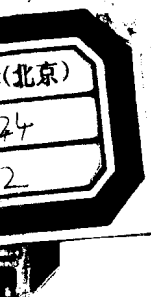


钻井工艺原理

下 册

刘 希 圣 等 编



石油工业出版社

6226

TE24
002

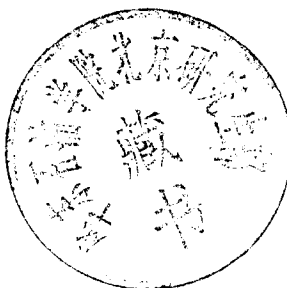
钻井工艺原理

下 册

刘希圣等编



0348/11



石油工业出版社

内 容 提 要

本书分上、下两册出版。下册内容为第七章至第十一章。书中详细地介绍了油井完成的各种主要技术问题,如压力预测与控制、固井完井等部分;对定向钻井及海洋钻井的工艺技术特点及有关问题也作了详尽的介绍。

本书可作高等石油院校石油钻井工程专业学生的主要教材,并可供从事于钻探工作的科技人员参考。

钻 井 工 艺 原 理

下 册

刘希圣等编

*

石油工业部教材编译室编辑(北京 902 信箱)

石油工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

北京印刷一厂排版

顺义县燕华营印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 $\frac{1}{16}$ 开本 19 $\frac{3}{4}$ 印张 496 千字 印 1—7,500

1981 年 8 月北京第 1 版 1981 年 8 月北京第 1 次印刷

书号: 15037·2295 定价: 2.10 元

目 录

第七章 定向钻井	1
第一节 定向井的基本概念	2
第二节 定向井井身剖面设计	9
第三节 实际井眼轴线的计算和绘制	14
第四节 定向井井斜角的控制	21
第五节 定向井的方位控制	34
第六节 定向仪器和定向工艺	46
参考文献	53
✓ 第八章 油气井压力控制	55
第一节 地层压力和地层破裂压力及其预报	55
第二节 地层-井眼系统的压力平衡和平衡的破坏	77
第三节 地层流体流入的发现和应立刻采取的措施	89
第四节 溢流时恢复和重建压力平衡的方法——压井	96
第五节 防喷压井用设备	120
参考文献	140
第九章 固井	142
第一节 套管及套管柱的设计	142
第二节 油井水泥	161
第三节 注水泥质量的要求及其保证措施	168
第四节 挤水泥及打水泥塞	174
第五节 特种注水泥技术	178
第六节 深井固井简介	181
附录	185
参考文献	187
第十章 油井完成	188
第一节 钻开生产层	188
第二节 完井方法	196
第三节 完井井口装置	217
参考文献	223
第十一章 海洋钻井	225
第一节 海洋石油工业发展概况	225
第二节 海洋常识	229
第三节 海洋石油钻井装置	239
第四节 海洋钻井的工艺技术特点	281
第五节 海上金属构件的腐蚀与防护	302
附录	308
参考文献	310

第七章 定向钻井 (Directional drilling)

沿着预先设计的井眼轴线钻达目的层位的钻井方法,称为定向钻井(或称斜向钻井)。

早在 1897 年就有人用顿钻打过斜井^{[1][20]}。但是真正按预先设计的井眼轴线钻井,却开始于本世纪三十年代。由于定向钻井能够解决直井难以解决的许多技术问题,以至五十年代中期以来它已被我国和世界各国大量采用。近几十年来海洋石油勘探开发事业迅速发展,许多先进的定向测斜器具和工艺技术相继出现,促使定向钻井技术日臻完善,其使用范围也更加广泛。

定向钻井使用范围可以归结为地面限制、地下要求和钻井技术需要等三个方面。

1. 地面限制

当油田埋藏在高山、海洋、森林、湖泊、沼泽、城镇、农田的地下,井场设置以及搬家安装受到极大障碍时,往往需要定向钻井。如图 7—1 所示。

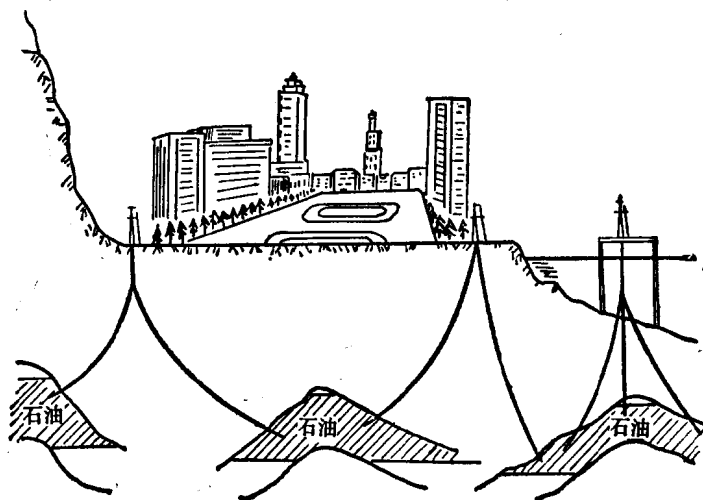


图 7—1 地面限制示意图

2. 地下地质条件要求

由于地质构造特点,直井不能有效地勘探开发油气藏,而采用定向钻井则有利于发现油藏或者增加开发速度。如图 7—2 (a)、(b)、(c)、(d)所示。

3. 钻井技术的需要

在遇到井下事故无法处理或者不易处理时,常进行定向钻井,如图 7—3 (a)和(b)。此外地层倾角太大,在建井周期或钻井成本方面,如果定向井优于直井,也需要钻定向井。如图 7—3 (c)所示。

定向钻井的广泛使用,进一步促进了这项技术的发展。目前世界上定向钻井技术已达到了相当高的水平^{[2][11][12][13]}。例如,最大水平位移已接近四千米;井身剖面完全可以控制在半径为 15 米的范围以内;井深四千米,井底距预定目标不超过 3 米;建井周期和总成本已接近钻直井的水平;全自动的随钻随测仪器已经试制成功等等。定向钻井的优越性,在海

