

高密度

三维地震技术

GAOMIDU SANWEI DIZHEN JISHU

韩文功 于静 刘学伟 著

地质出版社

高密度三维地震技术

韩文功 于 静 刘学伟 著



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

高密度三维地震技术是伴随地震装备技术进步而产生的地震新技术,具有全数字、超多道、单点、高空间采样率、海量数据等显著特点,通过加大空间域、时间域的数据采集密度,增加目的层有效覆盖次数,提高速度分析精度,便于室内灵活有效地进行资料处理,在提高资料信噪比的基础上提升地震资料的纵横向分辨率及保真度,促进勘探开发技术向特高精度发展,对小断块、薄储层、小砂体、小尺度孔洞的识别以及精细油藏描述具有重要意义。

本书以高密度地震技术为基础,阐述了高密度地震采集、处理和解释技术,包括高密度三维地震技术基础、高密度三维地震采集技术、高密度三维地震资料处理关键技术;并以胜利油田罗家地区为例,详细地介绍了高密度地震资料的解释方法和应用。可供从事石油地质、地震勘探及相关领域的专业技术人员和院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

高密度三维地震技术/韩文功,于静,刘学伟著.
—北京:地质出版社,2017.11
ISBN 978-7-116-10665-9

I. ①高… II. ①韩…②于…③刘… III. ①地震勘探 IV. ①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 276974 号

责任编辑:肖莹莹 刘云龙 张诚

责任校对:韦海军

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 66554528(邮购部);(010) 66554571(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 66554576

印 刷:北京地大彩印有限公司

开 本:889 mm×1194 mm^{1/16}

印 张:17.75

字 数:500 千字

版 次:2017 年 11 月北京第 1 版

印 次:2017 年 11 月北京第 1 次印刷

定 价:98.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-10665-9

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

高密度三维地震技术是伴随着地震装备技术（数字检波器、全数字仪器、计算机技术等）的革命性进步而产生的地震新技术，它具有全数字、超多道、单点、高空间采样率、海量数据等显著特点。

高密度三维地震技术有三个显著特点，一是单点接收，无组合，保护频率特征；二是数字检波器接收，保证对弱信号的接收能力；三是高密度空间采样，对信号进行充分、保真和健全采样，保证波场特征的完整性和连续性。因此，高密度地震采集技术通过加大空间域、时间域的数据采集密度，增加目的层有效覆盖次数，提高速度分析精度，便于室内灵活有效地进行资料处理，在提高资料信噪比的基础上提高地震资料的纵横向分辨率及保真度，促进勘探开发技术向特高精度发展，对小断块、薄储层、小砂体、小尺度孔洞的识别以及精细油藏描述具有重要意义。

随着油田，特别是老油区的发展，油田勘探开发的难度越来越大。概括而言，老油区勘探开发面临的难点表现在：①勘探目的层埋藏深；②勘探对象多为小断块、小幅度构造和隐性岩性圈闭；③油气藏多为低渗透、特低渗透油气藏；④单元储量规模小等方面。面对以上难点，当前的地震资料精度已经不能满足老油田勘探开发的需求，成为制约油田发展的重要因素之一。目前我国东部几乎所有的老油区普遍面临着勘探难度大、勘探对象复杂、剩余油寻找困难等难题，十分需要能够提高纵横向分辨率、高保真的高密度数字地震技术支持。

高密度地震勘探技术对于目前勘探程度较高的地区探明复杂地下地质构造以及岩性的结构与变化，寻找有利的含油气构造，查清开发中后期的剩余油分布，提高油气采收率，保证油田的稳产高产具有重要意义。同时，近年来超万道记录系统、数字检波器等新型地震勘探装备以及计算能力的巨大进步也在客观上推动了高密度地震勘探技术的迅速发展。

本书从高密度地震技术的基础出发，深入阐述了高密度地震采集、处理和解释技术。下面简要介绍每一章的主要内容。

第1章对高密度三维地震技术基础进行了论述。1.1节介绍高密度地震采样理论与波场特征，论述了时间采样与空间采样的基本要求；在此基础上，分析了空间假频的影响因素和几种因素导致的空间假频的特征；针对几种典型干扰波和有效波，分析了其波场特征，指出高密度空间采样有助于对叠前数据中复杂波场的认识；在空间采样和波场特征分析的基础上，提出了评价采样充分性的几个指标，并分析了空间采样间隔对成像的影响。1.2节进行了高密度数据的信号学分析，首先运用主成分分析方法在时间域对高密度采集数据进行了分析，认识到空间采样间隔与弱信号的关系；运用多道奇异谱分析技术在频率域分析了高密度采集数据，揭示不同空间采样间隔时地震波场的连续性差别，指出在频率域最佳的空间采样间隔。1.3节介绍高密度地震采集装备的适应性，从数字检波器的特点、弱信号接收能力测试和地震记录仪对高频信号可记录范围等三个方面分析了现有设备对高密度地震技术的适应性。

第2章介绍高密度三维地震采集技术。2.1节介绍高密度观测系统设计与评价技术，以健全空间波场采样为目的，优化设计观测系统；以满足叠前成像为目的，使用双聚焦成像分析技术，评价观测系统参数，进一步优化观测系统，最终形成高密度观测系统设计和评价技术。2.2节介绍高密度波场特征调查与分析技术，首先分析了高密度地震采集的波场特征，研究波场调查的方法，分析了波场调查数据，形成了波场调查与分析技术。2.3节介绍高密度地震技术近地表的适应性，简单介绍了几种近地表结构探测技术，重点分析了近地表和地下地质特点对信号特别是弱信号的影响，认识到吸收衰减对弱信号的重要作用。2.4节介绍高密度地震采集工艺与采集质量监控方面的技术，从超万道数据仪器操作的管理，到海量数据的现场质量监控技术，到施工工艺与组织管理措施等，形成了高密度采

集质量监控与施工工艺。

第3章介绍高密度三维地震资料处理关键技术。3.1节针对海量数据对可视化和分析带来的难题，在动力学特征、统计学特征和几何属性三个方面进行统计与分析，实现海量数据的快速浏览、分析和特征参数的提取；同时又在数据管理方式上，探讨了提高海量数据处理分析效率的方法。3.2节针对高密度采集数据环境噪声较为严重，尤其对于高频端弱反射信号几乎都被高频噪声埋没的问题，介绍了多域信噪分离技术，有效改善高频端弱信号的信噪比，提升弱信号边缘检测能力。3.3节充分利用高密度全数字采集资料弱信号丰富的特点，介绍了弱信号运动学特征一致性处理和动力学特征一致性恢复补偿处理技术，保障弱信号无畸变同相处理，提高了弱信号能量。3.4节高密度三维地震资料高保真处理流程，将前几节介绍的高密度特色处理技术集成，将原常规处理流程中不适应高密度海量数据的模块进行优化，形成了针对性的处理流程。

