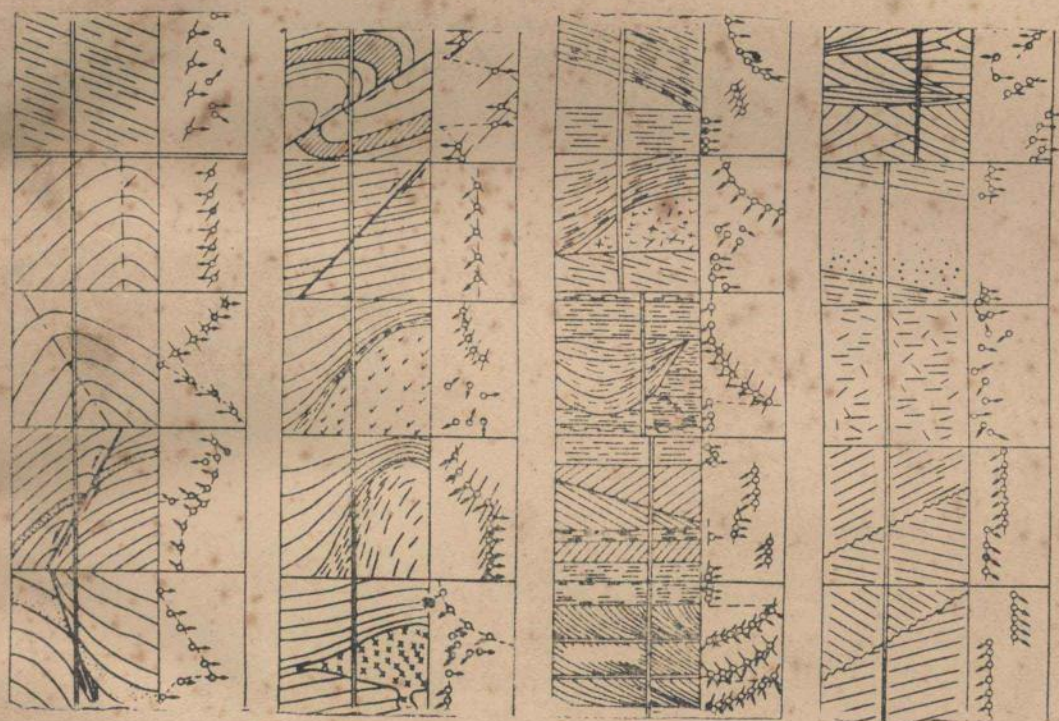


地层倾斜测井解释及地质应用



国家地质总局数字测井短训班

1979年7月

目 录

前 言	(1)
第一章 概 述	(2)
一、地层倾斜测井在油气田勘探开发方面的作用	(2)
二、地层倾斜测井发展概况	(16)
第二章 地层倾斜测井的基本原理	(18)
一、倾斜仪测量原理	(18)
二、计算地层产状的基本原理	(20)
1、地层产状的概念	(20)
2、地层产状坐标系的建立	(21)
3、仪器坐标系转换为大地坐标系的方法和基本公式	(23)
4、坐标转换后计算地层产状的公式	(25)
三、相关对比的基本原理和运算方法	(26)
1、什么叫相关对比	(26)
2、地层倾斜测井相关对比中几个名词的含义	(26)
3、简单相关对比计算实例	(30)
4、程序中所用相关对比公式和对比运算过程	(32)
第三章 地层倾斜测井数字处理概况	(36)
一、地层倾斜测井数字处理步骤	(36)
二、地层倾斜测井计算机处理流程图	(37)
三、野外磁带记录格式简介	(37)
第四章 地层倾斜测井资料解释的地质基础知识	(39)
一、构造地质	(39)
1、岩石的力学性质	(39)
2、主要构造变形	(42)
二、沉积地质	(65)
1、层理构造及其分类	(65)
2、沉积环境及其分类	(75)
3、层理构造与沉积环境的关系	(97)
第五章 地层倾斜测井资料的解释	(101)
一、地层倾斜测井计算机处理的主要成果图件及其应用	(101)
1、矢量图 (箭头图)	(101)
2、施密特图	(105)

3、改进的施密特图	(107)
4、方位频率图	(109)
5、线性极坐标图	(116)
6、圆柱面极坐标图	(116)
7、杆状图	(117)
8、极射赤平投影图	(118)
9、岩石组构异向性程度图	(128)
10、数据表	(128)
二、地层倾斜测井成果图分析	(130)
1、地层产状的确定及其分析	(130)
2、地层倾斜测井的颜色模型图象(矢量图象的分类方法)	(134)
3、地层倾斜测井记录的模型特征	(146)
4、地层倾斜测井记录与构造等值线的关系	(146)
三、地层倾斜测井解释的地质模型分类及应用	(149)
1、地质模型分类原则	(149)
2、地质模型的解释途径	(149)
3、三十四种地质模型的解释	(149)
四、地层倾斜测井资料的图解分析和手工计算	(184)
1、覆盖图和赤平网	(184)
2、图解法测量角度	(186)
五、地层倾斜测井地质解释的基本法则	(194)
第六章 地层倾斜测井资料的地质应用	(195)
一、利用地层倾斜测井资料研究构造问题	(195)
1、地层对比	(195)
2、确定断层	(197)
3、确定不整合	(199)
4、确定岩礁和盐丘等构造	(201)
5、绘制地下构造图	(205)
6、构造分析	(208)
二、利用地层倾斜测井资料研究沉积问题	(211)
1、利用测井技术研究沉积环境的物理基础和测井曲线特征	(211)
2、几种沉积环境测井曲线的模型	(231)
3、利用测井技术研究沉积环境的现场实例	(246)
4、沉积环境制图	(259)
三、利用地层倾斜测井资料研究岩层的定向组构	(261)
1、沉积岩的组构	(261)
2、测定岩石异向组构的基本原理与公式	(262)
3、定向岩石组构的解释	(264)
4、岩石电阻率异向性解释实例	(267)