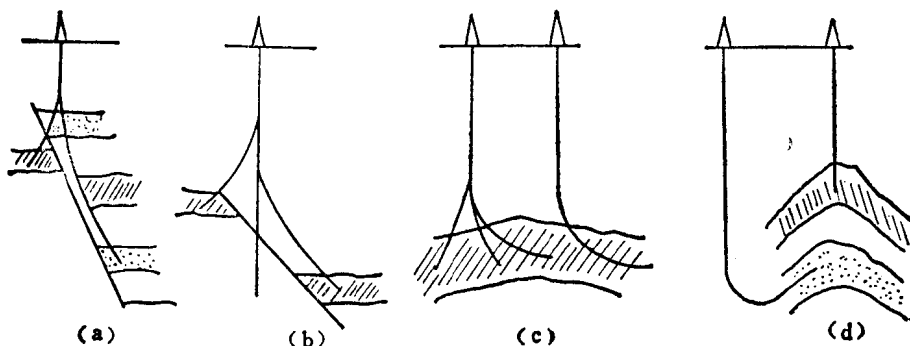


图 7—2 地下地质条件要求

(a)一断层；(b)一套管开窗侧钻及原眼侧钻；(c)一多底井及水平井；(d)一大斜度井

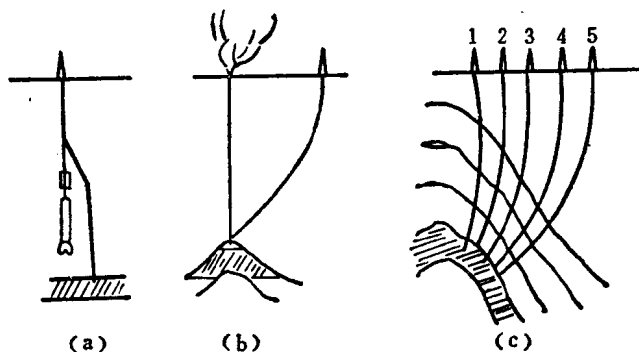


图 7—3 钻井技术需要

(a)一井下事故；(b)一井喷失火；(c)一4井最快

洋、森林、沼泽、城镇、湖泊等地区更为突出。如果在这些地区，建立一个钻井基地（如海洋钻井平台等），进行以定向钻井为基础的丛式钻井 (Multiple Drilling)，就能节约大量钢材，缩短搬家安装时间，便于组织管理，有利于油气开发与集输。大型的海上平台还能经受强劲风浪的袭击。

我国开始钻定向斜井是在新中国成立后的 1956 年。二十多年来，定向钻井的数量不断增加，技术水平不断提高。无论是定向测斜的工具和仪器，或是定向钻井工艺技术，都取得了较大的进步。我国海域辽阔，海底油气资源十分丰富。随着我国海洋钻井的发展，需要钻越来越多的定向斜井。因此决不能把定向钻井当成一种特殊的、暂时的、应急的钻井手段，而应当看到它是“多快好省”地发展石油工业的先进钻井工艺。

进行定向钻井，必须掌握定向井井身剖面的设计；实际井眼轴线的计算及绘制；定向井井斜角和方位角的控制和测量以及与定向井有关的其它钻井工艺问题。这些就是本章的中心内容。

第一节 定向井的基本概念

一、定向井的基本要素

在目前的科学技术条件下，人们所钻的任一口的井的井眼轴线都是一条空间曲线。如何表示这条曲线上任何一点的空间位置，这个问题对于直井并不迫切，而对于定向井却是非常重

要的。试看图 7—4，如果以井口为原点，东西(EW)、南北(SN)和垂线 H 为坐标轴，则图 7—4(a)中的井眼轴线 OE 就是该坐标系中的一条空间曲线。将 OE 投影到水平面 EON 上，可得水平投影图，如图 7—4(b)所示。设 A 点为井眼轴线上任意一点，正如前章介绍的那样， α_A 为 A 点井斜角； ϕ_A 为 A 点的方位角； S_A 是 A 点的水平位移， S_E 是井底 E 点的水平位移，也叫闭合距；闭合距的方位角叫闭合方位角 ϕ_s ； L_A 是从井口到 A 点的实际长度称为 A 点的井深； L_A 在 H 轴的投影 H_A 叫做 A 点的垂深，也就是 A 点的 H 座标值；同样 A 点在 EW 轴和 SN 轴的投影，可得 A 点的 E 座标值和 N 座标值。在以上介绍的许多概念中，井斜角 α ，方位角 ϕ ，井深 L ，叫做定向井的基本要素(简称定向要素)。掌握这些要素，就是掌握了定向井井眼轴线的球座标，从而可将井眼轴线足够精确地描述出来。但是目前我们还不能掌握井眼轴线上每一点的基本要素。一则我们所说的点实际上是测量仪器所占的某一微小井段；再则一般情况下，测斜工作并非沿井眼轴线连续进行，而是一般取 10 米，甚至更大一点的距离作一测点。根据这些测点作出的井眼轴线自然就不是精确的了。