第4章以胜利油田罗家地区为例，介绍高密度地震资料解释方法和应用。4.1节进行了地震资料品质分析，从直观对比、软件综合评价和基于目的层的综合评价三个方面，以解释的角度对高密度地震资料品质分析方法进行了介绍。4.2节是地震岩石物理分析，以岩石物理理论方法为基础，进行了数据分析与处理，然后进行了储层岩电特征、叠前敏感属性和弹性阻抗分析，为高密度地震资料的应用打下了基础。4.3节是高密度三维解释方法，结合不同地质目标的特点，充分发挥资料优势，开展了罗家高密度三维解释方法研究，介绍高密度三维地震资料解释技术。4.4节是实际资料的应用效果，从圈闭评价和油藏描述的角度剖析高密度三维的地质效果，综合研究认为高密度勘探具有地质放大镜的作用，是解决复杂构造描述和储层精细预测的有效途径。

目 录

前言

第 1 章 高密度三维地震技术基础	1
1.1 高密度地震采样理论与波场特征	1
1.1.1 时间采样与空间采样	1
1.1.2 空间假频问题	2
1.1.3 高密度地震勘探波场特征	7
1.1.4 高密度观测系统的采样充分性分析	17
1.2 高密度数据的信号学分析	28
1.2.1 高密度地震资料的波场主成分分析	28
1.2.2 高密度地震资料的波场奇异谱分析	35
1.2.3 结论	37
1.3 高密度地震勘探装备适应性分析	39
1.3.1 数字检波器特点与适应性分析	39
1.3.2 数字检波器弱信号接收能力测试	52
1.3.3 地震记录仪对高频信号的可记录范围分析	61
第 2 章 高密度三维地震技术采集方法	73
2.1 高密度观测系统优化设计与评价技术	73
2.1.1 高密度地震采集新理念	73
2.1.2 高密度采集充分性与均匀性分析技术	74
2.1.3 高密度观测系统评价技术	90
2.1.4 小结	95
2.2 高密度三维地震采集的噪音波场特征分析	96
2.2.1 高密度采集噪音分析	96
2.2.2 高密度采集波场特征分析技术	99
2.2.3 小结	103
2.3 高密度地震技术近地表结构研究	104
2.3.1 近地表结构高精度探测技术	104
2.3.2 高密度地震反射波衰减规律	108
2.3.3 小结	138
2.4 超万道三维地震采集质量监控与施工工艺	138
2.4.1 高密度施工仪器操作管理技术	138
2.4.2 超万道高密度现场质量监控技术	143
2.4.3 高密度地震采集管理措施与施工工艺	151
2.4.4 小结	154
第 3 章 高密度三维地震资料处理关键技术	156
3.1 高密度三维地震海量数据分析技术	156
3.1.1 基于动力学特征的海量数据统计与分析	157
3.1.2 基于统计学特性的海量数据统计与分析	160

3.1.3	基于几何属性的海量数据统计与分析	161
3.1.4	提高海量数据处理分析效率	162
3.1.5	小结	164
3.2	高密度单点数字地震信号多域保幅去噪技术	165
3.2.1	单点高密度数字地震资料波场特征	165
3.2.2	高密度地震资料多域信噪分离技术	170
3.2.3	小结	180
3.3	弱信号处理技术	181
3.3.1	基于运动学特征的一致性处理技术	181
3.3.2	基于动力学特征的一致性处理技术	188
3.3.3	弱信号边缘检测与能量补偿技术	191
3.3.4	小结	203
3.4	高密度三维地震资料高保真处理流程	204
3.4.1	基于高密度地震数据的传统处理技术分析	204
3.4.2	海量数据处理流程优化拆分技术	212
3.4.3	小结	213
第4章	罗家高密度地震资料解释方法和应用	214
4.1	罗家高密度地震资料品质分析	214
4.1.1	直观的新老资料对比法	214
4.1.2	软件综合评价法	215
4.1.3	基于目的层基础认识上的综合评价法	216
4.1.4	地震资料品质分析结果	217
4.2	罗家地区地震岩石物理分析	218
4.2.1	岩石物理理论方法	218
4.2.2	数据处理与分析	224
4.2.3	油藏地球物理特征	234
4.3	罗家高密度三维解释方法	241
4.3.1	构造描述技术	241
4.3.2	沉积微相划分	244
4.3.3	储层预测技术	256
4.3.4	油气检测技术	260
4.4	罗家高密度地震资料应用效果	261
4.4.1	构造识别能力	261
4.4.2	层序识别效果	262
4.4.3	储层预测效果	264
4.4.4	叠前检测适用性分析	265
4.4.5	油藏分析效果	266
4.5	小结	269
参考文献		270

第1章 高密度三维地震技术基础

高密度地震技术是在装备发展的基础上,随着地质任务要求的逐渐提高,而发展起来的一项高空间采样率的地震新技术。本章针对高密度地震技术的基础工作进行分析。

地震数据采集就是对空间连续的地震波场进行离散采样的过程。地震波场是一个三维体,对地震波场采样,原则上在各个方向的采样率都要满足采样定理。1.1节在时间采样定理和空间采样定理的基础上,研究了与空间假频有关的各种因素,重点分析了几种空间假频产生的影响,认识到防止假频的重要意义和防止假频的要求;结合实际资料和合成记录,分析了几种不同波场的特征,得到了高密度空间采样有利于对叠前数据中复杂波场的识别,可以有效地指导后续数据处理工作的认识;为评价空间采样密度的波场采样充分性,研究了评价充分性的参数,分析了不同采样密度对不同地震波场采样的影响,形成了高密度地震采集新理念。

1.2节从信号分析的角度,使用数学分析工具,开展地震波场的主成分分析(PCA)及奇异谱分析(SSA),找出对弱信号保真的有利空间采样密度,用以指导高密度地震采集的野外实践。

1.3节从数字检波器的适应性、弱信号接收能力和地震记录仪的分析入手,分析了硬件设备的进步对高密度地震工作的推动和影响。

1.1 高密度地震采样理论与波场特征

实践证明,提高空间采样密度、缩小面元尺寸能够有效地改善地震数据品质,提高成像精度。当陆上直接采用小面元采集受到装备条件的限制和勘探成本的制约时,砖墙式观测系统、细分面元观测系统作为特殊背景下的设计方法,可在一定程度上缓解地质需求与客观条件限制的矛盾。细分面元观测系统的属性不同于正交观测系统的面元属性,相邻面元的属性存在着一定的差异,相邻CMP的炮检距分布具有跳跃性,最大/最小炮检距分布的变化使数据处理面临一些新问题,特别是在地震波场特征随炮检距变化较大的地区,这一矛盾更加突出。可见,野外采集密度的调整、观测方式的变化要求采集人员、数据处理人员与地质解释人员重新认识采集参数,以新的理念,采取新的措施分析、处理地震数据。首先要求数据处理人员研究地震波场理论,对野外采集数据的特征有全面充分的认识;然后,针对数据的特点进行处理方法研究和试验,运用保真处理技术,挖掘数据中包含的丰富信息,最终服务于油藏研究。因此,在高密度数据采集与处理中,对地震波场采样的充分性分析显得尤为重要。

1.1.1 时间采样与空间采样

时间采样间隔应满足 Nyquist 采样定理:设信号 $x(t)$ 有截频 $f_{\max}$, 取采样间隔 Δt 满足:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_{\max}} \quad (1.1.1.1)$$

则可以由离散信号 $x(n\Delta t)$ 恢复 $x(t)$, 表达式为

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n\Delta t) \frac{\sin(t - n\Delta t) \frac{\pi}{\Delta t}}{(t - n\Delta t)\pi/\Delta t} \quad (1.1.1.2)$$