四、地层倾斜测井在其他方面的应用	(270)
1、地层倾斜对井孔偏斜的影响	(270)
2、井径测量反应井孔的形状——井孔横截面变长的方向研究	(273)
3、方向电阻率	(276)
4、感应——电测井资料与地层倾斜测井结果比较	(276)
参考资料目录	(284)

前言

地层倾斜测井^{*}，国外从 60 年代起早已普遍使用。目前，我国不仅已引进了部分仪器设备，同时国产仪器也投入了生产。从石油勘探、开发的发展趋势看，“测井”与“地质”资料的结合日益紧密，并逐渐发展形成了一门新兴的学科“测井地质学”，用来研究地下油气构造和沉积环境特征，指导油气田的勘探和开发。尤其是“地层倾斜测井”与“地质”、“地震”工作三者互相配合，已成为查明地下地质情况，“稀井广探”，多、快、好、省寻找油气田的一个极为重要的手段。

为了加速实现“四个现代化”，尽快地普及和推广地层倾斜测井解释及地质应用方面的先进技术，更好地学习和利用外国的好经验，为了能在最短的时间内赶上世界先进水平，在国家地质总局、成都地质学院、河南石油指挥部党组织的关怀与大力支持下，由成都地质学院石油系参加短训班教学工作的同志编写了这本“地层倾斜测井解释及地质应用”，供广大石油工作同志们学习和工作时参考。

考虑到测井战线上的同志们对地质可能不太熟悉，在有关同志的建议下，特意增加了地质基础知识这一章。初稿完成后承许多同志们提出了不少宝贵意见，在此表示感谢！由于时间紧迫，资料有限，加之人力不足，书中缺点错误可能不少。恳切希望同志们多多提出宝贵意见，以便下次进一步修改、补充使之完善。

国家地质总局数字测井短训班

一九七八年十二月

成都地质学院石油系地质教研室

^{*} 即地层倾角测井。*Dip* 可译为倾斜、倾角、倾向。因倾角在地质上为一专用名词，只代表岩层的倾角大小，并无方向之意。而倾斜既反映方向又包含角度的大小。

——编者

第一章 概 述

一、地层倾斜测井在油气田勘探开发方面的作用

六十年代以来，国外把地层倾斜测井与电子计算机紧密配合，并研制了高分辨力的地层倾斜测井仪，能对厚度很薄，电阻率变化很微小的地层进行测量，精度十分灵敏。配合其它测井曲线，能指示沉积岩颗粒大小的变化，泥质含量的变化。即使是在高电阻、厚泥饼、盐水泥浆以及溶洞等困难条件下，也能测得可靠的对比曲线。曲线的横向比例尺，也改变为非线性的，即放大了低电阻率部分，压缩了高电阻率部分，这样就使曲线变化更加尖锐和明显。

近年来，国外已积累了不少地层倾斜测井解释的经验，并开展了地层倾斜测井解释方法的研究，使地层倾斜测井在解决含油气构造问题 and 研究沉积环境方面取得了迅速的发展，特别是利用单井资料，也能提供一些有关构造和沉积环境方面的可信看法。因此，地层倾斜测井与地质、地震资料三者相互结合，已成为确定区域构造最全面、最可靠的方法，成为石油地质综合研究工作中的一个极为重要手段之一。它对我国目前开展的“稀井广探”，寻找更多更大的油气田，为创建十来个大庆有着十分重要的现实意义。

大量实践已经证明，利用地层倾斜测井，是一种提高勘探效果的好方法。例如北海一个油田，只用了五口井的测井资料和部分岩芯资料，就圈定了油田的构造面积，测出了油层的岩性、物性参数，还算出了储量和产能。

总之，概略地说，地层倾斜测井在研究含油气构造、沉积环境方面可以解决以下几方面的问题：

1. 确定区域构造和构造倾角

在利用电子计算机对地层倾斜测井资料进行处理时，长井段、大容量数据点的倾角计算，能够准确地识别地下地质构造的异常。通过计算机还可以自动绘制其他图件，如施密特图等，很容易地求出区域构造倾角和倾向，为进一步研究地下构造，提供了十分可靠的资料。

2. 进行地层对比

地层倾斜测井资料，为地下地层的细分与对比提供了更加科学的依据，特别是在岩性变化大，用一般测井曲线难以进行对比的地区，已成为井与井之间的地层对比行之有效的方法。

3. 确定断层的具体位置和性质

地层倾斜测井，是一种探测三角洲地区同生断层的良好工具，在墨西哥湾和尼日利亚应用的效果都非常好。但是对非同生断层，有时地层倾斜测井资料上没有直接反映，就需要配合其他资料加以确定。图1—1至图1—5是美国墨西哥湾路易斯安纳州，用地层倾斜测井探测断层的几个实例，以后均为其他资料所证实。图1—1是接近断层面产生滚动的例子，地层倾向与断层面倾向相反，倾斜测井表明，附着井孔接近断层面，倾角逐渐加大，到了断层面附近达到最大值（ 25° ），穿过断层，倾角又急剧下降为零。

