroseis）处理所作的基本假设。

地震系统对于一个频带的响应，相当于一个模拟滤波器。模拟滤波器的响应，常常是一条高斯型曲线：通带内各频率的振幅，由低频端向中点逐步增大，然后再向高频端降低。如果脉冲响应也是类似的平滑曲线，则因子对地层谱的影响，就只是在地层谱上附加一个坡度。在此情况下，为了平衡振幅谱而不改变局部谱的关系，则需要一个很平滑的反因子。这是对于振动法所作的基本假定，振动法运算将记录到的讯号与平坦或平滑振幅谱的因子互相关，只是为了恢复地层谱的相位而不明显地改变振幅谱的形状。

### 预白噪声化

地层讯号谱常常并非纯粹的白噪声谱，但确十分接近白噪声谱，以至在许多情况下统计方法工作得极为有效。如果地层讯号谱为非白噪声谱，其它问题就产生了，模型必须改变。可以用的第二种模型是：在此模型中，不把岩性剖面看成是纯随机过程的结果，而认为它具有某种周期性或循环的成分。其谱不完全是白噪声谱。尽管第一种模型可以用纯粹的统计或概率方法处理，而第二种模型却是确定论的模型，要求分别确定谱的实际成分。

在某些条件下，第二种模型是实际情况的更可靠的写照。也是更难于工作的模型。在这种运算中，必须努力分别确定剖面和脉冲响应各自的作用，而在第一种模型时，如果它是正确的，就可以从自相关或功率谱推导出子波的成分。在短剖面上，第一种模型不大可能严格正确。众所周知，考察的子样仅为一个短段，换句话说是一个薄的岩性剖