式中: $f_{\max}$ 为记录信号中的最大频率。

根据 (1.1.1.1) 式,为了保证不畸变地将连续时间信号离散为数字信号,在最短的周期内,应至少采到 2 个样点,否则信号将会出现假频,使离散采样后变为另一种频率的新信号。

在高分辨率勘探中，为保证无畸变地记录有效信号，每个最短周期内至少保证要采到 4 个样值或更高，这有益于提高精度，但有可能记录到高频干扰。实际工作中选择采样间隔 Δt 时，除上述因素外，还应根据勘探目的层的深度、精度要求、记录长度、仪器记录能力、存储容量等确定。

空间采样间隔同样要满足 Nyquist 采样定理：

$$\Delta x \leq \frac{1}{2 k_{\max}} = \frac{v_{\min}}{2 f_{\max}} \quad (1.1.1.3)$$

式中： Δx 为空间方向基本采样间隔（道距）； $k_{\max}$ 为最大波数； $v_{\min}$ 为最小视速度。

若满足 (1.1.1.3) 式，可实现无假频的空间采样。按照基本采样定理，常规地震勘探中，受条件所限，低速度的波不能被充分采样，就可能产生空间假频，如地震记录中面波的最大频率 $f_{\max}$ 为 35Hz，最小视速度 $v_{\min}=300\text{m/s}$ ，道距 Δx 应 $<4.3\text{m}$ ，这在目前条件下往往难以实现，因此野外通常采用检波器组合的方式，起到去假频滤波的作用。

1.1.2 空间假频问题

由采样定理推知：横向连续信号一旦离散采样，①将产生不可恢复的波数范围，最大波数以外区域的信息将无法完全恢复；②该波数区域的信息被采样后，变为另一种新的信息，即空间假频。

在油气地震勘探中，一般在时间方向有足够小的采样间隔（2ms 或 1ms，甚至更小），并且在仪器中设置有去假频滤波器。但在空间方向受仪器接收道数及采集成本的限制，往往采样间隔比较大，而仪器中没有空间方向的去假频处理，有可能产生空间假频。

根据采样理论，可计算出不产生空间假频的最大频率 $f'_{\max}$ ：

$$f'_{\max} = \frac{v_{\text{app}}}{2\Delta x} \quad (1.1.2.1)$$

式中： v_{app} 为层速度； Δx 为空间采样间隔。

在 (f, k) 域能够清晰地展示空间假频现象。 (t, x) 域的地震波场是由不同倾角与不同频率成分的波构成的，经二维傅立叶 (Fourier) 变换到 (f, k) 域。在 (t, x) 域一定倾角的同相轴，在 (f, k) 平面是一条通过原点的直线，倾角越大，视速度越低，在 (f, k) 域此直线愈靠近波数轴，出现空间假频的频率越低。零倾角分量则分布在频率轴上，在 (t, x) 域相互干涉的具有不同倾角的同相轴在 (f, k) 域中可以被分开。因此， (f, k) 域滤波是地震数据处理中常用的二维处理方法，在线性干扰压制、波场分离、多次波衰减等方面经常使用。在设计二维滤波器时，期望有效信号与噪声在 (f, k) 平面内能够最大限度地分离，这样在衰减噪声的同时，可以将信号无失真地保留下来。然而，由 (t, x) 域变换到 (f, k) 域的效果与空间采样的密度直接相关：空间采样密集，道距小，各种视速度的波在 (f, k) 域的混叠效应小，容易分析与识别；反之，空间采样稀疏，道距大，不同波场在 (f, k) 域混叠效应增强，难以区分。因此，波场分离的效果在一定程度上由数据空间采样的密度所决定。

在实际应用中，近地表的影响、地层吸收的影响以及各种干扰噪声的存在，使得可识别的地下反射信号的频率达不到 $1/2$ 波长，比如可能在 $f_{\max}$ （信号的最大频率）以内。这样，只要空间假频出现在高于 $f_{\max}$ 的频率上，对处理结果没有实质性的影响。但对于点接收的地震数据，面波及其他低速干扰发育，需要采用较小的空间间隔采样，否则，如果采样不够充分，在 (f, k) 谱中低频干扰产生的假频与信号的频率混叠在一起，无法分离。

在 (t, x) 域密集采样的数据可以较准确地变换到其他域，如 (f, k) 域或 (τ, p) 域等，从而可以更准确地实现叠前去噪及波场分离。此外，在 (f, k) 域偏移处理中，小道距，充分而密集的空间采样可以避免陡倾角地层的高频信息出现空间假频，提高成像的保真度。

在 (t, x) 域，通常由相邻道的时差来表示线性同相轴的倾角，这样可以非常直观地显示空间假频出现的位置。图 1.1.2.1 为以道间时差为参量的空间假频位置示意图，可以看出假频频率与道间时差的关系。

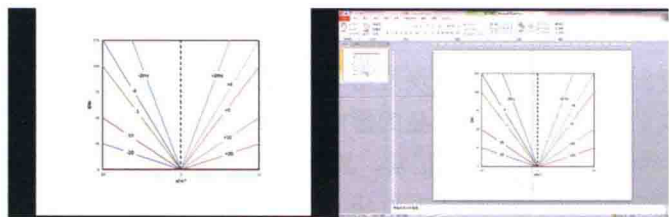


图 1.1.2.1 空间假频位置示意图

具体的量化说明如下：

相邻道间时差 20ms, $f > 25\text{Hz}$ 时出现假频；

相邻道间时差 10ms, $f > 50\text{Hz}$ 时出现假频；

相邻道间时差 4ms, $f > 125\text{Hz}$ 时出现假频。

通过上述分析可知，影响空间假频出现的主要因素为：①倾斜同相轴的主频；②反射界面倾角；③视速度；④道距；⑤噪声分量等。

1.1.2.1 强规则干扰的空间假频

规则干扰的空间假频会影响纵横向分辨率。在不同空间采样间隔下，规则干扰假频出现的位置不一样。因此，实际采集工作中，有一定的采样密度作保证的前提下，可以避免强规则干扰的空间假频对反射数据的不良影响。

图 1.1.2.2 是视频率为 25Hz、速度为 2000m/s 的浅层规则干扰波及其 $f-k$ 谱。由理论分析可知，①当道距为 20m 时，在最大波数对应的 50Hz 处出现频率折叠现象（图 1.1.2.2a）；②当道距为 40m 时，在最大波数对应的 25Hz 处出现频率折叠现象（图 1.1.2.2b）；③假频反复折叠，能量逐渐减弱，对高频部分的影响减小。

