



钻井工程师进修丛书 ● 钻井工程师进修丛书

韩志勇 编著

定向井设计与计算

石油工业出版社

41350

钻井工程师进修丛书

定向井设计与计算

韩志勇 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从定向井的基本概念讲起,详细地介绍了测斜计算和绘图的各种主要方法;推导并给出了各种二维定向井井身剖面的解析公式和设计方法;给出了三维定向井井身设计的思路、方法和整套计算公式;对定向井方位控制的有关概念给出了清晰的定义,并提出了进行方位控制的实用计算方法和计算公式。

本书可作为大专院校石油钻井专业学生的选修课教材和石油定向钻井工程师的培训教材,也可供从事石油和地质钻探工程技术人员参考。

钻井工程师进修丛书 定向井设计与计算

韩志男 编著

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京妙峰山印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行



787×1092毫米 16开本 10印张 242千字 印1—2,500册

1989年12月北京第1版 1989年12月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0340-6/TE·330

定价: 2.50元

出版者的话

为了能使钻井工程技术人员系统地学习和掌握钻井基础理论知识和国内外先进钻井技术，提高工作水平，适应我国石油工业发展的需要，我们将陆续出版钻井工程师进修丛书。本书是该丛书的一本，可作为钻井工程师进修用书，也可作为大专院校有关师生和钻井技术人员的参考书。

编辑出版钻井工程师进修丛书，对于我们来说还缺乏经验，恳请读者批评指正。

前 言

由于教学的需要，作者曾于70年代初收集了一些定向钻井方面的资料，对一些公式进行了推导、证明和校正，并且研究了定向井剖面设计的解析方法。1975年，编写了一本名为《定向斜井》的教材，后被纳入《钻井专题教材》（华东石油学院，1976年3月重印）。1983年初，作者应约写一本适合于定向钻井工程技术人员使用的书，并于当年8月写成初稿，定名为《定向井的设计与计算》。

初稿油印出来以后，石油工业部勘探开发技术培训中心于1984和1985两年举办过四期定向井工程师培训班，皆以此初稿作为教材。通过在培训班讲课，与现场工程技术人员共同研究和讨论，收到了教学相长的效果。在此基础上，1986年对初稿进行了修改，仍为油印本，又在两期定向井培训班上使用。在此期间，还以油印本的内容，分别在胜利油田和中原油田举办过定向井培训班。另外，初稿的部分内容还被作为石油学院钻井专业学生专业课的教学内容和被编入高等学校教学用书《钻井工艺原理》中。1987年，对初稿又作了进一步修改，增加了少量新内容，成为本书。

本书的内容，大体上来源于三个方面：

1. 国内外已发表的有关文章的汇编，如各种测斜计算方法等。
2. 在美国Eastman Whipstock Inc.学习的有关内容，如：方位扭转角的计算，查图法设计二维定向井，定向钻井计算尺（Ouija Board）的使用等。
3. 近几年的有关研究成果，例如：二维定向井各种剖面的解析法计算公式，三维定向井的设计方法和计算公式（与宁秀旭同志合作），造斜工具装置角的计算公式，动力钻具反扭角的资料反算法等等。

在本书的编写过程中，来自各油田的工程技术人员给予了很大的支持和启发，在教学中与他们共同讨论，确实受益匪浅。在此向他们表示衷心的感谢。在作者对本书的许多问题的研究过程中和在教学实践中，受到了华东石油学院刘希圣教授以及宁秀旭、聂翠平等同志的大力支持和帮助，在此特表谢意。

