

石油地球物理勘探丛书

反褶积与 地震道反演

黄绪德 编著

● 石油工业出版社

京)

065292

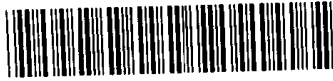


石油地球物理勘探丛书

反褶积与地震道反演

黄绪德 编著

5426/06



200407265



石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书共分十章，分别叙述了目前所用的几乎所有反褶积方法的基本原理、在计算机上的实现、处理效果及其最新发展情况。本书偏重于理论基础，并试图用线性代数形式来统一表达反褶积及地震道反演公式，同时尽可能提供实例，帮助读者思考。

本书可供地震勘探科技人员及有关院校师生参考。

石油地球物理勘探丛书
反褶积与地震道反演

黄绪德 编著

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版

北京科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 20 印张 3 插页 501 千字印 1—1,500

1992 年 11 月北京第 1 版 1992 年 11 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0646-4/TE·614

定价: 11.35 元

出版者的话

近二十年来,石油地球物理勘探技术日新月异,发展迅速。为了总结地球物理与地质相结合的经验,推广石油物探方法的新技术,我们组织有关专家、教授编写了这套《石油地球物理勘探丛书》,供石油地球物理工程师学习参考,以期做到物探工作中设计的合理性、采集的可靠性、处理的正确性、解释的科学性,提高解决各种复杂问题的能力。

这套丛书以应用为主,对基本概念和基础理论只做简要阐述,侧重于介绍各种新技术、新方法在实际工作中的应用。内容包括石油重、磁、电、地球化学、放射性、地震各种方法的资料采集、数字处理、成果解释、应用等,预计编写二十余册,每册都力图讲述清楚一个课题,它既是石油物探工作者施展才能的园地,又是您工作案旁的良师益友。让我们为发展石油物探技术,来共同编好和使用好这套丛书吧!

前 言

反褶积与偏移可以说是地震资料处理的两个支柱。反褶积所用的时间信号分析——信息论与偏移所用的空间波场分析——波动论就是地震勘探的两个理论基础。反褶积是时间域反褶积，偏移是空间域反褶积，两者都是广义的地震反演的一部分。但又与严格的地震反演不同。严格的反演是要提取地震参数，而反褶积企图提取反射系数，实际只能压缩子波，而偏移只是几何形态的反演。有趣的是，严格的反演又必须以反褶积与偏移为基础。地震勘探技术日新月异，发展到今天已经将分辨和预测岩性及油气作为前沿课题，严格的反演技术是主攻方向之一，但反褶积作为它的基础之一，仍有极其重要的理论和实际意义。

反演既可根据时间信号分析，又可根据空间波场分析，因此与反褶积及偏移有着深刻的渊源关系。反演可以在一维、二维及三维空间中进行。一维的地震道反演是时间信号分析过程，它与反褶积有着直接的继承关系。鉴于这些原因，本书就写了“反褶积与地震道反演”，企图将两者联系起来。反褶积有了几十年的历史，目前仍在发展，但可能已过了它的高峰期，它最初的目的取得反射系数，可能不得不由反演，首先是一维的地震道反演来完成。

本书搜集了一切常用的反褶积方法，也尽可能包括它的最新发展。本书偏重于理论基础，并企图用线性代数形式来统一表达反褶积及地震道反演公式，也尽可能提供实例，帮助读者思考。为此地质矿产部北京计算中心的同志们给予了大量的帮助，许多图件都是他们制作的，在此表示深切的感谢。我还要感谢我的好助手李守林同志，他为我做了许多工作，使本书能够顺利脱稿。

