

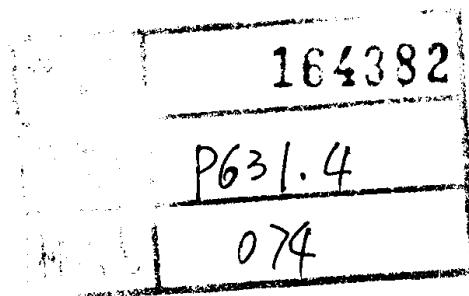
海上地震资料 高分辨率 处理技术论文集

何汉漪 主编



地质出版社





海上地震资料高分辨率 处理技术论文集

何汉漪 主编

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书收编了有关地震资料高分辨率处理方面的新技术新方法论文 23 篇。内容主要有消除噪音压制多次波提高信噪比的去噪技术、压缩子波拓宽频谱提高分辨率技术、高精度速度分析技术、零偏移距地震道拟合技术、处理流程研究等。本书所涉及的内容大多是近几年发展的新技术,所述方法原理准确、简明扼要,实际资料的应用效果明显,可广泛地推广应用。

本书可供地球物理工作者特别是从事地震资料处理工作的技术人员参考,也可供地球物理相关专业的教师、博士生和硕士生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

海上地震资料高分辨率处理技术论文集/何汉漪主编.

北京:地质出版社,2001.7

ISBN 7-116-03421-8

I. 海… II. 何… III. 地震数据,海上-高分辨率-数据处理-文集
IV. P315.63-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 034132 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:赵俊磊 江晓庆

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所发行

开本:787×1092¹/₁₆ 印张:13.5 彩色图版:3 页 字数:329000

2001 年 6 月北京第一版·2001 年 6 月北京第一次印刷

印数:1—800 册 定价:35.00 元

ISBN 7-116-03421-8

P·2193

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

序

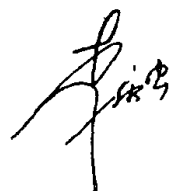
高分辨率地震勘探技术日益显示它在寻找油气方面的重要作用，而海上的地震资料较陆上具备达到高分辨率更为优越的条件，因此，近年来海上的高分辨率地震勘探的实践与经验对陆上资料向高分辨率迈进具有良好的示范作用。

要达到提高分辨率的目标，在海上地震资料的采集方面已经由 820-05-01 课题组在 2000 年 6 月份作了总结，有课题研制技术报告，题为“海上中深层高分辨率地震勘探技术”。该报告是对地震资料采集工作的全面总结，而本书是对其中的地震资料处理技术所做的专题讨论和补充。

资料处理的好坏也会反映到最终成果的分辨率好坏，因此深入研究地震资料的高分辨率处理理论及方法也是十分重要的。

本书第一篇何汉漪先生的“概论”一文便是对全书课题的一个全面概括。它论述了水平叠加的优缺点，并指出它存在着对分辨率提高的一些限制，因此不叠加处理便是首选的攻关课题。它们采用聚束滤波消除多次波加上时频域零偏移距地震道拟合的方法比较好地解决了这个问题。第二个题目便是如何展宽频带，何汉漪等指出了保护和拓宽低频的重要性，这也是十分正确的。第三个题目是关于保真度的讨论，这个题目展开得还不够。我认为地震资料处理的过程也是一个系统工程，叠前去噪、多次波压制及反褶积到叠加后的各种处理，前后都有关联，所以不是一个方法或一个模块可以单独判定其好坏的。判断资料处理好坏的惟一标准是分频扫描，就是说信噪比谱中间的有效频带变宽了就是好的，变窄了就是坏的。希望今后能有更好的文章把它们连贯起来做一系统分析。

本书对海上地震资料的处理技术方面具有较高参考价值。



2000 年 11 月

前 言

从 1994 年到 1996 年, 中国海洋石油总公司在海上高分辨率地震勘探方面做了大量的研究和试验工作, 获得了良好的浅—中层高分辨率地震资料, 为寻找海上油气田发挥了重要作用。

到 1997 年, “海上中深层高分辨率地震勘探技术” 研究课题得到国家 “八六三计划” 的支持, 被列为 “八六三计划” 重大项目的研究课题之一, 希望将海上高分辨率地震勘探深度加深至双程旅行时 2.5 s 左右, 得到频宽 10 ~ 100 Hz 高分辨率地震资料。

在国家 “八六三计划” 支持下, 中海石油研究中心与中海物探公司、清华大学、北京大学、长春科技大学等著名高等院校合作研究高分辨率地震勘探技术, 达到了很高的水平, 地震资料频宽达到了 10 ~ 100 Hz, 勘探深度接近 3.0 s。现将高分辨率地震资料处理技术研究中的一些论文集中发表, 供有关技术人员参考, 希望能起到抛砖引玉的作用, 推动高分辨率地震勘探技术向前发展。本书包括叠前去噪, 叠前消除多次波, 叠前提高分辨率, 不叠加技术以及叠后去噪和提高分辨率等方面的文章 23 篇。

高分辨率地震资料处理也是一个系统工程, 每一项技术对最终结果都有影响。对于特定工区地震资料, 其最终成果的好坏取决于处理流程中各项技术的综合应用和处理参数的选取。每一单项处理技术都有它特定的应用范围和应用条件, 本书中, 有些方法具有较好理论效果和实际应用效果; 有些方法对于某些特定工区的资料有较好效果, 而对于其他资料可能效果不好; 有些方法还处于理论研究阶段, 离实际应用尚有一段距离。因此, 作者真诚希望广大读者能提出宝贵意见, 共同发展和提高高分辨率地震勘探技术。

在本项目研究和本书编撰过程中, 得到了李庆忠院士、刘光鼎院士、龚再升、王伟元、宗国强等同志的帮助和支持, 在此特表示衷心的感谢!

