

海洋石油地震勘探

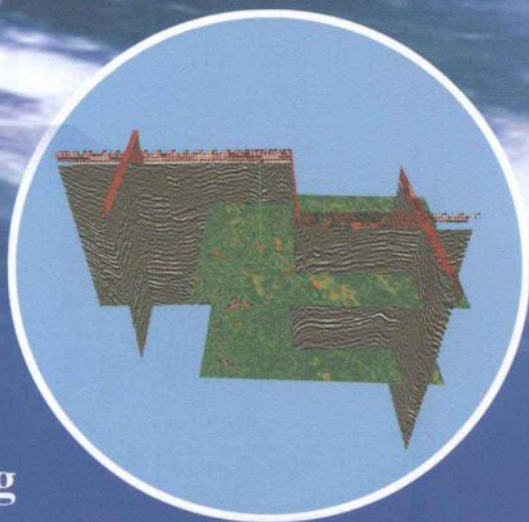
——资料采集与处理

○ 杨振武 编著



Offshore Oil Seismic Exploration

Data Acquisition and Processing



石油工业出版社

海洋石油地震勘探

——资料采集与处理

杨振武 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书内容涵盖了目前海洋石油地震勘探野外资料采集方法和地震资料处理方法,偏重于技术应用。

本书可供石油地震勘探技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

海洋石油地震勘探——资料采集与处理/杨振武编著.

北京:石油工业出版社,2012.7

ISBN 978-7-5021-9113-9

I. 海…

II. 杨…

III. ①海上油气田-地震勘探-数据采集

②海上油气田-地震勘探-数据处理

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 120775 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京晨旭印刷厂

2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 14

字数: 360 千字

定价: 68.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

1966年春，中国首支海洋地震勘探队在海南莺歌海诞生，随之拉开了中国海上油气勘探的序幕。找油找气，地震先行。为了实现“海上大庆”的梦想，几代中国海洋石油物探工作者劈波斩浪，耕耘碧海。在渤海、黄海、东海、南海等蓝色国土的40多年的勘探中，物探装备由土到洋，技术水平由落后到紧跟世界前沿；海洋石油物探队伍日益发展、壮大，为建成“海上大庆”发挥了名副其实的“先锋”作用。

本书作者杨振武同志作为一位近四十年来在生产、科研第一线的物探科技工作者，从事过野外资料采集、室内资料处理及其方法研究，以及资料解释等全部的物探工作，在海洋石油地震勘探资料采集与资料处理方面积累了较丰富的经验。他编著的《海洋石油地震勘探——资料采集与处理》一书，对中国海洋石油地震勘探资料采集与处理技术进行了比较系统的总结与提炼。该书涵盖了野外资料采集设计与室内资料处理的方法手段，对海上常规三维地震勘探、高分辨率三维地震勘探、高精度三维地震勘探、深海地震勘探、海底电缆地震勘探、海上多波地震勘探、时移地震勘探，以及海上VSP资料采集方法和资料处理技术，做了比较详细的介绍和讨论，较全面地反映了中国海洋石油在地震资料采集和数据处理方面的技术现状与能力。

海上石油地震资料的采集处理是技术性很强的工作，更是一门理论与实践相结合的工作。我不是物探方面的专家，但是我深深地佩服通过地震资料就能够看（分析）出哪里有油、有水、有气的勘探专家门。他们用毕生精力去不断实践，用全部的心血去逐步积累，才建立起这门学科，相信理论与实践的进一步结合将推动物探技术的进一步发展。

该书在海上地震资料采集与地震资料处理技术方面具有较高的参考价值，该书的出版是中国海洋石油物探事业的又一成果，相信能给海洋物探工作者一些参考与启迪。

抚今追昔、继往开来，中国海洋石油物探必将有更加辉煌灿烂的明天！

中国工程院院士

2012年4月25日

前言

宁静的南海北部辽阔的大陆架上，千百年来，海浪拍击着礁石，潮起潮落，生生不息……

中国海洋石油物探事业于 20 世纪 60 年代初期起步、探索于南海莺歌海海区。1966 年春天，沉睡千万年的海南岛莺歌海近岸，迎来了崭新的一天——中国海洋地震勘探队在此诞生。从此，海洋石油物探工作者鏖战四海波涛，纵横穿梭耕耘碧海……

在耕耘渤海、黄海、东海、南海等四大蓝色国土的 40 多年中，海洋石油物探队伍不断发展、壮大，技术装备由土到洋，技术水平由落后到紧跟世界发展趋势……

弹指一挥间，笔者从 1973 年踏入石油物探行业以来，业已过去了 38 年。

笔者从 1976 年开始从事中国海洋石油物探事业。从野外资料采集到野外资料采集质量控制，从室内地震资料解释到地震资料处理方法研究，从地震软件编写到地震资料处理。工作的海域从南到北，先后在中国海洋石油南海西部计算中心（后为湛江特普高科技有限公司）和中国海洋石油物探东方数据处理公司（后为中海油服物探事业部数据处理中心）工作 30 多年。在这两个处理中心长期担任过数据处理技术和生产方面的组织领导工作，亲自负责中国海洋石油南海西部最早的高分辨率地震资料处理研究、三维地震资料处理方法研究和 VSP 资料处理方法研究与实践。本书是笔者一生的经验积累和总结，也是中国海洋石油全体地震数据处理人员的经验总结，基本反映了中国海洋石油目前地震资料采集和资料处理的现状。