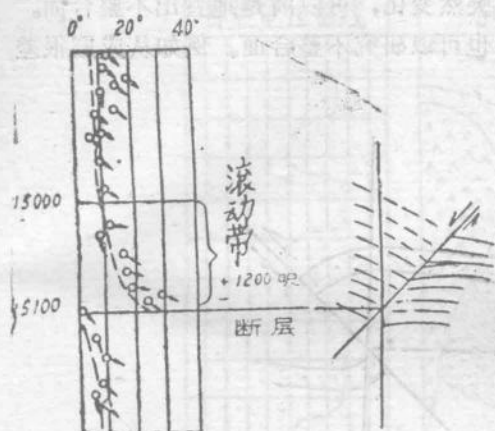


图1—1 断层上下盘都产生滚动，断层面斜向与地层倾向相反。在断层面处倾角为最大值。

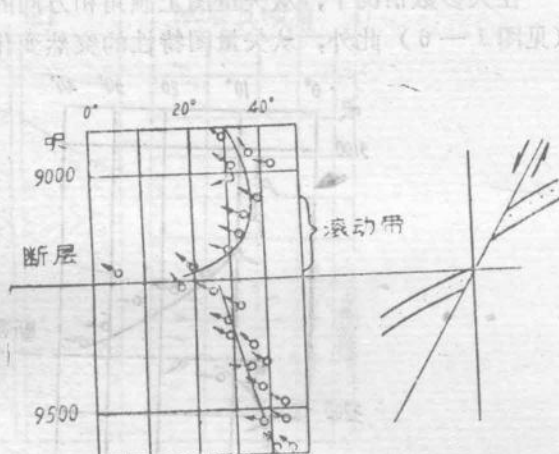


图1—2 下降盘发生滚动，地层倾向与断层面倾向一致。在断层面附近倾角为最小值。

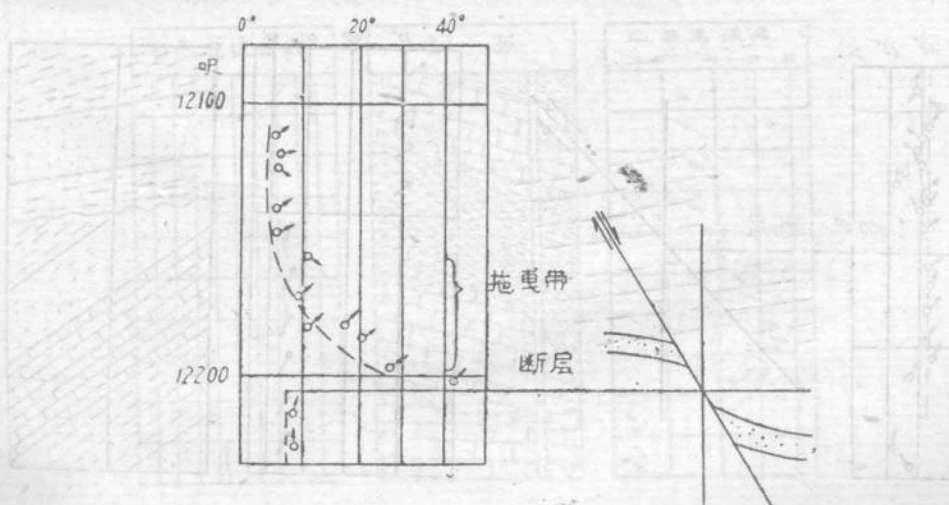


图1—3 断层下降盘具有正牵引现象，断层面倾向与地层倾向一致。在断层处倾角为最大值。

图 1—2 是断层下降盘滚动的例子，地层倾向与断层面倾向一致。在断层面附近，地层倾斜测井读数降到最小值，穿过断层面，地层倾角又逐渐增大。图 1—3 表示在正断层的下降盘产生牵引时，接近断层面时记录到最大的地层倾角 (43°)，倾角方向与断层面倾向一致。图 1—4 是逆掩断层的例子，在断层面附近，上下盘都发生滚动(逆牵引)，断层面倾向与地层倾向相反，地层倾角的读数最大，达 35° 。图 1—5 是非同生断层的例子，没有产生牵引或滚动现象，地层倾角没有变化，倾斜测井无显示。