面时，随机过程可以建立连续的系列，它可能有确定的非统计特征。对真正的随机分布，则要求长的讯号。

纯统计学方法与确定论方法之间的折衷，可以认为是在确定反褶积因子以前，把白噪声加到谱上的一个原因。除涉及到稳定性的原因之外，为了使建立的反褶积因子能够够

反褶积记录

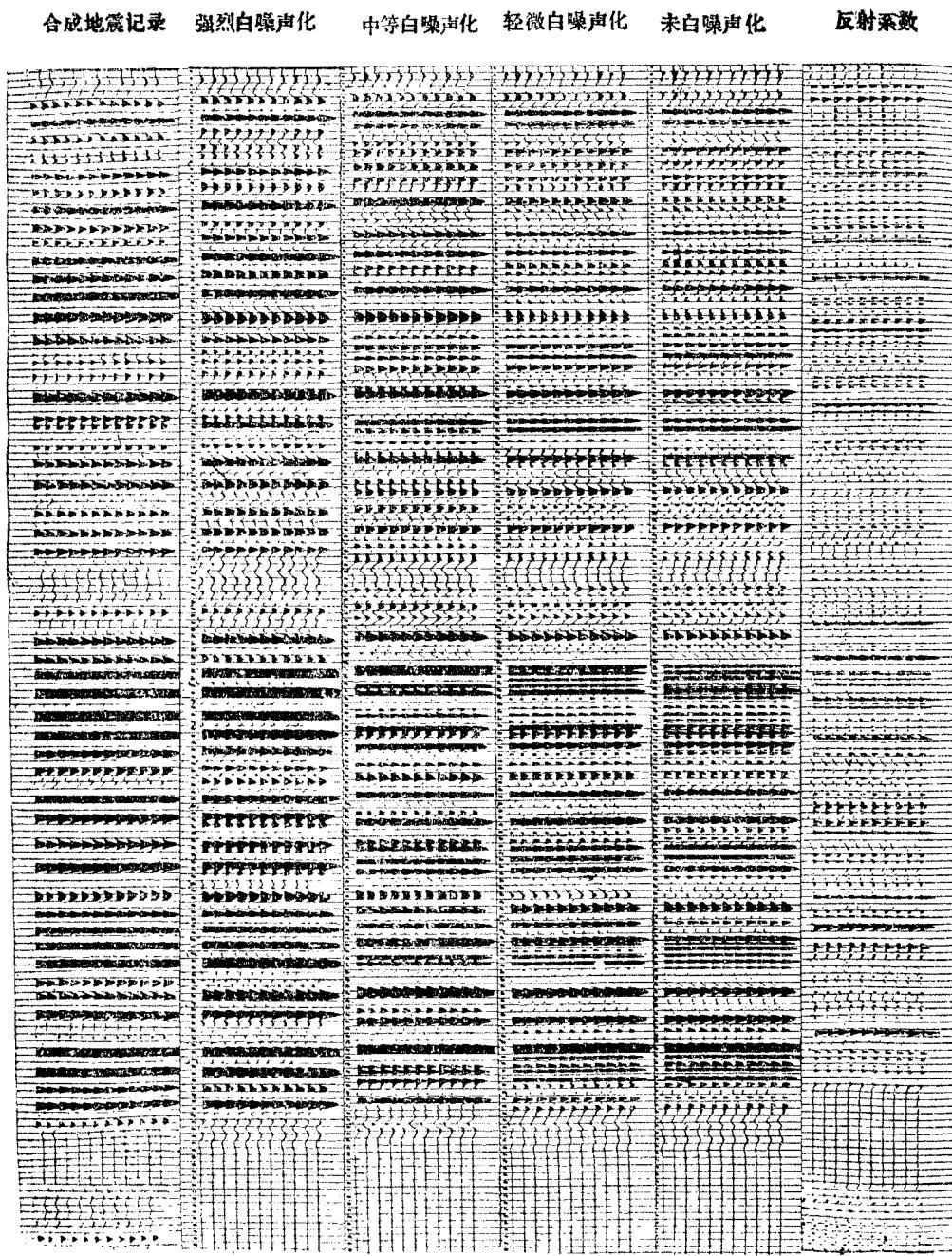


图 7 因子设计中白噪声化的影响

提供更满意或更有用的输出，有时也把白噪声加到讯号的自相关上。

例如，运用未白噪声化的反褶积因子，在某些情况下，产生的地震记录道难于使用，呈现出很差的道间同相性或连续性。在此情况下，地层谱不可能是纯白噪声谱，如果完全用统计学方法（即假定振幅谱中的不规则性，完全是由因子形状引起的），则利用反因子实际上会造成输出的过白噪声化。反因子白噪声化效应的强谱，实际上可能消去地层谱的某些特征，同时在时间域记录道上的清晰度有相应的损失。

可用自相关确定单位脉冲响应的平均频率成分，但这种确定的代价是在过程中损失掉相位信息。任何数量的或者说是各种各样的响应函数可能有相同的振幅谱，反褶积因子严格的设计成振幅的倒数。在频率域中，反因子的设计可以简单地看作是一个倒数据振幅谱，当它与对应的讯号谱相乘时，将整个谱变成值为1.0的水平线。因此，如果记录道振幅谱取值为2.0，则在因子上对应的频率点上就取值0.5，以此类推。同一记录道邻近第一点处的另一频率成分的振幅可以是3.0，这时反因子值就是0.33。

白噪声加到自相关上，其作用是使振幅谱的值都增加相同的数量。因此，如果增加的白噪声值为1.0，则值为2.0的第一点，现在的值就是3.0，而先前为3.0的点，现在则在4.0。该两点的反因子值，现在是0.33和0.25。反因子与原地震道褶积：就是用0.33乘上原记录道谱上第一个值2.0，结果是0.66；用0.25乘原记录道上的第二个值3.0，结果是0.75。因此，在谱白噪声化以前，比值为2:3的两点，现在约为2:2.25，而不加白噪声时，比值应为1:1。因此，附加白噪声虽使各种频率成分之间相对振幅之差减小，但谱形并不变成纯粹的白噪声。这种运算不可能从谱中完全去掉脉冲响应因子的影响，但同时也不会将地层谱的作用完全白噪声化。它只是修改了记录道各频率成分的振幅比例。而任何水平化或平衡化会改善讯号的分辨力，特别是恢复高频成分。

薄地质剖面，必然总是可认为带有相应地层谱不是纯白噪声的某些似然性。另外，一个窄带讯号可能远非白噪声。任何频率的相对贡献，即功率比率随带宽的增加而减小。按照一定的经验或试错法，对于特点的任何情况，主观上可以根据使输出面貌最佳确定其白噪声化的程度（图7）。

## 相位研究

骤然看来，把统计讯号理论应用到地震勘探数据的反褶积问题似乎是不可能的，因为缺失大部分需要的信息。记录道自相关函数的巧妙利用提供一种方法，可以取得单位脉冲响应的振幅谱。为此，必须作一些假设，即地层讯号为随机白噪声，干扰也是随机白噪声，或者在有多次波时，它与反射有相同的响应。这些假设的有效性影响输出的质量。

为使反褶积完全有效，还要求恢复单位脉冲响应的相位。如果相位被消去的话，反过来就要求了解单位脉冲响应的相位。记录道中含有地层相位谱与单位脉冲响应的相位谱之和。

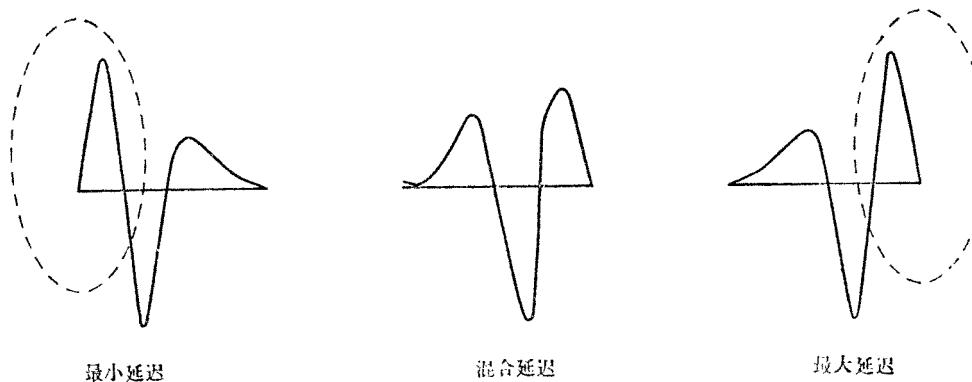
自相关提供一个近似算法，用于从记录道中提取脉冲响应的振幅谱，但这样作时却弃去了相位信息。它可以确定记录道的相位，但无法分开各个成分。因此，为了弥补失

去的相位参数，还必须作出进一步的假设。

主系统模型的输入是一个脉冲 ( $\delta$ -函数)，可以表示成一个时间序列  $\dots, 0, 0, 0, 1, 0, 0, \dots$ 。这种单位尖脉冲变换到频率域，具有一个完全宽带的、平坦的或白噪声的振幅谱，所有的成分都处于零相位。系统对单位脉冲的响应为一个具有有限时间长度的阻尼子波。实系统是实时动作的，响应不可能发生在输入时间之前。输出时间序列的第一个点，必然与输入脉冲同时或稍晚些产生，而脉冲响应的其余部分，其振幅在整个响应期间是减小的。

