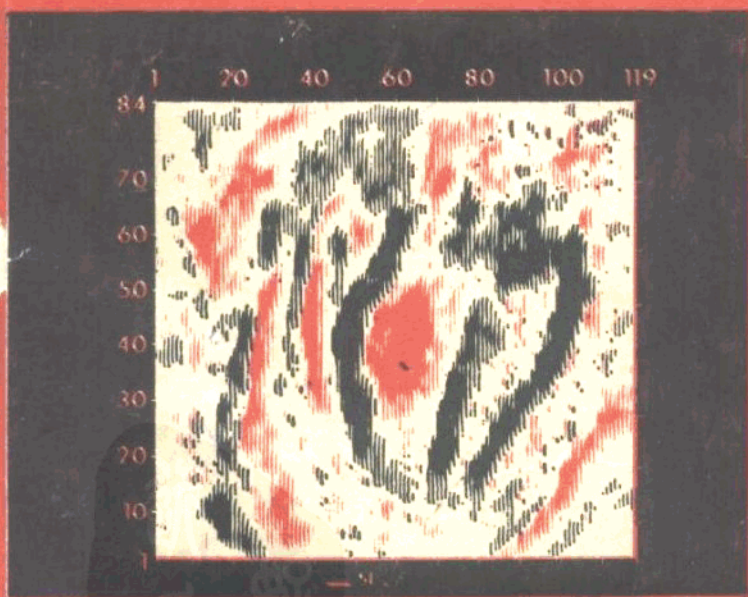
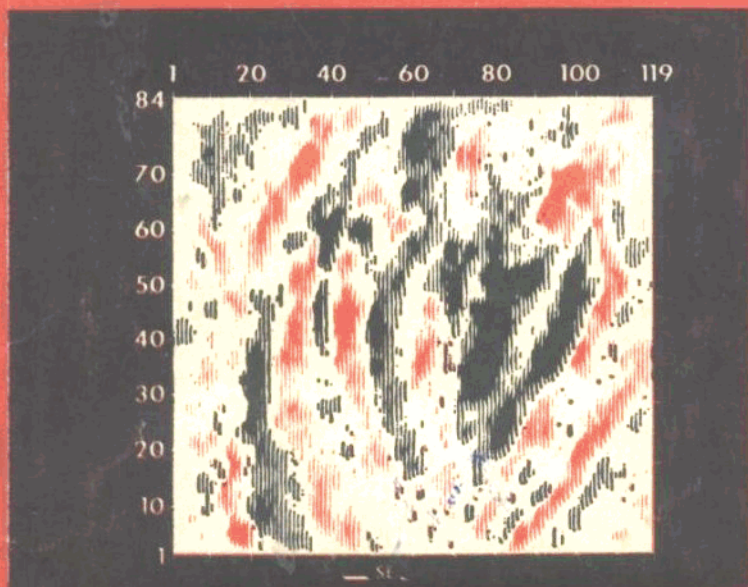


[美] G.H.F. 加德纳 等著

二维地震勘探



地质出版社



200304090

12689

三维地震勘探

〔美〕 G.H.F.加德纳 等著

吴 晖 等译



sy42/29



200398694



地质出版社

内 容 提 要

三维地震勘探方法是一种新的地震勘探技术。在复杂的构造地区，三维地震技术是取得有效地质成果的有力工具。三维方法能够提高地震勘探探测多种构造的能力和精度。本书是美国勘探地球物理学家协会（SEG）为推广三维地震技术、培训在职物探人员而编写的一本教材。全书共分八个部分，系统地叙述了包括弯线、宽线和面积三维在内的三维地震资料的采集、处理、解释和模型试验方法，并且提供了应用的实例，是当前学习和掌握三维地震勘探技术的一本重要参考书。可供从事石油、煤炭地球物理勘探的工程技术人员和科研人员，以及有关院校物探专业师生参考。

本书由吴晖、万有林、许树椿、林民瑞、欧庆贤、戴铭藻同志翻译，黄绪德同志审订。

三维地震勘探

〔美〕 G. H. F. 加德纳 等著

吴晖 等译

地质部书刊编辑室编辑

责任编辑：张怀素

地质出版社出版

（北京西四）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：14¹/₂ 字数：342,000

1982年2月北京第一版·1982年2月北京第一次印刷

印数1—1,880册·定价3.50元

统一书号：15038·新737

译者前言

三维地震勘探方法是近年来地震勘探技术发展的结果。随着石油和天然气普查、勘探、开发工作的日益深入，地球物理工作者面临着比过去复杂得多的地质构造条件。如果说过去用二维勘探方法能够解决一定问题的话，那么今天在某些构造复杂的地区唯有应用三维方法才有可能取得成果。三维方法能够提高地震勘探探测多种类型构造的能力和精度。因此，推行三维地震勘探技术是势在必行，是急需解决的一系列实际问题提出的要求。

