



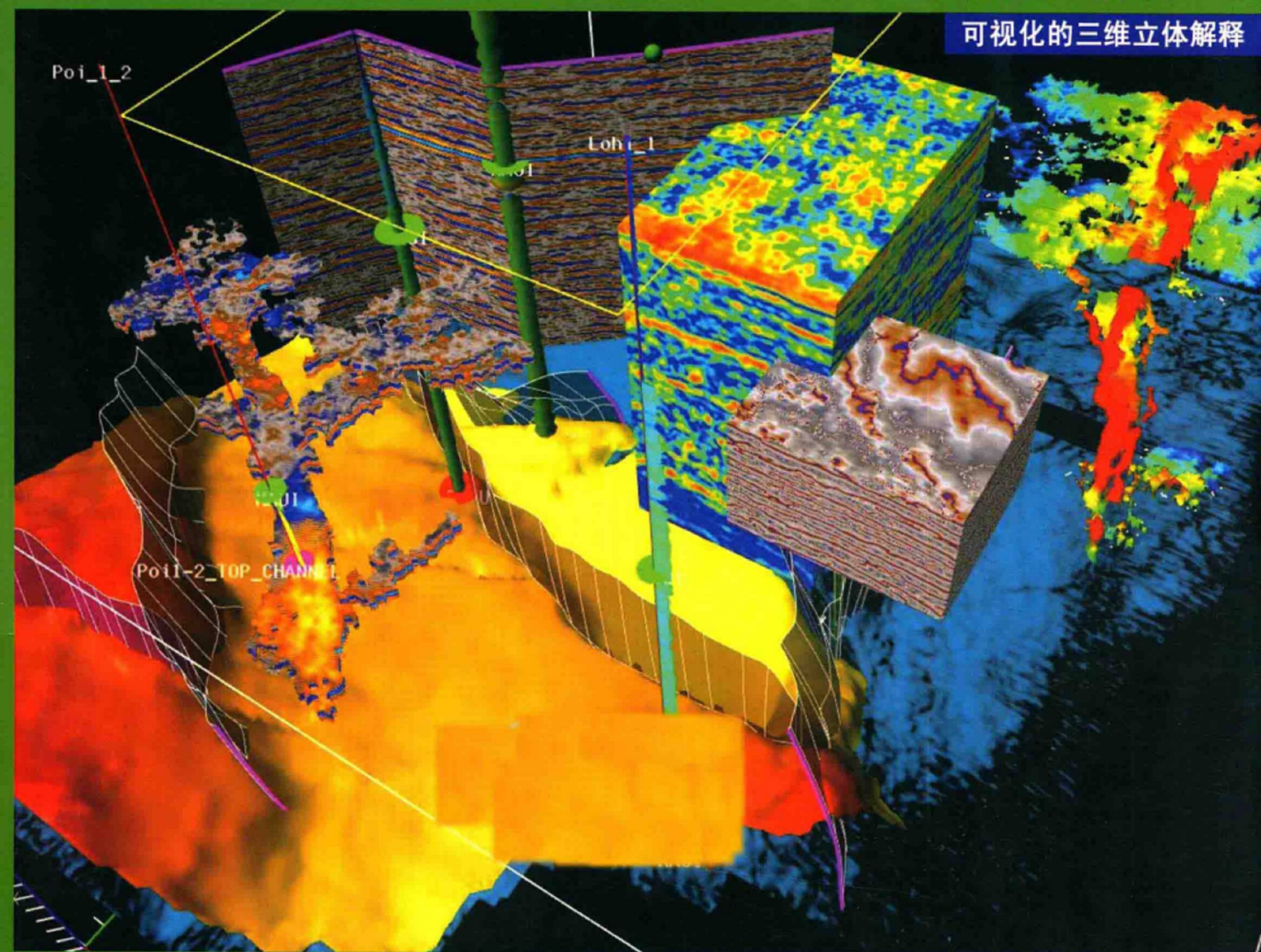
李庆忠文集

# 寻找油气的 物探理论与方法

## 第二分册 方法篇

李庆忠 编著

可视化的三维立体解释



中国海洋大学出版社  
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS



李庆忠文集

# 寻找油气的物探理论与方法

— 第二分册 方法篇 —

李庆忠 编著



中国海洋大学出版社  
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

本文集汇集了李庆忠院士从事石油勘探工作以来的主要研究成果,是他 60 年来经验及体会的总结。文集针对地震基础理论、各种地震信息的利用及物探方法的改进诸方面都进行了深入的探讨和详细的阐述,相信能对物探技术的发展有重要的指导意义。

本文集适合从事石油勘探的人员阅读,也可作为大专院校地质及地球物理专业师生重要的参考书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

寻找油气的物探理论与方法. 第二分册, 方法篇 / 李庆忠  
编著. —青岛: 中国海洋大学出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-5670-0753-6

I. ① 寻… II. ① 李… III. ① 油气勘探—地球物理  
勘探—研究 IV. ① P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 222847 号

出版发行	中国海洋大学出版社	
社 址	青岛市香港东路 23 号	邮政编码 266071
出 版 人	杨立敏	
网 址	<a href="http://www.ouc-press.com">http://www.ouc-press.com</a>	
订购电话	0532-82032573(传真)	
责任编辑	乔 诚	电 话 0532-85901092
印 刷	青岛国彩印刷有限公司	
版 次	2015 年 12 月第 1 版	
印 次	2015 年 12 月第 1 次印刷	
成品尺寸	210 mm×285 mm	
印 张	29.5	
字 数	912 千字	
定 价	200.00 元	



# 目录

## Contents

201	东辛油田地震勘探历程——一个复杂断块构造的三维地震解释实例 .....	1
202	绕射扫描叠加 .....	11
203	三维绕射扫描叠加 .....	40
204-1	地震信号内插与噪音剔除(一) .....	54
204-2	地震信号内插与噪音剔除(二) .....	74
204-3	一维空间域噪音剔除法及应用 .....	94
205-1	用剔除拟合法求纵波正入射剖面——一种取代水平叠加的处理技术 .....	106
205-2	剔除拟合 DELFIT 程序详细说明 .....	123
205-3	剔除拟合在 CRP 道集上的应用 .....	131
206-1	地震资料处理中应该注意的 12 个问题 .....	141
206-2	速度谱解释中需要注意的几个问题 .....	169
206-3	内切滤波法去面波——DEGROR 程序使用说明 .....	172
206-4	3DFKK 与 DEGROR 压制面波的实际资料效果比较 .....	178
207	抛物线拉东变换克服多次波——Neptune 海神程序特点描述 .....	188
208	陆相沉积地震地层学若干问题 .....	211
209-1	近代河流沉积与地震地层学解释 .....	241
209-2	“近代沉积与地震地层学”一文的补充材料 .....	256
210-1	河道解释中的陷阱 .....	259
210-2	河道解释一文的后记 .....	264
211	浅层强反射界面的能量屏蔽作用 .....	267

212	三维地震联片叠前时间偏移技术 .....	278
213	塔里木却勒地区叠前深度偏移中的问题探讨 .....	303
214-1	我国石油地球物理勘探今后的发展方向 .....	324
214-2	按科学程序搞好油气勘探 .....	330
214-3	论胜利油田的高精度三维地震 .....	335
215-1	地震勘探技术的发展方向 .....	348
215-2	关于陆上地区高密度采集的效果 .....	350
215-3	检波器组内高差对高频信息压制的理论分析 .....	361
215-4	论检波器横向拉开组合的重要性 .....	370
215-5	有效瞬时动态范围、可记录性、信噪态势图及信噪比谱概念 .....	386
215-6	今后地震勘探技术进步的重要方向 .....	409
216	介绍物探技术最新发展动态 .....	423