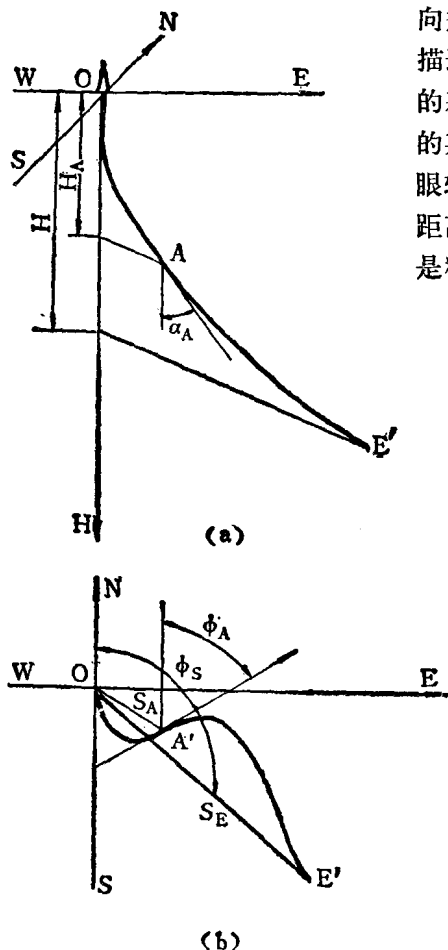


图 7—4 定向井的基本要素

二、井眼曲率(Hole curvature)的简单表示法

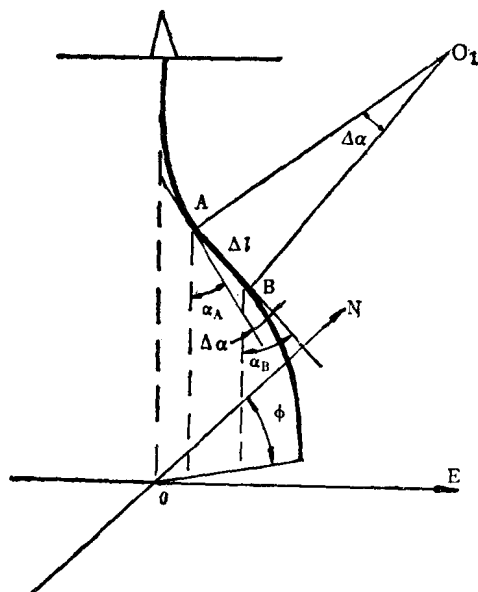


图 7—5 方位角不变的井眼轴线

我们先来研究一种最简单的情况——方位角不变的定向井。如图 7—5 所示。显然这时的井眼轴线完全落在与 SN 轴成 ϕ 角的垂直平面内，成为一条平面曲线。A、B 分别为井眼轴线上相邻两测点，则 $\widehat{AB}$ 井段的长度 Δl 为 A、B 两点的井深差， $\widehat{AB}$ 井段的井斜增量 $\Delta\alpha$ 为 α_B 和 α_A 之差。假定 $\widehat{AB}$ 井段有均匀曲率 K，根据数学上曲率的定义，则有

$$K = \frac{\Delta\alpha}{\Delta l} = \frac{\alpha_B - \alpha_A}{L_B - L_A} \quad (7-1)$$

然而，实际井眼各点的方位角不可能保持常数，所以井眼轴线也不可能只在一个平面

上。不过为了计算和设计的方便，我们总是把空间的井眼轴线用一平面上的曲线来表示。通常采用两个平面，即垂直平面和水平平面。在垂直平面上，我们这样来表示井眼轴线，第一、平面上每一点的井深与空间井眼对应点的井深一致；第二、平面上每一点的井斜角与空间井眼对应点的井斜角一致。

把实际测斜资料绘制成垂直平面图，如图 7—6 (a) 所示，虽然该图不能看出井眼在空间的实际位置，但它对于查看井深和井眼各点的井斜角是十分方便的。

设垂直平面上， $\widehat{AB}$ 段的曲率为 K_H ，曲率半径为 R ，则

$$K_H = \frac{\Delta\alpha}{\Delta l} = \frac{1}{R} \quad (7-2)$$

上式的物理意义就是钻过单位井深井斜角的变化，即井斜角变化率 (Rate of deviation change) K_a 的概念。所以

$$K_a = K_H$$

而对于方位角不变的井眼，则

$$K_a = K_H = K$$

因此，从垂直平面图上，可以直接求出井斜变化率 K_a 。

在水平平面上，作空间井眼轴线的水平投影，如图 7—6 (b) 所示。

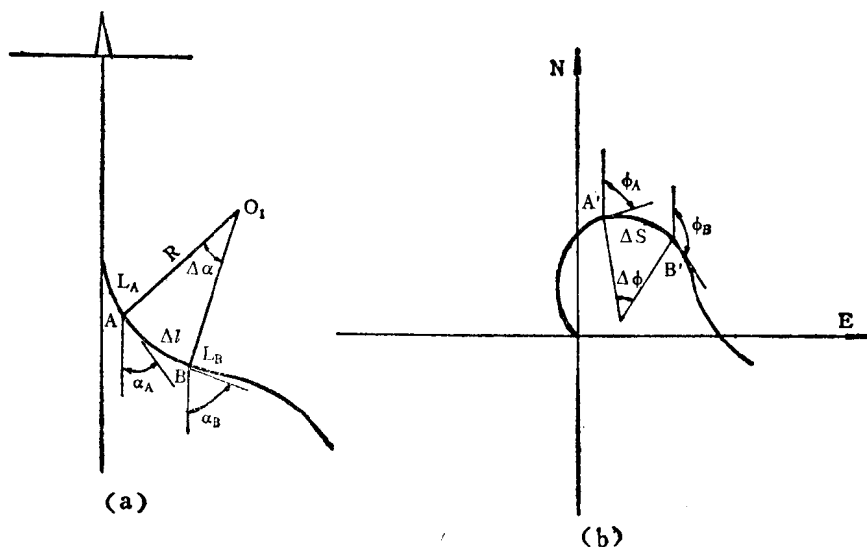


图 7—6 垂直平面和水平平面的井眼曲率

显然这也是一条平面曲线。图中的 A' 、 B' 是空间井眼上 A 、 B 的水平投影。在一般情况下， $\widehat{A'B'} = \Delta S \neq \widehat{AB}$ 。只有当 $\alpha = 90^\circ$ 时，水平投影才能反映井眼的实长。但是水平投影图可以反映井眼各点的方位角及其变化。例如， A 点的方位角 ϕ_A ， B 点的方位角 ϕ_B ，从 A 到 B ，方位角从 ϕ_A 变化到 ϕ_B ，则方位角变化 $\Delta\phi = \phi_B - \phi_A$ ，假定 $\widehat{A'B'}$ 有均匀的曲率 K_A ，且曲率半径为 r ，则水平投影的曲率 K_A 为

$$K_A = \frac{\Delta\phi}{\Delta S} = \frac{1}{r} \quad (7-3)$$

在一般情况下 $\Delta S \neq \Delta l$ ，所以井眼的方位角变化率 K_a 不等于水平投影的曲率 K_A ，因为

$$K_\phi = \frac{\Delta\phi}{\Delta l} \quad (7-4)$$

其意义是钻进单位井深的方位角变化。

三、井眼曲率

在阐明上述这些简单概念以后，就可以进一步分析空间井眼曲率的概念和求法。

试看图 7—7，设空间有一井眼轴线 L ， L 上有一点 A ，该点的定向要素为 H_A 、 E_A 、 N_A 、 α_A 、 S_A 。当井深增加到 B ，假定 $\widehat{AB}$ 比起整个井眼长度是很小的一段，其段长为 dl 。B 点的