美国著名地球物理学家渥·伊尔马滋说过，“地震数据处理并不完全属于科学客观性的范畴。数据处理看起来有点和解释一样的味道，有人甚至将它看做是一门艺术。”这也说明，地震数据处理人员既需要有一定的理论知识作为基础，又需要有一个长期的经验积累过程才会“熟能生巧”。显然，如何提高资料处理最终成果的质量，地震处理员的分析能力与地震数据处理软件的优劣性一样重要。这就要求地震数据处理人员既要有深厚的理论基础，又要有实践者的“辛苦”，并在实践中注意基本功的训练和经验的积累与升华，才能真正地进入“自由的王国”。

本书偏重于实践和技术上的应用，而非处理方法理论的研讨，笔者希望该书能给海洋石油物探技术工作者一些参考和启迪。需要说明的是，书中所述观点，仅仅是一家之言，一孔之见；见仁见智，读者自辨。同时，书中难免有不恰当、不充分、不合理和不准确的地方，恳切希望读者提出宝贵意见。

笔者在书中引用了庄祖垠、王征、金明霞、王旭谦、张善刚、麻志国等人的研究成果。另外，在写作过程中，李庆收、易淑昌、张福州、杨少虎等同志为笔者做了很多的工作。笔者还引用了中国海洋石油诸多物探专家如谢玉洪、陈宝书、万欢、赵仁永、王云峰、刘玉班、傅旦丹等人的很多研究成果和图件。在此，笔者一并表达真诚的感谢！

中海油田服务股份有限公司副总裁董伟良对本书的编写出版给予了大力的支持，在此表示深深的谢意！笔者还要感谢中国海洋石油天津分公司总地质师夏庆龙、勘探部物探经理周滨；中国海洋石油湛江分公司总经理谢玉洪、勘探部物探经理李列；中国海洋石油研究总院总物探师李绪宣，勘探研究院总物探师刘春成、首席工程师陈宝书，国际研究中心经理杜向

东；中国海洋石油上海分公司总经理张国华、勘探部物探总监陈华、研究院总物探师张雷；中国海洋石油深圳分公司研究院总物探师汪瑞良、勘探部物探经理张振波；中海能源工程研究院总物探师万欢等。他们对笔者的工作给予了很多的帮助和支持，在此一并致谢！

全书所有图件均来自中海油田服务股份有限公司物探事业部数据处理中心，以及中国海洋石油天津分公司、湛江分公司、上海分公司、深圳分公司、研究总院、中海能源湛江特普高科技有限公司的各个实际项目，数据均没有具体位置标志，没有实际意义，在此笔者希望得到原拥有者的谅解，并致以诚挚的感谢。

最后，笔者要特别感谢夫人程建春和儿子程越焱，是他们的大力支持才使我最终决定撰写此书。

目 录

1 海上地震勘探概述	(1)
1.1 海上地震勘探工作的特点	(1)
1.2 海上地震勘探采集参数设计	(2)
1.3 海上地震震源与电缆	(14)
1.4 海上拖缆地震资料采集	(20)
1.5 海上拖缆地震资料主要特征	(23)
1.6 海上资料采集现场质量控制处理	(25)
2 海上地震干扰噪声与提高信噪比	(29)
2.1 海上地震干扰噪声的特点	(29)
2.2 海上地震勘探中的特殊干扰波	(30)
2.3 海上地震噪声衰减技术	(44)
2.4 海上多次波与多次波衰减	(55)
3 海上三维地震勘探技术	(82)
3.1 海上三维处理技术的关键问题	(82)
3.2 海上地震资料采集足迹消除技术	(84)
3.3 “高保真”与海上地震数据相对保幅处理	(97)
3.4 海上三维拼接处理	(103)
3.5 海上三维叠前时间偏移处理	(107)
3.6 叠前深度偏移处理技术	(112)
3.7 偏移技术应用进展	(121)
4 海上高分辨率地震勘探技术	(125)
4.1 海上高分辨率地震勘探技术概述	(125)
4.2 海上高分辨率地震资料采集实例	(127)
4.3 海上高分辨率三维地震资料处理技术	(129)
5 海上高精度、高密度地震资料采集与处理	(145)
5.1 高密度地震采集技术	(145)
5.2 海上高密度三维勘探实例	(147)
5.3 海上单检波器勘探实例	(150)
6 深水资料、上下缆资料采集与处理	(155)
6.1 海上长电缆资料采集与处理	(155)
6.2 深海勘探资料采集与处理	(157)
6.3 上下源、上下缆资料采集与处理	(165)
6.4 PGS 水陆双检资料采集处理	(172)
7 海底电缆、多波多分量资料采集与处理	(176)
7.1 海底电缆资料采集与处理	(176)