4. 探测不整合面以及盐丘和碳酸盐岩礁的具体位置

在大多数情况下，从矢量图上倾角和方向的突然变化，可以清楚地看出不整合面。(见图 1—6) 此外，从矢量图特性的突然变化也可以研究不整合面。例如从成层很差

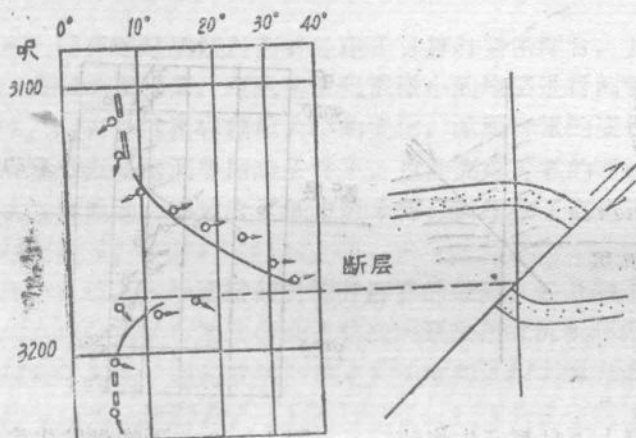


图 1—4 为一逆掩断层，地层比较平缓，但上下盘都发生了滚动(逆牵引)，在断层面附近地层倾向与断层面倾向相反，倾角读数在断层处有最大值。

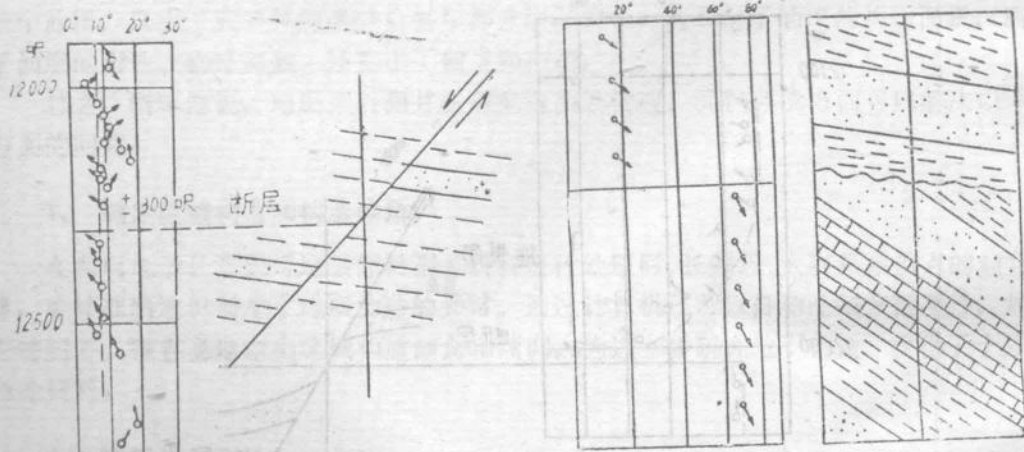


图 1—5 为非同生断层，上下盘都没有产生牵引或滚动现象，地层倾角没有变化。

图 1—6 角度不整合在地层倾斜测井图上表现为倾角的突然变化，有时也可以是倾向突然发生变化。

的地层进入明显成层的地层时，矢量图将从分散的状态变成很有规律的。实践还表明，长对比层段计算的结果，更加容易探测不整合面。

图 1—7 表示盐丘的图样，由于盐丘的侵入引起地层明显的弯曲，这些挤压力时常最后又破坏地层。倾角图案一般是恒向，高倾角的形式。倾向通常离开穹丘中心，并常反映穹丘的一侧剖面。

图 1—8 是一个碳酸盐礁的图形，对于礁前相，根据地层倾斜测井资料，对礁的解释问题是相当简单的，但在礁后相中，这个问题将变得较复杂。页岩在礁的各侧上会反

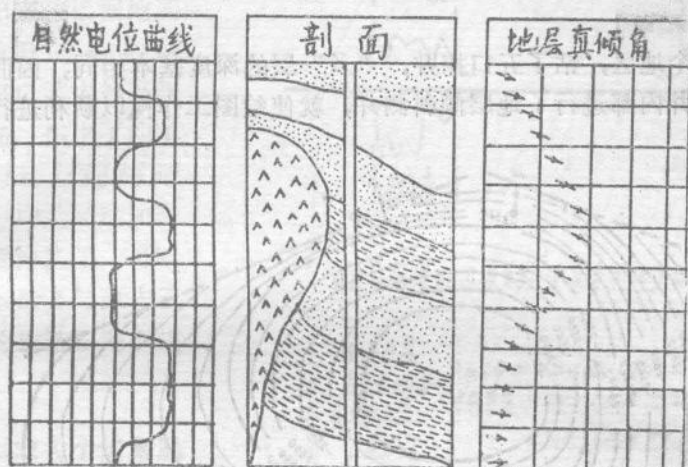


图 1—7 盐丘构造，由于它具有塑性的内核。（岩盐或石膏）刺穿上覆岩层，使地层倾角发生连续变化。

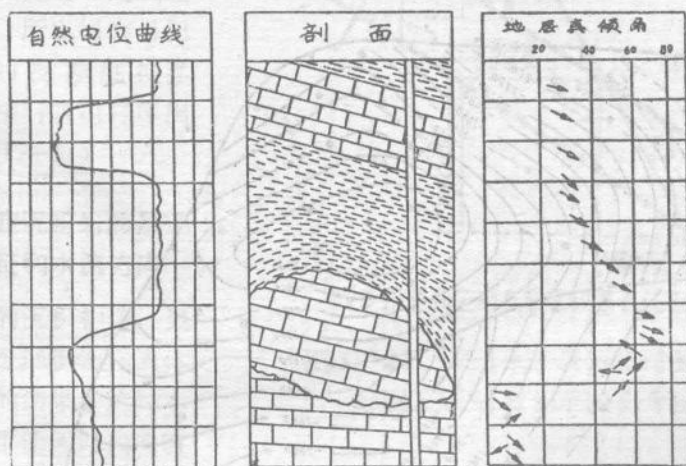


图 1—8 碳酸盐礁，当钻遇礁体时，倾角图象通常是分散的，并且显示倾角数值变大。

映出一种显著变化，上面的页岩会反映出较缓的变化，愈接近礁体，则倾角变得愈陡。当进入礁体后，倾角图案常常是分散的，且显示出倾角的增加，其原因多是由于晶簇、断口、节理等所造成，所以不能用来作礁的构造图。

5. 可以自动对井斜身进行校正，绘制高精度的地下地质构造图

利用地层倾斜测井资料，可以用最少量的控制井来绘制地下构造图。尤其是在海上进行勘探和开发，有时人为的钻了许多斜井，但是通过计算机的处理，就可以自动对所测的曲线进行井斜校正，并重新绘制出铅直井的曲线来，为绘制高精度的地下构造图提供资料。