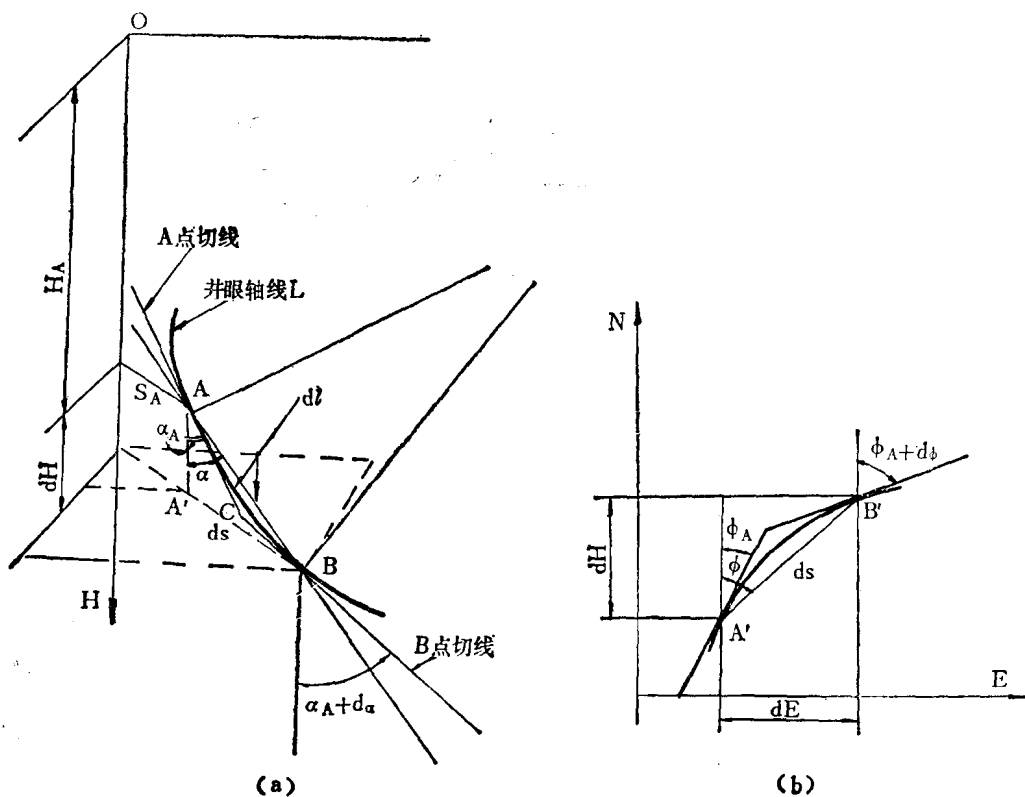


图 7—7 井眼曲率

定向要素为 $H_A + dH$ 、 $E_A + dE$ 、 $N_A + dN$ 、 $\alpha_A + d\alpha$ 、 $S_A + ds$ 。连结 A 、 B 两点 $\widehat{AB}$ 的水平投影为 $A'B$ 。我们近似地认为 $\widehat{AB} = \overline{AB} = dl$ ， α_A 、 $\alpha_A + d\alpha$ 均在 $AA'B$ 平面内，令 $\angle A'AB = \alpha$ ，则

$$\alpha = \alpha_A + \frac{d\alpha}{2}$$

$$\frac{dH}{dl} = \cos \alpha \quad (7-5)$$

$$\frac{ds}{dl} = \sin \alpha \quad (7-6)$$

在水平投影上， A 点的投影 A' ，其方位角为 ϕ_A ； B 点投影 B' ，其方位角为 $\phi_A + d\phi$ 。连接 A' 、 B' ，近似认为 $\widehat{A'B'} = \overline{A'B'} = ds$ ，则有

$$\phi = \phi_A + \frac{d\phi}{2}$$

$$\frac{dE}{ds} = \sin \phi \quad (7-7)$$

$$\frac{dN}{ds} = \cos \phi \quad (7-8)$$

由(7-6)式得

$$ds = dl \cdot \sin \alpha$$

将 ds 代入(7-7)(7-8), 则得

$$\frac{dN}{dl} = \sin \alpha \sin \phi \quad (7-9)$$

$$\frac{dE}{dl} = \sin \alpha \cdot \cos \phi \quad (7-10)$$

式(7-5)、(7-9)、(7-10)就是一条空间曲线(井眼轴线)上任一点的矢径分量, 以弧长(井眼长度)为参数的导数形式。

在微分几何中, 一条空间曲线的曲率 K 有公式

$$K = \sqrt{\left(\frac{d^2H}{dl^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2N}{dl^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2E}{dl^2}\right)^2} \quad (7-11)$$

因此只需将式(7-5)、(7-9)、(7-10)取二阶导数, 并代入(7-11)式, 化简整理后, 即可得

$$K = \sqrt{K_a^2 + K_\phi^2 \sin^2 \alpha} \quad (7-12)$$

因为方位角变化率 K_ϕ 与井眼在水平面上投影的曲率 K_A 之间有关系 $K_\phi = K_A \sin \alpha$, 所以又有

$$K = \sqrt{K_H^2 + K_A^2 \sin^4 \alpha} \quad (7-13)$$

从井眼曲率 K 的两个公式可以明显地看出井斜变化率 K_a 和方位变化率 K_ϕ 都对曲率 K 有影响, 即使 $K_a = 0$ (井斜角不变), 只要方位角发生变化, 井眼仍然具有曲率。

四、“狗腿”(Dog-leg)严重度的计算

“狗腿”形象地说明了井眼弯曲的情况。“狗腿”将给钻井和采油带来不利的影响。但是甚至最严重的“狗腿”也不能立即产生影响, 因为“狗腿”出现的当时, 钻柱处于受压状态, 很容易随井眼弯曲情况而变形。只是在钻进“狗腿”以下更深井段的时候, 它的不利影响才逐渐表现出来。

