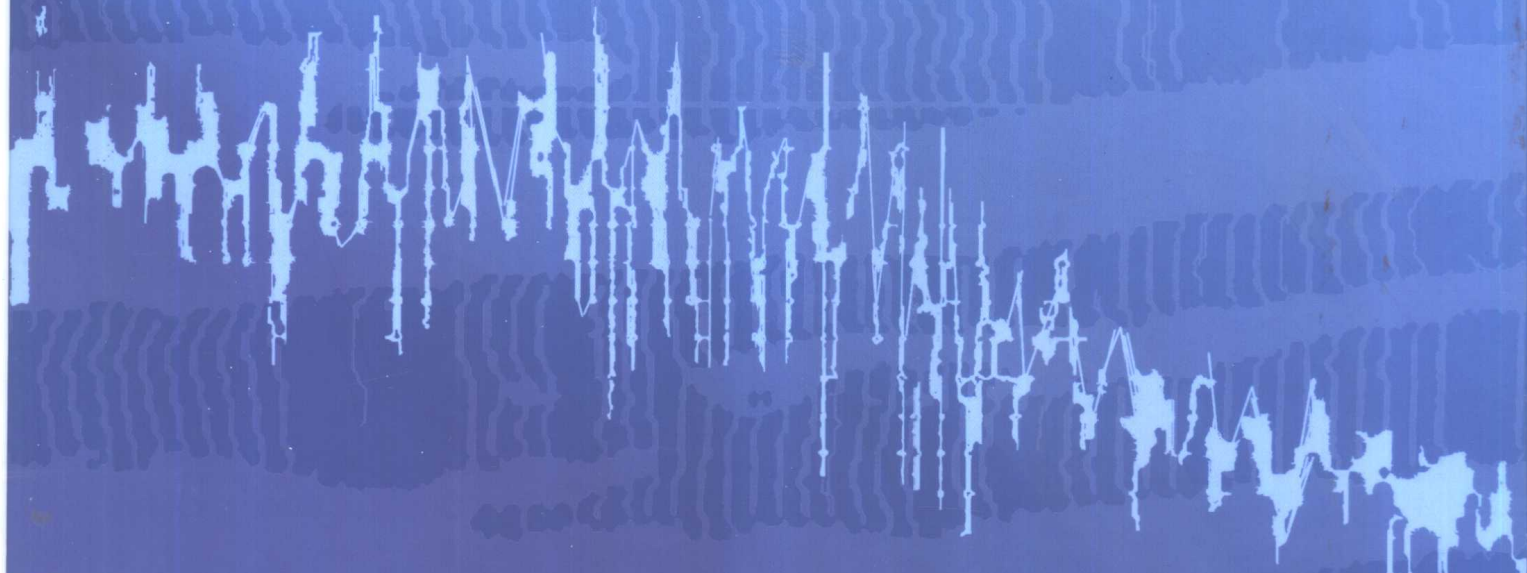


海上高分辨率 地震技术 及其应用

何汉漪 著



地质出版社

海上高分辨率地震技术及其应用

何汉漪 著

地质出版社

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是在国家“八六三”计划“海上中深层高分辨率地震勘探技术”课题研究成果的基础上,结合我国海洋石油地震勘探的实践经验编写的。其中第一章介绍地震分辨率的一般概念,针对实际工作忽略低频的倾向,重点讨论了低频成分在高分辨率地震资料中的重要作用。第二章分析了我国各海域的地震地质条件。第三章重点讨论了气枪震源的工作原理,介绍了高分辨率地震震源——框架式多枪相干组合震源,同时讨论了海上高分辨率地震的主要采集参数。在第四章中,作者提出了“基于不叠加的处理方法”,阐述了叠加提高信噪比的功能及其降低分辨率的局限性和实现不叠加处理的资料条件与技术条件;同时本章还讨论了采样率、保真度等地震资料处理中的一些基本问题。第五章介绍了高分辨率地震在莺歌海盆地天然气勘探中的应用及其在南海一个礁油藏开发中的应用情况。

图书在版编目(CIP)数据

海上高分辨率地震技术及其应用/何汉漪著.-北京:地质出版社,2001.7
ISBN 7-116-03422-6

I.海… II.何… III.高分辨率-海洋物探:地震勘探 IV.P631.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第034133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: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经销

开本:787×1092 1/16 印张:7.75 彩色图版:6页 字数:189000

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:30.00元

ISBN 7-116-03422-6
P·2194

(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)