在尼日利亚一个地区，钻了五口探井，“Z”层的深度基本相同，因而无法绘制构造图，由于在这些井内都进行了地层倾斜测井，就使绘图工作得以顺利进行。从图1—

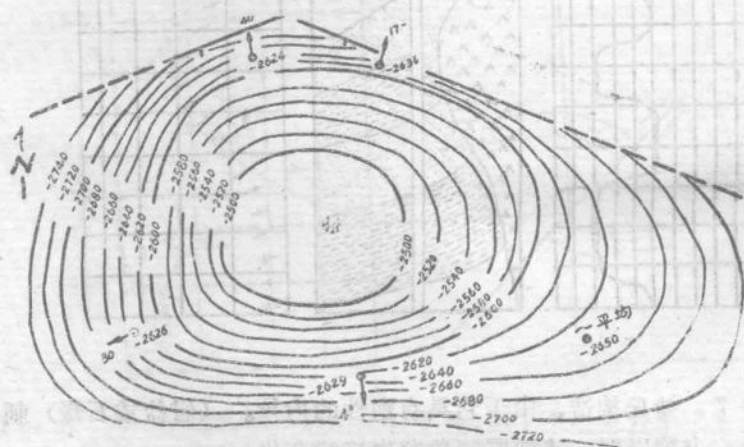


图1—9 根据五口井的地层倾斜测井资料绘制的“Z”层构造图。

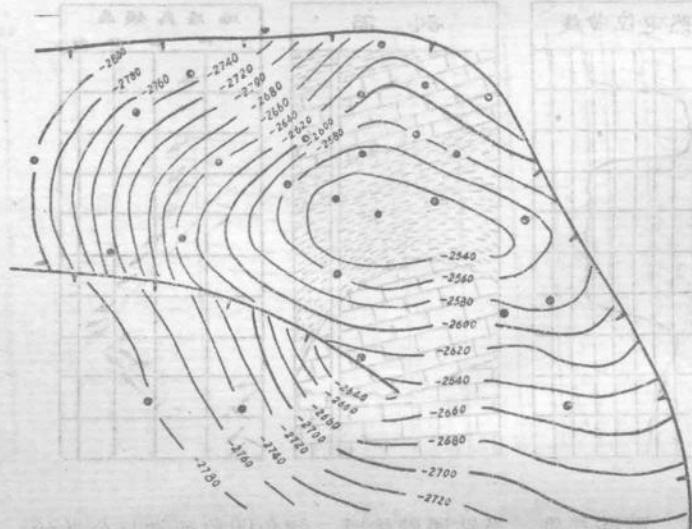


图1—10 经过加密钻井后“Z”层的最后构造图。

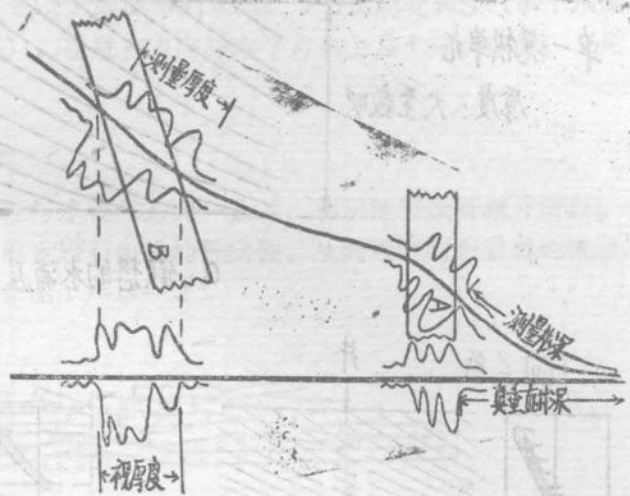
9可以看出,在北部的两口井“Z”层走向不同,表示存在两个断层,或者是一个断层改变了方向。从每口井到“Z”层和断层面的相交线的水平距离,可以从倾角畸变的度数以及区域性特征粗略地估计出来。根据地层倾斜测量所求得的结构倾角,确定了每口井内等高线的线距和方向,作出了如图1—9所示的近似的构造图。而图1—10是经过加密钻井后的最后构造图,可以看出,其基本形态与原先五口探井绘制的构造图是很相似的。

6. 可以求各个储集层的真厚度

由于地层倾斜测井可以求出每个小层的地层真倾角及倾向,加上通过计算机的处理,又可以自动对曲线进行井斜校正,所以很容易把各个储集层的视厚度换算成真厚度,由计算机打印出来。(见图1—11)

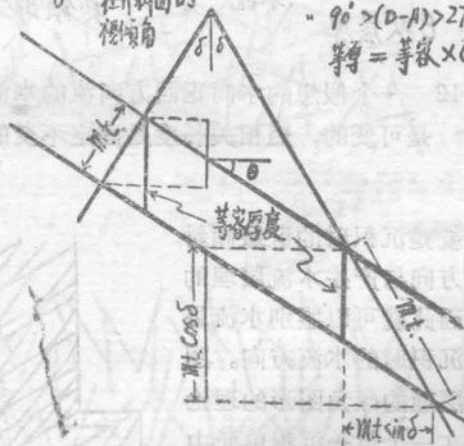
7. 确定沉积岩的层理特征和水流方向

沉积岩的沉积构造,最明显的一点是沉积物在流体运动中沉积的结果,这种水流层理存在于任何时代所有各类的沉积岩中,在砂岩、粉砂岩、泥质砂岩、泥岩、石灰岩、白云岩中都已证实有水流层理的存在。图1—12a描述了一个简单的、假想的、水向正西流动时沉积的水流层理的沉积单元。水流层理的特征是一系列向上凹陷的表面,通常伴有粒度和颜色的变化,所以其存在一般可以用目力鉴定出来。由于每一凹面一般都与堆积的表面相切,故



真垂直深度的回收取决于在垂直线上的水平投影。

$m.t$	测量厚度	$\tan \theta = \tan \alpha \cdot \cos (D-A)$
d	地层倾角	等厚度 = $m.t \cdot \cos \delta \pm m.t \cdot \sin \delta \tan \theta$
A	倾向方位	$= m.t [\cos \delta \pm \sin \delta \tan \alpha \cos (D-A)]$
S	井斜斜度	如 $90^\circ < (D-A) < 270^\circ$ 则为正
D	井斜方位	“ $90^\circ > (D-A) > 270^\circ$ 则为负
θ	在斜面上的视倾角	特 = 等厚 $\times \cos \alpha$