那么, 多么严重的“狗腿”才能给钻井带来困难? 这就是“狗腿”严重度的问题。国外规定, 井眼曲率以所钻井眼每 100 英尺的角度变化来表示(度/100 英尺)。

例如以最简单的方位角不变的情况为例, 两相邻测点距离为 50 英尺, 两测点的井斜角为 4° 和 6° , 则两点间平均“狗腿”严重度为

$$(6^\circ - 4^\circ) / 50 \text{ 英尺} = 4^\circ / 100 \text{ 英尺}$$

在定向钻井中, 一般不允许超过 $5^\circ / 100$ 英尺。但是允许“狗腿”严重度不是一个定数, 它是随井深、井眼尺寸、钻杆、套管、油管、抽油杆等的不同而变化的, 各油田必须根据实际资料统计分析而定。

为了迅速确定某一井段“狗腿”严重度, 需要对空间井眼曲率作一分析。

图 7-8 中, L 为空间井眼轴线, A 和 B 为 L 上两相邻测点, 两测点间的距离为 Δl , 井斜角为 α_A 和 α_B , 方位角为 ϕ_A , ϕ_B 。

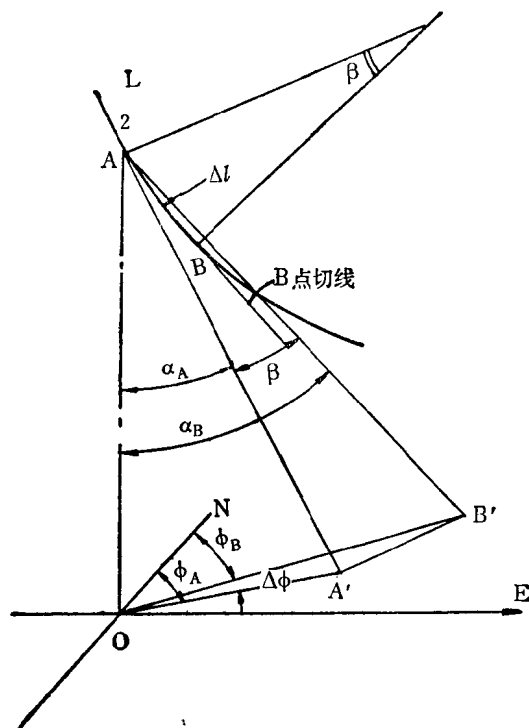


图 7—8 井眼轴线曲率

为了便于比较,我们将B点的切线移至A点,并且延长此线使其交于水平面NO'E的B'。 $\angle B'AA'$ 就是空间井眼轴线从A到B的角度变化。它包含着井斜角和方位角的变化,因此称为全角变化,以 β 表示。

假定AB井段有均匀曲率 K_{AB} ,则

$$K_{AB} = \frac{\beta}{\Delta l} \quad (7-14)$$

为了确定 β ,将A点本身的切线延长与水平面NO'E交于A'。A点的水平投影为O'。这样 $\angle O'AA' = \alpha_A$, $\angle B'AO' = \alpha_B$, $\angle NO'B' = \phi_B$, $\angle NO'A' = \phi_A$, $\Delta\phi = \phi_B - \phi_A$,根据空间几何关系,不难证明

$$\cos \beta = \cos \alpha_A \cos \alpha_B + \sin \alpha_A \sin \alpha_B \cdot \cos \Delta\phi \quad (7-15)$$

公式(7-15)与(7-12)(7-13)有相同的意义。

但是公式(7-15)的应用受到一些限制,因为当 β 很小时, $\cos \beta$ 近似于1,不容易计算 β 值,为此我们作如下变化。

通常相邻两测点的井斜角 α_A 和 α_B 很接近,可用平均井斜角 $\alpha_v = \frac{\alpha_A + \alpha_B}{2}$ 来代替 α_A 和 α_B ,并作一些三角恒等变换,于是公式7-15化为

$$\beta = 2 \arcsin \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta\alpha}{2} \right) + \sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \sin^2 \alpha_v} \quad (7-16)$$

在一般情况下,如果两测点的井斜角比值不大于2,公式(7-16)是足够精确的。如果井斜角比值大于2,则要用几何平均井眼斜度,即 $\alpha_{AB} = \sqrt{\alpha_A \cdot \alpha_B}$,结果将比用算术平均井眼斜