为推广三维地震技术，就需要一本这方面的基本书籍。在我国有关的地球物理勘探期刊上，近年来陆续刊登过一些介绍三维地震方法的文章，但是较为系统而完整地讲述这种技术的著作尚未见到。为了填补这个空缺，我们将美国勘探地球物理学家协会（SEG）最近为推广三维地震方法、培训在职技术人员而举办的进修班上的一本讲稿，在略作调整和增删后翻译出来，以供我国地球物理工作者，特别是地震勘探技术人员参考。

地质部石油物探研究大队以及地质部第四物探大队的下列同志参加了本书的翻译工作，按章节次序为：吴晖（第一部分）、万有林（第二部分）、许树椿（第三和第七部分）、林民瑞（第四和第五部分）、欧庆贤（第六部分）、戴铭藻（第八部分）。吴晖、许树椿同志分别校对了各部分的译文，黄绪德同志对全书作了审订；此外，王世库和朱铨两位同志参加了审稿。全书的图件由倪治平同志绘制。由于三维地震勘探是门新技术，在翻译时我们对内容的理解、术语的确定，难免会有不妥或错误之处，期望同志们多予指正。

目 录

第一部分 三维地震方法概论

G.H.F.加德纳(Gardner)

1. 资料采集	1
1.1 设计和排列	1
1.2 重叠正交排列	4
1.3 测量	5
1.4 地点的选择	6
1.5 问题的选择	6
2. 资料处理	6
2.1 地震数据和测量数据的合并	6
2.2 垂直零炮检距剖面的构成	7
2.3 共炮点(或共接收点)零炮检距剖面	8
2.4 零炮检距剖面的偏移	8
2.5 重叠正交排列	10
2.6 用三维偏移方法直接构成垂直剖面 and 水平剖面	12
2.7 三维资料换算成规则网格上的零炮检距资料	15
2.8 将资料换算成固定炮检距资料	15
2.9 三维处理框图	16
3. 资料解释	16
3.1 二维资料中三维特征识别和三维处理的分辨率	16
3.2 勘探史——查明断层	16
3.3 三维野外资料分析	18
3.4 地质层的比例物理模型资料	20
3.5 野外资料的水平剖面	24
4. 结论	26
附录A 模型说明	27
附录B 处理说明	28

第二部分 线性三维地震方法

F.贝克萨斯(Baixas)

1. 前言	43
2. 测定横向倾角的必要性	44
3. 野外排列方式	47
4. 宽线剖面的解析方法	48
5. 宽线剖面的几何原理	51
6. 宽线剖面的处理与解释	55

7. 宽线剖面的实例——温德河盆地	63
8. 人机联作图示终端的应用	68
9. 宽线剖面程序包的其它应用	74
10. 结论	75

第三部分 面积数据采集系统的设计

J.A.麦克唐纳(McDonald)

1. 前言	77
2. 简单的历史背景	77
3. 地震面积测量概要	78
4. 速度及射线几何学	80
5. 面积测量系统的理论设计	81
6. 数据采集最优化	87
7. 地震信号的特性	87
8. 面积测量类型	94
9. 陆上工作方法及仪器装备	96
10. 海上工作方法及仪器装备	100
11. 面积地震系统的经济效益	102

第四部分 地层成像的理论与实践

K.拉内(Larner) B.吉布森(Gibson)

1. 前言	105
2. 静校正	106
3. 环形排列	107
4. 平行测线	107
5. 正交观测	108
6. 速度	108
6.1 叠加速度	108
6.2 偏移速度	109
7. 偏移	110
8. 野外资料	114
9. 结论	117

第五部分 三维地震解释方法

A.R.布朗(Brown)

1. 前言	119
2. 显示选择方案	119

3. 对平点的研究	120
4. 由等时切面图实际绘制等值线图	121
5. 小构造边界的划定	121
6. 地层岩性的解释	121
7. 三维显示	122
8. 结论	123

第六部分 三维地震模型研究

F.希尔特曼(Hilterman)

1. 前言	124
2. 理论	124
3. 菲涅耳反射带	126
3.1 尖脉冲时间剖面	126
3.2 子波剖面	130
4. 河道砂坝	132
5. 对称的盆和丘	137
6. 地层圈闭	140
7. 地堑	143
8. 礁块	145
9. 结论	146
附录A 克希霍夫波动方程式的计算方式	147
附录B 由一个菲涅耳圆盘引起的反射绕射	150

第七部分 比例物理模型研究

W.S.弗伦奇(French)