作 者 1987年8月

目 录

| | |
|-----------------------|-----|
| 绪论..... | 1 |
| 第一章 定向井井眼轨迹的测斜计算..... | 2 |
| 第一节 定向井的基本概念..... | 2 |
| 第二节 测斜计算的主要方法介绍..... | 14 |
| 第三节 实钻井眼轴线形状的绘图..... | 27 |
| 第四节 附录一..... | 35 |
| 第二章 两维定向井的井身剖面设计..... | 40 |
| 第一节 概述..... | 40 |
| 第二节 常规两维定向井的剖面设计..... | 44 |
| 第三节 待钻井眼的井身剖面设计..... | 58 |
| 第四节 多种增降率的井身剖面设计..... | 63 |
| 第五节 缓降稳剖面的设计..... | 66 |
| 第六节 双增稳剖面的设计..... | 71 |
| 第七节 悬链剖面的设计..... | 74 |
| 第八节 附录二..... | 80 |
| 第三章 定向井的方位控制计算..... | 98 |
| 第一节 方位扭转角的计算..... | 98 |
| 第二节 造斜工具装置角的计算..... | 104 |
| 第三节 动力钻具反扭角的计算..... | 125 |
| 第四节 附录三..... | 130 |
| 第四章 三维定向井的井身设计..... | 133 |
| 第一节 斜面法设计三维定向井..... | 134 |
| 第二节 柱面法设计三维定向井..... | 140 |
| 参考文献..... | 151 |

绪 论

定向井是指按照预先设计的井斜方位和井眼的轴线形状进行钻进的井，定向井是相对于直井而言的，而且是以设计的井眼轴线形状为根据。直井的井斜角为零度，没有井斜方位角。尽管实钻的直井都有一定的井斜角，有的井斜角甚至很大，但仍然属于直井。定向井又可分为二维定向井和三维定向井，也是以设计的井眼轴线形状为根据划分的。凡是井眼轴线形状只在某个铅垂平面上变化的定向井，称为二维定向井，它们的井斜角是变化的，而井斜方位角则是不变的。三维定向井则是既有井斜角的变化，又有井斜方位角的变化。实钻的两维定向井，其井眼轴线都是既有井斜角的变化，又有井斜方位角的变化，但它仍然属于二维定向井。

定向井在石油勘探与开发中得到了广泛的应用。在地面上难以建立或不允许建立井场和安装钻井设备进行钻井的地区，要勘探开发地下的石油，唯一的办法是从该地区附近打定向井。在海洋或湖泊等水域上勘探开发石油，最好是建立固定平台或从岸边打定向井和丛式定向井。当在钻达油气层所经过的地层中，有难以穿过的复杂地层时，用定向井可以绕过这些复杂地层。为了扩大勘探效果和增加油井产量，可以打多底井、水平井以及丛式水平井、水平径向井等。在发生断钻、卡钻以及井喷着火等恶性钻井事故的情况下，钻侧钻井、救援井是处理此类事故的有效方法。

我国的定向钻井始于1956年，在60年代，曾达到了相当高的水平，钻出了许多高难度的定向井，与当时世界先进水平的差距并不大。我国是世界上第二个钻成水平井的国家。但在60年代中期以后，由于众所周知的原因，我们与世界先进水平的差距拉大了。近二十年来，国外在定向钻井技术方面的最主要的进展是随钻测斜仪器的出现和发展，另外，螺杆钻具、金刚石钻头以及可控弯接头等在定向钻井中的应用，都显著地提高了定向钻井的技术水平。目前，我国定向钻井技术的主要差距也在于仪器、工具和设备方面。

在定向井的设计与计算方面，近十余年也有很大的发展，其中包括我国学者的贡献。值得提出的有：郑基英教授在60年代初期曾推导了弯接头装置角的部分计算公式，在70年代提出了井身计算的圆柱螺线法和校正平均角法，在我国的定向井理论研究方面作了开创性的工作；白家祉教授把纵横弯曲连续梁理论应用于井底钻具组合的力学分析，在当今世界上众多研究井底钻具组合的方法中独树一帜；我在定向井剖面设计方面，推导了一系列解析公式，又与宁秀旭一起提出了三维定向井的设计方法和计算公式，为使用计算机进行定向井井身设计创造了条件；1986年，刘福齐提出“弦步法”进行井眼轨迹计算，也有其独到之处。从目前的情况来看，我国在定向井设计与计算方面并不落后，只是在井底钻具组合的设计与计算方面与国外相比还有一些差距。