2000 年 12 月

目 录

海上地震资料高分辨率处理技术概论	何汉漪 (1)
基于不叠加的海上高分辨率地震资料处理及效果	
..... 温书亮 何汉漪 刘永江等	(17)
用聚束滤波方法消除南海深海地震资料中的多次波	
..... 胡天跃 王润秋 温书亮	(23)
时频域零偏移距地震道拟合	陆文凯 张学工 李衍达等 (32)
剔除拟合技术在海上地震资料处理中的应用	温书亮 李庆忠 (39)
叠加与拟合方法在高分辨率处理中的应用	
..... 刘永江 陈宝书 李松康	(47)
叠前子波处理技术的应用	张云鹏 张丽焕 陈宝书 (55)
基于模糊判别和方向滤波技术的相干干扰消除	
..... 林 盛 张学工 李衍达等	(61)
自适应匹配叠加滤波	李鲲鹏 李衍达 张学工 (69)
分频去噪方法研究及其在海上高分辨率地震资料处理中的应用	
..... 温书亮 李松康	(77)
用自适应倾斜面元叠加提高地震资料的分辨率	
..... 张学工 李崇荣 荣志鹏等	(83)
振幅谱模拟提高地震资料分辨率	李鲲鹏 (91)
SVD 分解提高地震资料的信噪比和分辨率	
..... 陆文凯 李衍达 温书亮等	(97)
高分辨率地震资料处理技术在南海西部海区的应用	葛 勇 (102)
用VSP资料反演地层吸收系数的方法研究	
..... 梁光河 何樵登 王德利	(114)
多尺度时变子波反褶积	章 珂 刘永江 (127)
基于小波包分解的地层吸收补偿	李鲲鹏 李衍达 张学工等 (139)
分辨率与子波	张洪昌 (148)
用地面地震资料反演 Q 值的效果研究	梁光河 何樵登 王德利 (165)
基于雅号估计的高分辨率叠加速度分析	陆文凯 张学工 李衍达等 (178)
$K-L$ 变换多次波衰减	王德利 何樵登 李添才 (185)

叠前多次波偏移成像技术研究	王忠仁 何樵登 王德利	(195)
基于反馈模型用迭代反演法衰减多次波	孟庆生 孙建国 何樵登	(202)
图版		(211)

海上地震资料高分辨率 处理技术概论

何 汉 漪

(中海石油研究中心, 河北高碑店, 074000)

摘要 本文从“不叠加处理”、“保护和拓宽低频”和“保真度”等几方面讨论了地震资料高分辨率处理的关键问题。在整个处理流程中, 水平叠加对分辨率的影响最大, 因此在有条件的前提下, 即叠前资料有较高信噪比时, 最好采用不叠加处理方法, 这样可进一步提高分辨率。在地震资料的高分辨率处理中, 不仅要尽量拓宽高频, 而且更应该尽量拓宽低频, 拓宽低频能更有效地提高分辨率, 从而保证了地震资料的高保真度和可解释性。因此, 保护低频在高分辨率处理中是非常重要的。地震资料的保真可分为三个方面: 空间域保真、时间域保真和频率域保真。在地震资料处理中, 三个方面有不同的要求, 空间域要求绝对保真, 时间域只能相对保真, 频率域的保真要求尽量恢复激发子波的频率成分, 包括高频和低频, 以使地震资料能真实地反映地下的地质情况。

一、引 言

随着多源多缆采集技术和大面积三维地震的广泛应用, 四维(时间延迟)地震、海底电缆及海上多波地震技术的日臻成熟, 三维地震可视化解释和油藏描述技术的蓬勃发展, 地震勘探技术对海洋石油的作用越来越重要, 应用范围越来越广, 解决地质问题的能力越来越强。从地震勘探技术本身来说, 已基本摆脱了为提高地震资料信噪比而艰苦奋斗的尴尬局面, 转而向更精确的偏移归位、更高的分辨率、更好的保真度、更直接的油气探测(包括直接找油和开发地震)发展。在这一发展的大趋势中, 提高地震资料的分辨率是地震技术发展的最基础的条件之一。因此, 海上地震资料的高分辨率处理应作为一个重要的研究课题提到议事日程。

高分辨率地震剖面要求具有较高的信噪比, 同时要求有较好的可解释性,

即延续相位少、波组特征突出，要求能正确的反演。要达到上述要求，关键是使地震资料具有较宽的频谱并有足够的低频分量。高分辨率地震资料突出的特点是其振幅谱的频带比较宽。从本质上讲，提高地震资料的分辨率，不仅仅是提高了地震资料分辨薄地层的能力，而是提高了地震资料的信息量。三维地震增加了时空域的信息量，高分辨率地震则增加了频率域的信息量。频率域信息量的增加，对地震资料的真实性、可解释性和正确的地震反演都是非常重要的。