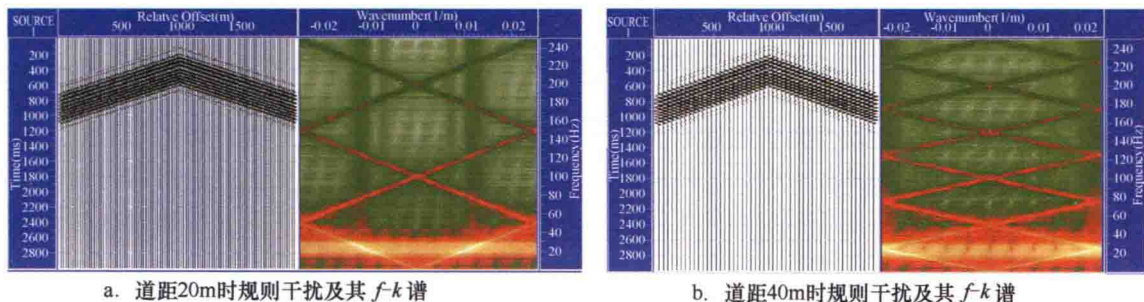


图 1.1.2.2 视频率 25Hz、速度 2000m/s 的浅层规则干扰波及其 $f-k$ 谱

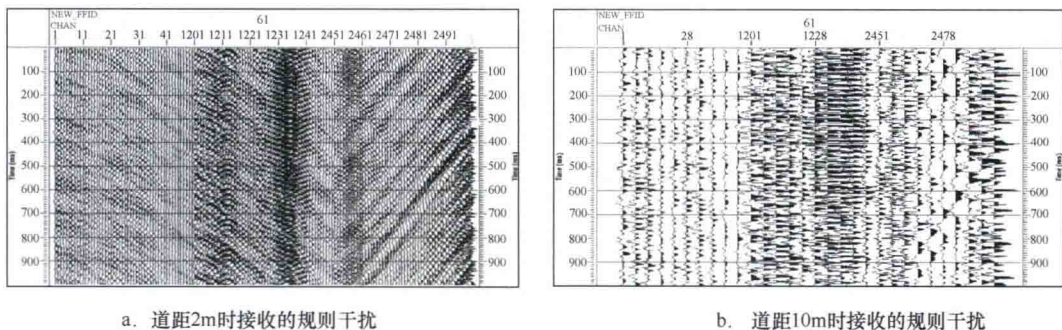


图 1.1.2.3 盒子波采集数据中的规则干扰

图 1.1.2.3 为盒子波采集数据中的规则干扰，是地震数据中最常见的一种强干扰，具有低频、低速等特点。图 1.1.2.3a 为 2m 道距接收的数据，图 1.1.2.3b 为改变道距为 10m 时的数据。可见，由于采样不充分，导致规则干扰波的波场特征难以识别，假频现象严重，干扰波的视速度发生了变化，增加了处理中噪声衰减的难度。

1.1.2.2 炮检距不均匀产生的空间假频效应

由假频产生的理论可知，空间假频的出现是由于空间采样不足造成的。若一个 CMP 内炮检距分布不均匀，对空间假频出现的规律不会产生明显的影响，但影响数据统计分析、叠前成像的精度和效果。

图 1.1.2.4a 为 480 道集的理论 CMP 道集记录，其中包括了初至波和多组反射波，CMP 道集内炮检距分布均匀，道距为 20m，没有缺失任何道；图 1.1.2.4b 为人工抽取某些道，造成道集内炮检距分布不均匀现象，从 $f-k$ 谱上分析，炮检距分布不均匀没有影响假频出现的规律，只是 $f-k$ 谱的噪声增强，分辨率降低。

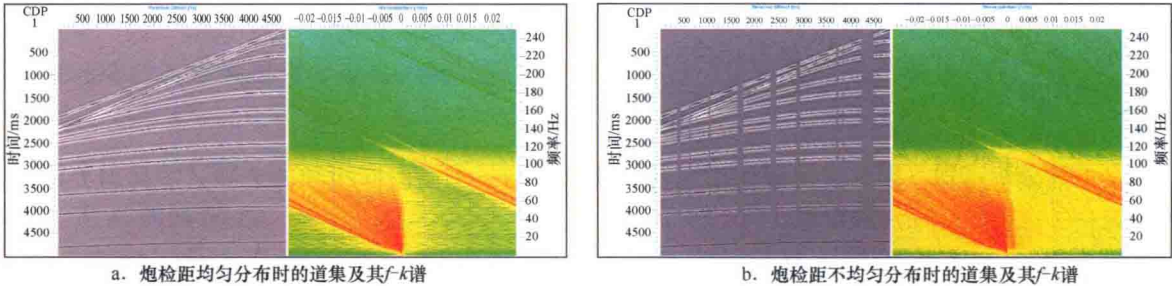


图 1.1.2.4 模拟道集及其 $f-k$ 谱

对于不规则采样的数据，造成了面元内的炮检距分布不均匀现象，目前较有效的方法是道内插和数据规则化处理，以弥补采集的不足，减小炮检距分布不均匀造成的影响。

1.1.2.3 陡倾角地层反射的空间假频

地层倾角为 ϕ 时，反射波的时距曲线方程为

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2} \cos^2 \phi \tag{1.1.2.2}$$

求导后：

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\cos^2 \phi}{v^2} \left(t_0^2 + \frac{x^2}{v^2} \cos^2 \phi \right) x \tag{1.1.2.3}$$

反射波的空间假频与地层倾角、速度有关。图 1.1.2.5 为道距 40m 时不同倾角的反射波，倾角分别为 0° 、 30° 和 60° 。地层倾角较大时，空间采样不足产生的空间假频造成反射波同相轴识别困难，特别是在大炮检距部分。在视觉上陡倾角的反射波以另外一种视速度出现，使得同相轴的自动识别出现误差，空间分辨率降低。图 1.1.2.6 倾角分别为 0° 和 60° 的反射波在大炮检距（1000~4000m）上的同相轴，可以清楚地看出假频的特征。