7.2 海上二维多波地震勘探技术	(188)
8 海上时移地震油藏监测技术	(199)
8.1 时移地震的概念与资料采集	(199)
8.2 时移地震资料处理	(200)
8.3 中国海洋石油时移地震实例	(204)
9 VSP 资料采集与处理	(206)
9.1 VSP 资料采集	(206)
9.2 VSP 资料处理	(208)
参考文献	(213)

1 海上地震勘探概述

从 1962 年至今,海上地震勘探技术发展已走过了 40 多个年头,其技术发展经历了:从光点记录到 24 位模数转换多缆多源数字磁带记录;从炸药震源到高分辨率相干空气枪阵列震源;从光学六分定位、罗盘导航到 DGPS、无线电声纳综合定位导航;从单次二维地震到非线性多次覆盖三维地震;从“一炮定终身”的无处理地震到运算速度达数千亿次/秒的大规模并行数字处理;从二维模拟处理到全三维数字处理;从 NMO 速度分析和叠加到 DMO 速度分析和叠加;从二维叠后射线偏移到三维叠前波动方程时间偏移至三维叠前深度偏移;从人工解释绘图到人机交互三维可视化解释绘图;从单一的构造解释到构造、地震地层学和岩性地震学综合解释;从单一的纵波地震勘探到转换波多波地震勘探;从常规二维地震作业到高分辨率二维至三维地震作业。可以说海上地震勘探技术经历了脱胎换骨的变化与技术飞跃,达到了与国际先进技术接轨的水平。

海洋石油物探人多年的耕耘,已换来了丰硕的地质成果:

- (1) 查清了中国海域的区域构造和有利沉积相带的分布;
- (2) 基本查明了构造带和主要局部构造的分布;
- (3) 为油气钻探提供了井位,发现了以蓬莱 19-3 油田为代表的多个亿吨级大油田和以崖城 13-1 气田为代表的多个大气田,并在 2010 年建成了“海上大庆”;
- (4) 落实构造和探井的成功率不断提高,现分别达到 53% 和 49%。
- (5) 为开发可行性研究、建立油气藏模型、编制 ODP 报告提供各种主要参数和地质依据。

上述成果充分证明,海洋石油物探在海上油气勘探与开发过程中起到了“先锋”的作用。

1.1 海上地震勘探工作的特点

地震反射法是海洋石油勘探中应用最广泛而又发展最迅速的物探方法。这是因为海上地震反射法在方法技术上已日趋完善,在寻找石油、天然气工作中很有成效,并且海上地震工作能在航行中作连续观测,具有高速度的生产能力等突出优点。

海上地震反射法与陆地地震反射法相比,在方法原理、资料处理和解释方法等方面基本上是一样的。但在野外工作方面,由于海洋与陆地有很大的差别,海上地震工作也有许多特殊性。

野外资料采集是整个地震勘探工作中的基础工作,它的基本任务是采集地震数据,是获取原始资料的具体手段,其资料采集的质量决定着勘探的精确度和成果的质量水平。因此,我们必须对野外地震资料的数据采集工作予以高度的重视。

海上地震工作是以地震队(船)的组织形式来完成的。可把地震仪器安装在船上,使用海上专用的电缆和检波器,在地震船航行中连续地进行地震波的激发和接收。

海上地震工作具有下述几方面的特点:

- (1) 使用非炸药震源,如空气枪。

(2) 野外记录数字化, 使用 240 道、480 道、720 道、960 道, 甚至几千道的数字地震仪。

(3) 使用等浮数字电缆。为了适应高覆盖次数的需要, 等浮电缆的道数不断增加 (如中海油田服务股份有限公司所属的海洋石油 720 地震船已多达 5760 道)。

(4) 一般为单船作业, 记录仪器和震源在同一条船上。

(5) 采用高次覆盖技术, 例如在南海最高已达 244 次。

(6) 采用导航定位技术实时确定船的位置和炮点的位置。

海上地震资料采集与陆地地震资料采集有很大的差异, 由于地震船能够昼夜不停地在航行中激发和接收地震波, 所以生产效率很高。船的速度通常为 4~5kn/h, 每天最多可以采集 200km (航行) 二维或三维地震资料。另外, 由于激发和接收条件都是处于水介质的相同环境中, 所以与陆地采集的资料相比, 地震资料质量较高。在海上进行资料采集时, 船的前进速度为常速很重要, 因为它关系到震源的激发时间。但是船速受到风浪涌流等多种因素的影响, 必须使用导航定位及时调节船速, 才能保持它的恒定。

此外, 在海上连续工作的情况下, 还有一些影响多次覆盖的因素。由于海流的影响, 接收电缆与设计测线往往具有一定的夹角 (叫做电缆羽角), 炮点间距也不均匀, 在反射层倾角很大时, 会造成道集内反射点之间分散性较大。这些问题在海上地震工作中都要注意。为了减小电缆羽角的影响, 在施工设计时测线应尽可能垂直于构造走向; 为了在实际生产中减小电缆羽角本身, 在可能条件下可适当增大船速或是在电缆上安放水鸟等。