黄绪德

1990年11月30日

目 录

| | |
|---|---------|
| 第一章 概 论 | (1) |
| 第一节 地震道线性褶积模型 | (1) |
| 第二节 反褶积的意义、目的和局限性 | (6) |
| 第二章 最小平方反褶积 | (11) |
| 第一节 最小平方滤波 | (11) |
| 第二节 脉冲反褶积 | (15) |
| 第三节 约束最小平方反褶积 | (31) |
| 第四节 延迟期望输出反褶积 | (37) |
| 第五节 构造反褶积 | (41) |
| 第三章 预测反褶积 | (45) |
| 第一节 预测反褶积的基本概念 | (45) |
| 第二节 预测反褶积的应用 | (51) |
| 第四章 变模反褶积 | (70) |
| 第一节 L_p 模双边反褶积 | (70) |
| 第二节 最小熵反褶积 | (84) |
| 第三节 L_1 、 L_∞ 及 D 模反褶积 | (89) |
| 第四节 统计检验 | (92) |
| 第五节 经济反褶积 | (98) |
| 第六节 变模反褶积 | (102) |
| 第七节 最大似然反褶积 | (106) |
| 第五章 同态反褶积 | (114) |
| 第一节 同态反褶积 | (114) |
| 第二节 同态反褶积的实现 | (127) |
| 第六章 子波反褶积 | (133) |
| 第一节 子波提取及子波反褶积 | (133) |
| 第二节 子波处理及子波整形 | (142) |
| 第七章 地震道反演 | (154) |
| 第一节 地层反褶积与虚测井 | (154) |
| 第二节 波阻抗恢复 | (169) |
| 第三节 广义反演 | (177) |
| 第四节 多参数约束反演 | (188) |
| 第五节 线性规划反演 | (196) |
| 第八章 递归反褶积 | (207) |
| 第一节 最大熵反褶积及反射系数估计 | (207) |
| 第二节 迭代反褶积 | (225) |

| | |
|-----------------------|---------|
| 第九章 振幅补偿及提高信噪比 | (230) |
| 第一节 Q反褶积 | (230) |
| 第二节 传输补偿频率域反褶积 | (241) |
| 第三节 地表一致性反褶积 | (248) |
| 第四节 $f-x$ 反褶积 | (254) |
| 第十章 特殊反褶积 | (260) |
| 第一节 Noah反褶积 | (260) |
| 第二节 最小信息反褶积 | (269) |
| 第三节 卡尔曼滤波 | (274) |
| 第四节 某些反褶积的改进 | (284) |
| 第五节 反褶积的新进展及发展趋势 | (299) |
| 符号说明 | (304) |
| 参考文献 | (309) |

第一章 概 论

第一节 地震道线性褶积模型

一、地 震 道

地球表面或地下任一固定点 $P(x, y, z)$ 上接收器 (单个或组合) 接收到的一次激发所产生的震动 (质点位移、位移速度或位移加速度), 通过特定仪器记录下来的连续时间过程为一个地震道。因此地震道是一个一维的地震信号道, 它在空间上记载了地震波从激发点出发, 经过地层滤波器 $g(t)$ 返回到接收点 (多半在地表或地表附近) 的过程, 因此载有大量地下地质结构的信息, 在时间上记载了从激发瞬间 ($t=0$) 开始到震动结束 ($t=t_e$, 图 1-1-1 (a)) 地震波变化的过程, 因此它是一个因果的、连续的、平稳的、随机的时间过程。我们用 $\xi(t)$ 代表, 它的离散值是一个时间序列 $\xi_i = \{\xi_1, \xi_2 \cdots \xi_n\}$ 。这四个限制词有它们特定的数学、物理意义。

因果的, 是说它是一个物理过程, 震动是由激发引起的。在数学上说是物理可实现的。即当 $t < 0$ 时, $\xi(t) = 0$, 在地震记录上初至前应该是平静的。有的记录初至前并不平静 (图 1-1-1 (b)), 这不符合地震勘探规范要求, 也不符合提供作反褶积的前提条件。对于这类非激发引起的振动干扰 $n_0(t)$, 不仅在激发前出现, 激发后也常出现, 如大地微震、环境震动、天电、工业电等等, 它们对地震道是非因果的, 要在反褶积前予以排除。