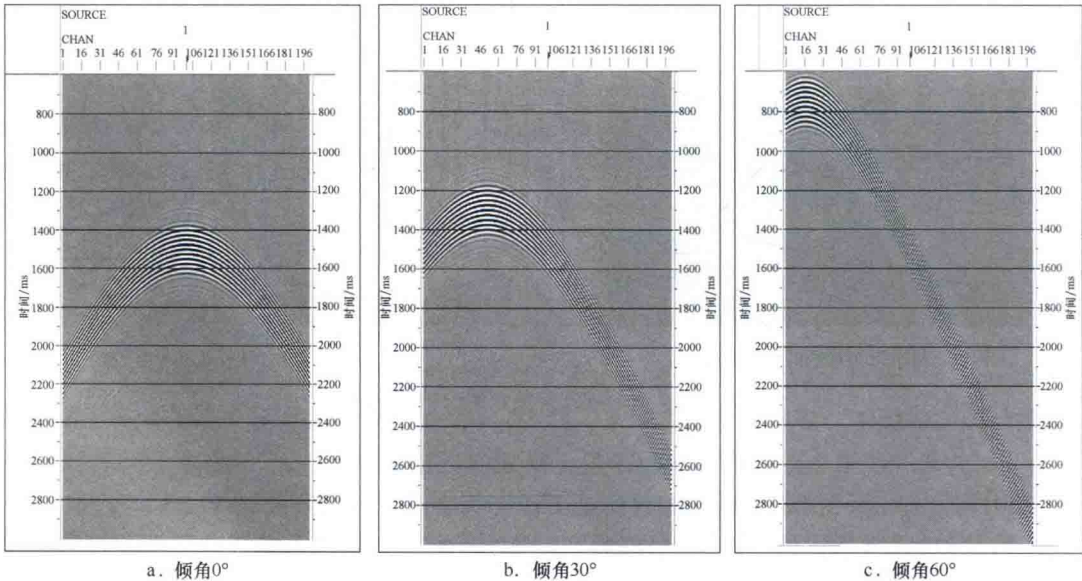


图 1.1.2.5 不同倾角的反射波

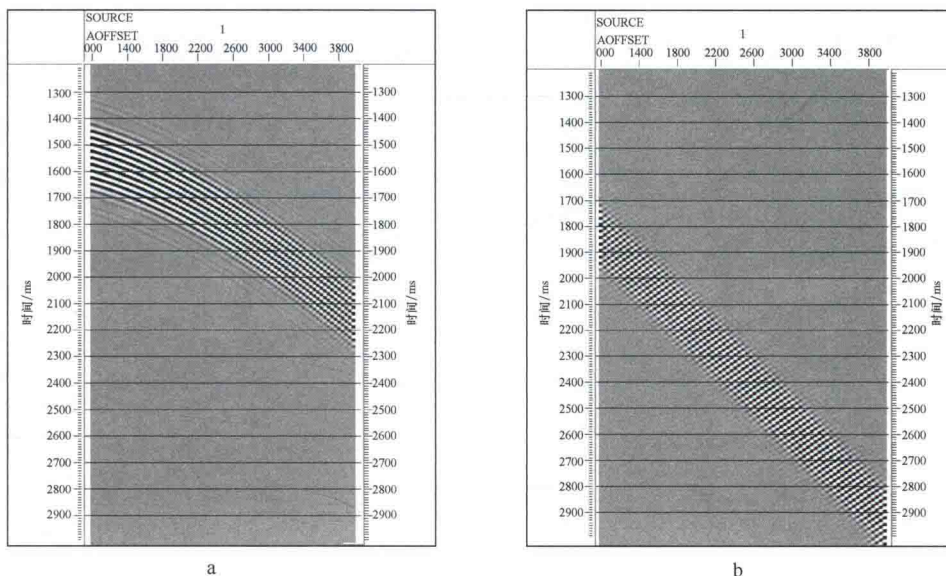


图 1.1.2.6 不同倾角 (0°和 60°) 的反射波 (炮检距 1000~4000m)

对比可知, 陡倾角反射波在空间采样密度不够时更容易产生空间假频, 空间假频对反射波的识别有一定的影响, 其影响程度与反射波的主频有关, 当频率较高时, 假频主要影响高频高波数的反射波, 导致反射波的空间分辨率下降。

1.1.2.4 假频对偏移成像效果的影响

偏移是使倾斜反射归位到它们真正的地下界面位置, 并使绕射波收敛, 以此提供空间分辨率, 得到地下界面的真实图像。当没有空间假频时, 反射波的能量能够收敛到正确的位置; 当存在空间假频时, 频率成分中的假频越多, 能量越分散, 映射到正确位置上的能量越少。假频影响的结果是偏移的空间分辨率下降, 偏移噪声严重, 信噪比较低。

此外, 由于假频与反射波的倾角有关, 水平同相轴几乎不受假频的影响, 倾角越大, 假频影响越严重, 对偏移的效果影响更大。

图 1.1.2.7a 为炮域 NMO 后的理论数据, 道距为 10m; 图 1.1.2.7b 为道距 10m 的偏移结果; 图 1.1.2.7c 为道距 20m 的偏移结果; 图 1.1.2.7d 为道距 40m 时的偏移结果。假频对成像结果的影响主要表现在陡倾角反射波的分辨率的降低。

在偏移之前, 对于具体的一个地震道, 空间采样间隔对时间分辨率没有影响, 但采样不足出现的假频将影响对地震波场的准确识别, 降低数据的信噪比, 影响对反射波场的识别能力, 增强了偏移噪声, 进而降低了反射波的横向分辨率。

1.1.2.5 绕射波的空间假频问题

弹性波在两种不同介质分界面上产生反射和透射, 但当分界面曲率小于波长, 或反射界面为断层、尖灭点、不整合点所中断时, 波的能量将以绕射形式传播, 绕射波是一种重要的地震波场。

绕射波的时距方程为

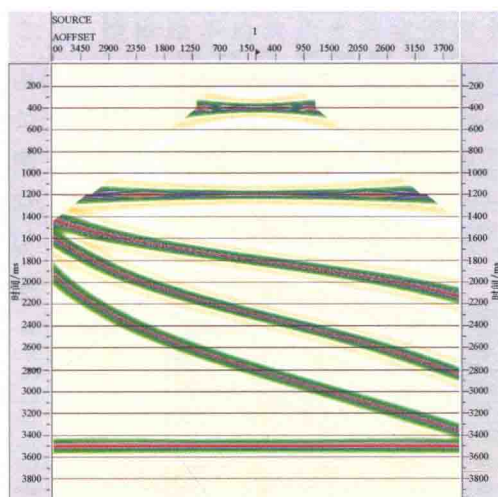
$$t(x_s, x_r) = \sqrt{t_0^2 + (x_s/v)^2} + \sqrt{t_0^2 + (x_r/v)^2} \quad (1.1.2.4)$$

激发点的坐标为 $S(x_s)$; 接收点的坐标为 $R(x_r)$; v 为介质速度。

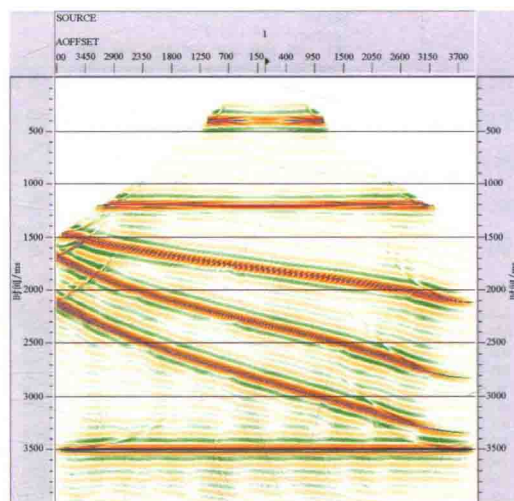
求导后:

$$\partial t(x_s, x_r) / \partial t = \frac{x_s}{v^2} \left[t_0^2 + \left(\frac{x_s}{v} \right)^2 \right] + \frac{x_r}{v^2} \left[t_0^2 + \left(\frac{x_r}{v} \right)^2 \right] \quad (1.1.2.5)$$

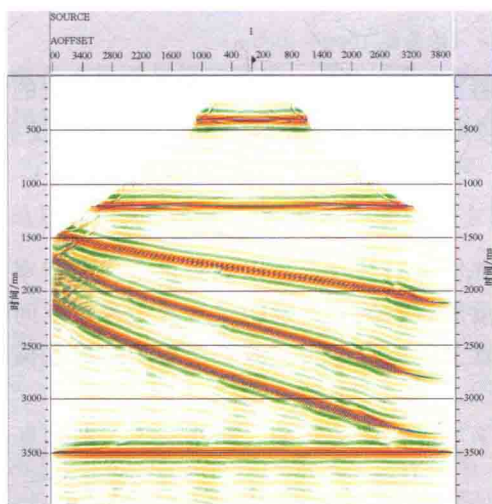
由前面所述的产生空间假频的基本理论可知, 空间假频主要与速度、同相轴的倾角、道距及地震波的主频有关, 而绕射波同相轴的倾角是不断变化的, 这导致绕射波的空间假频也随同相轴倾角的变化而变化。图 1.1.2.8a 为道距 5m 时的单炮记录上的绕射波, 绕射波的主频为 40Hz; 图 1.1.2.8b 为