1. 前言	152
2. 仪器装备	153
2.1 对该系统的一般描述	154
2.2 初步试验实例	155
3. 模型制作	156
4. 实验反射剖面	157
5. 成象概念	160
6. 理论设想	161
7. 偏移中的常见误差	164
8. 三维偏移	178
9. 将速度分析与偏移结合起来讨论	183
10. 结论	187

第八部分 应用实例

三维地震在墨西哥湾的应用

M.R.博恩(Bone)

1. 前言.....	189
2. 应用历史的讨论.....	189
3. 结论.....	210

三维地震在泰国湾油田开发中的应用

C.G.达姆(Dahm) R.T.格雷布奈(Graebner)

1. 前言.....	211
2. 应用历史的讨论.....	211
3. 结论.....	225

第一部分 三维地震方法概论

G.H.F. 加德纳

1. 资料采集

1.1 设计和排列

面积地震资料可以如此定义：标准反射波资料的震源和接收点之间的中点，均匀地在一个面积（几平方英里）分布，而不是象共深点剖面那样，沿着一条直线分布。面积资料有四个变量：中点的两个座标，震源到接收点的距离及其方位；而线性剖面资料通常只有两个变量：中点座标和炮检距。方位方向变化的意义和影响是不知道的，在许多三维勘探中它们被忽略了。

三维资料采集的常用方法有：1 平行共深点剖面；2 正交排列。

1. 平行剖面 这种剖面通常在海洋勘探中应用。用作采集的标准拖缆线距很小，大约是 50 米（在有些海洋勘探中，为了节约投资，将线距增加到超过了安全取样间隔。在那种情况下，三维处理的优越性将受到损害）。

电缆因涡流而偏离船的航线，其距离能够远远大于测线之间的距离。所以，最好能应用一种装有一组数字罗盘的电缆，每次激发都测定每个水中检波器道的位置。这样，即使有涡流存在，中点也能保持非常均匀的面积覆盖。

定位数据不应有重大的误差，要求的精度是几米。现在，这些已经容易做到了。

2. 正交排列 这种排列是在海洋工作中应用的，但在陆地上当平行线剖面的费用太高时也经常采用。正交排列是这样得到的：沿着一条线（一般都是直线）布设检波器，而在另一条线（一般都与前一条线垂直）的一系列点上激发进行记录。每次激发，往往几条平行的检波器线同时记录，在特殊的情况下，甚至用整个检波器矩形网格进行记录。

正交排列的勘探费用，由于增加每次激发的记录道数而有所减少。如果一次激发的记录道数超过了 500 道，那么三维与二维资料采集的费用大致相等。

正交排列的激发点线和接收点线，通常的长度是一英里左右。根据经验，从激发点到接收点的最大距离，不得大于我们目的层深度的大约两倍，否则对反射界面的入射角将会大到不得不考虑其影响的程度。相邻记录点和相邻激发点之间的距离，可以根据共深点指导测线来选择，但是距离近些是有一定好处的。

在共深点剖面中，震源和检波器的线性组合对于接收垂直传播的波和压制水平传播的波是极有帮助的。但是，在大部分实际条件下，设计和布设类似效果的二维排列即使说不可能，至少也是困难的。实际可行的办法是缩短点距，并且在资料处理中压制不需要的波。举例来说，128 个相距 20 米的点的覆盖长度大约是一英里半。这时，中点的间距是 10 米，这种距离对于低频（10 赫）和低速（300 米/秒）的波来说，是一种足够小的采样

间距。

如果每道的检波器数目不多（譬如 4 个），那么布置一个垂直于检波器线的短直线排列（间距约 5 米）或许是有用的。同样，假若震源的数目也不止一个，那么也需要布置一个同样垂直于震源线的排列（见 2.3）。

这种企图用一个点震源激发，也用一个点接收器记录反射波的建议，将大大改变在整个面积上为拉线和埋置检波器而忙碌的情形，并且加速资料的采集。实际上，处理的结果是极好的。

应用点震源和点接收器，也改善了精度，这种精度保证我们确定初至波，帮助我们利用初至折射波消除表层的影响。

然而，要对噪音作出初步估计，要求具有在野外处理资料的能力，因为处理已成为压制噪音的一个重要步骤（见 2.2）。

在布设震源线和检波器线的时候，它们最好能保持直线，并且彼此垂直。然而，首先应当考虑的，是把震源和检波器布置在信号的产生和接收看来是可靠且能重复的地方。假若有的点不得不偏离相等点距的理想直线条件，那么，在可能的情况下，那些点应当与直线垂直（或者与另一条线平行）地移动。震源和检波器的位置，不管在什么情况下都是必须测量的（见 2.1）。