全部三个分册的目录及大纲见第一分册,文集的“编者的话”及“自序”也可在第一分册里找到。

## 东辛油田地震勘探历程

——一个复杂断块构造的三维地震解释实例

1978年10月新中国派出第一个物探专业代表团赴美参加SEG旧金山年会,我作为代表在会上做了这个报告,得到与会专家的长时间掌声,为我国争得了荣誉。

许多SEG的同仁看到我国在遭到长期技术封锁的情况下,在三维地震勘探方面还能独立自主地走在世界前列,表示出极大的兴趣。Chevron石油公司,Columbia大学马上邀请我去他们那里做报告。SEG学会的《Geophysics》杂志总编Dominico在酒会上向我诚意邀约投稿,要争取早日发表此文。回国后,我整理好了英文稿件,报到外事处批,结果没有下文。于是我只好向科学院的《地球物理学报》投稿发表了此文。

此文1979年4月发表于《地球物理学报》第2期,作者李庆忠、俞寿朋、刘雯林、刘成正等。

### 摘要

东辛油田是一个典型的复杂断块构造。在这个油田上,地震精查的方法在搞清断裂系统方面,取得了较好的成效。本文简述了在该油田早期所采用的一套三维地震解释(立体归位)方法,其中有些方法对当前搞三维地震勘探及断层面的地质解释方面都还有着参考价值。近年来,又用数字地震方法,在此浅层的复杂构造的下面,发现了比较简单的深层构造,在几张附图中展示了深浅层构造之间的关系。

### 引言

东辛油田位于中国东部,黄河入海口附近,长约20 km,宽约8 km。由东营和辛镇两个构造所组成(图1)。它以其独特的复杂断块构造而著称。1960年通过少量的地震剖面发现了两个隆起构造,1961—1962年经钻探肯定了它们的含油性,地震工作立即开始转入详查。在这150 km<sup>2</sup>的范围内,下第三系地层中断层数目极多,它们都是正断层。油藏受断层控制,油气多富集于断层附近(图2)。因此,勘探过程中首先要准确查明断层的位置。

由于没有解决地震勘探断层的方法,早期的详查工作所得的成果不能满足勘探的需要。通过几年不断地摸索与试验,地震勘探在查明断层方面才取得较明显的效果。

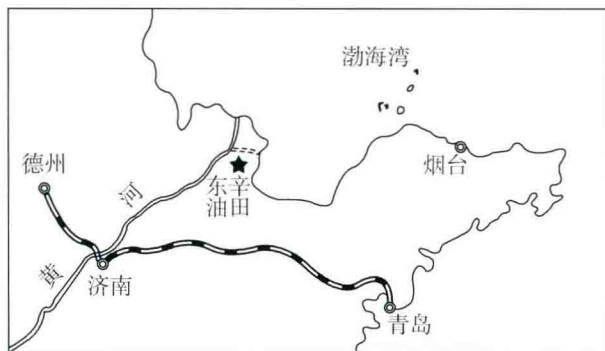


图1 东辛油田位置图

## 一、普查、详查、精查三个时期的构造图及其地质效果

这里展示了三张构造图。第一张图完成于1960年(图3),它是普查阶段的成果。当时完成的地震剖面(在图幅内)约90 km,测线距离2~3 km。结果发现了东营构造(当时画成圆形穹隆)和辛镇构造(半边鼻状构造),成功地部署了第一口发现井,打开了本区找油的新局面,但图3只绘出了两条断层,对断层的了解极为粗浅,而且现在看来位置也不太准确。第二反射标准层的深度(相当于渐新统上部生物灰岩顶)经后来钻探的30口井检验,深层误差平均为98 m,最大误差为470 m。

第二张图是1963年完成的(图4)。在此期间又做了详查测线380 km,使南北向主测线距离达到1 km,累计地震工作量为470 km。发现有断层16条,其中东营构造南翼的大断层已有所反映,位置是对的,但由于当时对缓断层面还没有认识,把一条大断层解释成两条。北部大断层位置误差较大,达500 m。辛镇构造已经基本认出8条东西向的断层,这是本区地震解释断层的良好开端,但精度还是较差。据后来打的32口井统计,平均深度误差50 m,最大165 m。

第三张图是1966—1969年分期完成的(图5),在三年内,边试验边生产,共计完成地震精查测线1180 km。面积组合及自控器的合理使用改进了记录,而且使用了一套300 m边长的小三角测网,使三维地震解释成为可能,从而地下的断裂系统搞得比较接近实际。共发现断层198条,划分出断块174块。其中较重要的含油富集块的边界断层都为后来钻井资料所证实。此图在后来勘探工作中被证明是很有价值的。据此图成图后所打的66口井统计,第二标准层的深度误差平均为15 m,断点的平面位置误差平均约150 m。