TVD投影和它们与等厚和等厚厚度的关系。

图1—11 利用电子计算机对斜井自动进行曲线校正, 计算油层的真厚度。

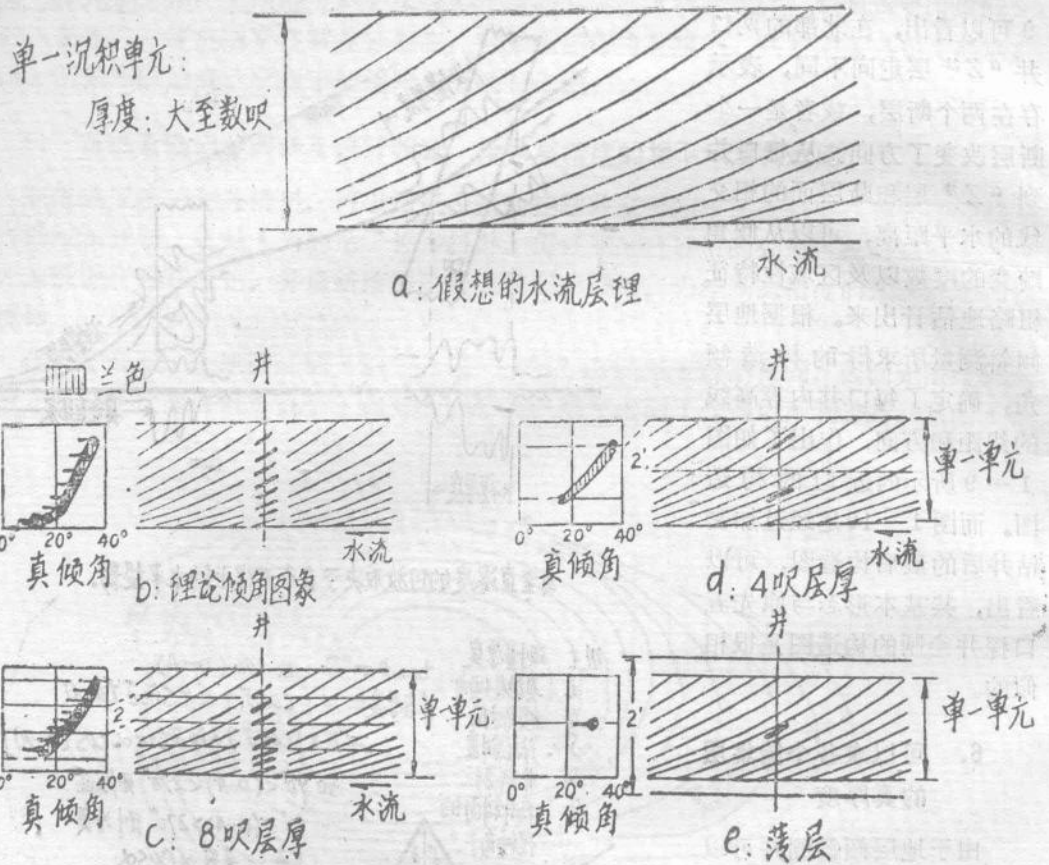


图 1—12 一个假想的水向正西方向流的水流层理的倾角图象，层厚是可变的，短相关长度是固定不变的。

其最小倾斜通常就是沉积时的区域倾斜率。水流倾角的方向与产生水流层理的水流方向相同，因此就可以鉴别水流层理的方向来确定沉积时的水流方向。图 1—12 b 为水流层理的倾角图形的理论特征，它表示出在一个单一沉积单元中各前积层之间的各界面的倾角，在地层内垂直方向进行连续测量，就可以产生一组倾角方向不变，但随深度增加而角度变小的图象。通过一定相关长度的计算，就可以得到与理论图象类似的四个倾角计算点的兰色图象。图 1—12 c 这些图象中的倾斜方向，就可以解释为沉积过程中的水流方向。因为曾在地面露

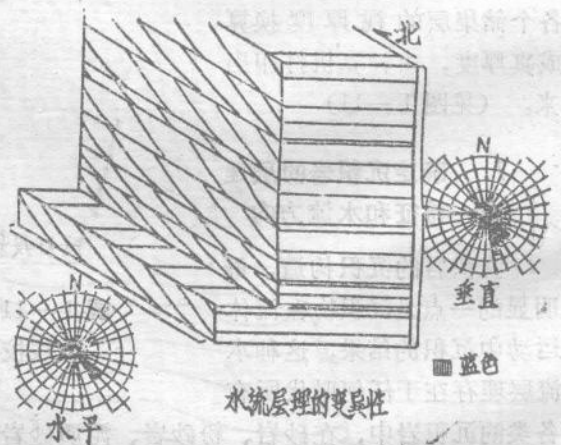


图 1—13 地层中水流层理的方位变异性在垂直方向与水平方向上是相类似的。

头对水流层理作了大量研究和测量，证实了地层中的水流层理方位的变异性（单个水流层理的方位角与其平均值的相差范围），在垂直方向与水平方向上是十分类似的。（见图 1—13）

8. 确定沉积时岩屑的搬运方向

因为岩屑的长轴排列方向，通常是与水流的方向一致的，利用地层倾斜测井资料，可以研究岩石电阻率的异向性程度，确定岩石组构的异向性，从而可以判断岩屑的搬运方向和物源方向。（见图 1—14—1 和图 1—14—2）