连续的, 即在物理上一次激发期间质点是连续震动的。在数学上, 在区间 $0 \sim t_e$ 内, $\xi(t)$ 是连续函数, 即没有间断点。间断点有两类: 第一类间断点, 即 $\xi(t_2+0) \neq \xi(t_2-0)$, 在地震曲线上表现为折断点 (图 1-1-1 (c))。第二类间断点即 $\lim_{t \rightarrow t_1} \xi(t) \rightarrow \infty$, 在地震曲线上表现为一个特强脉冲 (图 1-1-1 (d))。因此地震道应没有折断点及特强脉冲, 此外地震道不仅应该是连续的, 而且是可微的, 即没有折点 (图 1-1-1 (d) 之 t_3)。

平稳的, 是指非时变的, 即地震道的各项统计特征不随时间而变。实际上只有在吸收小到可以忽略的介质中, 或近乎完全弹性的介质中才如此。一般说地下介质是粘滞弹性的, 地震道是时变的, 即非平稳的。一个地区地震道是平稳还是非平稳, 要进行实际的统计分析。统计分析时有个遍历性问题。即能否用时间平均 (均值、相关等) 来代替样本空间的平均, 这要求自相关函数的均值为零。但由于地震道的样本空间 $\{\xi_1, \xi_2 \cdots \xi_n\}$ 就是离散时间序列 $\{\xi(t_1), \xi(t_2) \cdots \xi(t_n)\}$, 遍历性应是没有问题的。还有一个空间平稳性问题, 可对同一炮点排列上各道分别统计, 比较各道统计参数的变化, 也可作波剖面。如在 x 点地震道为 $\xi_x(t)$, 则波剖面为 $\xi_t(x)$, 表示同一时刻震动 ξ_t 随空间位置 x 的变化。对波剖面作统计分析, 估计参数, 与时间道统计参数进行对比。近来出现了用波剖面作反褶积的技术, 可进一步压制干扰。

随机的, 是说地震道上时刻 t 的取值 ξ_t 是随机的, 这有三个因素。一是噪音背景 n_t 是随机过程; 二是反射系数序列 r_t 常假定为随机分布的; 三是规则干扰波在时刻 t 的值 N_t 是随

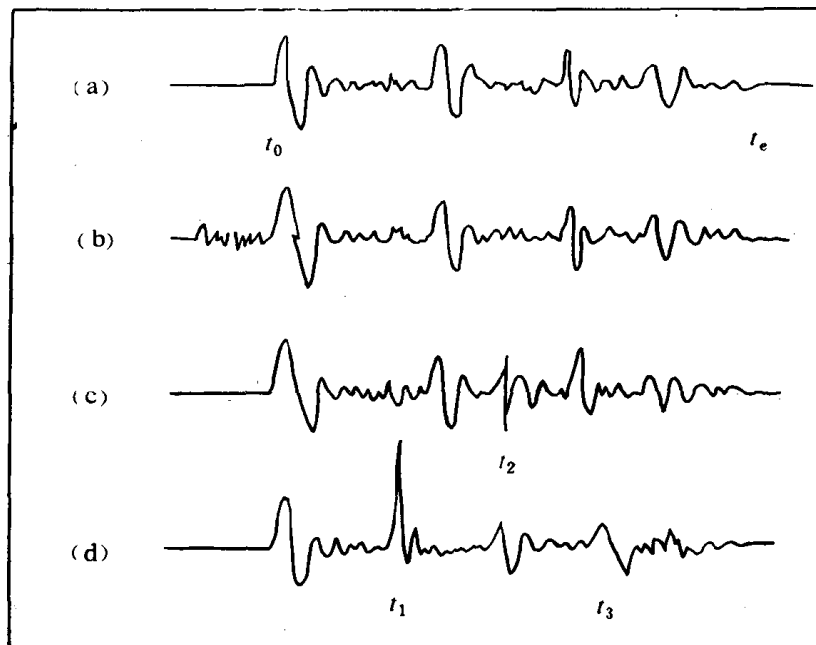


图 1-1-1 地震道的因果性与连续性

(a) 正常道; (b) 初至前噪音; (c) 间断点 (t_2); (d) 强脉冲 (t_1), 折点 (t_3)