对地震资料的高分辨率处理思路和几个关键问题，讨论如下。

二、不叠加处理

1. 影响分辨率的主要因素

经过对采集设备和采集技术的研究，可得到了 10 ~ 100 Hz 频宽甚至频率更高的原始记录，在处理中，能否将频率进一步提高？还是将频率降低？实践告诉我们，室内处理常常是提高了信噪比而降低了分辨率。为了查清谁是降低分辨率的“罪魁祸首”，我们按常规处理流程，每完成一步处理就做一次频谱分析，结果证明水平叠加大大削弱了地震资料的高频成分，是降低分辨率的主要环节。

图 1 是处理流程中地震波高截止频率变化图，从图中可看出，叠加、去噪、偏移都是降低分辨率的，而反褶积、子波处理、谱白化则都是提高分辨率的；其中，对分辨率影响最大的是叠加。高截止频率 120 Hz 的道集记录，叠加后高截止频率降低到 56 Hz，损失了一半以上的信息；另一方面也可看到，叠加是削弱了高频能量，并没有完全去掉，只是降低到 -6 dB 以下，因此叠加后反褶积、偏移后的谱白化还能将高频提起来。

2. 水平叠加的功与过

20 世纪 60 年代发展了水平叠加技术，地震勘探水平有一次飞跃，是一次革命性的进步，它的功绩主要有：

- (1) 压制了随机干扰；
- (2) 削弱了相干噪音；
- (3) 部分压制了多次波；
- (4) 克服地表影响。

因此水平叠加技术增加了原始记录的信息量，随之发展起来的数字处理技术极大地提高了地震资料的信噪比，提高了地震勘探解决地质问题的能力；在此基础上又发展了三维地震技术，在空间域进一步增加了信息量，形成了现代

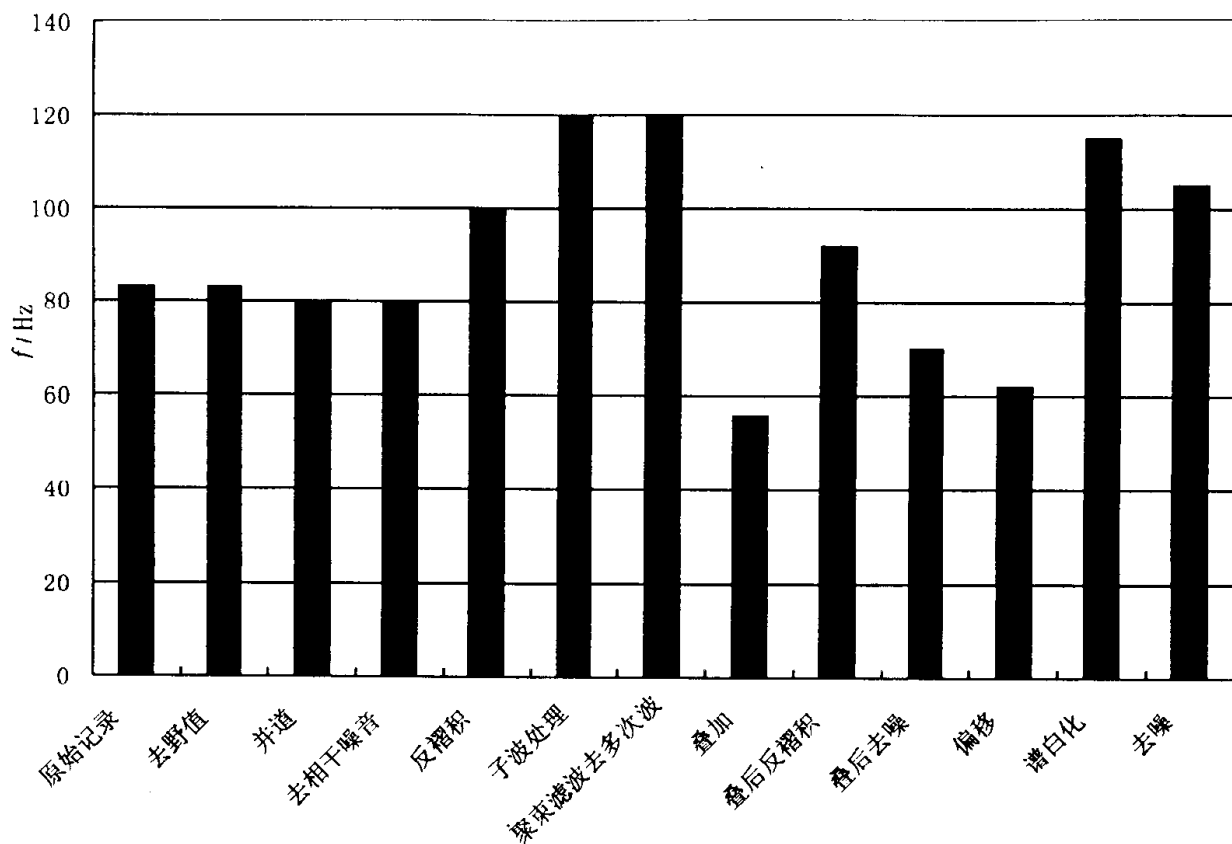


图 1 地震波高截止频率变化图

叠加、去噪和偏移都削弱了主频成分，其中叠加最为严重。叠加后，60 Hz 以上的高频成分都被削弱到 -6 dB 以下

的油气地震勘探技术，并使之成为油气勘探，特别是海上油气勘探的主要技术手段。

但是，水平叠加也有它的负面影响，一是削弱了地震资料的高频信息，降低了地震分辨率；二是模糊了地震振幅随偏移距变化的信息（即 AVO 信息）。造成这些负面影响的原因如下。