作者的话

高分辨率地震是提高地震勘探地质效果的有效手段之一，因此从“六五”时期开始，我国就正式立项研究高分辨率地震技术。海上高分辨率地震是 20 世纪 90 年代初开始立项研究的，“九五”期间又得到国家“八六三”计划的资助，成为“八六三”计划重大项目的课题之一。在项目研究和海洋油气勘探实践中，我深深地体会到，高分辨率地震从频率域将地震信息量增加了一倍，确实是提高地震勘探地质效果的有效手段。同时我也发现，在应用高分辨率地震技术时，还存在着一些缺陷或误解，导致应用效果不佳甚至出现一些假象。因此早就计划写一本小册子，一方面推介高分辨率地震技术，同时对一些不正确的做法作一些纠正。由于时间关系，一直未能完成。为了应急，曾写了一篇短文——高分辨率地震的优势与误区，发表在《海上油气》上。直到今天，书稿才匆匆成文，但还很不成熟，难免有谬误之处。

在项目研究过程中，徐光周、邵启群、安有利、温书亮等先生在采集技术研究方面，温书亮、张学工、胡天跃等先生在资料处理方面作出了重大贡献，龚再升先生、刘光鼎先生、李庆忠先生、马在田先生等给予研究工作以极大的关怀和帮助。王云峰先生撰写了“地震采集技术”初稿，本书第三章就是在此基础上编写的；宗国强、温书亮、王蓓、季佑仙等人在本书出版中给予了无私的帮助；在此一并表示衷心的感谢。

序

第一次世界大战后，地震勘探技术开始应用于石油勘探。几十年来，地震勘探技术飞速发展：从光点记录到数字磁带记录；从折射波法到反射波法；从单点地震到三维地震以至于四维地震；从“一炮定终身”的无处理地震到大规模的数字处理；从手画剖面到人机交互的可视化解释；从单一的纵波地震（声波方程）到多波地震（弹性波方程）。可以说，地震技术已经历了脱胎换骨的变化。

几十年的技术发展，始终围绕着提高地震资料的“含金量”（地震资料的有效信息量），提高勘探效果这一永恒的主题。早期，地球物理学家们为提高信噪比而奋斗，就是为了把有效信息从噪音中解放出来。直到多次覆盖技术和数字处理技术的广泛应用，与噪音的斗争才取得了决定性的胜利。大面积三维地震的应用，把原来以千米计的测网，加密到几十米间距的三维地震，有效信息量猛增，产生了从量变到质变的效果；四维地震又增加了随时间变化的动态信息，多波地震增加了横波和转换波的信息，使地震技术从油气勘探走向油气开发，从构造勘探走向岩性勘探，也使地震技术成为石油勘探开发的技术支柱。

这样，地震技术似乎已达到了登峰造极的地步。要进一步提高地震技术的地质效果，应向什么方向发展？答案是：高分辨率地震！在这一方面，中国的地球物理学家们捷足先登了。从“六五”时期开始，陆地已开展高分辨率地震研究；海上高分辨率地震虽然起步较晚，但进步很快，已经达到相当高的水平。遗憾的是西方的地球物理学家们尚未看到高分辨率地震的突出效果，尚未给予足够的重视。

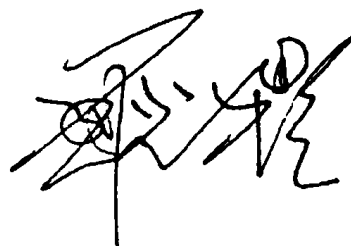
从本质上讲，高分辨率地震之所以有那么好的地质效果，是因为增加了地震资料的有效信息量；三维地震增加了空间域的信息量；高分辨率地震则是在频率域增加了信息量。海洋石油总公司何汉漪等人研究的高分辨率地震技术，将地震资料的频谱从 10 ~ 50 Hz 左右增加到 10 ~ 100 Hz，勘探深度达到双程旅行时 2.7 ~ 3.0 s；频率域的信息量增加了一倍多，其地质效果好也就不足为怪了。

海上高分辨率地震是国家“八六三”计划资助的研究项目，本书就是该项

目研究成果较全面的总结，也是作者长期实际工作经验的总结。其中分析了海上地震地质条件，论述了海上地震采集技术对地震分辨率的影响，重点介绍了海上高分辨率地震震源——框架式多枪相干组合震源。在资料处理方面，作者虽然提出了基于不叠加的处理思路，强调指出叠加是提高信噪比的强有力的处理手段，同时又是降低分辨率的处理过程，为此，在解决信噪比问题，特别是叠前去多次波问题的前提下，采用不叠加的处理方法，能在最大限度上提高地震资料的分辨率。作者虽然未在本书中论及具体的处理技术，但这一“返璞归真”的思想，是值得地球物理学家们重视的。最后一章介绍的海上高分辨率地震应用实例，是作者实践工作的经验总结。本书可作为地震勘探技术人员的技术指导书，也可作为相关专业学生的参考书。

海上地震勘探技术在我国已有 30 多年的应用历史了，它随着我国海洋油气工业的发展而进步，积累了丰富的经验，具世界先进水平。作为一名长期从事海洋勘探的老地球物理工作者，我非常高兴地看到《海上高分辨率地震及其应用》一书的出版。祝愿海上高分辨率地震技术进一步完善，为发展我国海洋石油工业作出更大的贡献；希望海上高分辨率地震技术能走出国门，走向世界。

中国科学院院士

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, interconnected strokes. The signature is written in a cursive style, typical of Chinese calligraphy or personal signatures.