机出现的, 即 $\xi_t = w_t * r_t + n_t + N_t$ 是随机的。即使加上非激发干扰 n_{0t} , 也不失其随机性。随机的不一定是白噪, n_t 及 r_t 是否是白噪, 决定于其功率谱是否是常数或近于常数。

地震道的因果性、连续性、平稳性及随机性对反褶积和反演有着重要的意义, 在以后的章节中可以看到。

二、地震道线性褶积模型

地震道是由有效波 $s(t)$ 和干扰波 $n(t)$ 叠加组成的

$$\xi(t) = s(t) + n(t) \quad (1.1.1)$$

我们指的有效波是一次反射波, 对反射地震勘探而言, 除一次反射波以外的一切波都是干扰波。层状介质的一次反射波通常用线性褶积模型表示。

$$s(t) = w(t) * r(t) \quad (1.1.2)$$

式中 $w(t)$ ——系统子波;

$r(t)$ ——反射系数函数。

系统子波是由震源子波 $o(t)$ 经地层滤波器 $g(t)$, 形成地下子波 $w_1(t)$, 然后逐层反射—折射 (透过响应 $\tau(t)$) —反射, 最后被地面接收器 $d(t)$ 接收, 仪器 $i(t)$ 记录后形成的, 它是除反射系数以外的综合影响的结果, 地层响应、透过响应、接收器响应、仪器响应都是滤波作用, 对震源子波滤波相当于它们的时间域响应与子波连续褶积

$$\begin{aligned} w(t) &= o(t) * g(t) * \tau(t) * d(t) * i(t) \\ &= w_1(t) * \tau(t) * d(t) * i(t) \end{aligned} \quad (1.1.3)$$

代入 (1.1.2) 式得

$$\begin{aligned} s(t) &= o(t) * g(t) * \tau(t) * d(t) * i(t) * r(t) \\ &= w_1(t) * r(t) * \tau(t) * d(t) * i(t) \\ &= o(t) * f_g(t) * f_d(t) * r(t) \end{aligned} \quad (1.1.4)$$

式中 $f_g(t) = g(t) * \tau(t)$, 为大地滤波器;

$f_d(t) = d(t) * i(t)$, 为接收滤波器。

干扰波由非激发干扰 $n_0(t)$ 、噪音背景 $n_1(t)$ 及规则 (相干) 干扰 $N(t)$ 叠加而成

$$n(t) = n_0(t) + n_1(t) + N(t) \quad (1.1.5)$$

规则干扰 $N(t)$ 分两类: 一类与地质结构有关, 称第一类规则干扰 $N_1(t)$, 包括多次波、转换波、反折射波、断面波、绕射波、伴随波、折射波、瑞利波 (及伪瑞利波)、勒夫波、斯通莱波等。这类波在特定条件下可转化为有效波。另一类与地质结构无关, 称第二类规则干扰波 $N_2(t)$, 包括水中鸣震、气泡效应、地表及海面散射等多次波 (包括地下鸣震、薄层屈曲多次、伴随波) 与反射系数函数有关, 可用一类特殊子波 $w_m(t)$ 与反射系数函数褶积形成的特殊的多次波模型代表

$$s_m(t) = w_m(t) * r(t) \quad (1.1.6)$$

它可以是线性的, 也可能是非线性的。而包含多次波的非线性褶积模型已经有许多论述⁽²⁰⁾ 本书不涉及。

三、地震道褶积模型的多种表示方式

(1.1.2) 式中的褶积在频率域中就是乘积

$$S(j\omega) = W(j\omega) R(j\omega) \quad (1.1.7)$$

式中, $S(j\omega)$ 、 $W(j\omega)$ 、 $R(j\omega)$ 分别为 $s(t)$ 、 $w(t)$ 及 $r(t)$ 的傅里叶变换。它们的复数形式可分解为振幅谱及相位谱两部分

$$\begin{aligned} S(j\omega) &= S(\omega) e^{-j\theta_s(\omega)} \\ W(j\omega) &= W(\omega) e^{-j\theta_w(\omega)} \\ R(j\omega) &= R(\omega) e^{-j\theta_r(\omega)} \end{aligned} \quad (1.1.8)$$