（1）动校正精度影响

动校正精度取决于速度分析精度，叠加速度又受多种因素影响，速度分析时的扫描间隔、地层的非水平性、采样率的影响、忽略动校正公式的高次项等都会影响动校正的精度。动校正精度低，叠加时必将削弱高频成分。

（2）共中心点不是共反射点

目前常规处理还是基于共中心点叠加，但当地层不是水平时，只有共中心点而没有共反射点，这时，同一共中心点道集上的反射点散布在一个面元内，叠加在一起当然要压制部分高频成分。当然，现在发展了叠前偏移技术解决了这一问题。

（3）动校正拉伸

假设一个反射波周期为 T ，波前到达时间为 T_0 ，用简化动校正公式计算，其动校正拉伸量为

$$\delta = \frac{X^2}{2T_0v_s^2} - \frac{X^2}{2(T_0 + T)v_s^2}$$

经整理后可得：

$$\delta = \frac{\Delta t}{T_0} \cdot T$$

拉伸量与周期之比，即为拉伸的百分比 K ：

$$K = \frac{\Delta t}{T_0} \times 100\%$$

式中， Δt 为动校正量。

图 2 为子波动校拉伸百分比图，图中三条曲线分别为 $T_0 = 1.0$ s, $v_s = 2200$ m/s; $T_0 = 1.5$ s, $v_s = 2700$ m/s; $T_0 = 2.0$ 秒, $v_s = 3200$ m/s 时的曲线，可看出，在最大偏移距 3200 m 的情况下，当 T_0 较小时，拉伸达到 100%，即子波周期增大一倍，频率则降低一半。随着 T_0 增大，拉伸逐渐减小， T_0 达到 2s 时，拉伸也超过了 10%。说明动校拉伸的影响还是很大的，特别是对浅层的反射影响更大。

由于上述原因和其他的影响因数，水平叠加总是降低了分辨率，对于常规地震资料来说，影响是不大的，但高分辨率地震资料含有较丰富的高频成分，因此很容易受到水平叠加的影响；如频率 60 Hz 的两个子波相加，如时差达到 2 ms (1/8 周期)，叠加的结果就很差了，而 2 ms 的误差在实际处理中是很容易出现的。

3. 不叠加或少道叠加处理流程

既然叠加是处理过程中降低分辨率的主要原因，能否不叠加而达到既有较高信噪比又有较高分辨率的目的？或者退而求其次，采用较少的叠加次数？要实现不叠加处理，必须具备以下条件。

(1) 资料本身具有较高的信噪比

叠加的主要目的是提高地震资料的信噪比，还有许多处理方法也可提高信噪比；但除叠加以外，其他方法提高信噪比的能力是有限的。因此地震原始资料本身具有较高信噪比是实现不叠加处理的前提条件。幸运的是，海上地震资料一般都具有较高的信噪比，其主要噪音是水波、直达波、浅层折射波等相干噪音，只要有办法在叠加前消除这些噪音，就能得到较高信噪比的资料。