在定向钻井的设计与计算方面内容很多，大体上可有三类：

- (1) 定向井施工前进行的井眼轨道设计，包括二维定向井设计和三维定向井设计。
- (2) 定向井施工过程中不断进行的井斜控制和井斜方位角的计算。
- (3) 定向井井眼钻出之后进行的井眼轨迹测斜计算。

本书的基本章节就是按照这三类内容划分的，只是三维定向井的设计较为复杂，另作一章。

第一章 定向井井眼轨迹的测斜计算

井眼轨迹的测斜计算是很有必要的。首先，根据测斜计算的结果，可以知道已钻井眼的形状。与原设计的井眼形状进行对比，可以知道已钻井眼是否符合设计要求，从而指导待钻井眼的施工，及时调整井斜角和井斜方位角，以便准确钻达目标点。其次，一口井井眼轨迹的形状及其坐标位置，本身就是一项重要的资料，对于继续钻进和以后的固井、完井、试油、采油、修井，以及油田开发过程中加密井、调整井的布置和钻进，都是必不可少的资料。

在介绍测斜计算方法之前，首先介绍有关定向井的一些基本概念。

第一节 定向井的基本概念

本节主要讲述各种井身参数的基本概念和它们之间的相互关系。这些基本概念对于以后的设计和计算是至关重要的。

一、井身基本参数

井身基本参数，也有人称之为井身基本要素。

实际钻出的定向井的井眼轴线都是一条空间曲线。为了了解这条空间曲线的形状，需要先进行测斜。目前的测斜方法还做不到连续测斜，实际上是一个点一个点地测。被测的点称为测点，测点的标志是该点所在的井深，相邻两测点间的井段长度，称为测段。

在每个测点上所取得的测斜数据有三项，即该点处的井深、井斜角和井斜方位角。

(1) 井深：指井口至测点间的井眼实长，也有人称之为斜深，国外称做测量井深 (Measure Depth)。井深通常是以钻柱长度或电缆长度来量测的。井深既是测点的标志，又是该测点处的井身参数之一。

实际上测斜仪器并不是一个点，它是有一段长度的。测点的井深是以测斜仪器中的测角装置 (Angle Unit) 所在的井深为准的。

井深常以字母 L 表示，单位为米。

(2) 井斜角：如果严格地为井斜角下个定义，它应该是：该测点处的井眼方向线与重力线之间的夹角称为该测点的井斜角。井眼方向线与重力线都是有向线段。

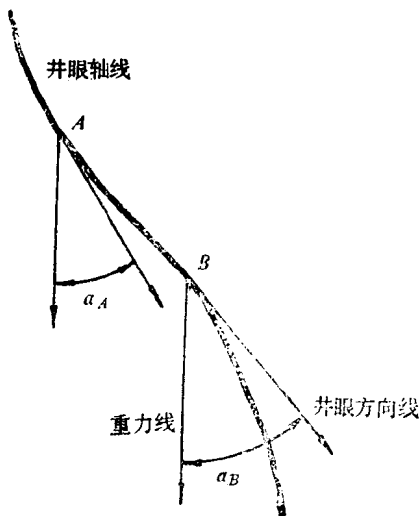


图 1-1 井斜角示意图

井斜角通常以希腊字母 α 表示，单位为度。如图 1-1 所示，A 点的井斜角为 α_A ，B 点的井斜角为 α_B 。

(3) 井斜方位角：是指以正北方位线为始边，顺时针旋转至井斜方位线所转过的角度。凡所讲到的方位线，都是在水平面上。正北方位线和井斜方位线都是有向线段。正北方位线是沿着该测点处的地理子午线向正北方向延伸的线段。井斜方位线是指该测点处的井眼方向线在水平面上的投影线。

井斜方位角通常以字母 ϕ 表示，单位为度。如图1-2所示，A、B等测点的井斜方位角分别为 ϕ_A 、 ϕ_B 。井斜方位角的值可以在 $0\sim 360^\circ$ 之间变化。