故有

$$S(\omega) = W(\omega) R(\omega) \quad (1.1.9)$$

$$\theta_s(\omega) = \theta_w(\omega) + \theta_r(\omega) \quad (1.1.10)$$

可写成向量形式

$$\mathbf{s} = \mathbf{w} \mathbf{r} \quad (1.1.18)$$

式中 \mathbf{s} —— $(n+1)$ 阶地震信号道列向量;
 \mathbf{w} —— $(n+1) \times (p+1)$ 阶子波矩阵;
 \mathbf{r} —— $(p+1)$ 阶反射系数列向量。

如果用 Z 变换表示上述离散序列, 则有

$$S(z) = W(z) R(z) \quad (1.1.19)$$

式中 $Z = e^{j\omega}$, 表示离散序列中延迟一个样, $Z^n = e^{jn\omega}$ 即为延迟 n 个样。

如一个子波时间序列为 $w_t = \{1, 0, 2, 4\}$, 则变换为

$$W(z) = 1 + 2Z^2 + 4Z^3 \quad (1.1.20)$$

也可用拉普拉斯变换后在 S 平面上表示, 则 (1.1.2) 变为

$$S(S) = W(S) R(S) \quad (1.1.21)$$

式中 $S^{-1} = e^{j\omega} = Z$ 表示延迟一个样, (1.1.20) 成为

$$W(s) = 1 + 2S^2 + 4S^{-3} \quad (1.1.22)$$

也可用拉普拉斯— Z 变换表示, 即 $S_z = e^{j\omega}$, (1.1.20) 变为

$$W(S_z) = 1 + 2S_z^2 + 4S_z^3 \quad (1.1.23)$$

而

$$S(S_z) = W(S_z) R(S_z) \quad (1.1.24)$$

上述时域 (1.1.2)、频域 (1.1.7)、离散表示 (1.1.13)、向量表示 (1.1.18)、 Z 域 (1.1.19)、 S 域 (1.1.22) 及 S — Z 域 (1.1.23) 的表示式都是等效的, 今后我们将根据方便用不同域的表示式来叙述, 但将注意它们的系统性及一致性。

四、地震道模型的非线性因素

上述褶积模型实际上作了五条假设:

- 1) 地层介质是完全弹性的, 子波不随传播的时间、空间而变;
- 2) 地层介质的弹性是线性的, 即地层内的各个地震波相互独立, 各自服从自己的传播规律, 但可以相互叠加, 叠加时服从线性规律;
- 3) 质点震动是被动的, 地层介质质点本身不放射能量;
- 4) 地层介质特性是稳定的, 不随时间而变;

5) 反射是一次的，多次波不予考虑。

而实际上地层介质是粘滞弹性的，没有一套实际的地下岩层对地震波没有粘滞吸收。地层愈松散吸收愈大。而弹性也是非线性的，各个地震波相互之间起作用，互不独立。两个不同频率的波干涉后产生新的具有合频或差频的波，这个新波与原始波相互作用引起介质的复杂震动。而波在行进过程中压力改变，从而引起行进速度及子波形状的改变。这种非线性取决于孔隙度、裂隙发育程度及孔隙内流体（水、空气、天然气、油）的饱和度。因此地层上部多孔岩层弹性具有最大的非线性性质。此外岩层还是“活的”，由于各种化学变化和物理变化，岩层随着时间在改变着自己的特性，同时放射出能量，产生高频微震、发热、发声或放光，成为“主动的”震体，油、气层及矿层这种活性可能更明显。因此可以说线性褶积模型的五条假设一条也不符合实际。但由于上述非线性因素有的微弱，有的随时间变化得很慢，有的可人为加以抑制，在一定程度内可以近似地看作是线性的。这五条假设在一般情况下还是有效的。在特定条件下非线性有了明显的表现时就应加以特殊处理，这可能是岩性地震勘探及油储地震勘探的特殊课题，即建立地震道的非线性模型。