(2) 具有叠前去噪的处理手段

如前所述，海上地震原始资料的主要噪音是相干噪音，叠前消除这些噪音

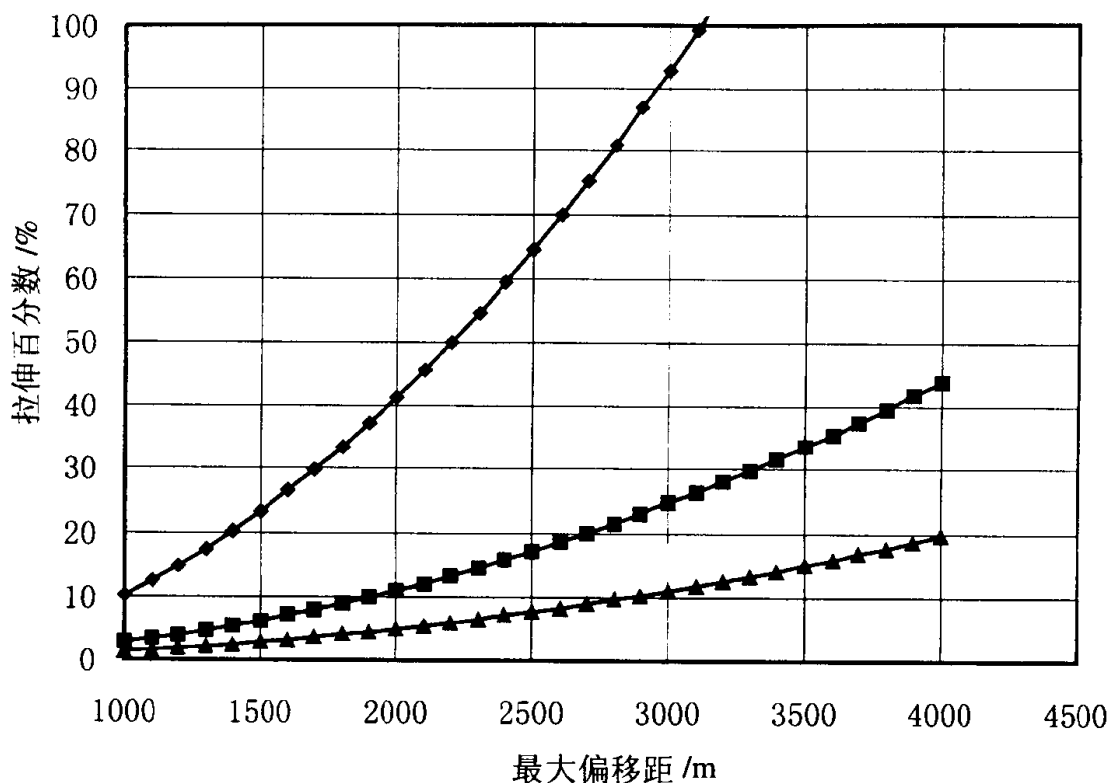


图2 子波动校拉伸百分比图
相对动校拉伸量随偏移距增大

是提高信噪比的主要途径之一。本书中介绍了几种消除相干噪音的方法，能有效地消除海上地震资料的相干噪音。

(3) 叠前去多次波

多次波是海上地震的最主要的干扰波，其中短周期多次波即海底鸣震，预测反褶积是比较成熟的消除海底鸣震的处理方法。而长周期多次波，特别是海水较深时的海底多次波，是一种较强的干扰波。目前所有的去长周期多次波的方法，如 $F-K$ 滤波、二维滤波、Radon 滤波， $\tau-p$ 域反褶积都是时差滤波法，利用多次波与一次波的速度差异而产生的动校剩余时差的特点把他们分离开来，这对于有较大时差的远偏移距道效果较好，但对于剩余时差较小的近偏移距，多次波和一次波却难于分离。而且，正是这些近偏移距道的多次波，不论是道集上还是叠加剖面上，都是难以识别的，它们或者与有效波叠加在一起，影响有效波振幅的真实性；或者作为一个独立的同相轴出现，造成解释的假象，同时这些方法还在一定程度上损伤了有效信号。基于模型的方法，需要预先知道地下模型，而且此类方法的计算量相当大。本书中介绍的聚束滤波叠前去多次波方法是一种较好的去多次波方法，它能较彻底地消除多次波包括近偏移距道的多次波，且对波组特征、分辨率等都无影响。

(4) T_0 道拟合技术

既然不叠加，则没有叠加后的 T_0 道；如何得到 T_0 道？拟合是惟一可采用的方法。拟合方法很多，如多项式拟合、剔除法拟合等。本书中介绍的时频域 T_0 道拟合是较好的，该方法不但能保留较多的高频成分，而且具有较高的信噪比，是实现“不叠加”处理流程必不可少的处理模块。