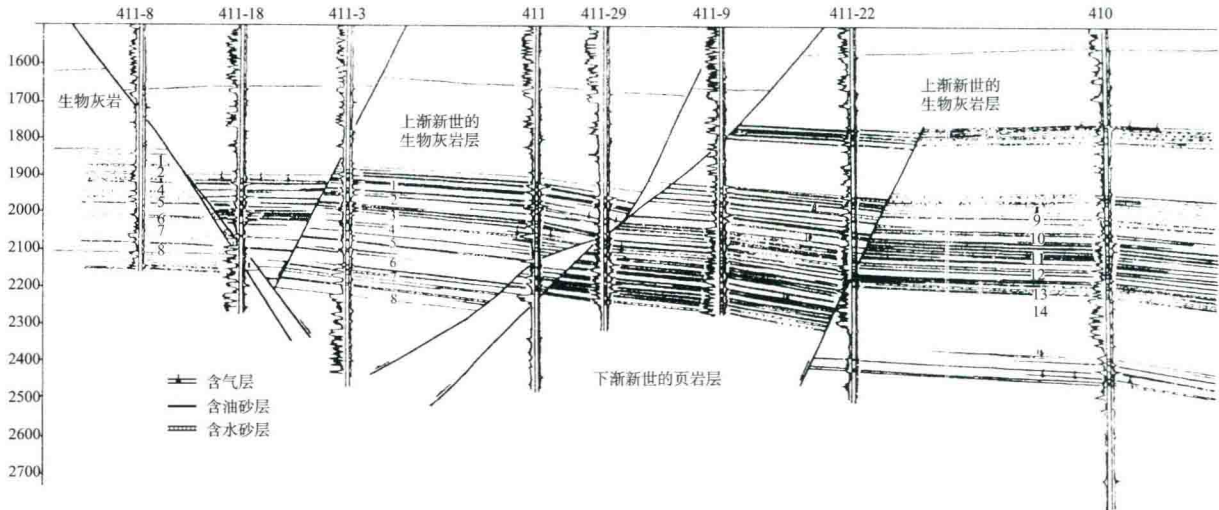


图2 油藏受断层控制,油气多富集于断层附近

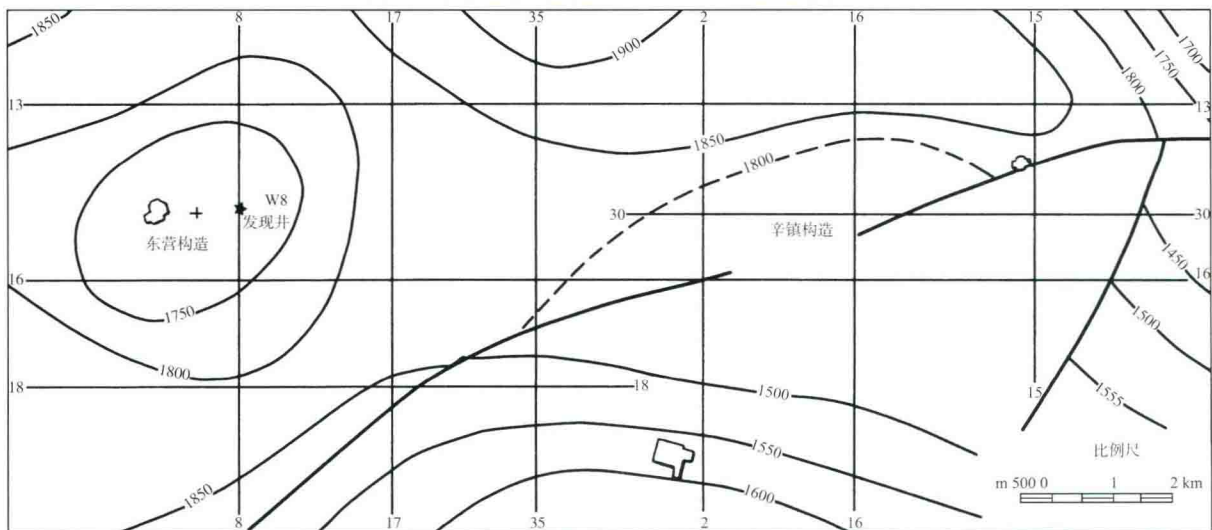


图3 1960年第二标准层构造图

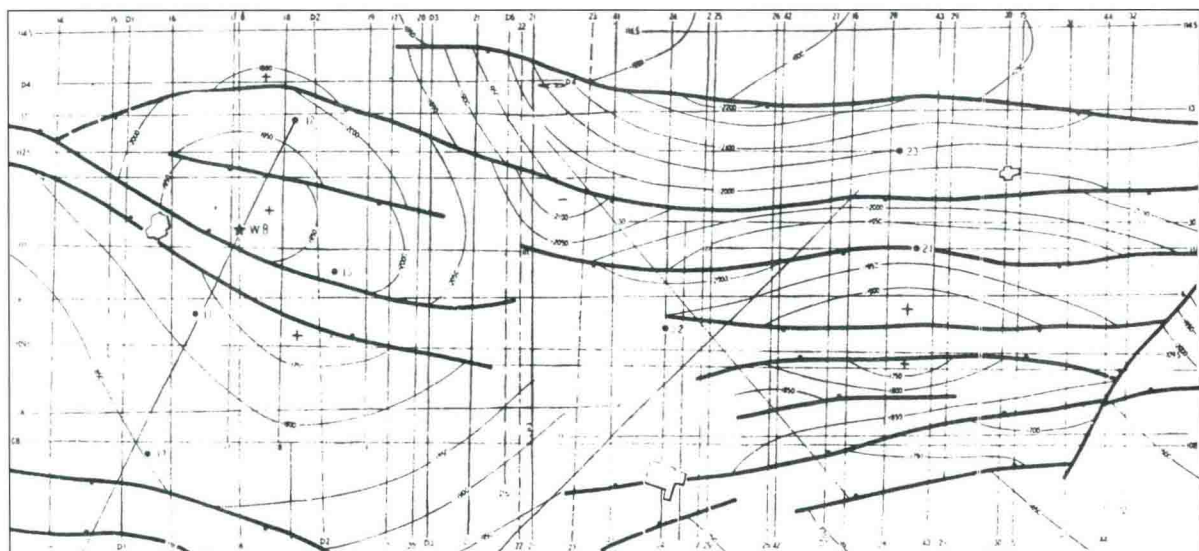


图4 1963年第二标准层构造图

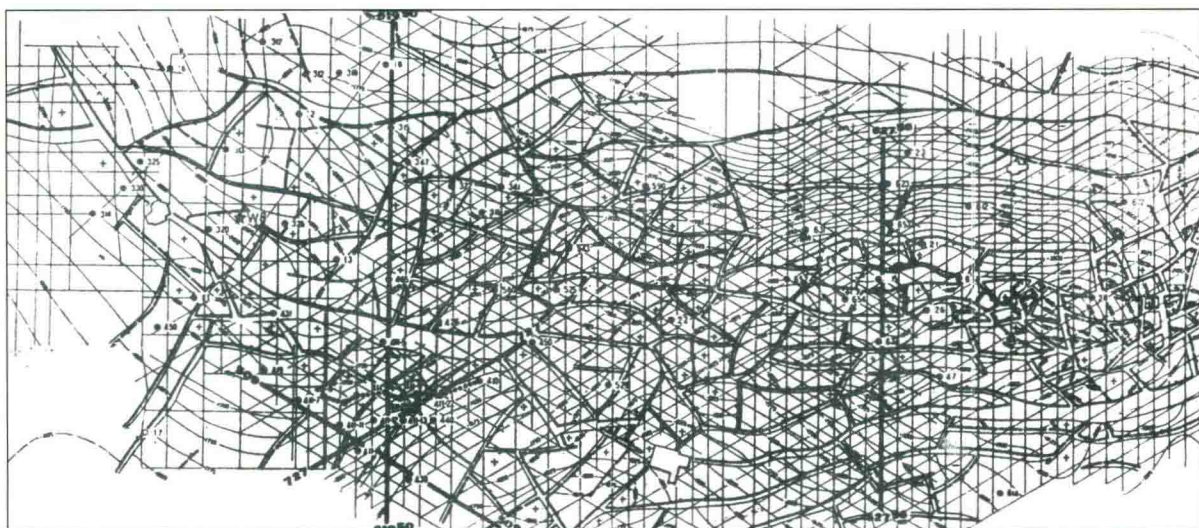


图5 1966—1969年第二标准层构造图

## 二、精查断层取得良好效果的方法及措施

### (一) 在野外测网布置方面采用了一套三个方向的较严密的小三角形测网

如图5所示,它对不同走向的断层都有较好的适应性。测线距为260 m,三角形边长为300 m,每个交点也是三个方向测线上的发炮点。这样做是为了从三个方向立体解释反射面和断层面。观测系统是600 m排列中间发炮的连续单次剖面。野外采用6~8个检波器面积组合,室内采用3~6道的混波,使用的仪器是国产DZ571光点记录仪和国产的模拟磁带记录仪DZ661型,记录质量一般较好。

### (二) 改进了记录对比方法和断层解释方法

在这三年中地震剖面的地质解释效果有了明显的提高。从图6及图7可以看出,1968年的剖面较1964年的有很大改进,主要在于:① 1964年的野外记录信噪比较低;② 记录对比方法上,1968年有了较高水平;③ 认识到本区的断层面倾角较平缓,在1964年都错误地解释成几乎直立的断层。