输入脉冲的宽度限于一个样值的宽度，而总能量就集中在这个脉冲内。先假设系统不削掉频率成分，则输入能量扩展到构成单位脉冲响应长度的许多取样点上。至少，有某些输入频率的成分受到了时间延迟，延迟的数值是以使输入能量的一部分传播到整个响应时间。频率域中的表现，就是那些时移成分的相位滞后。为了完成反褶积，必须恢复的就是这个相位滞后或时间移动。

不幸，无法确定单位脉冲响应的相位谱，并且，无论在什么情况下，自相关总是丢失相位成分。正如已经指出过的那样，许多不同的讯号，可以有相同的自相关；相位则是控制单位脉冲响应子波形状的因素。由于各种频率成分相位的延迟，零相位的输入脉冲就展布于单位脉冲响应子波的整个时间上。同样的频率成分，可能产生许多不同的相位变化，从而造成许多不同的子波。这种方式可以产生的子波，其数量相当多，但（在有限的响应时间内）并不是无限的，可以对它们进行分类（图 8）。



8 相同振幅谱的各种子波

分类中有一个子波，是原零相位脉冲的相位谱可能的最小延迟的结果。也将有一个子波，是在时间范围内最大可能的延迟。还存在许多中间的相位滞后。

最小延迟子波有一些独有的特点。它有最小延迟的事实，保证其大部分能量集中于子波的前沿，它基本上就是受到的干扰为最小的输入脉冲。因此，这种子波随时间迅速衰减，其衰减速度又由特殊的指数曲线确定。将这种子波积分，可揭示出其大部分能量包含在子波的初始部分，所得积分曲线比其它任何子波上升的都快。这种子波本身是尖锐的。对于许多系统来说包括典型的地震系统在内，这种性质的响应并不特殊。因此，假定任何地震系统的响应是最小延迟或最小相位滞后讯号子波是合理的。

最小相位子波还有另外一些优点。最小相位子波的逆也是最小相位子波。最小相位

子波是稳定的褶积因子，意味着这种因子很快衰减，可以运用短的因子。混合相位或最大相位因子不那么好。例如，一个简单子波  $1, 2, 1$  的逆，可用多项式除法除  $1$  得到  $1, -2, 3, -4, 5, -6, \dots$

最后，最小延迟的因子与最小延迟讯号的褶积产生一个最小延迟的输出。如果按照这样的事实，即褶积的输出（其相位）为两个讯号的相位谱之和，从而输出的相位滞后必然大于任何一个输入的延迟，那么产生最小延迟的输出似乎是奇怪的。解答这个问题很简单， $n$  个样值的讯号与  $m$  个样值的讯号褶积的结果，输出的长度有  $m + n - 1$  样值，所以子波长了，因而谱必须将响应伸展到更大的长度上。

看来因为这些优点，很希望假设一个最小相位系统，只要这种假设符合实际情况就行。正是这样，最小相位条件，是大部分地震工作的正常假设。

任何自相关必然对应于一个，且仅对应一个规定长度的最小相位子波，并且因此可设计出一个稳定的最小相位反褶积因子。如果假设是成立的，反褶积的结果就是一个高振幅的最小相位子波。在最小相位条件下，它提供尖脉冲的可能的最好的近似。如果假设不成立，则在任何情况下，输出都使输出谱白噪声化。它可以改善分辨力，但因子的相位将加到可能具有混合相位谱的子波上。某些混合相位的子波，其能量可能均匀的分布在子波的整个长度上，产生一个没有尖脉冲的讯号，这就可能是运算的结果。

解决此问题的一个方法，就是对逆子波谨慎地应用一个定量的延迟，使之产生尖脉冲输出。这种输出在时间上是滞后的，但必要时，其后可对该输出应用静校正。相位滞后的应用条件，可能因地震工作的典型窄带讯号而恶化。 $\delta$  函数  $\cdots 0, 0, 1, 0, 0, \dots$  的讯号分析，要求在整个取样序列的长度上，各频率成分在振幅上是均匀的。在形成时间域尖脉冲讯号时，所有各频率成分相加的形式是它们处处彼此精确地抵消，只有在形成脉冲之处例外，那里它们都处于相同相位。任何频率成分的损失，都会破坏平衡，其余频率成分之和就不能恰好完全抵消。结果，记录道的平静部位在低电平上振荡。另一个重要的边沿效应就是脉冲不再是尖脉冲了，变成一个子波，其波形对称于先前尖脉冲的轴，因为现在有一组旁瓣位于近似尖脉冲的前面。

对单位脉冲响应发生同样的影响。典型系统准确的响应是一个瞬变的波形，突然起始，然后在整个响应时间上，以指数率衰减到零。在响应之外的其它时间，输出为零。信号分析仍然要求所有频率成分都存在于该时间序列的整个长度上，在单位脉冲响应时间之外，它们彼此恰好抵消为零。任何频率成分的移去或衰减，都会改变这种平衡。响应子波的形状也要改变。子波可能失去瞬变波的波形，并且也会损失它的某些最小相位特征。常有这样的可能：由于相位滞后特性，系统的输出为非最小相位的，此时反褶积的结果，稍次于最佳结果。