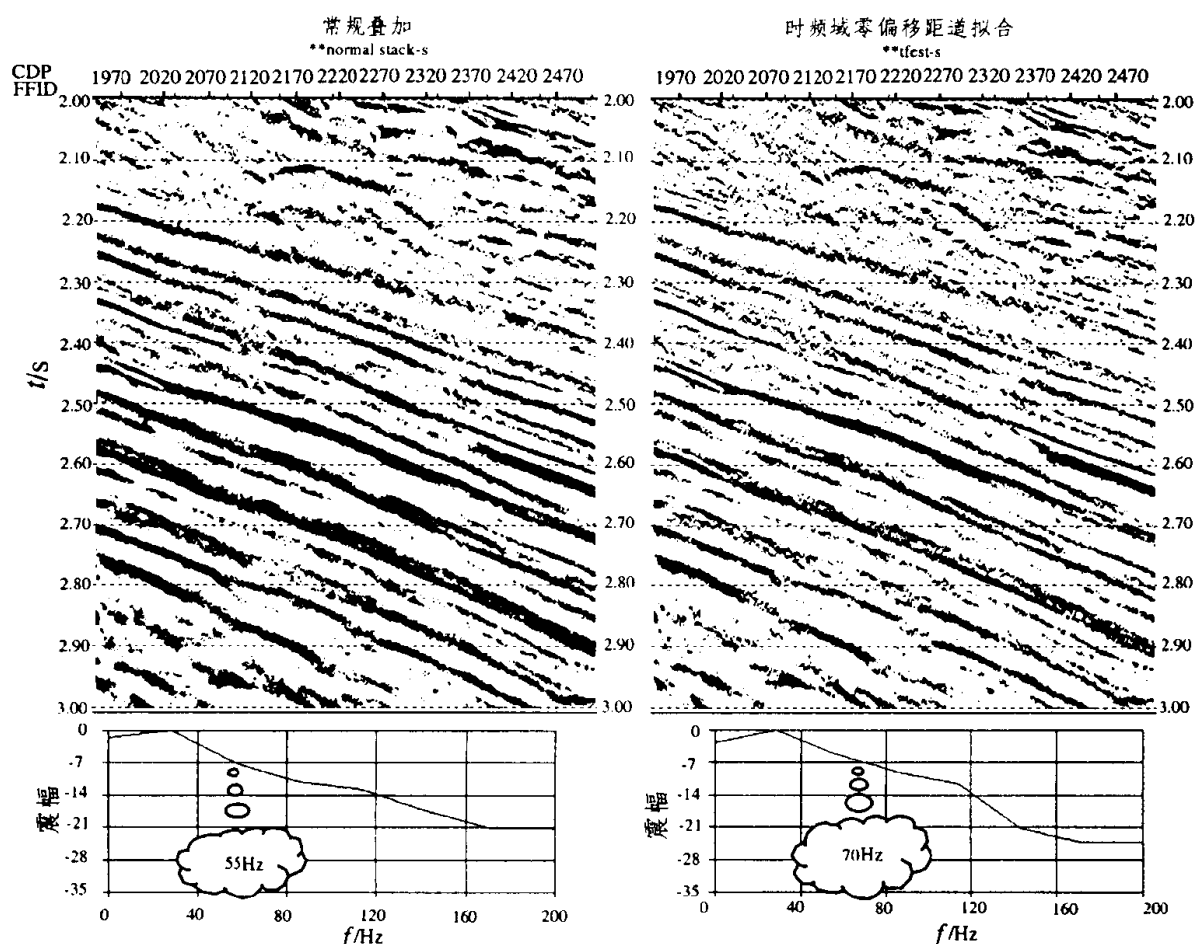


图3 常规叠加剖面及其频谱和时频域零偏移距道拟合剖面及其频谱

采用不叠加处理方法确实能提高分辨率，如图3是常规叠加剖面及其频谱和时频域零偏移距地震道拟合剖面及其频谱。拟合剖面的频率明显高于常规叠加。在没有足够高的信噪比的情况下，采用少道叠加方法也能得到较好效果，如图4是近道15道叠加的结果及其频谱和全部60道叠加的结果及频谱。从图4分析对比可见，对于低频信号，两者差别不大，如实线箭头所示；对于高频信号，两者差别较大，左图中复合波明显分开（如虚线箭头所示），而右图则不能分开，是分辨率较低的表现。

不叠加或少道叠加处理方法在一定程度上是可以减少高频成分的损失，提高地震资料高分辨率处理的效果，是高分辨率处理方法研究的方向。

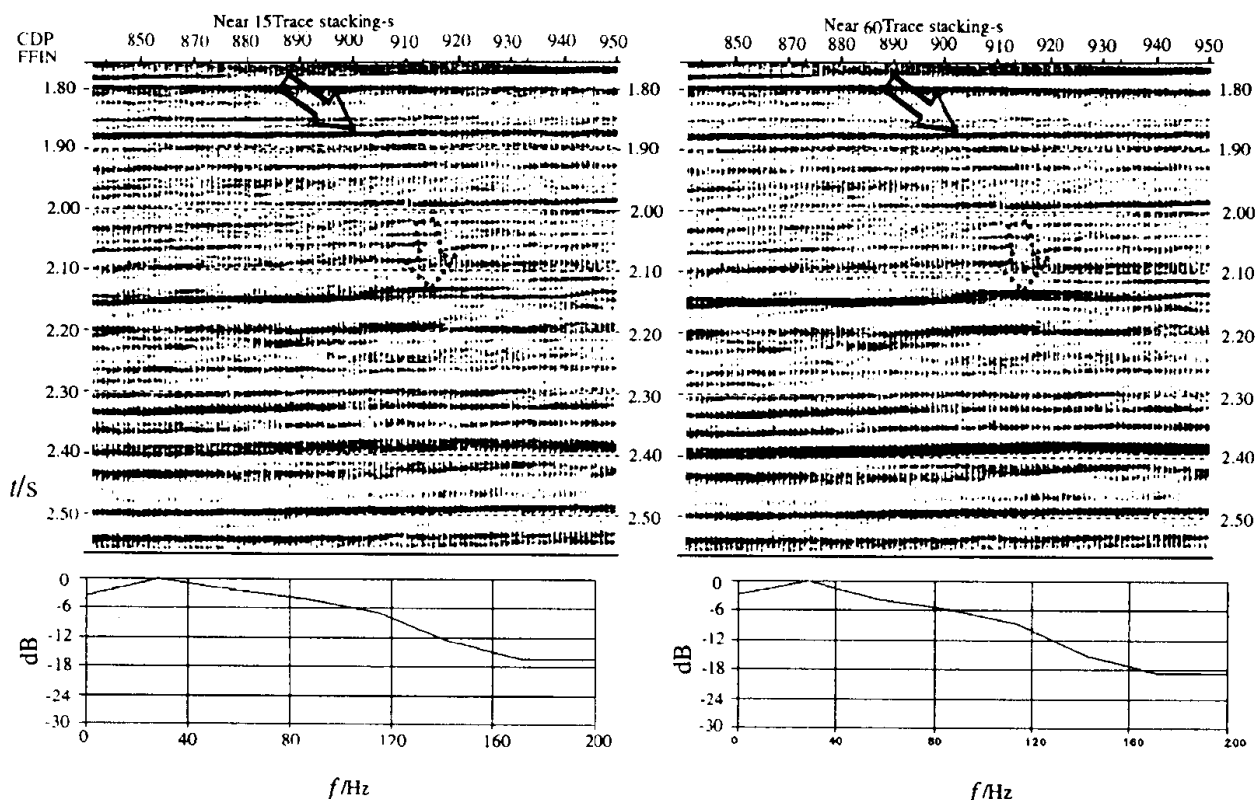


图4 近道 15 道的叠加剖面及其频谱 (左) 和全部 60 道的叠加剖面及其频谱 (右)