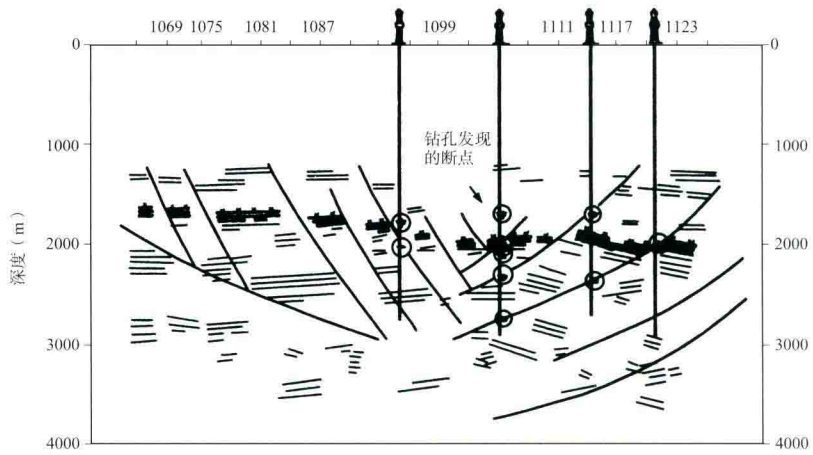


图6 1968年627.56测线深度剖面

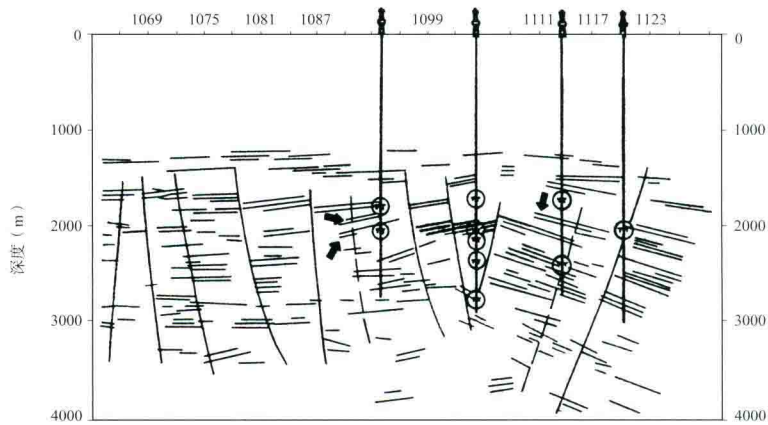


图7 1964年627.5测线深度剖面

### (三) 认识和利用了一些异常波及振幅屏蔽现象

图8为1967年619.50测线深度剖面,在解释剖面图中,已发现了来自断层面的反射波(图幅北部)和断面漫射波(图幅南部)。在图6里对比者认识了绕射波并将其正确归位到断层棱上,而原来在图7里把反射波的绕射段对比过长(图7中打箭头处),造成断层面解释的困难。断层面在某些地段会造成能量的屏蔽现象,这种现象是在断层面上由局部全反射现象所引起,在1965年前误认为有直立的断层存在也是与此有关的。这种屏蔽现象都产生在一个强反射波(1800~2000 m深度上)的大落差中断点的正下方(后来这里做了覆盖,这种能量屏蔽现象有极大改善)。

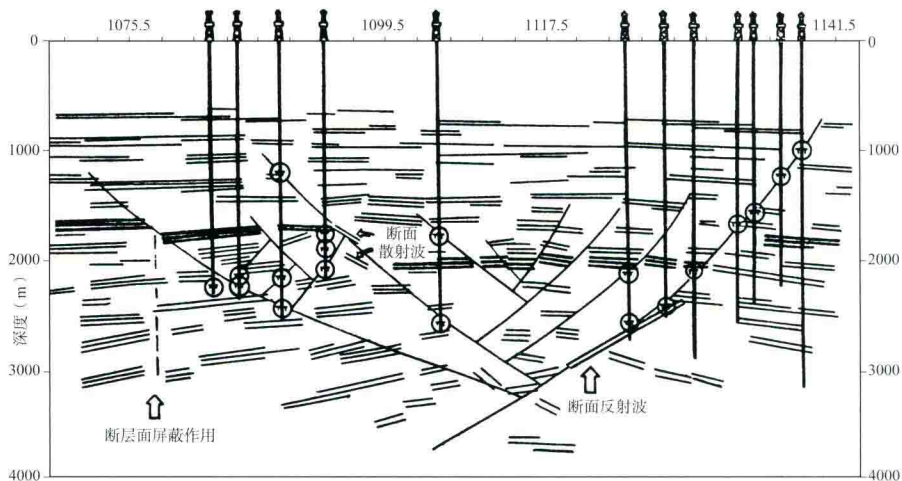


图8 1967年619.50测线深度剖面

### (四) 做了新层面闭合

过去解释断层时经常是忽视了断层面的空间闭合问题,例如解释者孤立地就单张剖面图解释断层,这就往往造成如下现象:① 相邻的测线上同一断层的倾角有陡有缓,或断层的位置前后错动,没有规律。② 出现断层面在空间上的不合理性,即交点上同一反射界面在不同方向的测线上,有时被划在上升盘,有时被划在同一断层的下降盘,自相矛盾。这种矛盾在未做“断面闭合”工作之前往往是无法发现的。所谓“断面闭合”,就是要求在不同的方向测线上,断层面必须从被解释断层之上升盘反射段与下降盘反射段之间通过。图9是这种闭合关系的说明。一般先从断层较清楚的601、602、603测线出发解释好断层线,并试作断层面平面等高线图,修改个别测线上的不合理现象,然后根据交点闭合到500测线及700测线上去。例如,图9(e)中500测线的断层面必须在b与c之间、f与g之间及m与o之间通过,断面是十分平缓的。同样700测线中闭合断面的过程也是进一步检查601~603测线解释断面的合理性的一个佐证。这就是二维归位深度剖面上的断层面闭合方法。如果所用剖面是未偏移的时间剖面,则断层线的解释将会更复杂。如果所用剖面是三维归位的深度剖面(或时间剖面),则只需要直接在交点上闭合断面深度(或相当的时间)就可以了。

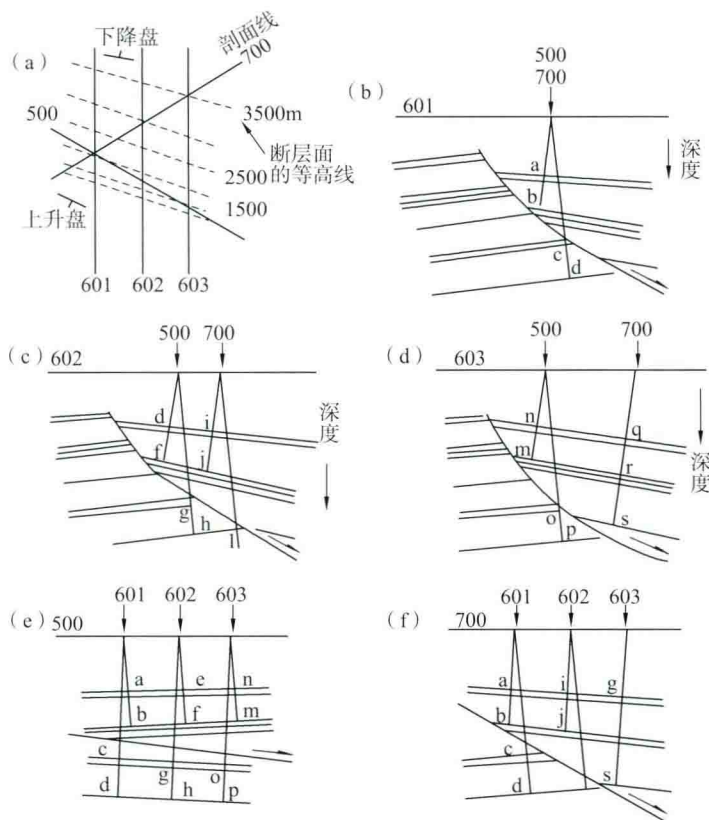


图9 断层面空间闭合检查的概念

### (五) 用手工方法完成了三维归位工作

野外的小三角网测线使我们能够对每个反射波都正确地求得它的空间位置和产状。三个方向上倾斜时差(即单位长度上某同相轴的倾斜时差)分量  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$ 、 $\Delta t_3$  与总向量  $\Delta T$  之间的关系,必须满足