总之，用统计方法进行简单的反褶积处理，严重地依赖于建立因子的几个假设，当这些假设准确时，可以期望得到好的结果，而不好的结果，可能是所取假设不准确的征兆。有可能确定这些问题并选择某些另外的方法，给出更好的结果。

### 延迟和预测滤波

只用因子除单位脉冲，就可得到因子的简单的逆，单位脉冲只有一个值 1.0，用多

项式除法就可以实现。这就是  $z$  变换的基础。然而，在大多数情况下，除法没有合适的结果，除非成为一个连续的序列。如果序列随时间增大，因子就是不稳定的。正因为这个原因，才导出了最小二乘法，以便用一个事先确定长度的因子取得可能的最佳近似逆因子。逆因子与输出的褶积，使讯号恢复成因子能力所及的讯号尖脉冲。自然，因子是最小相位的，如果单位脉冲响应也是最小相位的，则输出为前载的（译注：前载的就是最小相位的），即在反褶积处理的输出中，输出尖脉冲取代单位脉冲响应的第一点。在进行逆因子的褶积运算时，起始尖脉冲后面应跟着一串零。实际上，按照在原始褶积输出中找到的脉冲响应的第一点，逆因子预测有一最小相位的单位脉冲响应，在始点输出一个尖脉冲。而且，倘若预测正确，以后的输出就由一系列的零组成，直到下一个单位脉冲响应出现为止。因子总是与过去的信息打交道，而产生现时的输出。因此，简单的最小二乘法求逆的反褶积处理，可以叫作预测运算。

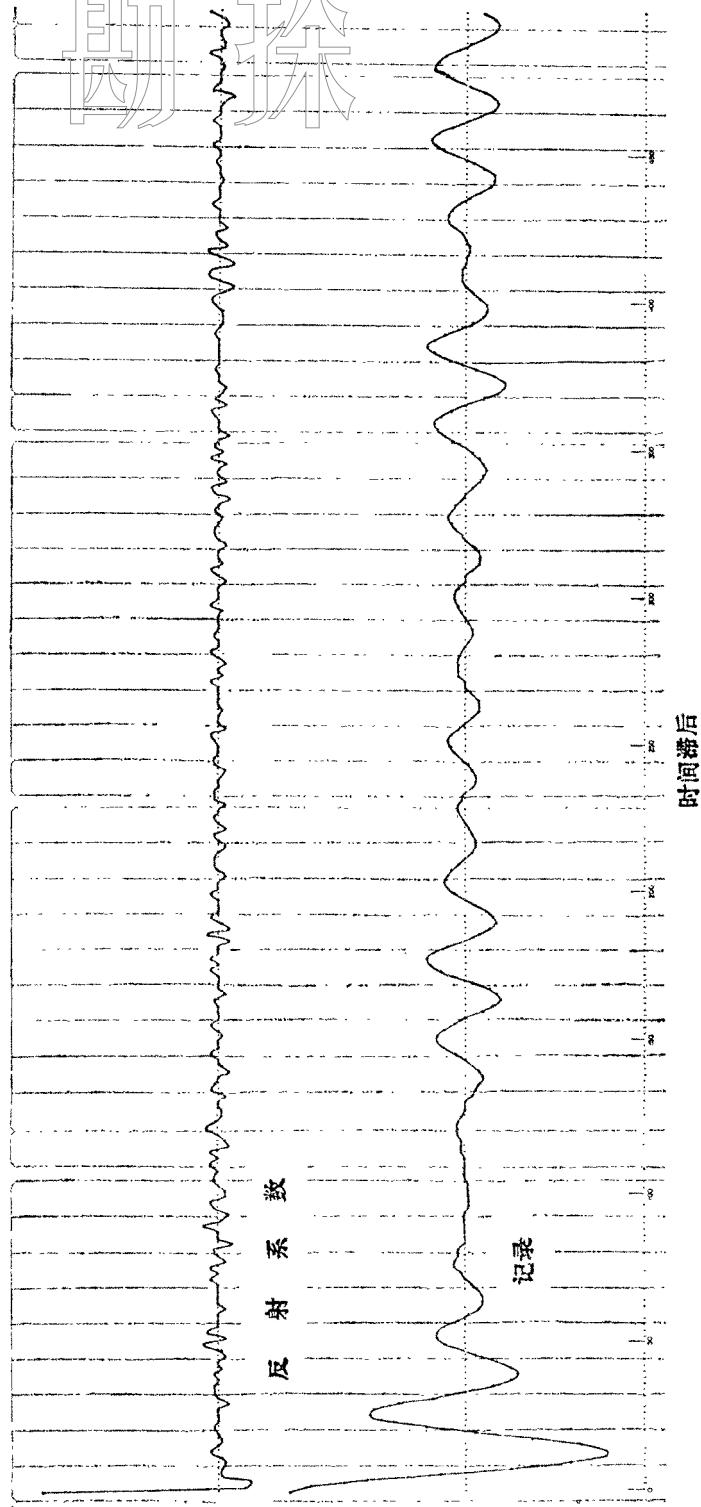
滤波作用必然强烈地依赖这样的假设，即响应子波是最小相位的，因为它必须输出最大的能量以后才能考察子波的静止部分。在必须输出尖脉冲时，延迟一个瞬间有时可使性能改进。延迟为因子提供一个机会，使之可以根据脉冲响应子波的许多个工作，在要求它形成尖脉冲以前，可以得到子波性质的更好的量度。这就要求以后作简单的静校正以便合适地确定输出的位置。