三、保护和拓宽低频

1. 衡量分辨率的两个参数

(1) 子波包络主峰值的宽度

对分辨率的经典定义是 Widess 提出的, 他以地震子波的主极值的能量 Am^2 与子波总能量 E 之比定义分辨率 P , 即

$$P = \frac{Am^2}{E} \quad (1)$$

高分辨率地震要求地震子波的能量尽量集中在主极值上, 能量愈集中, 则子波主极值愈尖锐, 分辨率就高; 反之, 如能量分散在几个极值上, 分辨率自然就低。 P 值在 0~1 之间变化, 最大为 1, 最小为 0。

地震子波经过各种客观存在的, 如大地滤波、海上的鬼波滤波和人为设置的滤波后, 基本上都是带通子波; 因此可以零相位带通子波来研究分辨率问题; 之所以用零相位子波, 一方面是因为零相位子波具有最好的分辨率, 另一方面也为了计算方便。设 f_1 、 f_2 分别为带通子波的低、高截止频率, 则其零相位子波为:

$$A(t) = \frac{1}{\pi t} (\sin 2\pi f_2 t - \sin 2\pi f_1 t) \quad (2)$$

则地震子波的分辨能力^[1]

$$P = 2(f_2 - f_1) \quad (3)$$

从式 (3) 可看出, 分辨率的大小取决于地震子波的频宽 $f_2 - f_1$, 频谱越宽, 分辨率越高, 频谱越窄, 分辨率越低。细心的读者可能已看出, 这里, P 不再是 0~1 的概念了, 而已经把 0~1 的能量比值转换成通过常规的手段可以测算的频带宽度了。

而零相位带通子波的振幅包络为:

$$B(t) = \frac{2}{\pi t} \sin\left(2\pi \frac{f_2 - f_1}{2} t\right) \quad (4)$$

从上式即可看出, 零相位带通子波的包络的频率, 其周期就是包络主极值的宽度

$$W = \frac{2}{f_2 - f_1} \quad (5)$$

地震分辨率实际取决于地震子波包络主极值的周期, 或者说主极值的宽度, 据此, 可直接计算出可分辨地层的时间厚度, 单位是秒。

如以子波包络主极值宽度的四分之一定义可分辨的地层时间厚度, 比较式 (4) 和式 (5), 可看出:

$$\frac{W}{4} = \frac{f_2 - f_1}{2} = \frac{1}{P}$$

即分辨率 P 的倒数就是可分辨地层的时间厚度。

(2) 包络主极值内的子波周期数

从上述讨论可知, 频宽是决定地震分辨率的主要因素, 但绝不是全部, 真正的高分辨率地震, 不仅要求较宽的频谱, 而且要求有充分的低频成分。

我们先从一个极端的例子说起, 图 5 是 80~160 Hz 和 10~90 Hz 两种情况的零相位子波及其包络, 假设地震子波的频谱为矩形谱, $f_1 = 80$ Hz, $f_2 = 160$ Hz, 频宽 80 Hz, 按上式 (5) 计算, $W = 25$ ms, 应该可分辨双程旅行时为 6 ms 时间厚度的地层; 但实际情况如何?

我们计算了 80~160 Hz 和 10~90 Hz 两种情况的零相位子波及其包络, 为了视觉的原因, 子波取绝对值; 二者的频宽是相等的, 因此包络的主极值宽度是一致的, 都是 25 ms, 应该都能分辨 6 ms 左右时间厚度的地层。但从图 5 中可看出, 频谱为 10~90 Hz, 包络主极值内, 地震子波只有一个主峰, 两边的次极值都很小; 而频谱为 80~160 Hz 时, 虽然频宽、包络主极值宽度都一样, 但包络主极值内, 地震子波除主峰外, 还有 4 个峰值是可供解释的。这里就发生两个问题。第一, 一个反射的地震子波代表一个波阻抗界面, 如图 5 中 80