$$\Delta T \cdot \cos\theta_i = \Delta t_i \quad (i=1,2,3)$$

因此,已知  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$ 、 $\Delta t_3$ ,就可以用图解法交会得到  $\Delta T$  的大小及方位。交会的三角形愈小,说明对比的可靠性愈大(图10)。此外,对两组波干涉的记录也可以分辨出哪组波是同一个波。

这种交会检验的方法,实际上也是检查记录对比的一种较好的手段,常常可以避免解释原来对比中的

错误。得不到交点的波往往不是正常的反射波。

有了总向量  $\Delta T$  以后,总的空间偏移量也就知道了。并且就可以知道每条测线中每个反射波的侧向倾斜时差  $\delta t_i$ 。

$$\delta t_i = \Delta T \cdot \sin \theta_i \quad (i=1,2,3)$$

根据反射时  $t_0$  及  $\delta t_i$ ,查偏移图版即可知道侧向偏移量  $\Delta y$ ,利用这个侧向偏移量,就可以对反射段实现三维归位。

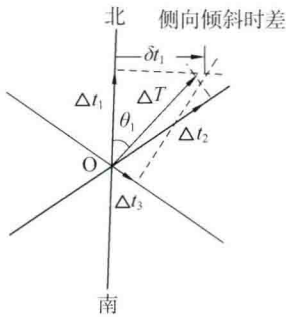


图 10  $\Delta t_i$  示意图

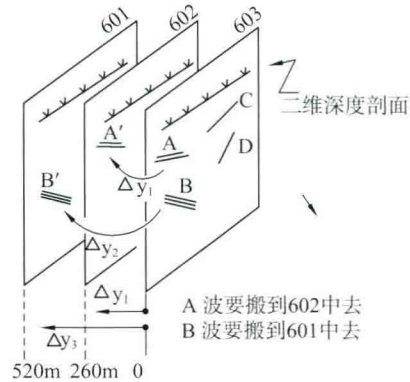


图 11 归位重排剖面示意图

东辛油田上的三维归位方法是將一系列的二维深度剖面上的反射段一个个按其侧向偏移量  $\Delta y$  搬到它应该去的那条剖面上去( $\Delta y$  接近哪一条测线就搬到哪一条去,如图 11 所示)。在搬进新剖面之前,要对其做一个深度校正(搬过以后,深度变浅)。

深度校正量  $\Delta Z = -R(1 - \cos \phi^*)$ ,  $\phi^* = 2 \arctan \left[ e^{\frac{1}{2} V_0 K Z} \cdot \tan \left( \frac{1}{2} \arcsin \frac{V_0 \cdot \delta t_i}{L} \right) \right]$ 。式中  $R$  为曲射线等时圆半径,  $\phi^*$  为垂直于测线方向的视倾角,  $V_0$  及  $K$  为地表速度和速度垂直梯度,地层速度  $V = V_0(1 + KZ)$ ,  $Z$  为垂直深度,  $L$  为计算时差  $\Delta t_i$  的排列长度,  $\delta t_i$  为侧向倾斜时差。

实际上深度校正采用一种事先计算好的图版,直接查  $\Delta Z$ 。

搬到新剖面以后,在每个反射段上,用符号表示出它是来自何方。因此这样的剖面还可以看出反射段的侧向倾角。当所有反射段都三维归位后,就得到一系列的三维归位剖面图,这就是我们的最终成果剖面。

### 三、三维空间归位剖面图在地质解释中的优越性

三维空间归位剖面图有如下优越性。

(1) 这样的剖面是真正的垂直剖面,反射段的空间位置得到正确的反映,因而避免了过去二维深度剖面上的各种侧面来的波的干扰,例如图 12,727 测线中三口井中遇到的断点在三維归位剖面中与②号断层符合得很好,但是在二维的 727 剖面中(图 13),钻井的断点位于一组完整的反射段中,无法正确解释,实际上这组反射段是需要搬走的。

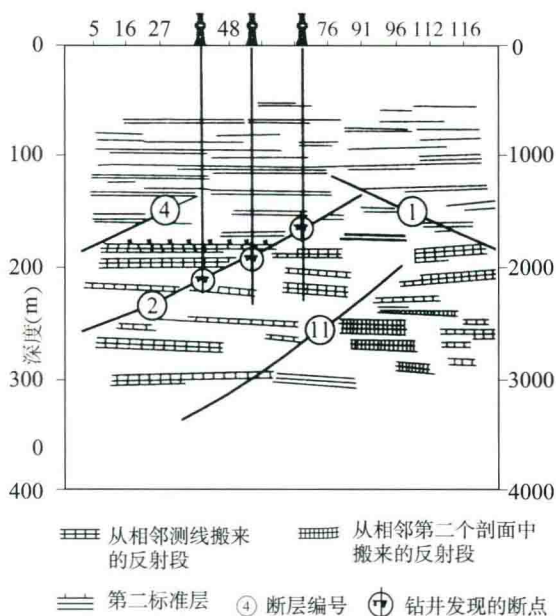


图 12 727 测线三维深度剖面

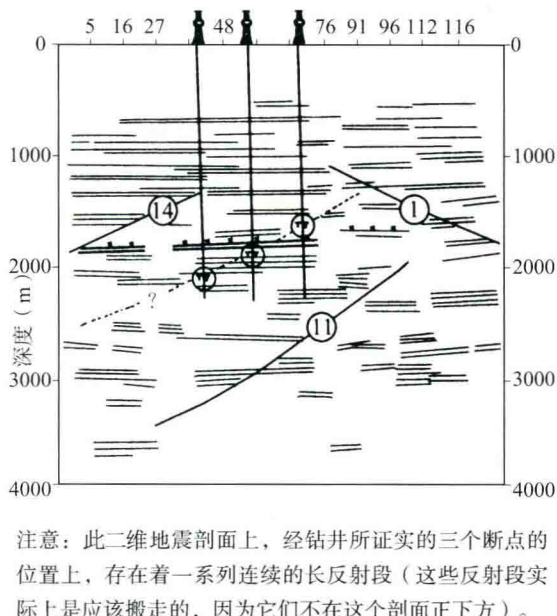


图 13 727 测线二维深度剖面

(2) 由于剖面是真正的垂直剖面，断层面的闭合十分方便，只要交点上断点深度一致就行，便于检查。作构造图时反射层的闭合也可直接在交点上量铅垂深度，做出来的构造图不需再做空间校正，并且与钻井数据对比时，也不需要考虑反射段的侧向偏移，直接能与钻井数据对比。