数字滤波有这样的优点，就是整个时间序列以时间“快像”保存起来，因此信息无需按其实际发生的时间起作用，即无需实时运算。获取的时间序列，可以从容不迫地考察。对于数字滤波而言，“先看看”以后的时间值，据以进行动作是可能的。在混合延迟响应时，这是有特殊价值的，滤波器又根据事件的全体进行动作，以确定在特点的时间上输出是什么。

### 多次波的压制

运算标准的反褶积，常常取得消除多次波或虚反射的各种成效。干扰波常常出现在有效反射波之后某个不变的时间里。一般地说，这种波的强度，足以使它们在自相关中被测出来，实际上，这种应用的根据是，假定脉冲响应的始点与多次波最后一点间的全部信息，包括多次波本身，就定义为整个的单位脉冲响应。任何输入送进系统，都在不变的时间延迟处产生恒定的不想要的效果，这种假设并非不合理。最小相位假设也可能包括在内。这可能不正确，并且得到的反因子对消除多次波来说可能有效，也可能无效。真正的危险在于剖面上巧合的波相关，可能在自相关剖面上产生虚假的多次波（图 9）。当地层讯号不是白噪声，并且包含某些周期性沉积过程影响的地方，这种可能是常有的。可在典型地点取无多次波的简单合成地震记录来检验这一点。如果输出含有周期性的迹象，这很可能是实际波的分布巧合的结果。如果设计反褶积因子时包括这些波，它们在处理中就会失真。此外，如果多次波不是一致的，则它对真正的单位脉冲响应造成非常不利的影响，结果真正的波可能严重失真，或者分辨率的改善很小。

石  
油  
物  
理  
地  
球  
勘  
探



# 石油地球物理勘探

## 预测褶积

1969年匹柯克和垂得在他们的著名文章中，描述了为消除多次波和混响而发展的长项预测反褶积因子。该文中描述的预测褶积因子的设计方法，力图保留单位脉冲响应不动，而深谋远虑的攻击多次波。设计出的因子，可消除继单位脉冲响应之后规则出现的那些波，而保持原响应不受损害。为此目的，必须定实际单位脉冲响应的长度，规定这个长度时要按照不发生作用的时间间隔以及消除干扰波的时间间隔进行。对这种处理所做的假设，类似于对消除多次波应用标准反褶积所作的假设。特别强调以下各点：多次波的出现是周期性的，在真波后面无限期的重复出现；任何一次重复与上次出现的振幅之比为常数；有一致的极性关系（通常每重复一次，极性改变一次）；最后，对每个波的响应是相同的。

至少在理论上可用简单的多项式除法得到需要的因子，或许这就是说明方法及作这些假设的最好途径。例如：相应于反射波的单位脉冲响应的后面，在某段时间处跟着一个原始波的多次波。如果它是简单的地面多次波，则多次是反转的，具有相反的极性；否则，可能除了比例因子之外，就与反射波的单位脉冲响应相同。简单的地面多次波可以重复几次。期望的因子是这样一个因子：它保留反射波的单位脉冲响应不受损害，而破坏其多次反射波。因此，期望输出与简单的反褶积过程不同，现已不再是尖脉冲而是简单的、真反射的单位脉冲响应。如果反射子波之后，紧跟着的是具有完全相同响应的多次反射子波，且假设无干扰，则用简单的多项式除法可在总长度上将单位脉冲响应分开（图10）。

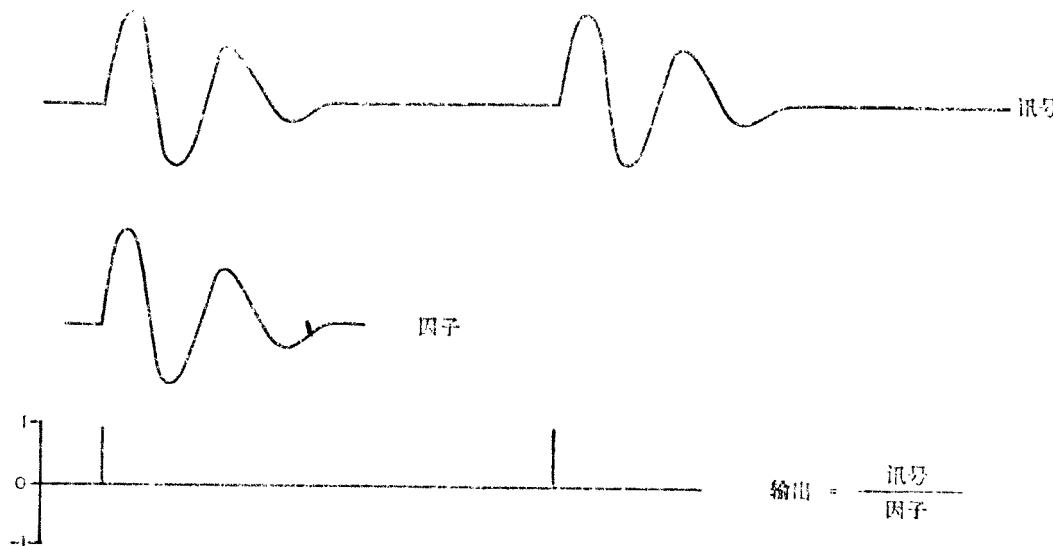


图10 因子除信号

在两波发生的地方可将单位脉冲响应除成它本身，在第一个波处得到 1.0 值，其后为一串零，接着在反转的多次波处产生 -1.0。两输出值间的时间间隔与多次波滞后于一次反射的时间精确相等。如果第二个被除数值的极性与 +1.0 相反，这个因子与地震道的