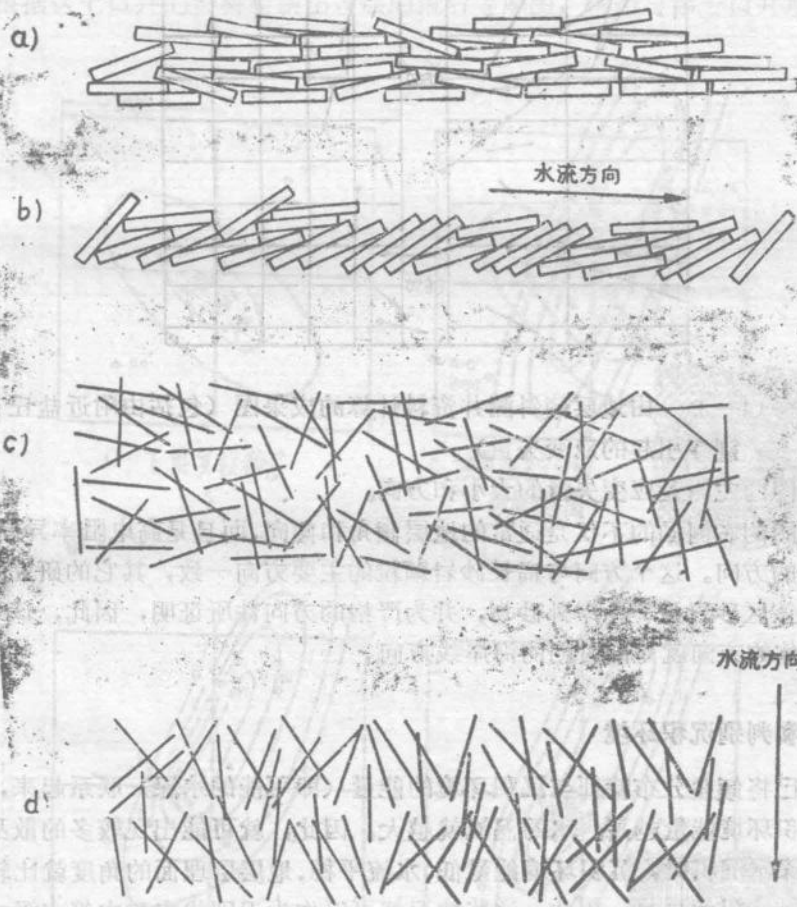


图 1—14—1 片状和杆状矿物在水流作用下的方向性。

a) 重力场中的片状矿物排列情况

b) 重力和水流相结合作用下的片状矿物排列情况

c) 重力场中的杆状矿物排列情况

d) 重力和水流相结合作用下的杆状矿物排列情况

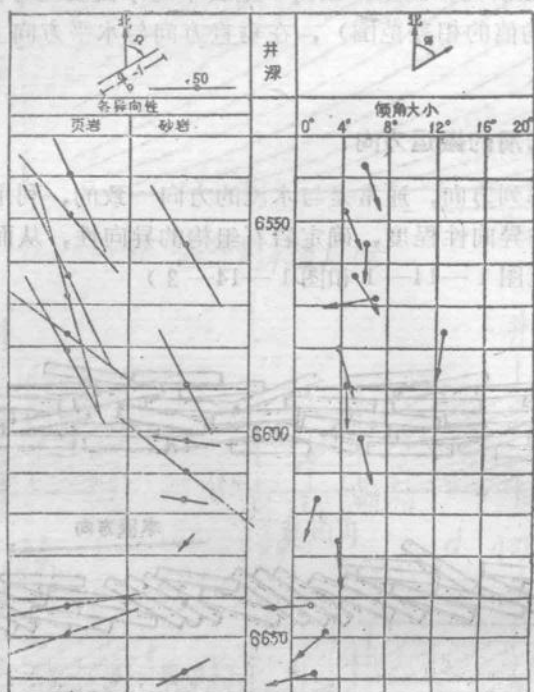


图 1—14—2 由地层倾斜测井资料计算的成果图 (包括由附近盐丘刺穿引起的应变矢量)

图的左侧是应变矢量的大小和方向。

图的右侧画的不仅是通常的地层倾角和倾向,而且是高电阻率异向性轴的方向。这个方向与扁长砂岩颗粒的主要方向一致,其它的研究证明该区砂岩是一个岸外砂坝,并为严格的方向性所证明,因此,该砂岩体的方向就是同时期的海岸线方向。

9. 研究和判别沉积环境

近年来,已将倾角分布特征与沉积环境的能量(即可能的水深)联系起来,沉积时水流越急,沉积环境能量越高,水的涡流就越大,因此,就可能出现较多的高角度层理面。在深水沉积时,沉积环境能量低,水流平稳,地层层理面的角度就比较低,而且比较稳定和有连贯的趋势。因此,这些情况都可以作为识别浅水和中等水深或深水沉积的标志。

地层倾斜测井,不仅有助于区分三角洲不同类型的沉积环境,不同沉积层理特征,水流方向和沉积物源方向等沉积特征;而且还可以作为研究三角洲沉积和岩相古地理的一个重要手段,还能研究海岸线的变迁和岩体的分布规律。

10. 可以探测和绘制砂体圈闭图

原始的或次生的沉积构造或沉积物的形态,如砂丘等通常可以用高分辨力地层倾斜

测井配合地质和地震资料探测出来。图 1—15 是美国中陆地区用地层倾斜测井确定砂岩体的一个实例。图 1—15 a 是四块租区的上摩洛砂层（密西西比系）的地震构造图，其走向为北西—南东，在两边打了两口干井。西南部的井钻穿含水的上摩洛砂岩，厚 34 呎（约 10 米）；在东北部的井这层砂岩的厚度为 59 呎（约 18 米）顶部有微弱的油气显示。进行了地层倾斜测井，目的是确定地震构造图的顶部是否存在可能含油的砂岩体。图 1—15 b 是根据东北部的井的地层倾斜测井结果推测的砂岩等厚图，砂岩体走向为北东 15 度，南西 15 度，在西南租区砂体厚度较大，在这个区的东北角上（地震构造的顶部）砂岩体的厚度最大。在这里钻了一口井，发现了油田。该井钻穿的砂岩厚度为 68 呎（约 21 米），构造高度约 24 米。图 1—15 c 表示原来两口干井之间约 32 公顷范围内打了七口油井，根据这七口井的资料绘制出 A 层的最后等厚图，形态与第一口井地层倾斜测井计