国外表示井斜方位角通常使用象限值，它是指井斜方位线与正北方位线或与正南方位线之间的夹角。象限值在 $0\sim 90^\circ$ 之间变化，并需要注明象限，如图1-3所示。

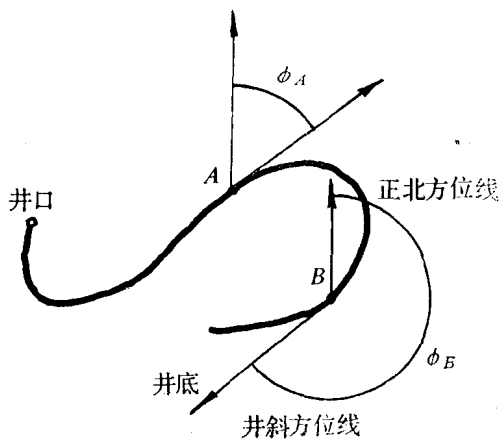


图 1-2 井斜方位角示意图

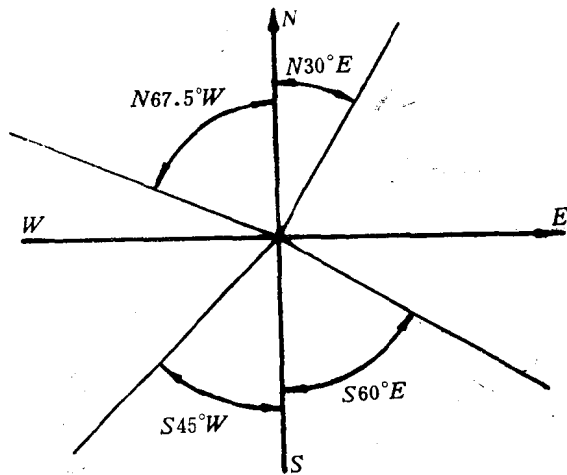


图 1-3 井斜方位角的象限值

目前广泛使用的磁力测斜仪器测得的井斜方位角是以地球磁北方位线为准的，称为磁方位角。磁北方位线与正北方位线并不重合，二者之间有个夹角，称为磁偏角。所以此类仪器测得的井斜方位角还需进行校正，换算成真方位角。磁偏角又有东磁偏角和西磁偏角之分。如图1-4所示，当磁北方位线在正北方位线以东时，称为东磁偏角；在正北方位线以西的，称为西磁偏角。进行井斜方位角校正时，可使用如下简单公式：