海洋地震勘探也有静校正问题。这是由于震源与检波器的深度不同, 需要校正; 另外当海底崎岖不平时, 和陆地风化层校正类似, 要作海底地形校正。

1.2 海上地震勘探采集参数设计

在地震采集之前, 首先需要设计相应的采集参数, 包括排列长度、覆盖次数、震源大小等, 每一个参数都有一定的应用范围, 各个参数之间既相互联系, 又相互制约, 因此有必要对它们进行详细论证。

1997 年中国海洋石油在南海西部海域的自营地震勘探中首次引进了 SED 技术, 即地震勘探设计与评价技术, 从而实现了三维地震采集参数的优化选择。从此, 三维 SED 技术在中国近海油气勘探中得到了广泛的应用。

目前, 随着勘探难度加大, 常规的二维和三维采集需要面向更为复杂的地质目标, 而新的采集技术 (如 OBC 等) 和采集方式 (如上下缆、上下源、拖缆双检等) 也逐渐被尝试和投入生产, 在这种情况下, 为客户提供更加具有科学依据的采集参数至关重要。

1.2.1 地质任务

地质任务是选择勘探方法的基础, 如要解决一般的油气和构造分布情况, 可采用一般的反射地震勘探; 如要在已开发生产的油田上监测油气的变化和残存油气的情况, 可采用延时地震; 如要解决由于油气的扩散引起的得不到好反射层的问题, 可采用多波勘探等。

就目前世界石油资源的开发现状和物探新技术发展的情况, 多数采用常规三维地震勘探, 在海上就是采用双源多缆三维地震勘探。

设计的采集参数需要保证新的采集成果达到以下效果:

- (1) 提高主要目的层分辨率;
- (2) 满足储层研究和烃类检测要求;

(3) 查清油气藏关系和已钻井的成败原因。

总之，地震采集要符合难度日益加大的地质任务和地球物理要求，同时要节省成本，满足投资的要求。

1.2.2 工区设计

首先根据油气勘探及开发的要求，提出一个勘探范围，这个范围称作地质勘探范围，其目的是要得到这个范围垂直正下方的构造、油气情况。

考虑到构造多为向四面外倾的情况。要想得到地质勘探范围的地质情况，其作业满覆盖范围必须向 x 、 y 方向扩大一个偏移孔径，这样，扩大后的面积为满覆盖范围。它经资料处理中的偏移处理后，就得到地质勘探范围。

在作业过程中，作业船作完测线后还要继续前进，以便调头后施工时把电缆拖直，这个继续前进的长度一般为整个电缆长的一倍半，这个范围，也是工区的一部分。另外，在水上不能有严重干扰物、障碍物，水深要满足勘探船的要求，这个范围称为作业范围。

因此，在工区设计时，必须考虑地质勘探范围、满覆盖范围和作业范围三者的关系。

1.2.3 测线方向设计

海上地震勘探测线方向主要考虑构造方向、长测线方向、海流方向。

1.2.3.1 构造方向

通常，主测线的采集方向应垂直于主要构造走向，而联络测线的采集方向应与主要构造的走向一致，这是海陆通用的选择标准。

1.2.3.2 长测线方向

如果我们的工区是一个长方形，在构造条件许可时，测线方向尽量采用工区的长轴方向，使测线尽量变长，这可大大提高工作效率。这是因为在海上施工时，水下接收系统（电缆）所出的故障大部分都发生在调头期间，因为这时电缆处于弯曲状态，运行速度多变，它容易沉到海底和挂上障碍物。调头越多，其故障率越高，其效率也就越低。因此，设计测线方向时应尽量考虑沿工区的长测线方向施工。

1.2.3.3 海流方向

在海上地震资料采集时，由于受风向、潮流等因素的影响，船尾拖着的接收电缆和设计测线并不重合，往往偏离设计测线有相当大的距离，从而产生所谓羽角问题（羽角是电缆平均方位或尾标方位与设计测线方位之夹角）。为了减小电缆羽角，在设计测线方向时，应考虑选择平行潮流的方向，以减小电缆羽角。

总之，在保证满足构造走向要求的前提下，还应当适当考虑工区内潮汐流向、羽角大小、工区形状、采集效率等方面的要求，具体的采集方位角还应参考三维照明结果分析，根据具体情况合理选取测线方向。

1.2.4 主要采集参数论证

在进行采集参数论证时，要根据研究区的不同构造单元、不同埋藏深度等地质条件选取一个或多个论证点，在论证点处提取的地球物理参数要有代表性，能够控制区域构造特征。

例如，根据工区内已有的二维采集资料、井资料等，提取本区主要的地球物理模型参数（表 1.2.1），应用分析软件，对主要采集参数进行论证计算，以优选主要参数，可得到具有工区普遍意义的论证点数据，在论证时要结合 VSP 资料及地区分层数据。

表 1.2.1 论证点参数地球物理模型数据 (其中 T_2 至 T_8 为主要目的层)