2000 年 12 月 20 日



ISBN 7-116-03422-6



9 787116 034228 >

ISBN 7-116-03422-6

P · 2194 定价: 30.00元



目 录

序

第一章 关于高分辨率地震的讨论	(1)
一、从油气勘探的角度看地震分辨率	(1)
二、地震分辨率的概念	(6)
三、关于低频成分	(10)
四、关于中心频率、主频、视频	(17)
五、分辨率与信噪比	(20)
第二章 海上地震地质条件分析	(22)
一、海水层与低、降速带——陆地与海洋比较	(22)
二、海上地震噪音分析	(23)
三、大地滤波作用	(27)
四、中国近海部分沉积盆地地震地质条件	(44)
第三章 高分辨率地震采集技术	(52)
一、概述	(52)
二、空气枪及单枪激发子波	(54)
三、组合气枪震源	(58)
四、震源子波测试	(65)
五、高分辨率地震震源	(69)
六、海上地震勘探记录系统	(77)
七、高分辨率地震采集参数	(80)
八、海上高分辨率地震采集的质量控制	(88)
第四章 海上地震资料高分辨率处理概论	(91)
一、影响分辨率的主要因素	(91)
二、不叠加或少道叠加处理流程	(94)
三、保护和拓宽低频	(97)
四、关于保真度的讨论	(98)
五、地震资料成果剖面的评价标准	(99)
第五章 海上高分辨率地震应用实例	(103)
一、莺歌海浅层天然气勘探	(104)
二、高分辨率地震在 LH11-1 油田开发中的应用	(116)
图版	(119)

第一章 关于高分辨率地震的讨论

对于高分辨率地震，已有不少专家学者论述过。国内代表作有李庆忠院士的《走向精确勘探的道路》、俞寿朋先生的《高分辨率地震勘探》；国外如 Widess、Rayleigh、Ricker 等著名学者，早在 20 世纪 50 年代就对地震分辨率的问题做过详尽的讨论。因此，对地震分辨率的问题，没有必要再做详细论述，这里仅就实际工作中碰到的一些问题加以阐述。

一、从油气勘探的角度看地震分辨率

俞寿朋先生在其专著《高分辨率地震勘探》中，定义“分辨率是指分离两个十分靠近的物体的能力”；Widess 等用地震子波主极值能量，或用地震子波的频宽等来具体定义地震的分辨率。这都是从物理意义上定义地震分辨率，无疑是正确的。

高分辨率地震的意义远远不限于分辨两个相邻的物体，而是为油气勘探提供更多的、更精细的地质信息。因此，对油气勘探而言，地震分辨率是指精细而且正确反映地下地质情况的能力；这种分辨能力是通过地震波同相轴的分离、组合、延伸、相互接触关系、振幅、频率变化而表现出对地下多个（不仅是两个）地质体的地层及其之间的关系、沉积相、岩性、含油气性等对油气勘探至关重要的地质信息。因此，地震分辨率不仅仅是一个纯物理概念，而是一个地球物理概念，也就是一个地质加物理的概念，对于石油地球物理来说，从油气勘探的角度讨论地震分辨率的问题是必要的。

高分辨率地震是提高勘探效果的有效途径。如前所述，高分辨率地震不仅提高了分辨相邻地质体的能力，更重要的是提供了更丰富、更精细的地质信息，因此高分辨率地震是提高地震勘探效果的最有效的途径。根据多年来的工作经验，高分辨率地震的优越性主要表现在以下方面。

(1) 精细的构造解释 由于分辨率的提高，地震剖面更清晰，小断层、小幅度构造、水道等细微的地质现象都表现出来了，有利于精细的构造解释，

如莺歌海盆地 LT31-2 构造，就是应用高分辨率地震后在地层上倾方向发现一条深切谷，形成上倾方向的封闭，侵蚀面与地层界面共同形成一个背斜圈闭（见图 1-1）；在南海东部，曾应用高分辨率地震寻找小幅度背斜，取得很好的效果；江汉^[1]、苏北^[2]也应用高分辨率地震解决了小断层、小断块以至砂岩体的问题。