# 石油地球物理勘探

褶积，就使单位脉冲响应无损害的通过，而在输出中除去一切多次波的迹象。多次波的振幅应当比原始波小，多半是这样的。因子两个点的相对数值应反映这一点，其比例也应相同以便产生所需要的抵消。自然，作了这样的假设，如果产生多次波，就是一串多次波，其振幅每次都按比例减小，并且是其前面一个的反转。这是与多次反射理论相一致的。

实际上，情况不可能如此简单。在一个时间间隔内可以有若干个多次波，它们也不一定就是反射的精确地反转。因此，再次借助于最小二乘法设计最佳因子。然而，在各种情况下，最小二乘法因子的设计，消除讯号中一切位于规定的单位脉冲响应期间与因子总持续时间之间的波，就像由自相关函数规定的那样。

注意，时间滞后必须保持为常数。为了得到最佳结果，就要求按照多次波通过的层速度对记录作动校正。否则时间滞后就不是常数。

通常的尖脉冲反褶积，应该是需要的。经过上述去多次波之后，实现这种运算是比较简单的，或者首先将两个反褶积因子相褶积，以便一次完成这种处理。

## 去交混回响

去交混回响，消除水层中发生的海上交混回响，只是预测反褶积方法的特殊情况。

假定海上放炮是在水面上进行的，海底反射可以看成是由原始波与其后的多次波混响组成的。多次波出现的时间精确地等于原始波的两倍。水面可认为全反射面，其反射系数为1.0。因此，原始波中反回的能量直接是水底反射系数的函数。这个能量由从水面反射回到海底，其能量无变化而极性反转(图11)。一级多次(海底反射两次)波以原始反射系数平方的负值反回海面。其后的多次波可正可负，且第n次波携带的能量等于观测到的原反射系数n次幂。适当的去混响因子精确地等于理论的预测反褶积因子，是由

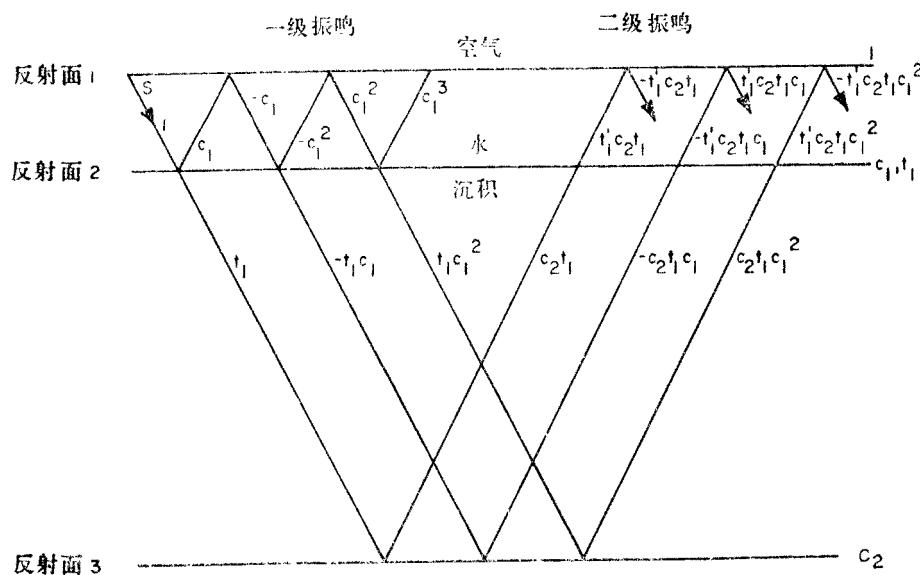


图11a - 级和二级海上混响

# 石油地物勘探

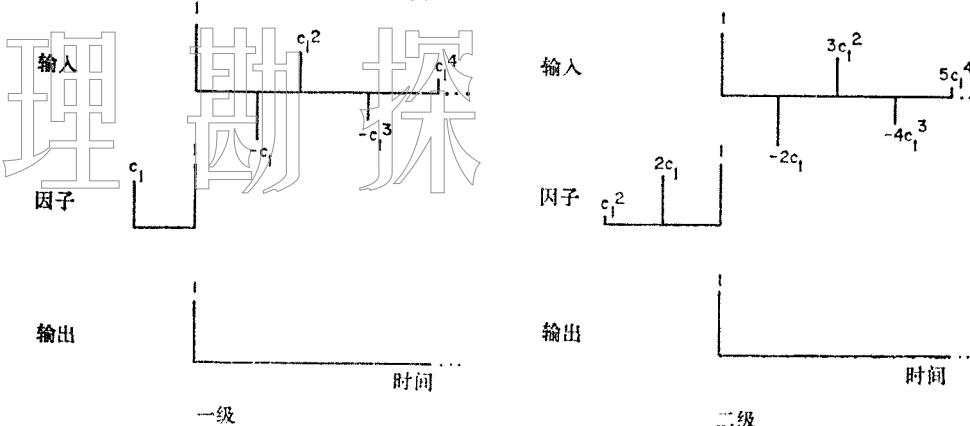


图11b 反褶积因子

在整个多次波时间间隔上为零值分开的两个点组成。因子的第一个点是值 1.0，而第二个点的值等于海底的反射系数。

以上描述了一级多次波的情况。二级多次波是由于地下反射能量投射到海面产生的，它作为新能源引起新的一系列混响。这里的情况多少要复杂一点，每个混响的实际能量值，取决于使用的模型。对于能量从一个地下反射面返回的简单模型，每个一级海水混响投射到水底，反射其能量的一部分，并将其余的部分能量送入地下，经反射面返回。每个二级混响因来自相应的一级混响的地下反射而加强，并且其后的波受到进一步的加强。例如，在原始反射以后，下一个接着的二级多次波是第二个波，其能量两倍于与其等价的二级混响的能量，下一个二级二级多次波是第三个波，且有三倍于等价一级波的能量，以此类推。另外，由于实际剖面的复杂性，去混响因子可以、且最好由最小二乘法从自相关函数中推导出来。