有 N 个炮点的炮点线和有 M 个检波器的检波器线垂直相交，产生有 $N \times M$ 个中点的矩形网格，中点的间距等于地面线点距的一半。如果点垂直偏离它所在的线，则将引起中点网格的相应纵列或横排沿着同一方向发生移动。中点网格会发生畸变，但覆盖仍将是十分均匀的。炮点和检波器的空缺，使网格少掉一排或一列。任何这种“孤立”的空缺，都不致对结果产生明显的影响。

图 1 是海洋测量的正交排列的例子。一条标准的 48 道水中检波器电缆荷重后沉到海

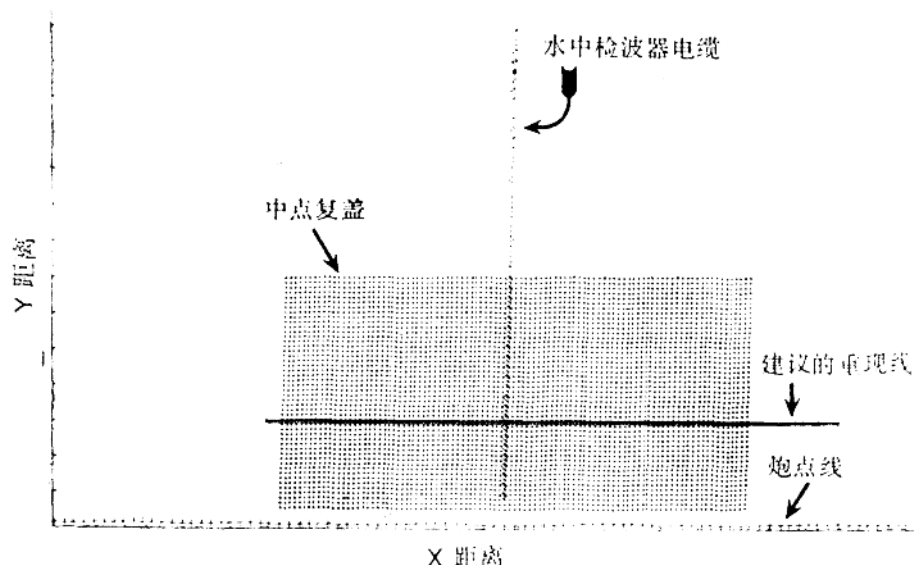


图 1 炮点和检波器位置图，地下中点覆盖网格的点距为 25 米

底，成为排列的一条支线。用一条船记录资料。第二条船沿着与检波器电缆垂直的线布置 96 个炮点。震源和检波器道两者都彼此相距 50 米，所以中点覆盖点距在两个方向都相距 25 米。在不到三天的时间里，记录了大约 44 个这样的排列，覆盖面积共约 12 平方英里，在全区的大部分地方都是四次覆盖。

单独一个正交排列也能够提供关于地下地层的若干有用信息（见 2.2 和 2.3），尽管一个完整的三维图象可能需要联合几个毗邻的排列。图 2 上的例子是一条垂直剖面，它沿着大致反映沉积地层倾斜的线向右延伸，在一个盐丘那里终止。这个例子虽然仅仅是单次覆盖，偏移剖面的信噪比却是令人满意的。应用多次覆盖的目的，并非为了改善信噪比，而是为了压制多次反射波，校正静态误差，以及测定速度和振幅衰减。