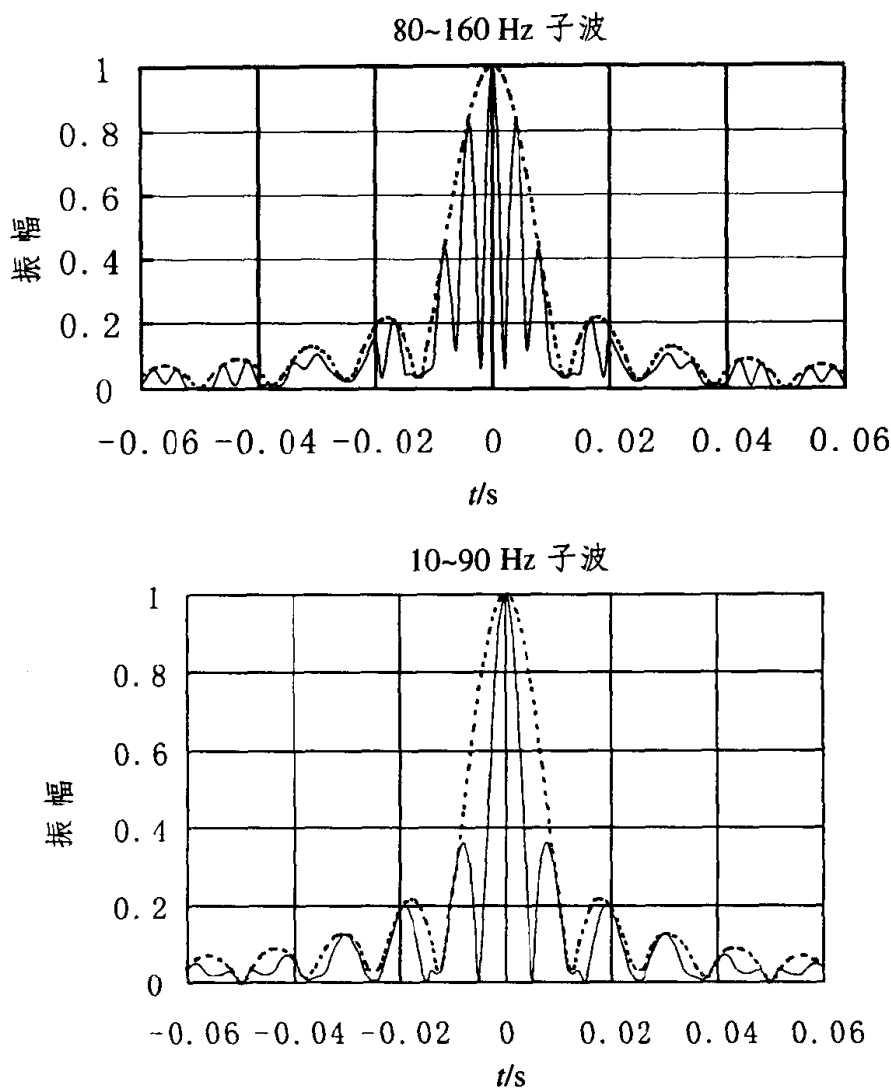


图5 相同频宽、不同低截止频率的带通子波

~160 Hz 的子波有 5 个峰值，应以哪一个为波阻抗界面的代表？如果我们知道这是一个地震子波，当然以最大的峰值为代表，遗憾的是，每一个地震道都是由许许多多个子波叠合而成，我们根本就无法分开每一个单独的子波。这样，在实际解释工作中，就很可能把一个波阻抗界面解释成 3 个甚至 5 个界面，这就是我们常说的假的高分辨率。第二，如果两个波阻抗界面之间的时间厚度等于或小于二分之一一个 w ，这两个子波的边峰值必定会叠加，二者互相影响，所得到的地震波都是被改造过的，不可能正确反映地下地质情况。

为了保证包络主极值内地震子波的周期个数，可引进一个新的概念；从式 (2) 可看出，带通零相位子波的周期为 $\frac{1}{f_2 + f_1}$ ，而子波包络主极值宽度为 $\frac{2}{f_2 - f_1}$ ，二者相除，即为包络主极值内子波周期数，即：

$$N_c = \frac{f_2 + f_1}{f_2 - f_1} \quad (6)$$

将上式做一定的转换，可得到：

$$N_c = 1 + \frac{2f_1}{\Delta f} \quad (7)$$

式中， Δf 为频宽。从式 (7) 可看出：

(1) 包络主极值内，子波周期数总是大于 1；

(2) 子波周期数与带通子波的低截止频率成正比，低截止频率越高，则包络主极值内子波周期数越多，越易造成地质解释的假象。一般情况下，高分辨率地震要求 N_c 小于 1.5。

综上所述，从提高地震勘探的地质效果出发，控制地震分辨率的参数应有两个：一是地震子波包络主极值的宽度 W ，二是包络主极值内子波的周期数，二者缺一不可。而这两个参数则与频宽和低截止频率有关。真正的高分辨率不仅要求地震子波有较宽的频谱，而且要求地震子波的低截止频率足够低，如地震子波缺乏低频成分，则地震子波的周期数增多，造成地质解释的假象，是假高分辨率。

2. 拓宽低频更有效

综上所述，保护低频是保证地震资料真实性的必要条件，资料处理中应该尽量拓宽低频，拓宽低频能有效地提高分辨率。

拓宽低频能提高分辨率吗？请看理论计算情况：假设高截止频率为 80 Hz，低截止频率分别为 30 Hz、20 Hz、10 Hz 时分辨率的情况如下表：

低截止频率/Hz	30	20	10
包络主极值宽度/ms	40	33	28.6
地震子波周期数	2.2	1.7	1.3
可分辨的时间厚度/ms	10	8.3	7.2
相对频宽/ K	1.4	2	3

另假设低截止频率不变，提高高截止频率，其效果如下表：

高截止频率/Hz	80	90	100
包络主极值宽度/ms	33	29	25
地震子波周期数	1.7	1.6	1.5
可分辨的时间厚度/ms	8.3	7.2	6.3
相对频宽/ K	2	2.2	2.4