（2）含气层的直接标志——亮点和平点 当砂、泥岩的阻抗差别不大时，含气层顶面将有亮点出现，而气水界面处则应有平点；但由于气层顶面与气水界面之间的距离一般都很小，特别是地层倾角较小时，常规地震是很难分辨的。地震分辨率提高后，就有可能同时得到亮点和平点反射。众所周知，仅凭亮点是很难确定气层的，因为造成亮点的原因很多，也可能是含气造成的，也可能是岩性变化造成的。但如果同时有亮点和平点，则含气的可能性就很大，是比较可靠的含气直接标志。海洋石油总公司应用亮点加平点的直接标志^[3]，在莺歌海盆地勘探天然气时，钻探 4 个构造，成功率达 100%，并应用平点圈定气田的含气范围，确定气水界面，有效地减少了评价井数量，获得巨大的成功；这些将在实例部分详细介绍。

（3）层序地层学及沉积相研究 由于分辨率的提高，一些原来复合的波分离了，原来很弱的波组加强了，反射同相轴也增多了，因而更清晰地表现了上超、下超等地层接触关系，层序界面之间的内部反射结构也更清楚，有利于层序地层学的精细解释和沉积相分析。如图 1-2 所示，高分辨率地震剖面上，上覆地层层层上超非常清楚，水道、前积的斜坡扇及其之间的关系也很清楚；而这些在常规地震剖面上是很难看出来的。大庆油田物探公司^[4]通过岩心观察、测井资料的微相解释，对比分析高分辨率地震资料，发现高分辨率地震剖面上那些不规则的杂乱同相轴多数是地下沉积微相的反映，总结出一套根据高分辨率地震剖面同相轴的反射特征划分油层沉积微相的方法，取得较好的地质效果。

（4）岩性预测 根据地震资料预测岩性，寻找砂岩储层，是石油地震勘探的重要任务之一。预测砂岩储层的途径有以下两个。

一是根据沉积相的分析，根据层内部反射结构分析，判断岩性。如上所述，因高分辨率地震资料能够得到更丰富的地质信息，更有利于沉积相分析，同时，高分辨率地震能得到常规地震不易得到的内部反射，所以能更有效地判断砂岩储层。如琼东南盆地某构造，目的层埋深近 5000 m，如图 1-3 所示，常规地震剖面上目的层同相轴是一强反射，难以判断是否存在砂岩储层；而经高分辨率处理后，除储层顶面的强反射外，还可见叠瓦状的内部反射，据此可判断强反射是一套砂岩储层的顶面反射。后钻井证实了这一点。