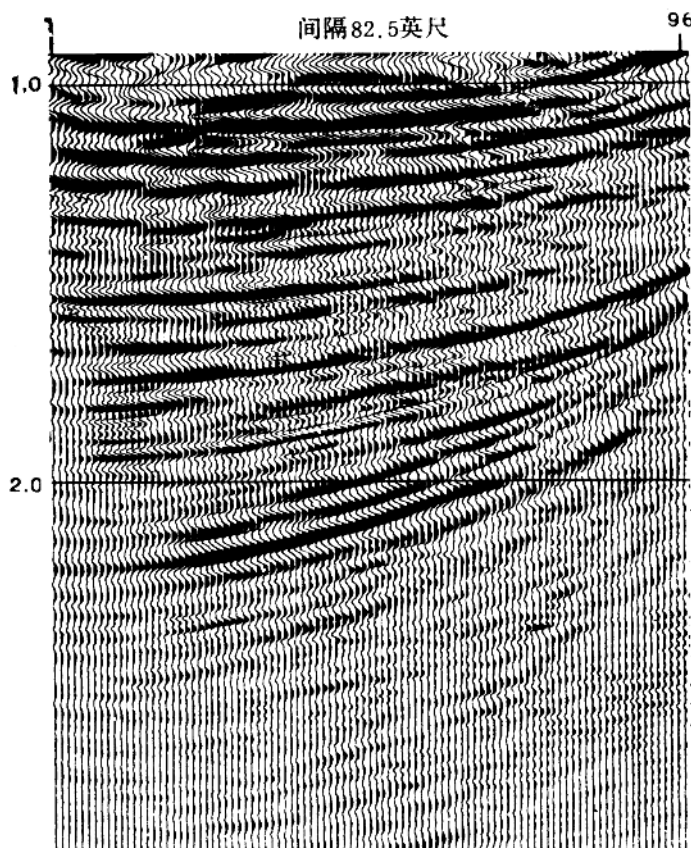


图 2 用单次正交排列所作的三维偏移

请注意，炮检距和方位在中点网格上都是变化的。从炮点到检波器的距离，事实上等于中点到排列线交点的距离的两倍。方位变化从平行炮点线到平行检波器线。于是，从单个正交排列得到的地下地层图，应当具有能正确地计算炮检距和方位的精度。十分明显，炮检距校正要求知道正确的地下速度，高程校正（以及静校）也需要速度资料。

所以，在设计面积测量时，必须考虑如何记录足够的信息，以便可靠地测定速度和静

校值。

由于三维处理目前尚处于初步阶段，因此比较慎重的做法是为每个正交排列都在排列的两条支线（arm）采集标准的 CDP（共深点）资料。沿着炮点线布设检波器，沿着检波器线布设炮点，就能够实现这种采集。

沿着每条支线得到的 CDP 资料，可以用现有的高度发展的二维处理方法进行处理。两次面积覆盖能够相加以改善信噪比。速度和静校值可以在处理面积资料时应用。

从另一个观点来看，面积测量可以这样设计：或者布设由一些相距较大的标准的 CDP 测线组成的网格，或者在这种 CDP 测线构成的正交排列上进行记录。然后，三维处理能以较高的可靠程度根据相距较大的 CDP 测线来扩大解释范围。

到了三维处理高度发展时，大概才有可能完全废除 CDP 网格。但是现在，就我们所掌握的知识而言，三维速度分析和三维静校程序仍然属于试验性的，不能完全证明可供常规应用。

1.2 重叠正交排列

如果速度和高程校正值（静校值）能够精确地知道，就没有什么必要去重叠排列，并且只要保证勘测地区的每个地面点都位于某个正交排列的中点网格内，就能够使广大的地区覆盖。虽然把正交排列的每条支线作为 CDP 线亦能完全保证速度和静校值的测定，但是布置重叠排列也是有用的，因为这样也能从面积资料进行一次测定。

基本思想是重叠相邻正交排列的中点覆盖面积，以便在每个网格点都得到偏移距范围内（或者在偏移距方向是重要的情况下在方位角范围内）的资料。

为了获得重叠覆盖，以同一炮点线激发在几条平行的检波器线记录，在几条平行的炮点线激发用同一检波器线接收，以此来测定静校值是有好处的。这样将使每个炮点和检波器对于再现不同的地下反射点都有意义，因而也就能够通过统一的地面分析把构造效应与表层效应彼此分开。

在正交排列重叠的地方，速度测定的精度与炮检距之差成正比。如果炮检距相差很大，那么速度的变化对大炮检距道的移动将大于小炮检距道。因此，速度如果不正确，在混合资料（combined data）的三维偏移时往往会发生脉冲的抵消。不过，如果炮检距接近相等，那么所用的速度对偏移并无影响。

前已指出，任何中点的炮检距，都是该中点到正交排列两条支线交点距离的两倍。因此重叠正交排列的炮检距，对于到交点等距的任何中点来说都是相等的。如果排列中出现了这样的中点，为了在这个范围测定速度，就需要另一个炮检距不同的正交排列。为了观察用于速度分析的覆盖是否适当，应有一张说明每一中点炮检距的图幅。

图 3 展示了根据四个重叠的东西正交排列重现的两种不同偏移半径的垂直剖面。为了构造左边的剖面，以偏移输出道的位置为中心、半径为 220 英尺的圆的范围内的所有道，按照炮点和检波器的位置移动和相加（见 2.6 的说明）。这种半径在右边剖面为 2500 英尺。

小的半径对于接近平直或者时间小的同相轴能够较好地偏移。但是在时间大的地方，剖面看起来更象一条 CDP 线。大的半径能够较好地确定陡的和时间大的同相轴，然而在时间小的地方产生的同相轴轮廓不够分明。