层 名	双程时 (s)	叠加速度 (m/s)	层速度 (m/s)	深度 (m)	地层倾角 (°)	最大频率 (Hz)	主频 (Hz)
海底	0.027	1500	1500	20	1.0	56	40
T_0	1.050	2020	2031	1060	3.0	49	35
T_2	1.265	2150	2450	1359	4.0	45	32
$T_3^{\text{上}}$	1.452	2300	2600	1669	5.0	39	28
$T_3^{\text{中}}$	2.600	2621	2977	3407	6.0	36	26
T_3	2.900	2700	3206	3915	7.0	34	24
T_8	3.325	2896	3983	4814	10.0	31	22

根据以上数据可建立地震地质模型, 并进行后续采集参数论证。

1.2.4.1 覆盖次数

如果工区有二维资料并且二维资料主要目的层反射有良好的信噪比, 则采用经验公式: 三维覆盖次数不小于二维覆盖次数的一半。

1.2.4.2 面元大小

设计面元大小的条件:

(1) 面元大小小于地质目标尺度的 2~3 倍, 经验公式: 面元边长 b = 地质目标尺度/3。如果地质目标尺度为 100m, 则面元边长可选小于 33m。

(2) 面元大小小于混叠频率 (避免假频), 即: 面元边长 $b < v_{\text{int}} / (4 \times f_{\text{max}} \times \sin \alpha)$, 其中: f_{max} 为最高无混叠频率; v_{int} 为地层速度; α 为地层倾角。设: $v_{\text{int}} = 3000\text{m/s}$, $f_{\text{max}} = 65\text{Hz}$, $\alpha = 15^\circ$, 则面元边长应小于 44m。

(3) 面元大小小于现有的横向分辨率: 面元边长 $b < v_{\text{int}} / (2 \times f_{\text{dom}})$, f_{dom} 是目标优势频率。按照 $f_{\text{dom}} = 45\text{Hz}$, 则面元边长小于 33m。

表 1.2.2 为面元分析举例。

表 1.2.2 面元分析

层 位	双程时间 (s)	主频 (Hz)	最大频率 (Hz)	叠加速度 (m/s)	层速度 (m/s)	界面最大倾角 (°)	最高无混叠频率计算面元 (m)	横向分辨率计算面元 (m)
海底	0.0270	40	56	1500	1500	1	77	19
T_0	1.0500	35	49	2020	2031	3	119	29
T_2	1.2650	32	45	2150	2450	4	157	38
$T_3^{\text{上}}$	1.4250	28	39	2300	2600	5	190	46
$T_3^{\text{中}}$	2.6000	26	36	2621	2977	6	196	57
T_3	2.9000	24	34	2700	3026	7	196	67
T_8	3.3250	22	31	2896	3986	10	186	91

综上所述, 并考虑到电缆道间距为 12.5m, 采用 CMP 面元大小为 12.5m×25m, 满足本工区要求。

1.2.4.3 最小偏移距 (x_{min})

一般而言, 从 P 波剖面要求, 最小偏移距 x_{min} 应越小越好, 以便对浅反射界面有适当的

采样。若最小偏移距太大,就不能保证浅层达到多次覆盖的要求。但是,海上作业时由于船尾螺旋桨噪声较大,为了避开作业船引起的噪声,要使最小偏移距很小也是不太现实的。

可见,最小偏移距主要是为了避开作业船引起的噪声。选择最小偏移距的经验计算公式: $x_{\min}$ 不小于最浅反射层(我们选择的最浅反射层为海底层)深度的1.0~1.2倍。

压制多次波要求:最小炮检距处多次波剩余时差应超过多次波低频谐波周期的1/4到1/2(120~297m)。

另外,考虑到工作船及其拖带的水下设备的影响和拖缆作业的固有特点,选择范围为: $120\text{m} \leq x_{\min} \leq 280\text{m}$ 。

1.2.4.4 最大偏移距($x_{\max}$)

最大偏移距的选择主要考虑以下几个方面的因素。

(1) 目标层深度与最大偏移距关系。

最大炮检距应接近于最深目的层深度。例如,目的层深度为5000m,则最大偏移距不小于5000m。

(2) $x_{\max}$ 小于折射波(初至波)干涉。

当反射界面较浅时,初至波会在远偏移距处切过有效反射同相轴,数据处理时,为了保证叠加剖面的有效反射不受初至波的干扰,必须切除初至干涉,从而限制了最大炮检距长度。从图1.2.1可见,海水直达波(速度为1500m/s)与浅层反射同相轴相交,造成初至强干扰带,而构造深部的地层基本不受初至的影响。如果我们考虑主要目的层 T_8 ,则 $x_{\max} \leq 5750\text{m}$ 。

(3) $x_{\max}$ 小于动校拉伸不能容忍的炮检距。

资料处理时,动校正使远偏移距的波形发生畸变,且动校正量越大,拉伸越严重。为使动校正后浅、中层有效波在大炮检距处不至造成过大拉伸,一般限定动校正拉伸率不大于12.5%。