第二节 反褶积的意义、目的和局限性

一、反褶积和反滤波

如果我们能求得一个算子 $b(t)$ 正好是子波 $w(t)$ 的逆，即

$$b(t) = w^{-1}(t)$$

则它与 $s(t)$ 褶积时，由 (1.1.2) 式可得

$$\begin{aligned} b(t) * s(t) &= w^{-1}(t) * w(t) * r(t) \\ &= \delta(t) * r(t) = r(t) \end{aligned} \quad (1.2.1)$$

$$\text{式中 } w^{-1}(t) * w(t) = \delta(t) \quad (1.2.2)$$

即地震有效波 $s(t)$ 用子波的逆褶积时可以得到反射系数函数，这个过程就叫做反褶积。

在频率域，由 (1.1.7) 式可直接得到

$$S(j\omega) / W(j\omega) = R(j\omega) \quad (1.2.3)$$

$$\text{或} \quad S(\omega) / W(\omega) = R(\omega) \quad (1.2.4)$$

$$\theta_s(\omega) - \theta_w(\omega) = \theta_R(\omega) \quad (1.2.5)$$

即有效波振幅谱直接被子波振幅谱除，可以得到反射系数函数振幅谱。相位谱相减可以得到反射系数函数相位谱。这个过程就叫反滤波。反褶积在频域中实现就是反滤波。很明显，这样求反滤波是不稳定的。因为 $W(\omega)$ 有零点或接近于零点（图 10-4-1 (b)），这时 R

(ω) 即趋于无穷大。因此必须给子波加上白噪 B 。使 $W(\omega)$ 抬高一个水平而摆脱零点。

$$\frac{S(\omega)}{W(\omega) + B} = R(\omega) \quad (1.2.6)$$

这个 B 必须足够小，以使 $R(\omega)$ 既稳定又不致有较大误差。

二、两类反褶积

如果我们能够求得子波 $w(t)$ ，就能求得它的逆作为算子 $b(t) = w^{-1}(t)$ ，这样就能求得确切的反射系数 $r(t)$ 。这就是说 (1.1.2) 式中三个参数有两个已知，就可确切地求得第三个参数。一个方程一个未知数，能够得到确定性的解，这种反褶积就叫确定性反褶积。

实际上我们往往得不到子波，或者得不到确切的子波。从反褶积方法发展的初期直到 70 年代末，反褶积都带有统计估计的性质。一个方程式中带有两个未知数，是不定方程，不可能有确定性的解。这种反褶积叫估计性反褶积。它的任务是对子波及反射系数进行估计。估计了其中的一个，再估计另一个；或者给其中一个未知数以初值，再对两者作反复迭代估计。

三、反褶积的目的和局限性

1. 结果与目的背离

反褶积的目的就是为了分离子波和反射系数序列：子波就象无线电中的载波，反射系数序列就象无线电中的声波。只有消除高频载波才能提取声波。子波在地层中传播，携带着反射系数序列这种有用的地质信息返回地面，只有消除子波才能恢复反射系数序列的本来面目。反射系数序列中有波阻抗随时间变化的信息，这就提供了速度和密度随时间变化的信息，随之就可得到地层、岩性及构造在地下空间分布的信息，在有利条件下还可得到岩石孔隙率、渗透率、孔隙流体性质（油、气、水）乃至地层压力的信息。因为反射系数序列中任意一个样值都有

$$r_i = \frac{I_{i+1} - I_i}{I_{i+1} + I_i} \quad (1.2.7)$$

而
$$I_i = \rho_i \cdot V_i \quad (1.2.8)$$

式中 I_i ——波阻抗；
 r ——反射系数；
 ρ ——密度；
 V ——速度。

由 r 求 I ，再求 ρ 和 V ，这就是地震道反演的任务，对此将在反演各章中详细叙述。

反褶积的目的就是为了求得任一时刻的反射系数 r_i ，但能否达到这一目的决定于能否取得符合当地实际的系统子波 $w(t)$ ，乃至随空间变化的子波 $w(x, y, z, t)$ 。对于地震道，只随深度变化时子波为 $w(z, t)$ 。对于估计性反褶积可以说这一点是肯定达不到的，对于