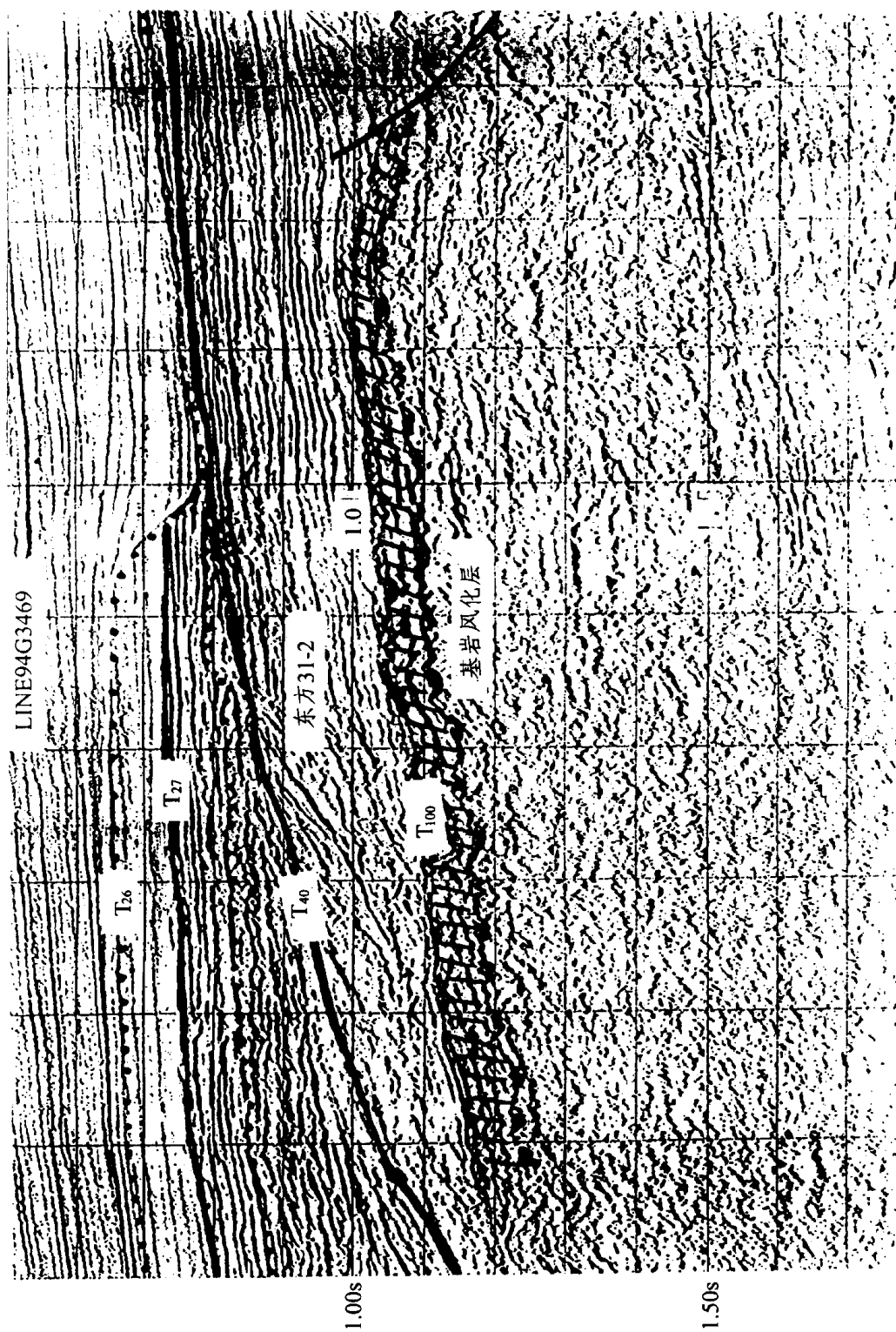
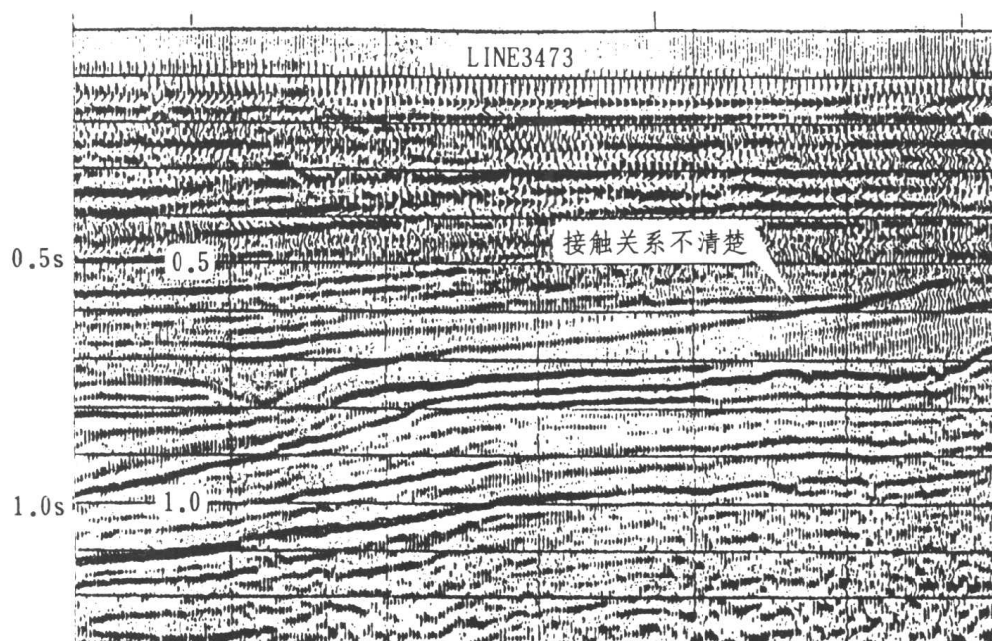