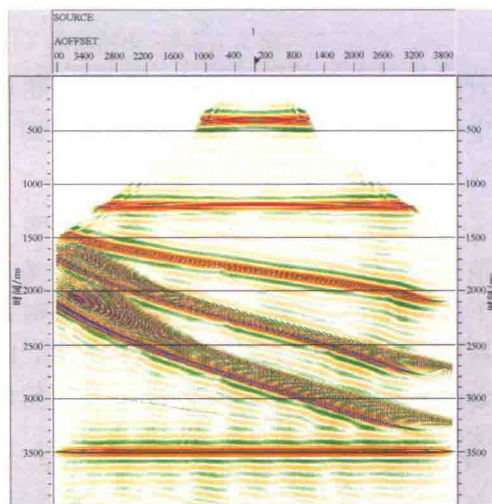
a. 炮域数据



b. 10m道距



c. 20m道距



d. 40m道距

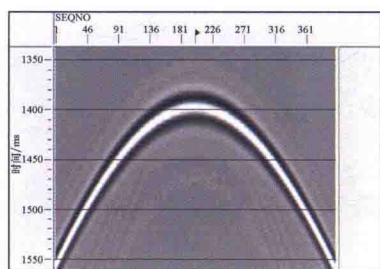
图 1.1.2.7 炮域数据及不同道距偏移结果

图 1.1.2.8a 对应的 $f-k$ 谱；图 1.1.2.8c 和图 1.1.2.8d 为道距 10m 时的单炮记录及其 $f-k$ 谱；图 1.1.2.8e 和图 1.1.2.8f 为道距 20m 时的单炮记录及其 $f-k$ 谱；图 1.1.2.8g 和图 1.1.2.8h 为道距 40m 时的单炮记录及其 $f-k$ 谱。

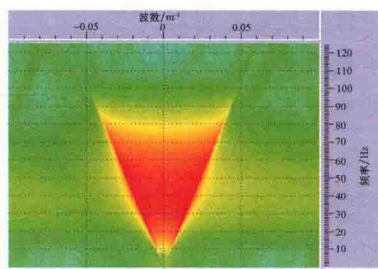
对比可见，道距变化对绕射波及其空间假频产生影响。随着传播距离的增大，绕射波的能量减弱，视速度降低，即绕射波同相轴的倾角变大，此时，受空间假频的影响很大。在实际地震数据中，接收到的绕射波往往只是绕射点附近的视速度相对较高的绕射波的一部分，而距绕射点较远的绕射波由于能量弱，假频干扰严重，难以被准确识别。特别是当空间采样较稀疏时，远离绕射点的绕射波的高频成分受假频的影响，无法分辨，这样在偏移时，会造成绕射波不能完全收敛，绕射点的特征不够清晰。当绕射波的主频提高时，这种影响更为严重。所以，在绕射波发育的地区，宜采取高密度地震勘探技术。

1.1.2.6 小结

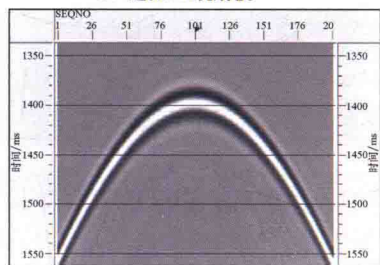
本节从基本采样定理出发说明空间假频问题，即横向连续信号一旦被离散采样，将产生不可恢复的波数范围，最大波数以外区域的信息将无法完全恢复，该波数区域的信息被采样后，变为另一种新的信息，即空间假频。在地震勘探中的空间假频的产生与 5 种因素有关：同相轴的主频、界面倾角、视速度、道距、噪声问题等。通过模型数据分析了强规则干扰、陡界面反射波、绕射波、采样不均匀时产生的空间假频问题及其对成像效果的影响。



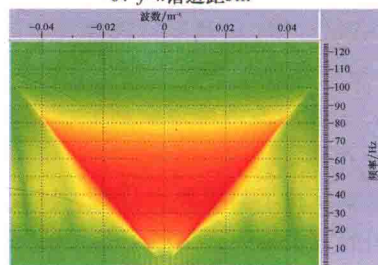
a. 道距5m绕射波



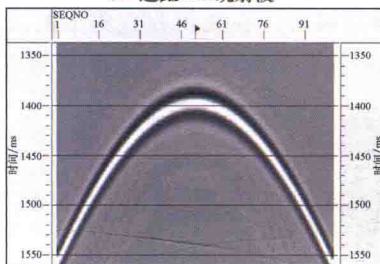
b. $f-k$ 谱道距5m



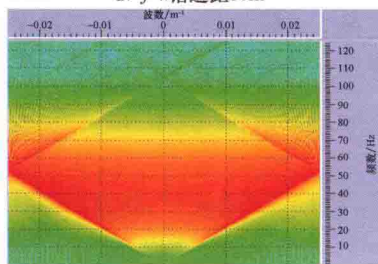
c. 道距10m绕射波



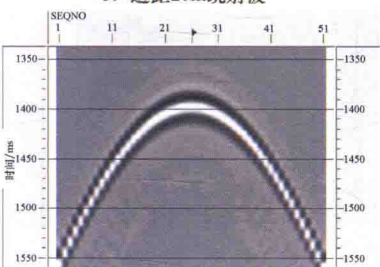
d. $f-k$ 谱道距10m



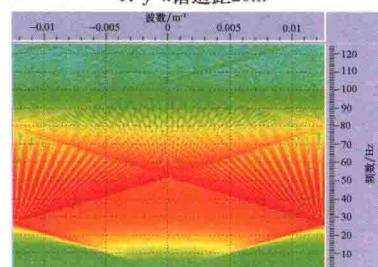
e. 道距20m绕射波



f. $f-k$ 谱道距20m



g. 道距40m绕射波



h. $f-k$ 谱道距40m

图 1.1.2.8 不同道距的绕射波及其 $f-k$ 谱

结果表明：①采样不充分导致规则干扰波的波场特征难以识别，假频现象严重，干扰波的视速度发生了变化，增加了处理中噪声衰减的难度。②陡倾角反射波在空间采样密度不够时更容易产生空间假频，空间假频对反射波的识别有一定的影响，其影响程度与反射波的主频有关，当频率较高时，假频主要影响高频高波数的反射波，导致反射波的空间分辨率下降，偏移精度降低。③炮检距分布不均匀没有影响假频出现的规律，只是 $f-k$ 谱的噪声增强，分辨率降低。④当空间采样较稀疏时，远离绕射点的绕射波的高频成分受假频的影响，在偏移时会造成绕射波不能完全收敛，绕射点的特征不够清晰，当绕射波的主频较高时这种影响更为严重。

1.1.3 高密度地震勘探波场特征

高密度地震技术能够实现对信号和噪音的充分、保真采样，利于后续处理中的多域信噪分离，而多域信噪分离技术的应用基础是对各种波场特征的认识。因此，研究高密度采集条件下，面波其他强干扰波、相干噪音、次生干扰、断面波、绕射波等主要波型的波场传播特征，结合近地表波场传播理论研究，分析各种波场在不同道集上的表现形式和基本特征，可以为采集方案的选择、多域去噪技术