度精确。

将公式(7-16)所确定的 β 值代入(7-14)很容易求出井眼曲率 K_{AB} ，从而确定100英尺内的全角变化值(即“狗腿”严重度)。

A. 鲁宾斯基(A. Lubinski)根据公式(7-16)绘成图7-9，应用图7-9能够迅速查出“狗腿”严重度。

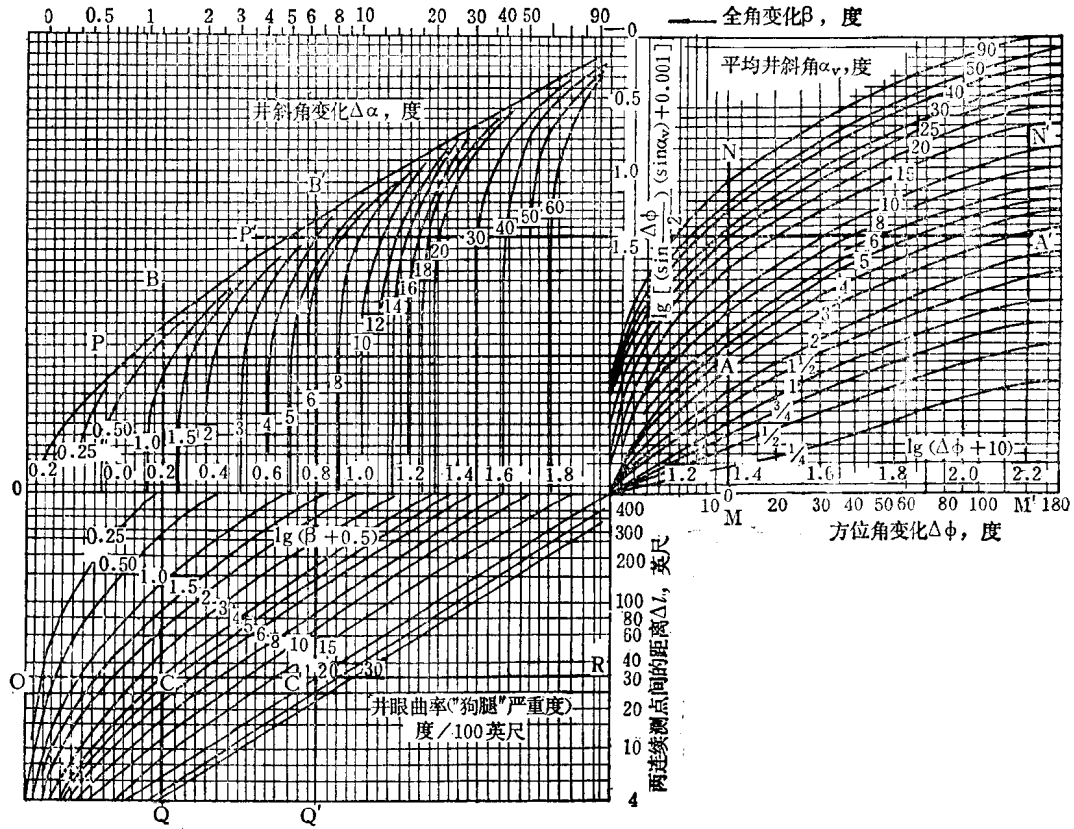


图 7-9 确定井眼曲率(“狗腿”严重度)度/100 英尺

例 1 设两测点的数据如下，求“狗腿”严重度。

	第 一 测 点	第 二 测 点
井深, 英尺	3666	3696
井斜角	3°30'	4°30'
方位角	N11° E	N23° E

解

(1) 方位角变化 $\Delta\phi = 23^\circ - 11^\circ = 12^\circ$

(2) 平均井斜角 $\alpha_v = \frac{(3\frac{1}{2}^\circ + 4\frac{1}{2}^\circ)}{2} = 4^\circ$

(3) 井斜变化 $\Delta\alpha = 4\frac{1}{2}^\circ - 3\frac{1}{2}^\circ = 1^\circ$

(4) 井段长度 $\Delta l = 3696 - 3666 = 30$ 英尺

从图 7—9 先找出方位角变化 $\Delta\phi=12^\circ$ ，延长直线 MN 与平均井斜角 $\alpha=4^\circ$ 的曲线交于 A，再向左与井斜变化角 $\Delta\alpha=1^\circ$ 的曲线交于 B，延长 BQ，与 $\Delta l=30$ 英尺水平线 R 交于 C，则可读出两测点间的“狗腿”严重度为 $4^\circ 15'/100$ 英尺。

上例井斜变化率为 $1^\circ/30$ 英尺，即 $3.3/100$ 英尺。它与“狗腿”严重度相差不大。可见方位角变化较小时，方位角变化对“狗腿”严重度影响不大。

例 2 两测点数据如下，求“狗腿”严重度。

	第 一 测 点	第 二 测 点
井深, 英尺	3666	3696
井斜角	3°	3°
方位角	正 N	S 40° E

解

(1) $\Delta\phi=140^\circ$

(2) $\alpha=3^\circ$

(3) $\Delta\alpha=0$

(4) $\Delta l=30$ 英尺

同样方法查出 ($M' \rightarrow A' \rightarrow B' \rightarrow G'$) 平均井眼曲率 (“狗腿”严重度) 为 $19.5^\circ/100$ 英尺。

可见方位角变化很大时，尽管井斜变化率为零，井眼曲率 (“狗腿”严重度) 也会很大。这是定向井必须考虑的问题。

第二节 定向井井身剖面设计

一、定向井井身剖面设计原则

合理的井身剖面设计是定向钻井成功的首要条件。我们必须在保证实现定向井的目的的前提下，深入调查分析本地区的现场资料，尽可能利用地层自然造斜规律，尽可能为钻井以及采油，修井创造有利条件，精心设计，精心施工，“多、快、好、省”地钻成定向井。

首先要保证实现定向钻井的目的。这是定向井设计的主要依据和首要原则。例如，对于裂缝性油层或者厚度小倾角也很小的油层，为了钻穿更多的缝洞，增大油层的裸露面积，降低油气流动阻力，扩大勘探效果，增加产量，往往设计成水平井或多底井。

又例如在海上固定平台进行丛式钻井，每一口定向井必须按照油田开发井网布置的要求去设计。

为了灭火，定向井要准确钻达“靶心”，即方位角和井斜角都要严格控制。而为了避开“落鱼”，则不必要求过严，只要能斜出一定水平距离即可。

其次，要尽可能利用地层自然造斜规律。不同的地层，自然造斜规律也不同。我们要深入调查分析该地区各地层的倾角、走向、岩石硬度、岩性组织和构造，总结实际钻井资料，找出自然造斜规律。从而尽量利用这种规律，减少人工造斜。

再次，应有利于采油和修井。从这个要求出发，最好是钻直井。斜井不利于下封隔器等各种井下器具；斜井会增加抽油杆和油管的磨损，使深井泵偏磨；斜井还会对修井工作带来

很多困难,使修井质量难以保证。因此设计定向井时,应尽可能使进入油层的井段保持垂直,或者井斜角较小。

最后,应有利于快速、优质、安全钻进。

在这方面需要考虑以下几个问题:

(1) 在满足以上各条件的前提下,应力求使设计井身最短。为了达到某一钻井目的,可能有许多井身剖面可供选择,这里首先要考虑设计井身最短的问题。设计井身最短是快速钻进降低成本的有利条件。

(2) 在满足定向井设计要求的前提下,尽可能保持较长的直井段,尤其对于深井应如此。因为这样有利于组织快速钻进。

(3) 造斜井段应选在比较稳定的地层,尽可能避免在易坍塌、易膨胀、易漏失、有高压盐水以及其它复杂地层造斜。

(4) 斜井段应保持曲率均匀,避免急弯。要校核“狗腿”严重度,不能超过规定的数值。否则会产生键槽,增加钻具与井壁的摩擦,造成起下钻阻卡等复杂情况,也给测井完井带来困难。