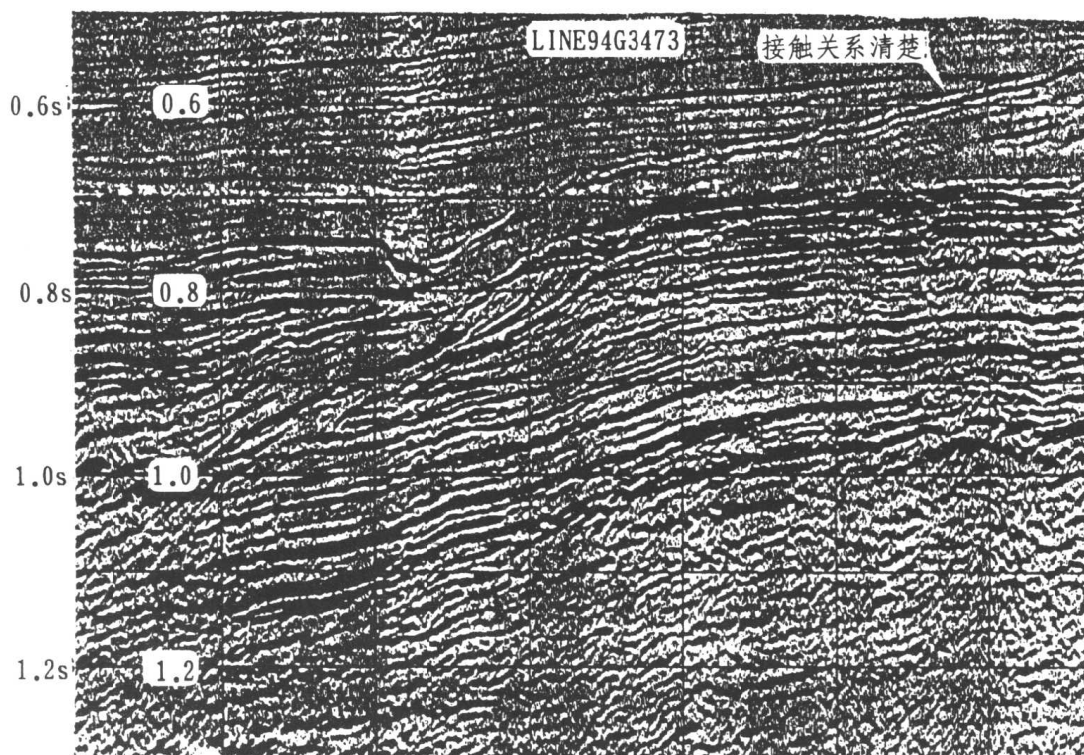