的应用和高保真成像提供理论指导。

本节利用盒子波数据、合成地震记录和高密度三维采集地震数据，分析了反射波、绕射波、折射波、面波、声波和规则次生干扰等波型在不同道集上的表现形式和基本特征。

1.1.3.1 反射波波场特征分析

利用罗家地区实际三维高密度地震数据，在共炮点道集、共接收点道集和共炮检距道集上，分析反射波在不同域的表现特征。

(1) 共炮点道集

在罗家地区 SW32-34 束线上，选择其中的一炮记录分析波场特征。图 1.1.3.1 为原始单炮记录，每炮 28 个排列，接收点分布基本均匀，取其中一个排列放大显示（图 1.1.3.1、图 1.1.3.2），因为基础数据品质较好，去除面波等噪声后，能够清楚地分析反射波在炮集数据上的分布规律。

(2) 共接收点道集

共接收点数据集反映了与接收点位置、接收点条件等相关的信息。在三维实际数据中，共接收点数据集可以按照不同的方式排列，如图 1.1.3.3 为按接收线顺序排列的共接收点集，图 1.1.3.4 为按炮检距排列的共接收点集，图 1.1.3.5 为共接收点集中反射波的放大显示。当激发点规则布设时，共接收点集上反射波规律性强，易于追踪分析；反之，当激发点位置不规则时，在共接收点集上的道距随之变化，影响了反射波的规律性，特别是在检波点域进行数据处理时，这种道距的变化会影响处理效果。

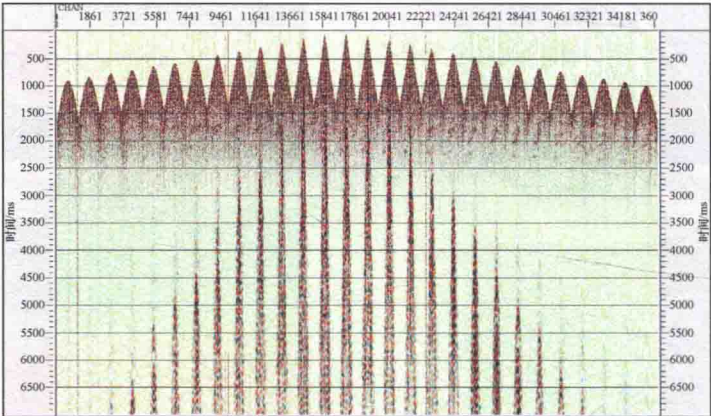


图 1.1.3.1 原始共炮集记录

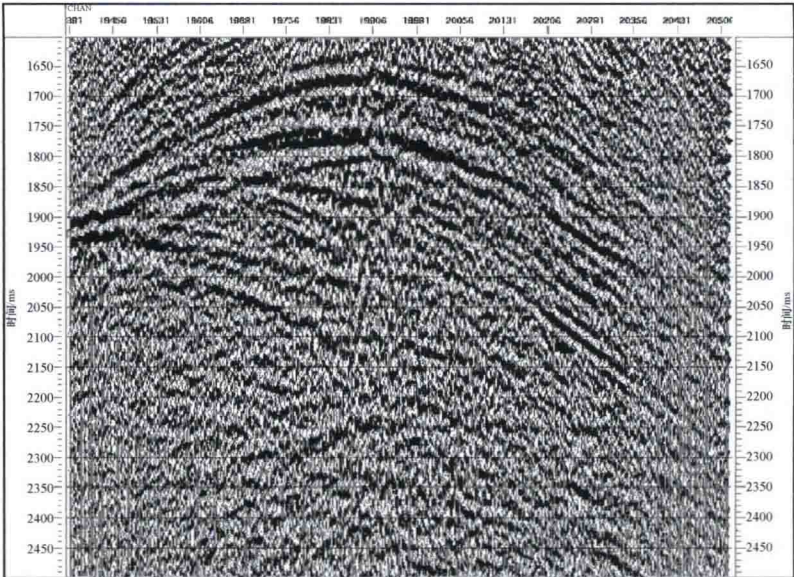


图 1.1.3.2 共炮集记录中的反射波

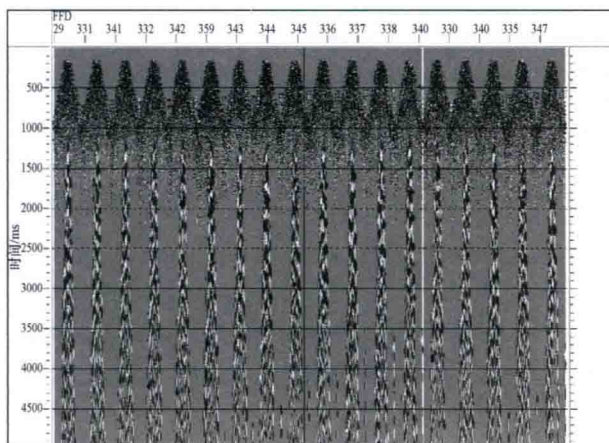


图 1.1.3.3 原始共接收点集（按线号排列）

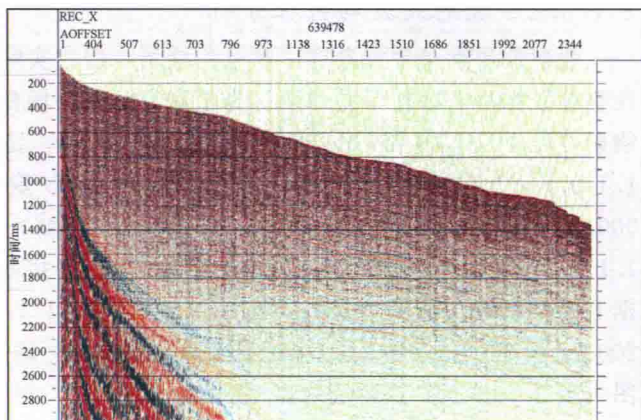


图 1.1.3.4 原始共接收点集

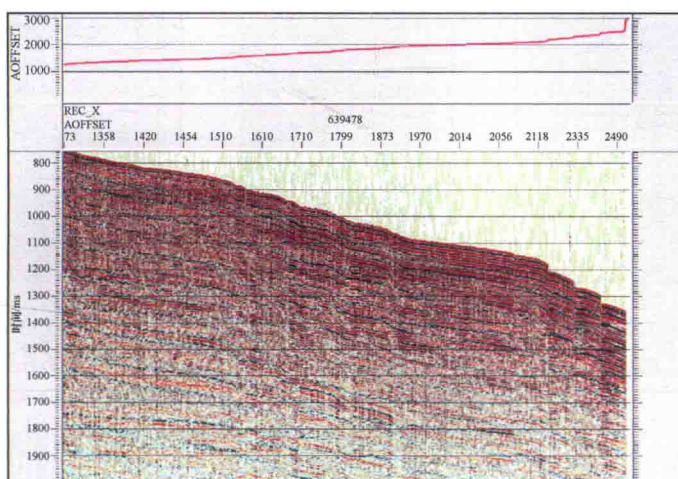


图 1.1.3.5 共接收点集中的反射波

(3) 共炮检距道集

三维数据中的一个单炮记录中炮检距相同的地面位置点呈环状分布，如果按照二维方式抽取共炮检距集，则应固定一条炮线、固定一条接收线，这样，可以分析各种波场在共炮检距数据上的分布特征。图 1.1.3.6 为不同炮检距的数据，即存在非纵距的单个剖面，为了更好地认识反射波的特征，对原始数据做了滤波和增益处理，避免其他干扰波和能量变化的影响。在共炮检距集中，其道距与激发点、接收点的位置及规则程度相关。在图 1.1.3.6 中的 4 个不同炮检距的数据中，可以看出本区炮点分布不规则对单个剖面上反射波形态造成的影响。