在使用井下动力钻具进行定向钻井时,井身曲率还要保证该钻具顺利通过^[19],因为涡轮、“迪那”等钻具的刚度较大,其外径与井眼之间间隙甚小,如井身曲率过大,该钻具将不能顺利起下。该钻具顺利起下的最小曲率半径 R_T 可由下式确定

$$R_T = \frac{0.125 L_T^2}{0.74 \Delta d - f} \quad (7-17)$$

式中 L_T ——涡轮、“迪那”等钻具的长度;

$\Delta d = (d_b - d_T)$;

d_b ——钻头直径;

d_T ——涡轮、“迪那”等钻具的直径;

f ——间隙值,软地层 $f=0$;硬地层 $f=3\sim 6$ 毫米。

设计时井眼曲率 K 必需满足下式

$$K < \frac{1}{R_T}$$

此外还要考虑井眼曲率对套管的影响。套管是弹性体,它可以允许一定的弯曲变形。但是,变形太大,就会妨碍套管的工作,甚至引起破坏。套管允许的最大曲率 K_c 可以根据材料力学原理求出

$$K_c = K_1 K_2 \frac{E d_c}{2 \sigma_s} \quad (7-18)$$

式中 E ——钢材弹性模量;

σ_s ——套管钢材屈服极限;

d_c ——套管直径;

K_1 ——安全系数 $1.2\sim 1.25$;

K_2 ——丝口应力集中系数 $1.7\sim 2.5$ 。

设计时应使 $K < K_c$ 。

上述原则并不是彼此孤立的,它们之间既存在着紧密的内在联系,而又存在着某些矛盾。我们必须抓住主要矛盾,全面考虑,使定向井设计达到尽量完善的地步。

二、井身剖面类型的选择^[6]

在进行定向井设计的时候,首先应根据井身剖面设计的原则确定一种井身剖面。井身剖面的类型很多。选择合适的井身剖面也不是件简单的事。它必须考虑到地层条件、套管程序、目的层的位置以及钻井技术水平等因素。根据目前国内外的资料和经验,最常用的井身剖面有三种类型。如图 7—10 所示。

类型 I,如图 7—10(a)所示。这种剖面造斜深度较浅,通常在表层套管内即达到所需的井眼倾斜角,以后一直稳斜钻进至目的层位。该剖面最常用于不下中间套管和单一油层的中深井,也可用于要求水平位移很大的较深的井。该剖面可防止键槽出现。为了保护套管和钻具,可采用橡皮护箍防止磨损。

类型 II,如图 7—10(b)所示。这种剖面造斜井深也比较浅。造斜完成后下表层套管,然后稳斜钻进。在达到预定的水平位移后降斜钻进,直到井眼垂直,然后下中间套管。最后使井眼垂直进入油层。该剖面适用于地层情况复杂需要下中间套管,而且油层较多的深井。采用这种剖面,井距易于保持均匀,便于地质解释工作。造斜井段处在较软的上部地层,既便于造斜,又可减少起下钻工作。

类型 III,如图 7—10(c)所示。这种剖面具有大段的垂直井眼,便于组织快速钻井。该剖面适于地层倾角较大,闭合距不太大的多油层深井。通常不下中间套管。

上述几种剖面类型,并不是一成不变的。在生产实践中,常常根据实际情况灵活应用,设计出许多种剖面。

三、定向井井身剖面的设计方法

定向井井身剖面的设计方法有两种:一种是通过简单计算查表绘出井身轴线的垂直平面图和水平投影图,叫做绘图法;另一种是根据公式计算绘图所需的数据,然后根据这些数据绘图叫做计算法。其实这二种方法实质是一样的。目前我们常用前一方法设计,后一方法检验,避免设计中的差错。

过去曾普遍要求在指定的地质剖面上作井身轴线的垂直平面图。这种图除了一些特殊用途外,作用不大。现在均直接在通过井口和目的层位的垂直平面内作图。

其具体设计方法如下。

(1) 掌握原始资料 主要是该地区的地质剖面,地表对井位的限制条件,目的层位的垂直井深和总水平位移(闭合距 S_E),自然造斜规律,工具造斜能力,钻井技术水平以及故障提示等等。

(2) 根据井身剖面确定原则,选定一个井身剖面类型。

(3) 根据原始资料,选定造斜点的位置,并确定造斜率和降斜率的大小。

(4) 确定最大井斜角。

(5) 计算剖面上各井段的井斜角 α ,方位角 ϕ ,垂直井深 H ,水平位移 S 。

(6) 核算井眼曲率,使其满足对它的各种限制条件,并作出井身的控制圆柱(Control

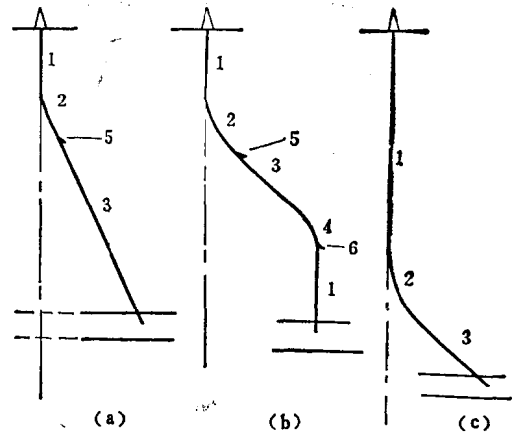


图 7—10 井身剖面类型

1—垂直井段; 2—增斜井段; 3—稳斜井段; 4—减斜井段; 5—表层套管鞋; 6—中间套管鞋

Cylinder), 也就是误差范围。

现在我们举例说明这种设计方法。

例1 某油区设计钻一口定向井, 已知全井垂直井深 H , 闭合距 S_E , 设计方位角 ϕ_i , 进入油层井段没有特别要求。

设计步骤:

1. 确定井身剖面类型

由于进入油层井段没有特殊要求, 所以可采用最简单的剖面——垂直井段, 造斜井段和斜直井段组成。

2. 选择造斜点

即确定垂直井段的长度 H_v 。 H_v 的长度与 H 、 S_E 以及地层、技术水平各个因素有关。一般来说, 浅井、中深井 S_E 较大, 则 H_v 多选在表层, 相当于图 7—10 (a)。而深井、超深井、 S_E 不太大, 则 H_v 选取较长, 如图 7—10 (c)。