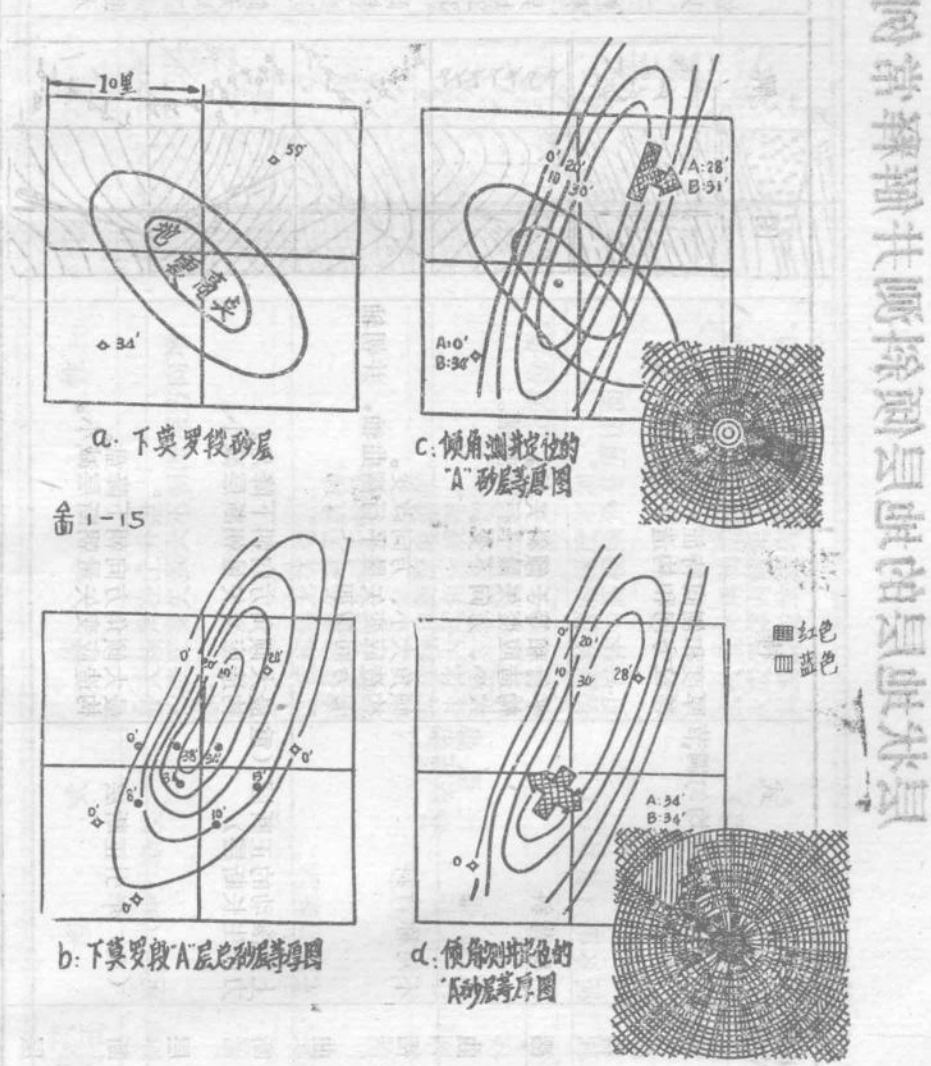
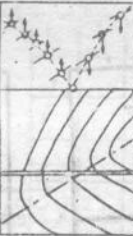
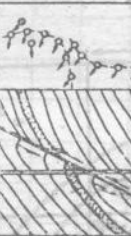


图 1—15 为美国宾夕法尼亚上莫罗段沙层，用地层倾斜测井资料得出来的砂体延伸方向，与地球物理勘探资料综合解释成果对比图。

层状地层的地层倾斜测井解释常例

表 1-1

地质类型	地质特征	型式	特性	图解	识别特征	标志
区域下倾	均匀单斜	向盆地倾斜或均匀调节	厚度和侧向特征一致。 颗粒方向和构造应变矢量一致。		只有十五分之一倾斜矢量反映区域地层倾向，这个倾向是普遍存在的具有固定一致倾向的最低倾角。构造应力矢量一致。	
构造变形	褶曲	对称背斜	平行和等于倾斜矢量。 构造应变矢量平行褶曲轴。 大小、方向不变。		异部井观察到： 1. 一致的倾斜。 2. 一致的颗粒方向。 3. 一致的应变矢量。	
构造变形	褶曲	不对称背斜	倾角大小、方向改变。 构造应变矢量平行褶曲轴，并朝轴的方向增加。		倾角大小、方向相反。 构造应变矢量朝轴部增大。	
构造变形	断层	上盘滚动的正断层（重力或生长断层）	最大倾角方向朝下降盘。 构造应变矢量朝断层面减小。		倾角数值在断层面处分叉。 无应变矢量。	
构造变形	断层	（正）牵引正断层	最大倾角方向朝下降盘。 构造应变矢量朝断层面减小。		断层面处产生倾角峰值。 无应变矢量。	

地质类型	地质特征	型	式	特	性	图	解	识别特征标志
构造变形	断层	逆掩(冲)断层		最大倾角在上升盘。 构造应变矢量大小朝断层方向增加。				如果横向冲击强烈,这种类型难以同不整合区别,除非通过构造应变矢量。
构造变形	断层	无扭曲断层		区域倾斜无扰动。 构造应变矢量无扰动。 颗粒方向无扰动。				仅从倾斜测量不能识别,需要观测标准层的位移。不受干扰的定向矢量。
构造变形	刺穿侵入	盐丘带 剪切带	断带 泥带 层带 压带 缩带	构造倾角随深度增加。 盐体内倾角无规律。 构造应变面很陡。 剪切带垂直于盐丘方位角。				在一定距离内可以感觉有盐丘的存在,用构造矢量指数的三角形法能够确定其位置。
构造变形	刺穿侵入	泥火山(页岩丘)		构造倾角随深度增加。 页岩体中高视倾角是剪切面。				从构造应变矢量可以在远处感觉到有页岩丘的存在,并象盐丘一样用三角形法推测其位置。
构造变形	刺穿侵入	火成岩颈(岩盖)		因披盖作用构造倾角随深度增加。 火成岩体内倾角无规律。 典型的蛇纹岩颈下是区域倾角。				利用差异板盖图可以发现岩盖体。