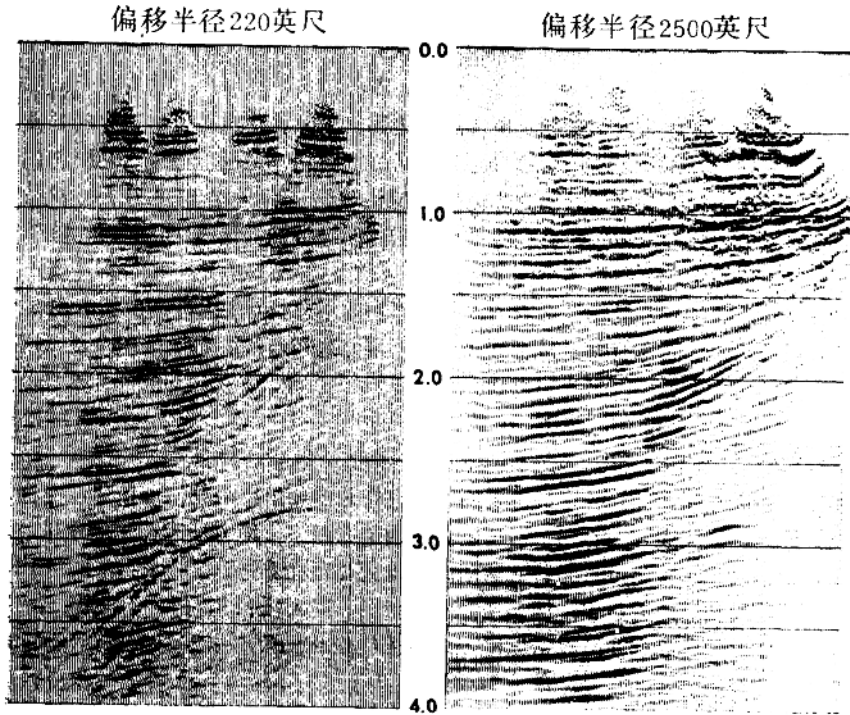


图 3 根据四个重叠正交排列重现的两种不同偏移半径的垂直剖面

根据这些结果，十分明显，偏移半径应随时间而增加，如 2.2 所述。同样明显的是，陡倾的同相轴需要一种大的半径才能合适地确定其位置。

对于 2500 英尺的半径——它在这个例子中几乎还不够大——如果不采用简化算法，计算的工作量将非常大。每一个输出道都要求对大约 6000 个输入道进行移动、加权和相加。这说明在处理中发展精确的简化算法，以期使计算时间变得合理的重要性。在第二部分将讨论若干有效的简化算法。

1.3 测量

工程测量的目的是测定每个炮点和检波器点的 (x, y) 座标与高程，将数据与相应的地震道联系起来，将 (x, y) 座标与固定的地理标志联系起来。尽管这是简单的，但仍然需要仔细地计划才能有效地进行。一次典型的测量或许要测定几千个点和几百万个道。

准备一种计算机程序，对于根据测量员和观察员的记录本计算 (x, y) 座标和高程，并将这些数据方便而无错地记录下来大有帮助。

为了把这些数据与地震道联系起来，最好能绘制一种索引图。在这种图上，为每条炮点线和每道检波器线都确定一个名称，譬如用数字或者字母。这些线上的每个炮点和检波器也给予连贯的数号。这样，每个点都有两个索引标志，即它所在的线的名称以及沿着该

线的顺序号。把两个索引标志、 (x, y) 座标、高程以及其它识别记号记录在磁带上，将带来很大方便。一旦正确地记录了索引标志和其它数据，磁带的次序就无足轻重了。

这种索引图已在实际工作中被证明是适用的。

1.4 地点的选择

上面讨论的设计和布置一次测量所考虑的诸因素中，往往也应包括选定的地点合适与否这个因素。当然，面积内的反射信号必须包括规则同相轴。可能造成资料显得混乱的重叠同相轴，或许用三维偏移可以将它们分离开来，但是三维方法解决不了规则信号的缺失。地表附近的速度异常或较深部位的散射地层可能导致规则信号穿透困难。这类“磨砂玻璃”地区不应当选来进行三维方法试验。

三维设计的若干特点简化了地点的选择：面积的覆盖范围内可以包括钻井或钻探平台；不肯租借的小块面积可以安排在测线之间；可以应用弯线；布置排列时可以避开诸如房屋、山包、沟谷、渠道等等的障碍物。

1.5 问题的选择

在设计和进行三维勘探时，最重要的因素也许是需要解决的问题。值得注意而且有意义的一个特点，是三维解决的问题不一定只在构造方面。三维方法适合于确定礁、地层圈闭、亮点和起伏很小甚至没有的其它圈闭。它也适合存在着强烈的绕射波、侧面同相轴和复杂的干涉同相轴的地方应用，例如在盐丘、断层、侵入体和其它突变点的周围。三维方法也许尚未完善地发展到能够揭示捉摸不定的相位变化的阶段，而这种揭示最好的 CDP 处理是能够做到的。