3. 确定造斜率

根据该地区造斜资料, 其中包括自然造斜率和工具造斜能力。确定造斜率为 $\Delta\alpha_{10}$ (单位: 弧度/10 米), 曲率半径为 $R = \frac{1}{\Delta\alpha_{10}}$ 。

4. 计算最大井斜角 α_{max}

试看图 7—11, 在 $\triangle bb'E$ 中有

$$\frac{S_w}{\sin\alpha_{max}} = \frac{H_v}{\cos\alpha_{max}}$$

如令 $H_x = H - H_v$, 代入上式, 整理后可得一个以 $\cos\alpha_{max}$ 为未知数的一元二次方程。解此方程, 则得

$$\alpha_{max} = 2 \arctg \frac{H_x - \sqrt{H_x^2 - (2R - S_E)S_E}}{2R - S_E} \quad (7-19)$$

5. 作图

如图 7—11, 具体作法是

- (1) 确定井口 O , 过 O 作铅垂线 Od , 使 $Oa = H_v$, $Od = H$;
- (2) 自 a 点作水平线 aO_1 , 使 $aO_1 = R$, 并以 O_1 为圆心, R 为半径画弧;
- (3) 过 d 作水平线, 使 $dE = S_E$;
- (4) 自 E 点向圆弧作切线, 切点为 b ;
- (5) 则 $\widehat{Oa}bE$ 即为设计的垂直剖面图;
- (6) 在水平面上, 定出井口原点 O' 和正北方向 N 。使 $\angle NO'E' = \phi_i$, 并使 $O'E' = S_E$, 此即井身轴线的水平投影图。

(7) 作出井身的控制圆柱 (图中虚线)。一般取控制圆柱直径 $D = 25 \sim 30$ 米。

6. 校核

- (1) 根据公式 (7—17) 和 (7—18) 算出 R_T 和 K_C , 若 $R > R_T$, $K < K_C$, 则合格。
- (2) 计算 α_{max} 和图 7—11 的 α_{max} 是否一致, 如相差太大, 则说明计算或作图有错误, 必须认真检查。

7. 各井段的计算

将各井段有关数据计算结果列于表 7—1 中。

表 7-1 例 1 的各井段计算结果

井 段	段长 Δl , 米	井斜角, 度	方位角, 度	垂直井深增量 ΔH , 米	垂直井深 H , 米	水平位移增量 ΔS , 米	水平位移 S , 米
0— L_a	H_v	0		H_v	H	0	0
L_a — L_b	$\frac{R \alpha_{\max}}{57.3}$	$0-\alpha_{\max}$	ϕ_s	$H_b=R \sin \alpha_{\max}$	$H+H_b$	$S_b=R(1-\cos \alpha_{\max})$	S_b
L_b — L_E	$\frac{H-H_v-H_b}{\cos \alpha_{\max}}$	$\alpha_{\max}$	ϕ_s	$H_w=H-(H_v+H_b)$	H	$S_w=H_w \operatorname{tg} \alpha_{\max}$	S_b+S_w

例 2 已知所设计的定向井全井垂直井深 H , 闭合距 S_E , 设计方位角 ϕ_s , 井眼进入油层要求保持垂直, 井段长不少于 H_E 。试设计该定向井。

设计步骤:

1. 初步确定井身剖面类型

根据地质开发上的要求, 油层井段需有一段 H_E 保持垂直, 所以常选图 7-10 (b) 这种“S”形井眼, 即由垂直井段、增斜井段、稳斜井段、降斜井段和垂直井段组成。

2. 垂直井段长度 H_v 的选择

由这种剖面组成的定向井一般 H_v 均选在表层, 否则很难形成“S”形井眼轴线。

3. 选定增斜率和降斜率

根据原始资料, 增斜率选为 $\Delta \alpha_1$ (度/10 米), 降斜率选为 $\Delta \alpha_2$, 则增斜井段曲率半径 $R_1 = \frac{1}{\Delta \alpha_1}$, 降斜井段曲率半径 $R_2 = \frac{1}{\Delta \alpha_2}$ 。

4. 计算最大井斜角

公式推导与例 1 基本相同, 得下式

$$\alpha_{\max} = 2 \arctg \frac{H_x - \sqrt{H_x^2 - (2R_0 - S_E)S_E}}{2R_0 - S_E} \quad (7-20)$$

式中 $R_0 = R_1 + R_2$

$$H_x = H - H_v - H_E$$

5. 作图

如图 7-12 所示:

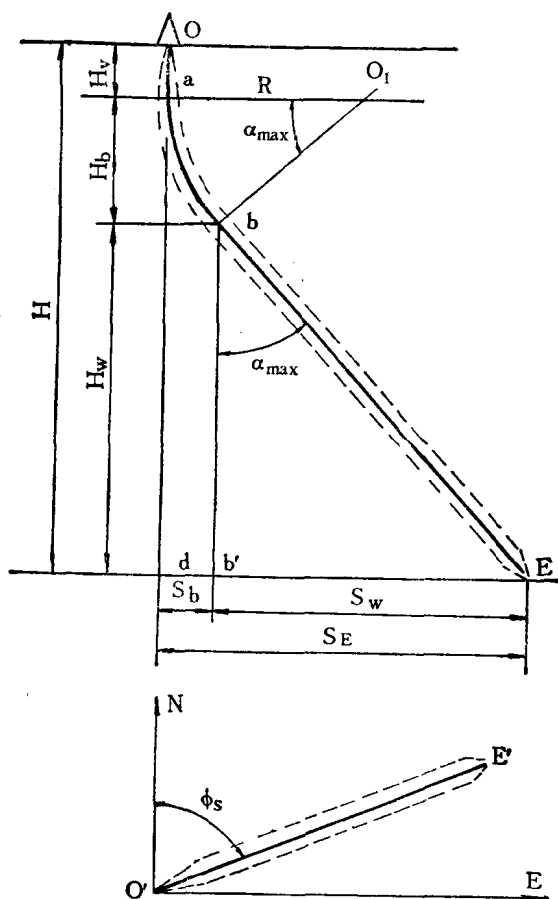


图 7-11 例 1 作图