确定性反褶积有两种可能。如果所提取的子波不符合实际，就得不到确切的 $w(t)$ ；或者，噪音不能忽略，我们只有实测道 $\xi(t)$ ，而没有有效反射道 $s(t)$ ，就不可能利用 (1.1.2) 式反褶积得到 $r(t)$ 。可惜的是就目前（80年代末）的技术而言，得到确切的系统子波 $w(t)$ 的可能性极小，而只能得到估计值 $\hat{w}(t)$ ，只是 $\hat{w}(t)$ 逼近 $w(t)$ 的程度不同而已。这时 (1.2.1) 式变为

$$\begin{aligned} \hat{b}(t) * \xi(t) &= \hat{w}^{-1}(t) * w(t) * r(t) + \hat{w}^{-1}(t) * n(t) \\ &= \xi'(t) \end{aligned} \quad (1.2.9)$$

结果只是一个经过改造了的新的地震道 $\xi'(t)$ 。我们来看一下这时振幅谱的变化

$$\hat{B}(\omega) \Xi(\omega) = \Xi'(\omega) \quad (1.2.10)$$

$\Xi(\omega)$ 是 $\xi(t)$ 的振幅谱， $\hat{B}(\omega)$ 是估计算子 $\hat{b}(t)$ 的振幅谱，而 $\hat{b}(t)$ 又是估计子波 $\hat{w}(t)$ 的逆 $\hat{w}^{-1}(t) = \hat{b}(t)$ 。子波或近似子波的振幅谱一般是窄频带，与它褶积就象通过一个带通滤波器，而它的逆正好是一个带阻滤波器。这个逆与地震道褶积就有可能将地震道的频带拓宽了，如果匹配得好，就会近于一个无限宽的常数谱（图 1-2-1），这就正好是估计子波等于真实子波而噪音可忽略时的情况。这时由 (1.2.9) 式有

$$\begin{aligned} B(\omega) \Xi(\omega) &= 1(\omega) * R(\omega) + 0 \\ &= R(\omega) \end{aligned} \quad (1.2.11)$$