为了知道具体的要求，或许最好选择一个答案是“已知”的问题：一个建议的钻探位置，一个生产的圈闭，一个断裂的界面，一口建议的开发井，一个亮点以及一个盐丘，等等。

提供答案的地震特性应当是已知的：相角的变化，振幅的变化，速度的变化，频率比的变化，特征的变化等。

应当建立关于问题及其答案的简化模型。这类模型是合成的，是用先进的三维模型技术建立起来的。或者是建立物理比例模型，并将其比例数值汇集起来以供野外试验应用。

这两种方法的任何一种，都为建议的排列、处理和解释提供了一次很好的检验。

最后，应当注意：现存的两种陆地采集系统是完全不同的。符号位数据记录每炮能超过 1000 道，或者全振幅记录每炮大约 200 道。显然，符号位系统要便宜一些，或者说在同样的费用情况下能够更细密地进行空间采样。但是要考虑它是否合适。

经验表明，当解释主要依靠相位（波至时间）或者在背景噪音高的时候，符号位系统是极好的。至于它是否同样适合于振幅异常或其它解释，则应当仔细考虑。

2. 资料处理

2.1 地震数据和测量数据的合并

合并地震数据和测量数据的目的，是把座标、高程和其它识别信息写入每个地震道的

当然，如果能把座标和高程直接写入地震道的道头，那就没有合并两种磁带的必要了。不过，即使能够合并的话，不产生一点误差也是少见的。

2.2 垂直零炮检距剖面的构成

有一种方法能够非常简单地这样做。在线的两边的所有资料都用合适的 NMO 校正投影到线上并且相加 (图 4)。



S —炮点位置; R —接收点位置; M — SR 的中点; P — M 在重现线上的投影;
 O —重现线上的任意输出位置; T_0 —在 D 点的输出道上的任意取样点; T —相应于 T_0 的在 P 点的零炮检距道时间; T_1 —相应于 T_0 的在输入道的时间

1. 从炮点S和接收点R之间的中点M画一条垂线到重现线确定P点。

2. 用下面公式计算在时间 T_1 相应道的时差校正值:

7

式中 V 是时间 T 的均方根速度, $T_1 = T + \text{NMO}$ 。计算的其余步骤是:

3. 在用这个 NMO 校正值作了校正后, 将该道加到离 P 点最近的输出道上;
4. 与 MP 成正比, 与 T 成反比进行锥形相加。加权系数只用正值, 当 $MP = 0$ 时加权系数 = 1;
5. 根据 SP 对 T 的比值, 切除大炮检距的能量;
6. 微分输出道 (或者校正相位畸变)。

在第 4 个步骤中的比例常数决定着“偏移孔径”。当横向倾角明显或者存在着侧面同相轴时, 要求一种大的“偏移孔径”。这种算法很容易在一台小型计算机上实现。

2.3 共炮点 (或共接收点) 零炮检距剖面

如果上面 2.2 部分描述的垂直剖面与正交排列的炮点线平行, 那么相加而形成零炮检距剖面上任何一个道的那些道, 全都近似地具有同一炮点。如果排列偏离了线性, 在相邻炮点之间可能会发生一些局部混合。所以, 应当修改产生零炮检距剖面的算法, 使得每个输出道仅仅只包括一个炮点。这样, 该炮点位置的任何静校移动、振幅异常或者滤波器效应, 都将没有混合地加在零炮检距剖面上的相应道。

我们同样可以构组平行于正交排列检波器支线的类似的线。

此外, 可以构组另外的诊断线来检验常数炮检距、常数方位角或者其它专用参数。

2.4 零炮检距剖面的偏移

在上面第 2.2 和 2.3 部分描述的零炮检距剖面, 都不应当包含来自剖面平面以外的任何同相轴。但是剖面内的同相轴是需要偏移, 使它们处于平面内它们的真实位置上的。为了实现这种偏移, 我们可以重复第一个步骤 (即应用射线路程偏移), 或者采用波动方程偏移、傅里叶变换偏移以及为二维资料发展的其它算法。

偏移的结果, 就是所有同相轴都合适地归位的地层的真实垂直平面图象。

对三维偏移的这种两步过程更仔细地进行考察, 将会看到这只是一种良好的一级近似, 并没有十分正确地处理速度随时间的变化。在倾角非常陡的时候可能出现明显的误差, 但是对于十分平直的同相轴, 误差是可以忽略不计的。

物理模型资料能够说明 CDP 剖面、零炮检距投影与三维偏移之间的不同。图 5 和图 6 是三维模型 (两个圆丘和一个断层) 的透视图和平面图。标明 NS-27 的线指出了用作例子的剖面的位置。

图 7 是一条 CDP 剖面, 它上面所有的道其中点都沿着 NS-27 线分布, 并且对距离作了 NMO 校正。在剖面上可以看到来自圆丘 B 和断层 C, 以及圆丘 A 和模型的平直界面的反射波。