动校拉伸系数与排列长度的关系为

$$\kappa = \frac{x^2}{2t_0^2 v^2}$$

式中: κ 为拉伸系数; x 为炮检距; t_0 为双程旅行时; v 为叠加速度。

根据动校拉伸与排列长度的关系,当动校拉伸率不大于12.5%时求出相应的炮检距见图1.2.2所示,当目的层深度为3.325s时,最大偏移距 $x_{\max} \leq 5480\text{m}$ 。

(4) $x_{\max}$ 大于速度分析精度所需的炮检距。为保证资料处理时的速度拾取精度,CDP道集必须具有一定数量的远偏移距数据,最大炮检距越大,速度分析精度越高,为了保证最大炮检距满足一定的速度分析精度。应使正常时差大于1/2视周期,并满足以下公式,即

$$x_{\max} \geq \sqrt{\frac{2HV}{f}}$$

式中: H 为目的层深度,单位为米(m); V 为均方根速度,单位为米/秒(m/s); f 为视频率,单位为赫兹(Hz)。

通常,速度分析精度的上限值为5%。当速度分析误差不大于5%时,可通过计算确定相应排列长度,见图1.2.3。例如:在目的层深度3.325s时, $x_{\max} = 3430\text{m}$ 。

(5) 反射能量与排列长度的关系。

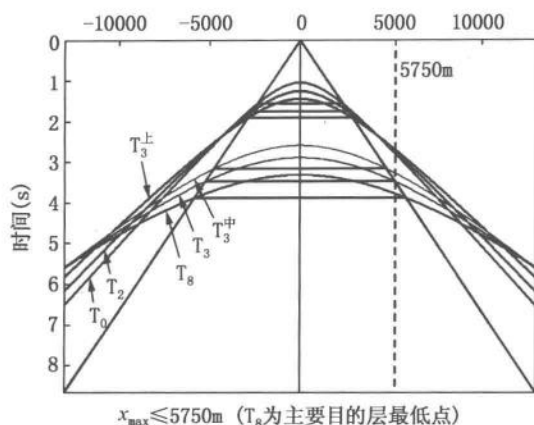


图 1.2.1 初至切除范围与排列长度关系

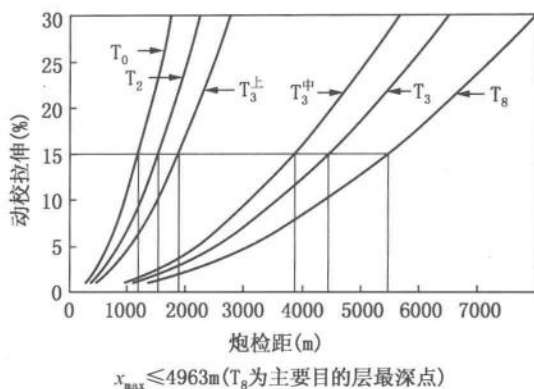


图 1.2.2 动校正拉伸与排列长度关系

针对纵波勘探，当反射界面入射角小于临界角时，反射能量比较稳定，这就决定了排列长度不能太长，见图 1.2.4。

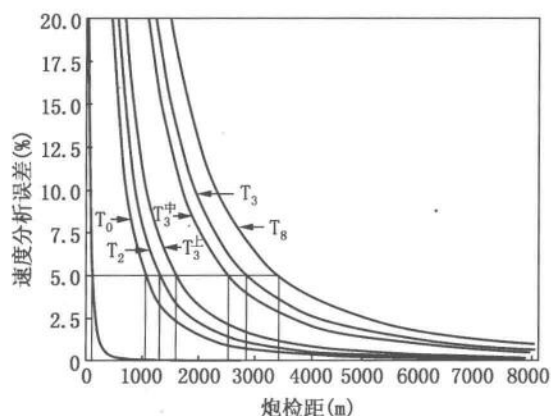


图 1.2.3 速度分析精度与排列长度关系

$x_{\max} \geq 4148\text{m}$ (T_8 为主要目的层最深点)

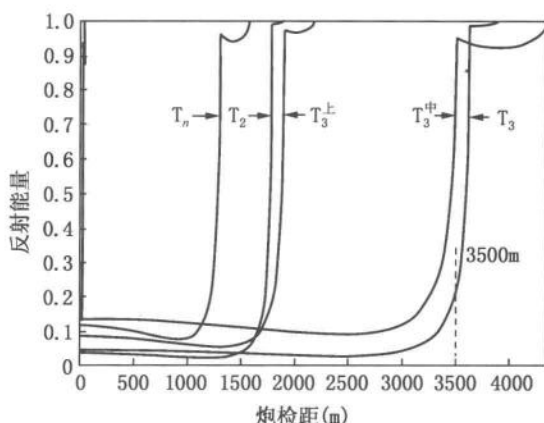


图 1.2.4 排列长度大于 4000m 后，
反射系数稳定性降低

(6) $x_{\max}$ 大于辨别多次波所需的炮检距。

压制多次波总是需要利用剩余时差，而剩余时差的大小取决于 $x_{\max}$ 的大小，也取决于多次波与一次波的速度差。一般来说，采集上适当加大偏移距有利于对多次波的压制。

$$x_{\max} > v_{\text{多}} \times \sqrt{\Delta t^2 + 4\Delta t t_0}$$

为压制波剩余时差之差应超过多次波的一个低频谐波周期以上。

如果：有效波最低频为 10Hz，有效波最高频为 120Hz，双程时为 2.9s，叠加速度为 3430m/s，多次波速度为 1800m/s，则为 $x_{\max} \geq 3430\text{m}$ ，见图 1.2.5。