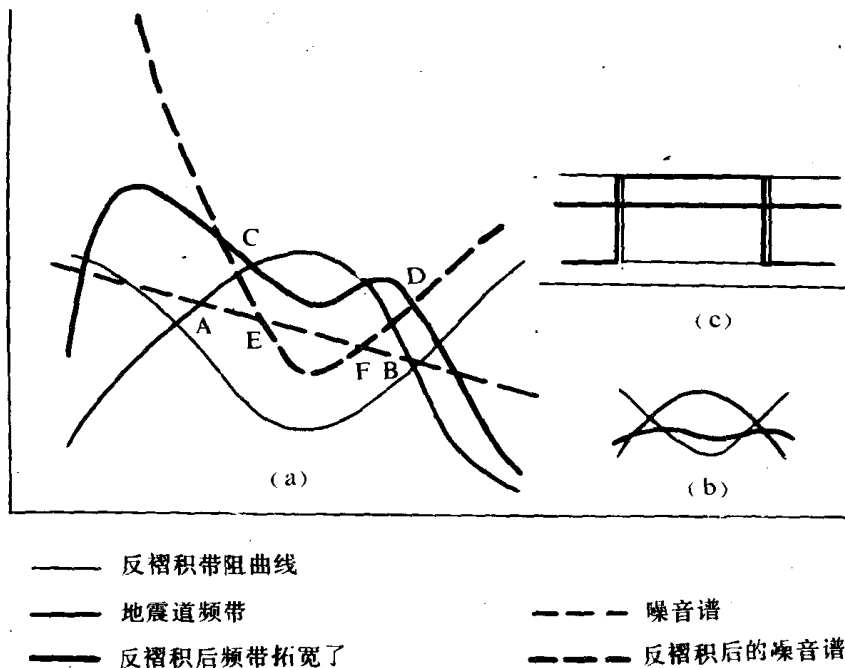


图 1-2-1 反褶积拓宽了频带，提高了分辨率，降低了信噪比

(a) 通常频谱与带阻曲线；(b) 两者反对称；(c) 两者完全匹配

因 $w^{-1}(t) * w(t) = \delta(t) \leftrightarrow 1(\omega)$

这就是精确的确定性反褶积的结果。一般的确定性反褶积子波估计并不准确，达不到这个结果。而估计性反褶积就只能是拓宽频带，提高一些分辨率而已。这就出现了一个有趣的现象。反褶积背离了它的初衷，将提取反射系数的任务退化为只是提高分辨率了。

2. 频带的限制

地震道是限带的，而期望输出反射系数序列是宽带的，要从限带输入中得出宽带输出是一个极大的矛盾，就是说要得到反射系数 δ 脉冲序列几乎是不可能的，详见第七章第二节。

3. 提高了分辨率降低了信噪比

实际上地震记录中不可能没有噪音。经反褶积后，只有在靠近反褶积算子振幅谱负峰的很小频段内，噪音振幅谱才会降低，而在其两侧噪音迅速提高。如图 1-2-1 (a)，细虚线是噪音振幅谱，粗虚线是反褶积后的噪音振幅谱。AB 段内反褶积前信噪比大于 1，CD 段内反褶积后信噪比虽仍大于 1，但要比反褶积前小；虽然噪音振幅在 EF 段内降低了，信号振幅却降低得更多。而在 CD 段外，反褶积后噪音迅速增加，信噪比降低更多，情况恶化了。为了滤去信噪比恶化的频段，要专门设计一个滤波算子。

4. 设计解释算子进行改进

设计时遵从 Turin 准则，即该算子是零相位的，其振幅谱为

$$B_i(\omega) = \frac{W^2(\omega)}{W^2(\omega) + N^2(\omega)}$$

$$= \frac{1}{1 + N^2(\omega) / W^2(\omega)} \quad (1.2.12)$$

这时反褶积算子变为

$$a_t = b_t * b_{it} = w_t^{-1} * w_{it}^{-1} \quad (1.2.13)$$

式中 b_{it} —— $B_i(\omega)$ 的反傅氏变换，等于 w_{it}^{-1} 。

(1.2.12) 式表明信噪比愈低， $B_i(\omega)$ 愈低。这个滤波器是专门用来压制高噪音的恶化带和提高剖面的可解释性的，因此可称 b_{it} 为解释算子， w_{it} 为解释子波。

5. 反褶积早被反演理论所超越

从第七章第三节的讨论我们可以知道：一个超定的线性矛盾方程组 $s = wr$ 的解有多种形式，每种形式都优于它的先前形式。

$$\text{直接解} \quad r = w^{-1} s \quad (7.3.3)$$

$$\text{最小二乘解} \quad r = (w^T w)^{-1} w^T s \quad (7.3.10)$$

$$\text{阻尼最小二乘解} \quad r = (w^T w + v^2 I)^{-1} w^T s$$

$$\text{约束阻尼最小二乘解} \quad \Delta r = (w_i^T w_i + v^2 iI)^{-1} w_i^T \Delta s \quad (7.3.18)$$

$$\text{或} \quad r = r_0 + (w^T w + v^2 I)^{-1} w^T (s - s_0) \quad (7.3.24)$$

而反褶积恰恰是最落后的直接解法，所谓子波求逆与地震道褶积以求得反射系数，不正好是(7.3.3)式吗？这个解的条件数（见(7.3.12)式）太差，或误差放大系数太大。这就是整个反褶积方法的先天局限性，即使是确定性反褶积也是如此。今后必然要被反演代替。当然在特定条件下反褶积仍会起到应有作用，因为它简单易行，并可提高分辨率。