图 8 表明按照前面 2.2 部分中描述的算法将三维资料投影到 NS-27 线。请注意, 这里不再看到来自圆丘 B 和断层 C 的反射波。该剖面现在显示的, 是切割模型的一条 NS-27 线的垂直平面内的点所引起的“CDP”线。换句话说, 零炮检距投影资料中已消除了所有横向倾角的影响, 如果地下界面是二维的话, 零炮检距的投影当然会与一般的 CDP 剖面一致起来。

最后, 图 9 说明, 如果零炮检距投影资料再经过偏移, 那么同相轴在变换后就位于沿

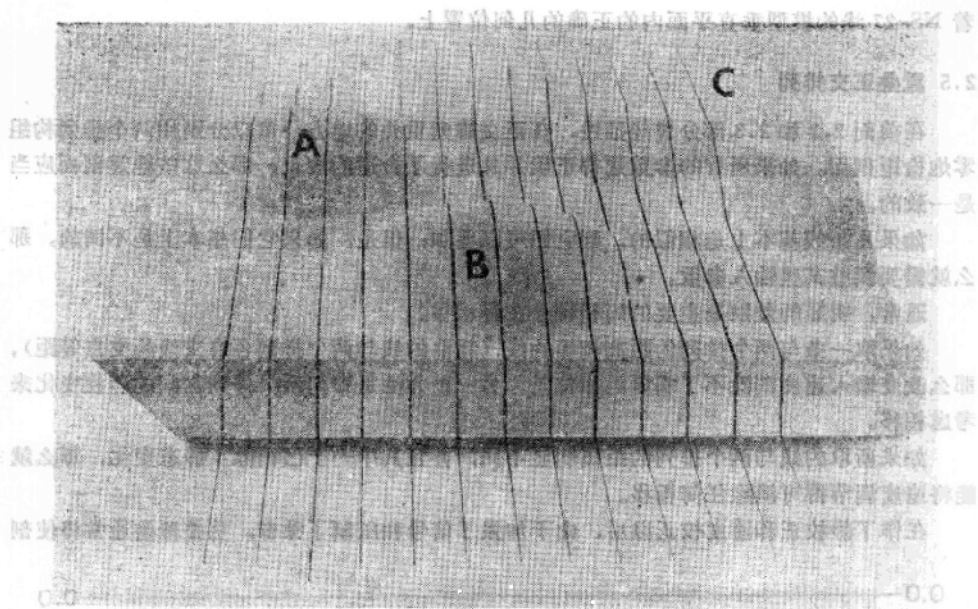


图 5 三维模型的照片

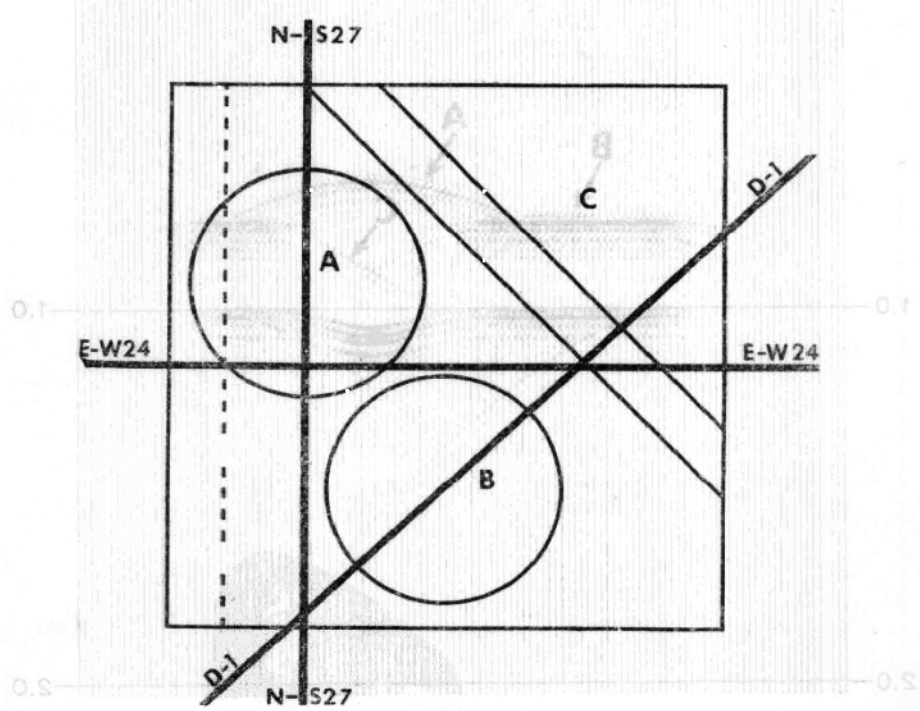


图 6 三维模型的平面图