(7) $x_{\max}$ 大于 AVO 分析所需的炮检距，即 $x_{\max}$ 至少能让目标反射角度足以表现 AVO 效应。AVO 分析是分析反射波振幅与其入射角的关系，以推测地层的含油气性。而地层界面的反射系数随入射角变化最明显的，是在入射角 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间。因此 $x_{\max}$ 的设计，应保证入射角达 35° ，最好达到 40° ，以保证 AVO 分析的效果。

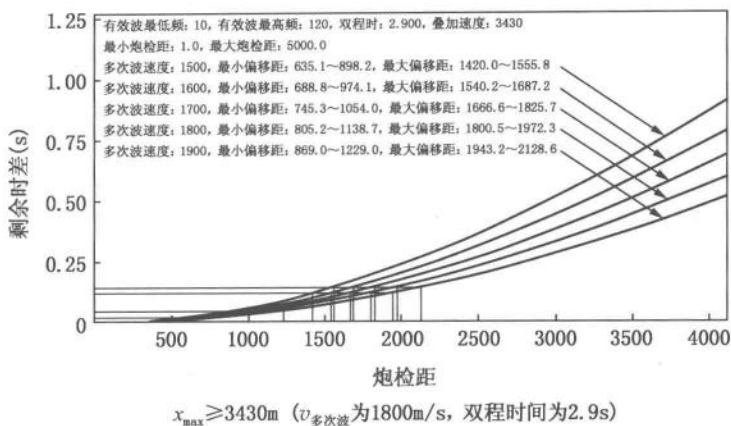


图 1.2.5 多次波剩余时差与排列长度关系

综上所述，在目的层深度 1000~4000m 时，最大炮检距范围见表 1.2.3。

表 1.2.3 不同条件的偏移距

动校拉伸要求	不大于 4693m
速度分析精度	不小于 4148m
为了保证反射系数稳定性	接收 P 波不大于 4000m、PS 波不大于 3900m
考虑到初至切除	不大于 5750m
考虑到以往记录分析	不小于 4814m

综合考虑论证点数据及整个工区勘探目的层深度，建议最大炮检距长度：4814~5750m。

1.2.4.5 偏移孔径 (L)

偏移孔径是为了使任意倾斜同相轴能正确成像而加到三维测区边缘区域的宽度。计算偏移孔径主要考虑以下几个方面的因素。

- (1) 偏移孔径大于第一菲涅耳带半径。
- (2) 为了使倾斜地层和断点在偏移后能正确归位，根据以下公式计算偏移孔径（表 1.2.4）。

表 1.2.4 绕射归位距离与偏移孔径

反射层	双程时间 (s)	叠加速度 (m/s)	层速度 (m/s)	主频 (Hz)	绕射能量归 位倾角 (°)	菲涅耳半径 (m)	绕射归位距离 (m)	实际倾角 偏移孔径
T ₀	1.0500	2020	2032	35	30	176.1	612.3	55.6
T ₂	1.2650	2150	2450	32	30	229.0	785.1	95.1
T ₃ ^上	1.4520	2300	2600	28	30	279.3	963.6	146.0
T ₃ ^中	2.6000	2621	2978	26	30	442.7	1967.2	358.1
T ₃	2.9000	2700	3206	24	30	512.4	2260.3	480.7
T ₈	3.3250	2896	3984	22	30	661.8	2779.7	848.9

①为了保证倾斜地层偏移后正确归位，有

$$L = H \times \tan \alpha$$

式中： H 为目的层深度； α 为地层边界最大倾角。

②为了保证边界断点偏移后正确归位，有

$$L = H \times \tan 30^\circ$$

式中： H 为目的层深度。

如三维区内的构造为不对称的背斜，工区四侧镶边偏移孔径不同。考虑到最深目的层 T_8 的计算结果，本工区镶边距离应该为 2800m。

1.2.4.6 覆盖次数渐减带

覆盖次数渐减带是为了建立满覆盖次数而加上去的额外的地面面积。通常覆盖次数渐减带和偏移孔径之间有一定的重叠，因为在偏移孔径外边界上可允许覆盖次数稍微减少。

为保证地面满覆盖面积，施工时必须在施工方向上延长半个排列长度，由此计算出施工面积。

1.2.4.7 采样率、记录长度

根据采样定理，采用 2ms 采样率时，可以保护的最高不失真频率为 250Hz。在进行 SED 设计时，考虑到工区目的层埋深、断裂、断块是否发育的特点，在防止产生假频，保证有效反射频带宽度不会受到影响的同时，为了提高采集精度，并为以后的精细处理做准备，建议采用 1ms 的采样间隔。在目前情况下，没有必要使用 0.5ms 的采样率。