## 递归反褶积

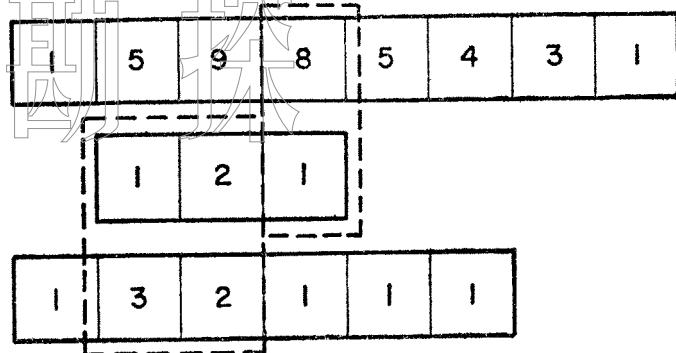
递归方法是这样一种方法，在这种方法中，因子利用过去所取得的经验，帮助产生并有希望改善现在和将来的处理输出。

前一节曾谈到一种方法，按照这种方法，可以用因子除反褶积输出取得输入讯号。在日常应用中“除”或反褶积处理变成递归方法。例如，序列 1, 3, 2, 1, 1, 1，与因子 1, 2, 1 褶积得到输出 1, 5, 9, 8, 5, 4, 3, 1。1, 2, 1 的逆与输出褶积可以得到输入，但是此混合延迟因子的逆为 1, -2, 3, -4 …，是一个不稳定的因子。精确的反褶积可按图12步骤得到。

按此方式可以精确的反褶积，无论振幅或相位都精确地恢复到原来的位置。大部分运算都是对前面的输出作的，并且每一个新的输出值，都受前面计算点的影响。实际上，第一点的某些部份转入而影响最后一点和所有的中间点。

这种方法存在的问题是，有舍去误差以及因为不适当的定义或转入干扰引起的误差，而且在这种反馈过程中可以迅速增加。过程可能是不稳定的。稳定性问题是设计递归

# 石油地球物理



反褶积的递归方法

- 1.用因子尾部的两个值（1,2,——译注）乘上输出的过去的两个值（3,2,——译注）并求和 = 7
- 2.由讯号的现在值（8——译注）减去这个和 = 1
- 3.用余数除因子的首项（1——译注）
- 4.将因子向右移动一个位置，并重复以上运算

图12 递归算法的例子

反褶积因子的一个最大的问题，这也是众所周知的与单位脉冲响应的振幅和相位不明确有关的问题。与统计法相比，运用这种方法，要求对参数的了解要精确的多，也即完全是确定论的。它能给出精确的答案，但在一般条件下，它也更可能是不稳定的。

## 频率域反褶积

上述一切方法均为时间域方案，虽然也常常参考频率域的等价运算以提供运算的概念。在适当的条件下，时间域有许多优点。最小二乘法用起来也简单。短因子常常很凑效。相位的确定并非完全需要，特别是当系统是最小延迟的时候。当假设不再可靠时，也有某些稳定性和输出质量的问题。

反褶积对振幅谱的影响是比较简单的，就是将谱白噪声化或拉平。这种精确的运算可在频率域中进行，方法只是将振幅谱的形状调整成均匀的水平，并且修正频率成分的振幅比。这总会以某种程度增加分辨率，特别是在高频成分严重衰减的时候，必须有足够的频率成分以便确定相位，完全没有的成分是不能代替的。在这种方法中相位通常是不变的。

## 时变特征

在许多地区，特别是对相当深的剖面，一个共同的现象是地震记录的频率成分多少是随时间而变化的。通常，高频成分的衰减随深度而增加。这就违背了大多数地震处理中所用的假设，这些假设是由讯号或通讯理论发展起来的，即预记讯号是平稳的，也就是说，从地震道某一部分取出的子样，与另一部分取出的子样实质上具有相同的频率。