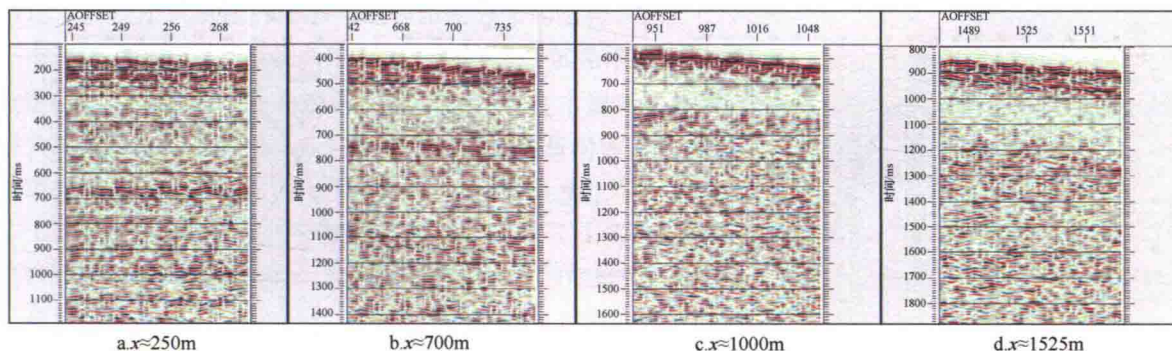


图 1.1.3.6 不同炮检距数据中的反射波

1.1.3.2 绕射波波场特征分析

绕射波虽然是地震勘探中常见的波场，但在实际数据中，绕射波与反射波及其他波场干涉在一起，在叠前数据集上往往不易识别。为了研究绕射波场在叠前不同数据集上的形态特征，设计了理论记录，绕射点位于中间位置，顶点时间在 1400ms 处。图 1.1.3.7 为不同单炮记录上的绕射波，其中图 1.1.3.7a 炮点在绕射点的正上方，图 1.1.3.7b 炮点距绕射点 1500m，图 1.1.3.7c 炮点距绕射点 3000m。图 1.1.3.8 为不同接收点集上的绕射波，其中图 1.1.3.8a 接收点在绕射点的正上方，图 1.1.3.8b 接收点距绕射点 1500m，图 1.1.3.8c 接收点距绕射点 3000m。图 1.1.3.9 为不同炮检距数据上的绕射波，图 1.1.3.9a、图 1.1.3.9b、图 1.1.3.9c、图 1.1.3.9d 的炮检距分别为 0m、1000m、2000m 和 3000m。图 1.1.3.10 为不同 CMP 集上的绕射波，图 1.1.3.10aCMP 点在绕射点的正上方，图 1.1.3.10bCMP 点距绕射点 1500m，图 1.1.3.10cCMP 点距绕射点 2500m。

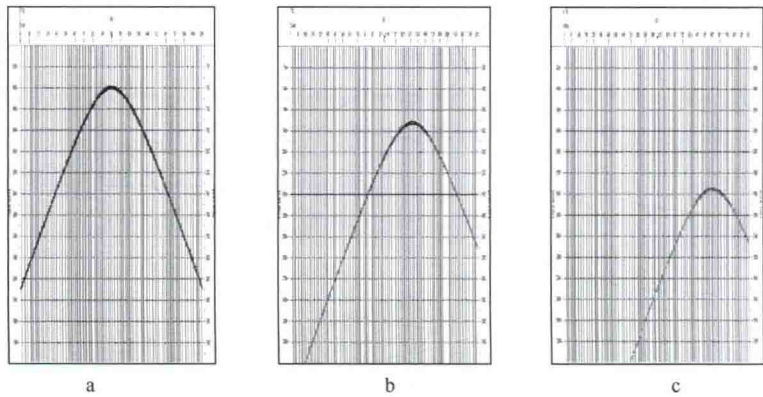


图 1.1.3.7 不同单炮记录中的绕射波

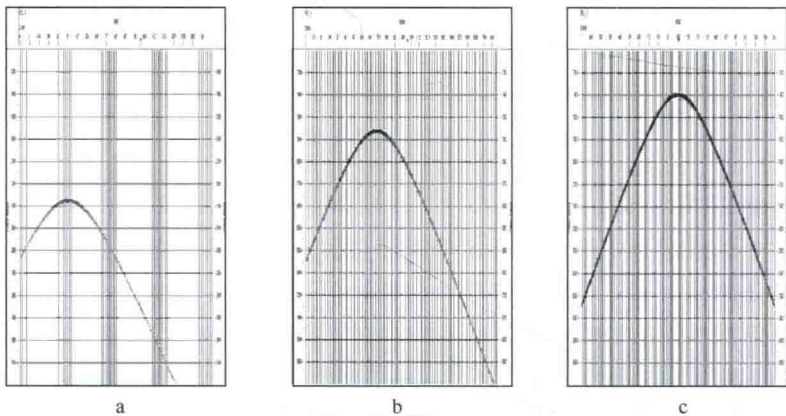


图 1.1.3.8 共接收点集中的绕射波

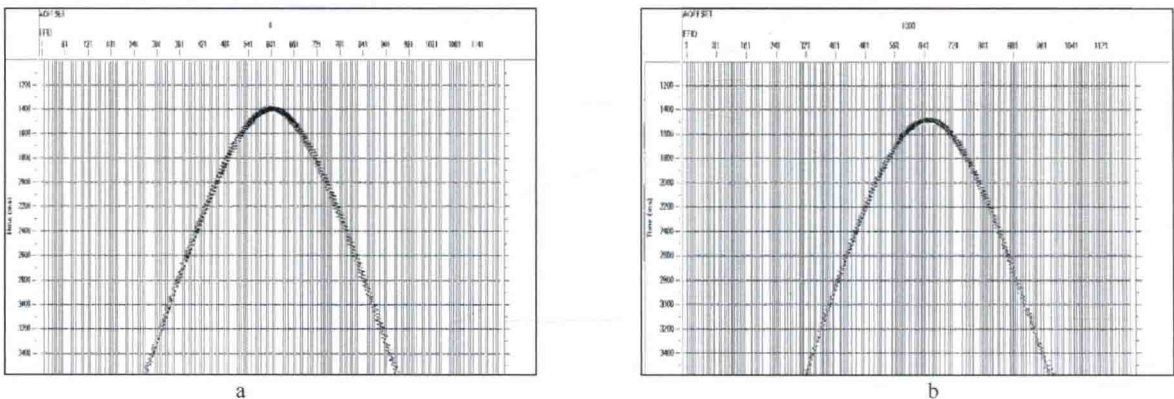


图 1.1.3.9 共炮检距集中的绕射波