记录长度应足以记录偏移孔径、绕射尾部和目标层。例如：

(1) 取最深目的层 T_8 反射时间为 4.0s， T_{mto} 为 500ms（多次波最大剩余时差）， $T \approx 4500\text{ms}$ 。

(2) 根据常规，通常认为 30° 作为一个适当的偏移角度可以获得更长的绕射双曲线：记录长度 = $4500\text{ms} / \cos 30^\circ = 5196\text{ms}$ 。

(3) 增加记录时间（经验数值为 1000ms）将使得基底绕射具有更长的尾巴，可以改善成像的效果，此时，记录长度 = $5196 + 1000 = 6196\text{ms}$ 。

(4) 考虑工区中基底追踪及将来深度处理的要求，同时兼顾 ps 波的采集，有

$$\frac{2T_{\text{PS}}}{T_{\text{PP}}} - 1 = \frac{v_{\text{P}}}{v_{\text{S}}}$$

式中： T_{PS} 是转换波反射层时间； T_{PP} 是纵波对应层位时间； v_{P} 、 v_{S} 为纵、横波速度。

(5) $R_{\text{max}} = SI/v - O$ 。其中： R_{max} 最大记录长度， SI 炮间隔， v 船速， O 采集系统延迟时间。假设航行速度 $v = 2.57\text{m/s}$ ，炮点间距 $\Delta S = 25\text{m}$ ， $SI = 50\text{m}$ ， $O = 0.1\text{s}$ ，则：

$$R_{\text{max}} = 50/2.57 - 0.1 = 19.35\text{s}$$

因此，相邻炮点间的时间间隔能够满足 8s 记录长度的要求，记录长度可以选择为 8s（表 1.2.5）。

表 1.2.5 采集参数建议

面元	12.5m×25m
线间距离	300~400m
最大偏移距	$4814\text{m} \leq x_{\text{max}} \leq 5750\text{m}$
偏移孔径	2.8km
记录长度	8s
覆盖次数	大于 96 次
采样率	1ms

1.2.4.7 震源系统分析

对于空气枪震源有：震源总容量、空气枪沉放深度和气枪空气压力这些参数的选择主要是保证得到满足要求的震源子波，其中空气压力已由船上装备的空压机限定，没有选择的余地。现在，作业一般采用 Sleeve 枪，其最佳组合是 3180in³、2000psi 阵列。

1.2.4.7.1 震源子波特性分析

空气枪阵震源，早已占据海上地震资料采集的统治地位。海上地震资料采集对震源子波的基本要求是：

- (1) 子波的能量，它用主脉冲的振幅表示，通常有两种表示法：峰—峰振幅；零—峰振幅。对于一般地震勘探，峰—峰振幅值达 100bar·m 左右就满足要求。
- (2) 气泡振幅相对要小，气泡比（初始脉冲振幅与气泡振幅之比）至少大于 15：1。
- (3) 子波信号要稳定。

模拟显示，枪阵在 5m 沉放深度激发的模拟子波显示震源输出峰—峰值为 133.0bar·m，气泡比为 31.3，见表 1.2.6。

表 1.2.6 震源设计与能量分析（震源深度 3~9m，电缆深度 0m）

震深度 (m)	峰—峰值 (bar·m)	气泡比	频带宽度 (Hz)
3	131.4	45.1	8~168
4	130.7	36.7	8~140
5	133.0	31.3	7~118
6	139.6	28.4	6~102
7	140.6	25.1	6~89
8	137.8	20.7	6~80
9	137.7	18.0	6~73

1.2.4.7.2 频谱分析

频带宽度是分辨率的决定性因素，为保证有足够宽的频谱，要求子波的脉冲宽度要窄。模拟频谱显示使用的震源频带较宽，主频高，第一陷波点出现在 150Hz（图 1.2.6）。

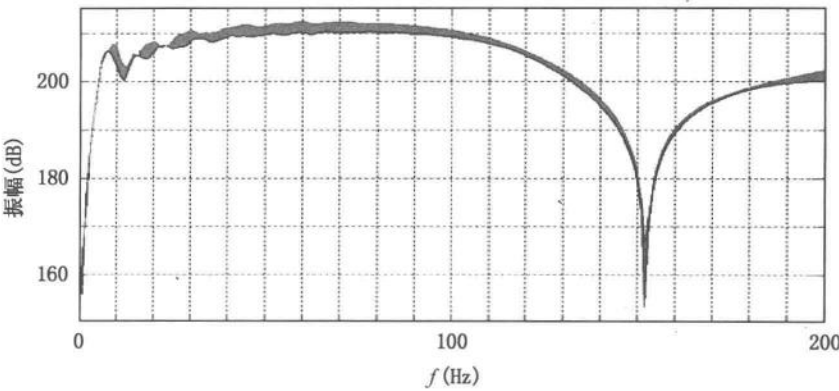


图 1.2.6 震源子波频谱