(3) 正像普通二维深度剖面中，根据不同断块间反射段产状的变异点可以确定断层位置一样，三维深度剖面中的不同侧向偏移量，也往往可以说明断层的存在。如图 12 中的⑪号断层，图 16 中的①号断层。

(4) 正如普通二维剖面中地层反射波与断面反射波的产状往往相反的现象一样，三维剖面中与大部分反射归位方向相反的那些“反向归位段”，或者上下两层归位距离小，中间夹着一层归位距离大的“夹心”现象，往往是断层的反映。如图 16 中①号断层就是有两个反向归位的断面波。

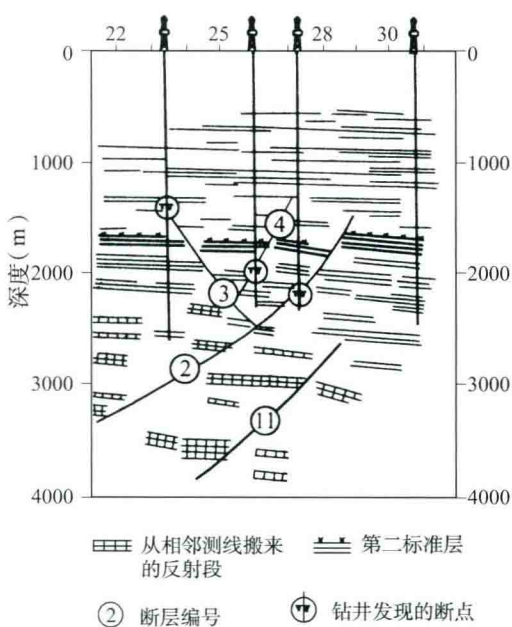


图 14 509 测线三维深度剖面

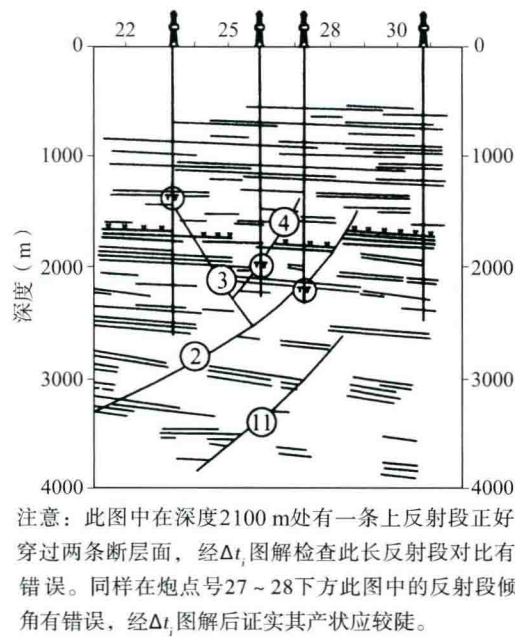
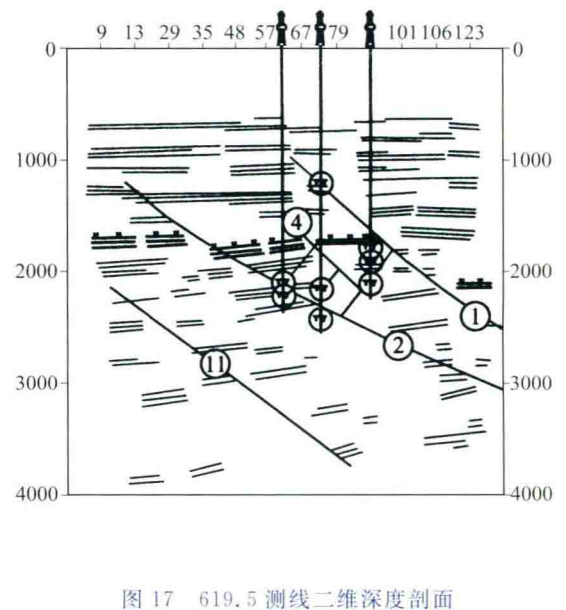
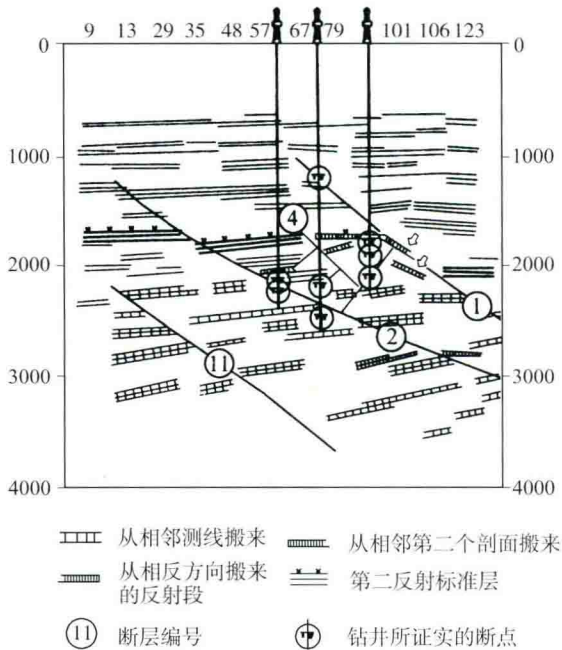


图 15 509 测线二维深度剖面

通过这样的立体解释，无论在波的对比如方面，还是断层面的解释方面，都经过了一次较严格的检查。例如 509 的二维深度剖面(图 15)上，有钻井断点控制的②号断层，曾穿过一根长的反射段，立体对比中把

它否定了(它在  $\Delta t_i$  图解中找不到交点)。同一剖面中 28 点号下方 2000 m 左右的反射段,原来对成水平的,后来经立体的  $\Delta t_i$  图检查后,纠正了它的错误,它的产状是较陡的。这一点事后为相邻两个剖面所证实。



注意这里所附的三个方向的剖面图 727、509 和 619.5,它们的每一个断面都是经过闭合检查的。尽管有些断层在单条剖面上看起来有些根据不足,但在其他方向的测线上它们是较明显的,这些断层大多已经为钻井所证实。

东辛油田的三维归位工作全部是用手工方式完成的。然而,即使今后我们用计算机完成三维归位,这些有关断层立体解释的经验也还是值得我们参考的。

#### 四、多次覆盖及数字处理方法查明了深层构造形态

东辛油田自上述工作完成以后,转入油田的开发阶段,地震工作暂时中断。直到 1975 年,为了研究这里深层构造的形态,继续向深处找油,又开始用数字地震仪做多次覆盖工作。此次覆盖工作的测网较稀,平均测线间距为 1.5 km,共计做了剖面 220 km,仪器采用了 SN338-B 及一台试验性的国产数字地震仪,野外排列一般最大炮检距为 3000 m 左右,偏移距 650 m,道间距 50 m。用 48 个工作道,做 12 次覆盖。资料处理采用国产 DJS-11 电子计算机以及美国的 1704 地震处理专用机。所得的剖面质量比以前的提高了一步,不仅在浅层及中层进一步证实了 1966—1969 年构造图是可信的,而且在深层领域内展示了另外一个天地,发现了东营构造和辛镇构造的深部都存在着隆起构造。