图 1-1 高分辨率地震清晰地显示了水道冲蚀, 形成 LT31-2 构造



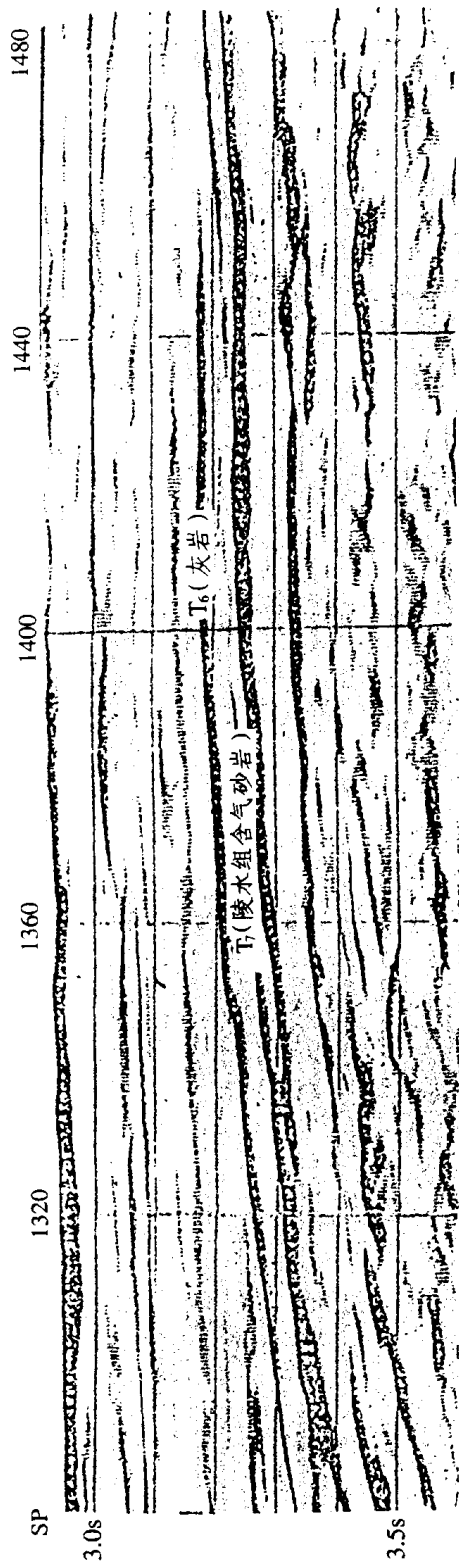
莺歌海盆地常规地震剖面



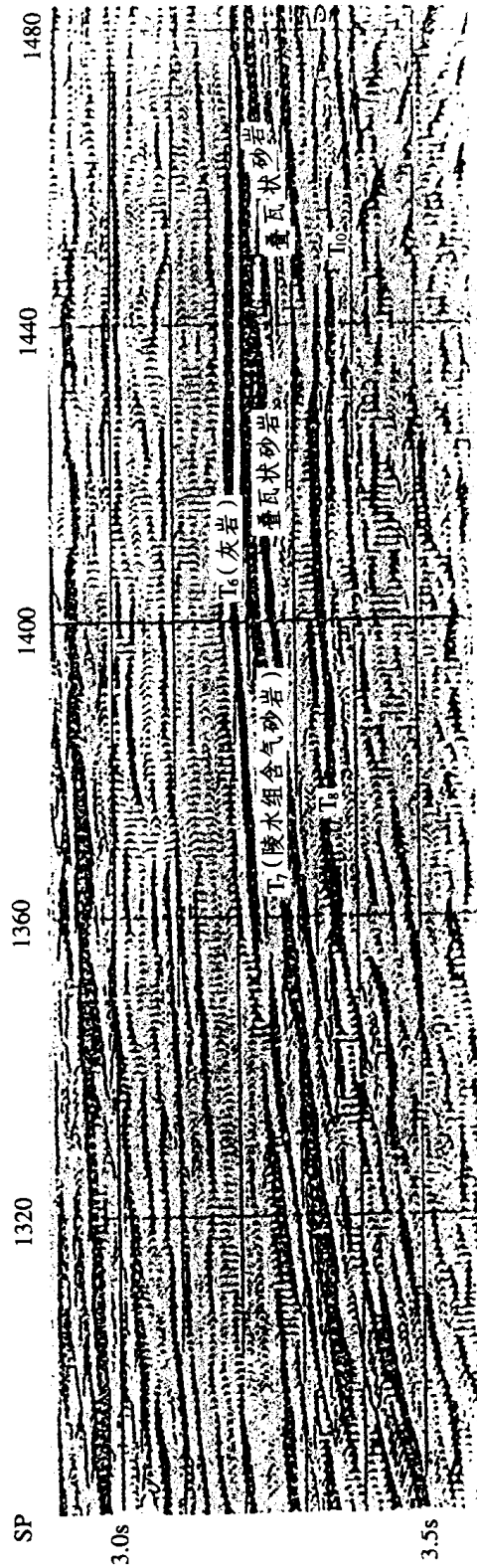
上图剖面同一位置的高分辨率剖面

图 1-2 常规地震剖面与高分辨率地震剖面对比

高分辨率地震提供了更丰富的地质信息，如上超、水道下方的加积、深层内部反射结构等，都是常规地震剖面无法相比的



常规地震剖面, T₇ 强反射下为空白



高分辨率处理后, T₇ 以下叠瓦状反射清楚

图 1-3 高分辨率地震表现了内部反射结构, 有利于推断岩性

岩性预测的方法之二是根据反射特征属性参数如瞬时振幅、瞬时频率、瞬时相位等，或根据反演剖面的波阻抗特征来判断岩性，在有井标定的情况下，应用反演的波阻抗剖面判断岩性是比较准确的。问题是：反演的结果可靠吗？这就引申出下一个问题。

(5) 正确的反演 正确反演的先决条件是地震子波有足够宽的频谱，且高频、低频齐全；对于这个问题，在讨论分辨率的时候，还将要重点论述。高分辨率地震正是具有频谱宽、频率成分齐全的优点，因此是能够正确反演的，无论是岩性预测，还是油气田的评价、油藏描述，正确的反演无疑都是极其重要的。

这一节费了大量的笔墨，大讲高分辨率地震在石油勘探中的作用，要说明的就是：高分辨率地震是为了石油勘探，要从石油勘探的角度讨论分辨率的问题。

二、地震分辨率的概念

对地震分辨率概念的认识，大的方面是统一的，公认的是：垂向分辨率应该用地震子波的时间延续度来定义^[5]，即地震分辨率取决于地震子波包络的周期，而不是子波本身的周期。但在实际工作中，仍有一些不同的看法，有些问题还是非常重要的。如有的认为分辨率与中心频率无关^[6]，有的人则认为高分辨率要求较高的中心频率^[7]。因此，有必要对分辨率概念中的几个问题，从石油勘探的角度加以讨论。

1. 频宽是决定分辨率的主要因素

对分辨率的经典的定义是 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：

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

这就是说，要求地震子波的能量主要集中在主极值上，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；因此可以用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：

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

则地震子波的分辨能力

$$P = 2(f_2 - f_1) \quad (1-3)$$

从式 (1-3) 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:

$$B(t) = \left| \frac{2}{\pi t} \sin(2\pi \frac{f_2 - f_1}{2} t) \right| \quad (1-4)$$

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

$$W = \frac{2}{f_2 - f_1} \quad (1-5)$$

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。

至于实际可分辨的时间厚度是取 W 的 $\frac{1}{4}$, 还是取其 $\frac{1}{2}$, 说法不一。这在很大程度上还取决于地震子波旁瓣值的大小、地质情况和资料的信噪比, 对于稳定的砂、泥岩互层的沉积剖面, 信噪比较高的地震资料, 在子波旁瓣值较小的情况下, 取子波包络主极值的 $1/4$ 周期作为可分辨的地层时间厚度是可行的, 因为包络两侧幅度较小, 即地震子波的旁瓣值较小, 影响不大。