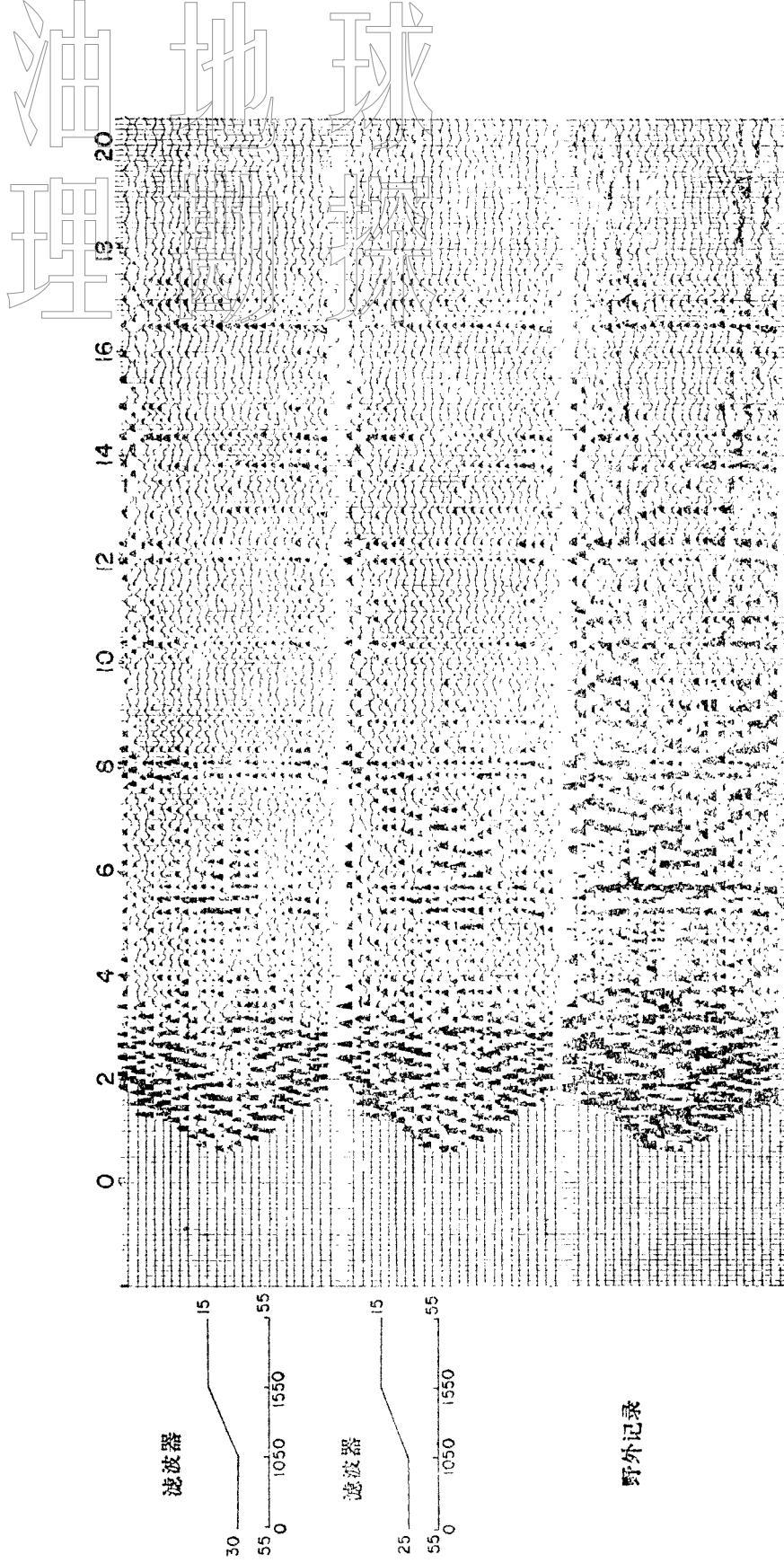


图13 时变带通滤波

在出现时变情况时，为弥补这一点，相当普遍的方法是应用或大或小的随着时变讯号的变化而变化的滤波因子。计算和应用连续的时变因子通常是很困难的。普通的方法是将地震记录分成两个或几个段或时间门，把每个门中的讯号视为均匀的进行处理。处理的结果再用平滑技术在接点处连接起来，使得从一段平滑的过渡到另一段。这就是多数所谓时变滤波的基础。当广泛使用时，这个名称是错误的，应当称为时门滤波。往往有足够的频率差别，使我们可用时变带通滤波器将反射波与多次波分开（图13）。

任何地震记录道可在其全长度上进行富氏变换，所得变换可用频率和相位恰当地刻划记录道。深层的高频损失可用变换的相位特征作恰当地处理。在剖面的浅层，较高的频率成分因相加而增强，而在深层它们是不同相的，在相加中趋向于抵消，这样的相加形成记录道。时间门的所谓时变运算的完全等价的运算，在时间域中可用选择记录道各部分的办法精确地再现，每个部分都当作独立的讯号处理，并且对每个作变换。所得到的变换，与整个记录道作一个变换的不同之处，在于在浅层有高频成分，而在深部就没有。

### 应用范围

现在，把反褶积应用的处理范围归纳一下是有益的。野外地震记录常常受到正常时差几何效应的畸变。

考虑一个层状介质模型，两个反射层直接在震源下面得到的反射，其记录时间之差等于两波之间的间隔时间。在远道上，由于旅行路径加长，同样的两个层的两个反射的到达时都晚一些。路径是不同的，又由于几何效应，在远道上两波的时间差就小于近道。其纯效应是延迟波在远道上的到达时间，然而浅层比深层延迟的更多，这就在远道上将整个剖面在时间压缩了。时间压缩造成频率提高，所以地层讯号谱向谱的高频端移动某一数量。

每个反射界面的反射系数触发一个持续一定时间的单位脉冲响应。几何压缩对任何给定的单位脉冲响应没有影响，因为整个响应的旅行路径是相同的。唯一的影响是，下一个较深的响应，在远道上比在近道上更接近于一个反射。纯粹的正常时差效应是，移动地层讯号的谱而不触及单位脉冲响应的谱。

用适当的动校正可将地层讯号恢复到它的适当位置，然而会拉长远道上的单位脉冲响应。由此可以得出结论，反褶积应在动校正之前进行，以保证最佳的结果。