图 18~20,626.5 测线是通过辛镇构造的南北向剖面。从水平叠加剖面、叠偏剖面到深度剖面都清楚地显示出中层构造较深层更为复杂。此剖面图在 2000 m 深度上下,第二反射标准层  $T_2$  有 13 个断块,到了 3000 m 深度上就比较简单,仅 5 个断块。在南面发现一个新的深层隆起(图 18~20 左),而在辛镇构造正下方却是两个深层断块屋脊高点(图 18~20 中部,在②号断层附近)。

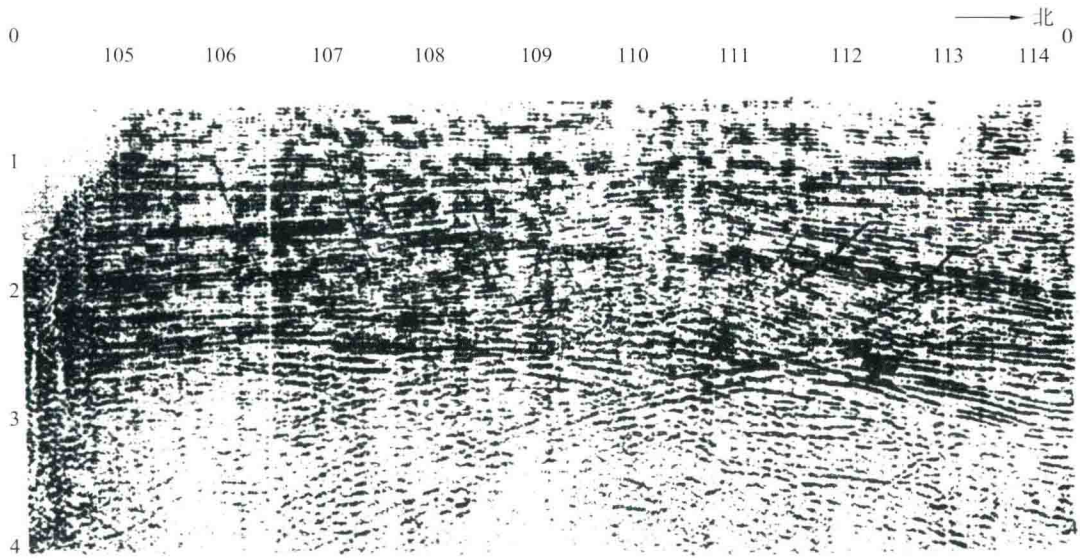


图 18 626.5 水平叠加偏移时间剖面

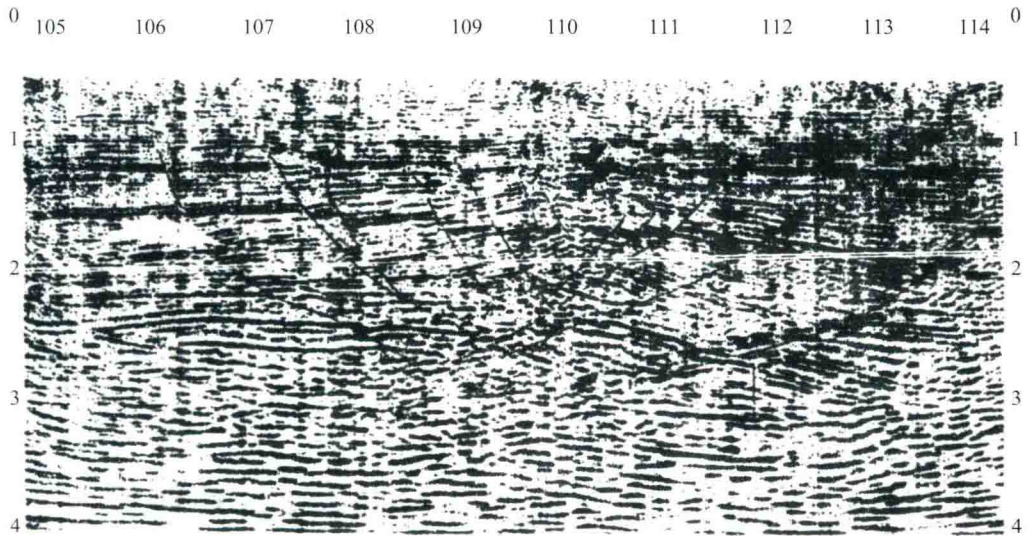


图 19 626.5 叠加偏移时间剖面

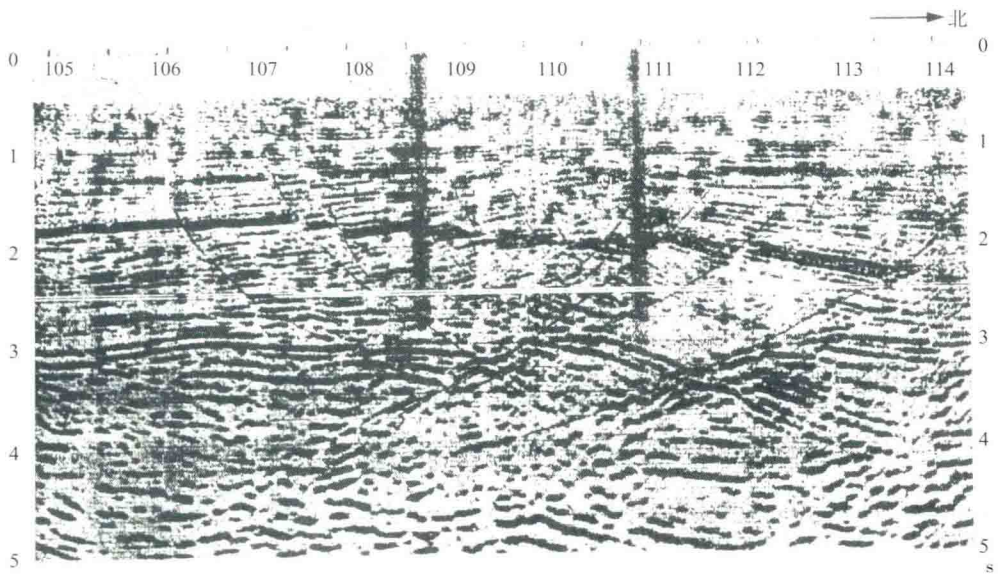


图 20 626.5 的深度剖面

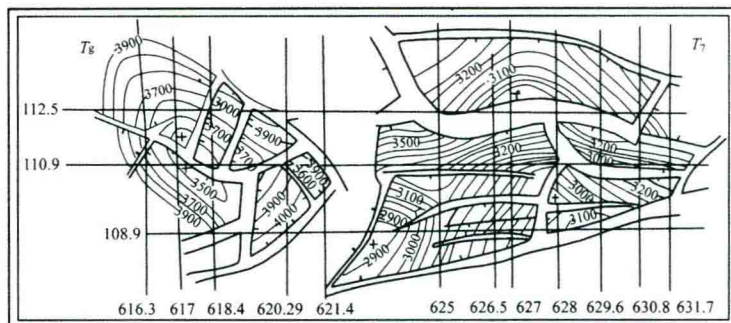


图 21 东辛油田的深层构造图

东辛油田的深层构造图见附图 21。现在这两个深层构造正在进行深井钻探,其中在辛镇深层鼻状构造上已经发现油层。显然这里在深层找到油田的可能性较大。

## 五、结 论

在东辛油田上,一套对付复杂油田的地震精查断层的方法是行之有效的。它可以归纳为下列几点:

(1) 三方向的严密小三角测线网可以适应于查明各种走向的断层,以及造成立体解释、空间归位的先决条件。

(2)  $\Delta t_i$  图解法是检查反射同相轴对比正确性的较好的检验方法。

(3) 断层面闭合检查是断层解释中必须考虑的一个环节。

(4) 断面反射波、断面散射波及绕射波等异常波对确定断层的存在很有用。

(5) 剖面的三维(立体)归位方法能够得到真正的垂直剖面资料。在三维归位剖面上用符号标出每个反射段的侧向偏移量,将非常有助于地质解释。



## 绕射扫描叠加



这是我在胜利油田与刘雯林、柴振奕等同志一起编写的文章。

文章介绍了如何根据我《走向精确勘探的道路》一书中“绕射扫描叠加”原理,通过 121 计算机进行计算做出短反射段和倾斜反射段的理论模型。分析了它们在偏移成像过程中,偏移孔径、偏移速度误差等因素对成像好坏的影响。

当时,正值我国各油田在推广偏移技术的起步阶段。此文有着重要的参考价值。

此文 1974 年 10 月发表于《石油地球物理勘探》第 5 期,作者李庆忠、刘雯林、柴振奕等,当时以胜利油田地质处、地质研究院的名字发表。

### 引言

到目前为止,复杂断块区的地震勘探工作,从野外工作方法到室内解释方法,进行了多方面的努力,取得了积极的效果。但是,勘探断层的精度仍然满足不了勘探与开发的需要。在断块构造上,即使采用 260 m 线距的小三角形测网,进行断面闭合和空间归位,做较细致的对比、解释,也只能查明大于 500 m 见方的大断块,发现 300 m 见方的断块,而更小的小断块还是搞不清楚。

为了提高复杂断块地震勘探断层的精度,我们试从地震波的波动性质出发,由物理地震学的角度研究了反射波的性质。发现中层(深度为 2000 m 左右)小断块(断块宽度 $\leq 200$  m)的反射波接近于几何点绕射波的特点,其相互干涉作用远比大断块厉害,致使标准波面日全非,用常规的几何地震学解释方法是无法搞清楚的。即使是断块(宽度大于 500 m),由于绕射尾巴的相互干涉,也使记录复杂化,断点不易确定。为此,针对复杂断块区小断块的勘探问题,建立了绕射扫描叠加法。具体的做法,就是对野外记录用点绕射波双曲线去做扫描叠加,把小断块分散到绕射尾巴上的振幅收敛起来,使小断块反射振幅增强,使断点清晰、干脆,借以达到查明小断块的目的。同时,在整个扫描过程中,可完成自动对比、自动偏移、干涉带自动分解以及压制干扰、提高信噪比。

### 一、理论反射记录的正解和逆解

#### (一) 理论反射记录的制作

这里对用计算机制作理论反射记录做一简要介绍(断块模型为二度平面形式,反射子波波形可选用任意脉冲波)。



### 1. 反射记录的形成原理

根据惠更斯—菲涅尔原理,地震波到达一个反射界面,界面上每一个质点都可看作是一个新的子波振源,发出球面子波,此即绕射波,而质点即是绕射点源。在地面上任意一点接收到的反射波,就是反射界面上所有点源产生的绕射波在接收点的总和。

这样,就可以把一个地质剖面看作一个反射系数剖面。在剖面中每一个有反射系数的具有一定长度的微反射段,即是一个绕射点源,可以产生一个微小反射波——绕射波,我们叫它“波涟”。“波涟”用点绕射双曲线来描述,双曲线的极小点在绕射点源上。在时间域中把许许多多的绕射“波涟”叠加起来,就形成了反射记录。如图1中(a)(b)(c)所示。

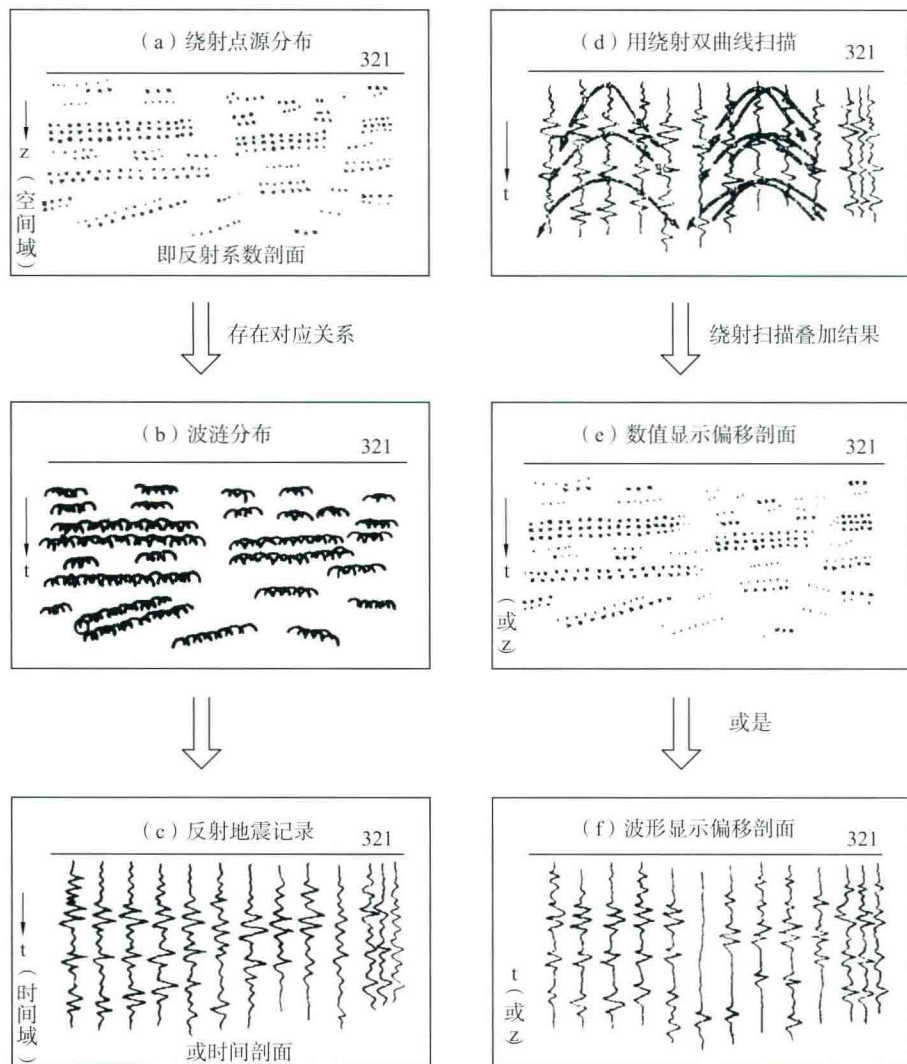


图1 反射记录的形成和绕射扫描叠加原理图

### 2. 地震波形成的物理过程的数学表示形式

(1) 地震波的表示形式:波形可以是任意的。我们在计算中选取余弦钟形脉冲

$$f(t) = A_0 e^{-r^2 t^2} \cos \omega_0 t$$

作为子波波形。每隔  $\Delta t$  取一个样,可以得到一个振幅序列:

$$f(t) = a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$$

这样,这组序列就以离散形式表示了一个脉冲波形。

(2) 地层对振幅的衰减作用:地震波在地下传播的过程中,振幅要有所衰减。引起振幅衰减的因素有