如以子波包络主极值宽度的 $1/4$ 定义可分辨的地层时间厚度, 比较式 (1-3) 和式 (1-5), 可看出:

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

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, 而且也要求充分的低频成分。

我们先从一个极端的例子说起, 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 1-5 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

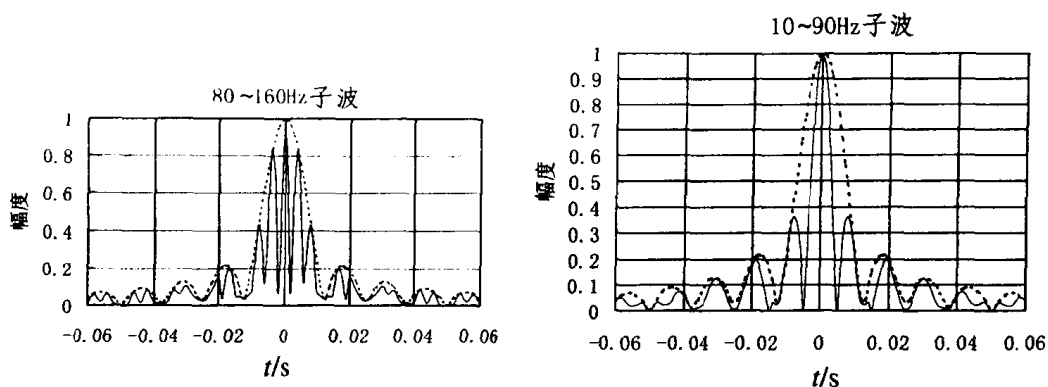


图 1-4 相同频宽、不同频率成分的子波比较

了视觉的原因，子波取绝对值；因为在地震解释中，波谷也是很重要的信息，现代的解释是不能忽略波谷的。从图 1-4 可看出，二者的频宽是相等的，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。但从图中可看出，正常情况下，频谱为 10 ~ 90Hz，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 ~ 160Hz 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。①一个反射的地震子波代表一个波阻抗界面，如图中 80 ~ 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。②如果两个波阻抗界面之间的时间厚度为 $1/2$ 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 (1-2) 可看出，带通零相位子波的周期为 $\frac{2}{f_2 + f_1}$ ，而子波包络主极值宽度为 $\frac{2}{f_2 - f_1}$ ，二者相除，就是包络主极值内子波周期数，即：

$$N_c = \frac{f_2 + f_1}{f_2 - f_1} \quad (1-6)$$

将上式作一定的转换，可得到：

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

其中, Δf 为频宽。从式 (1-7) 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, 一个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。

3. 绝对频宽与相对频宽

前面的讨论所说的频宽都是绝对频宽, 即实际频宽有多少赫兹。如用相对频宽的概念, 可能更好一些。若 $f_2 = f_1 \times 2^K$, 则子波有 K 个倍频程, 或者说, 子波的相对频宽为 K 。如 $f_1 = 10$, $f_2 = 40$, 则 $f_2 = f_1 \times 4 = f_1 \times 2^2$, 即相对频宽为 2; 如 $f_2 = 80 = f_1 \times 8 = f_1 \times 2^3$, 则相对频宽为 3, 等等。

将绝对频宽的概念代入式 (1-5) 和式 (1-6), 可得到:

$$W = \frac{2}{f_2 - f_1} = \frac{2}{(2^K - 1)f_1} \quad (1-8)$$

$$N_c = \frac{2^K + 1}{2^K - 1} \quad (1-9)$$

从式 (1-8) 看, 低截止频率 f_1 也是分母之一, 似乎低截止频率越高, 分辨率也越高, 但是, 另一方面, 低截止频率越高, 相对频宽 K 越小, 分辨率就越低; 且分母项中, K 是指数项, 所起的作用更大, 因此, 对于分辨率来说, 提高低截止频率是弊大于利。

从式 (1-9) 看, 包络主极值内子波的周期数 N_c 取决于相对频宽 K , K 值越大, 则 N_c 越小; 延续相位越少, 反映的地质情况也就越真实。

总结:

(1) 控制地震分辨率的因素有二, 即地震子波包络主极值的宽度 W 和包络主极值内子波的周期数 N_c , W 控制了地震的垂向分辨率, N_c 则反映了地震分辨率的真实性。

(2) 为保证地震资料有真实的、较高的分辨率, 必须使地震子波有较宽的频谱并有足够的低频能量。