真方位角 = 磁方位角 + 东磁偏角

或 真方位角 = 磁方位角 - 西磁偏角

上述公式可以概括为“东加西减”四字口诀。即在校正井斜方位角时，碰到东磁偏角就加上，碰到西磁偏角就减去。

按照国外习惯，使用象限值，在进行井斜方位角校正时相当麻烦。必须记住东磁偏角和西磁偏角分别在各个象限里，是“加上”，还是“减去”，如图1-5所示，不可搞混。

表1-1所示是几个例子，读者可根据上述方法进行验算。

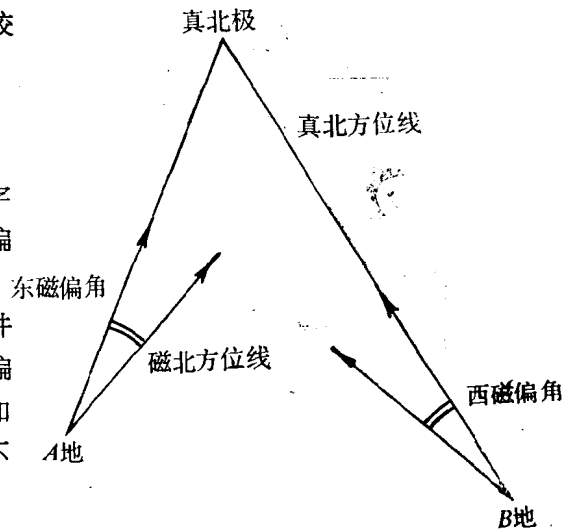


图 1-4 磁偏角示意图

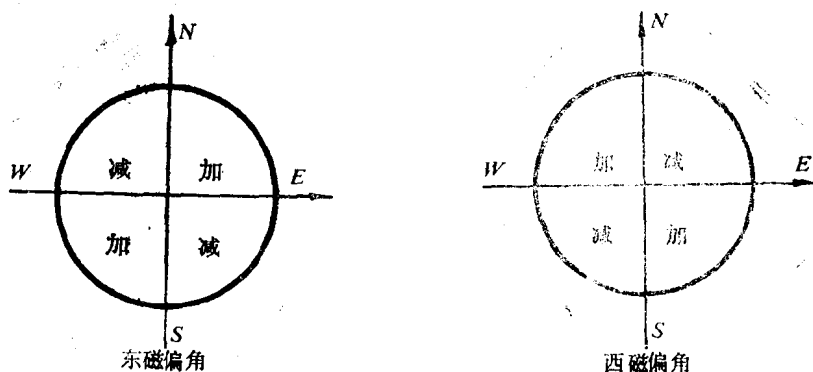


图 1-5 象限值的校正

表 1-1 井斜方位角的校正

| 测 量 值 | | 磁 偏 角 | 校 正 值 | |
|---------|--------|-------|-------|-------|
| 象 限 值 | 方 位 值 | | 象 限 值 | 方 位 值 |
| N30°E | 30° | 5°E | N35°E | 35° |
| S60°E | 120° | 5°E | S55°E | 125° |
| N67.5°W | 292.5° | 5.5°W | N73°W | 287° |

二、井斜变化率和井斜方位变化率

从全井段来看，井斜角和井斜方位角是在随着井深而不断变化的。既然在变化，就有变化快慢之分，变化率就是变化的快慢。

(1) 井斜变化率：是指井斜角随井深变化的程度，以 K_α 表示。严格地讲，井斜变化率是井斜角(α)对井深(L)的一阶导数，可写为

$$K_\alpha = \frac{d\alpha}{dL}$$

由于目前还做不到连续测斜，只能隔一定长度的井段，进行定点测斜，所以在实际工作中，是以增量代替微分，以相邻二测点间的井斜角变化值($\Delta\alpha$)与二测点间井段长度(ΔL)的比值来表示井斜变化率的。这可以表示为

$$K_\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\Delta L}$$

显然，这样求得的乃是该测段的平均井斜变化率。井斜变化率的单位通常为度每100米，例如 $3^\circ/100$ 米。

(2) 井斜方位变化率：是指井斜方位角随井深变化的程度，以 K_ϕ 表示。井斜方位变化率的严格定义应是：井斜方位角(ϕ)对于井深(L)的一阶导数，即 $K_\phi = \frac{d\phi}{dL}$ 。同样，由于无法连续测斜，在实际工作中也是以增量代替微分，即

$$K_\phi = \frac{\Delta\phi}{\Delta L}$$

显然，这也是测段内的平均井斜变化率。 K_ϕ 的单位通常也是度每100米。

三、井眼轴线形状的图示法

实际的井眼轴线形状是一条空间曲线。怎样把这条空间曲线画出来，让别人了解它的空间形状呢？目前常见的有三种图示法。

1. 三维坐标图示法

这种图示法相当于工程制图中的轴侧图。本来轴侧图会给人以明显的立体感，可以直接看出物体的空间形状。可是，对于我们的井眼轴线来说，轴侧图却不能给人以立体感。如图1-6所示，人们看了以后甚至想象不出它的空间形状。这是因为井眼轴线不同于机器的零部件。井眼轴线有两个特点：一是形状复杂，它在空间是随机变化的；二是结构简单，只有一条线，不象机器零部件那样有棱有面。这两个特点使得井眼轴线在三维坐标图中没有立体感。

如果在三维坐标图中增加一些辅助平面，则可以看出井眼轴线的空间形状，如图1-7所示。显然，要作许多辅助面是很麻烦的，而且，三维坐标图不能表示出井身参数的真实值，所以这种图示法通常是不用的，只在特殊需要时才用。

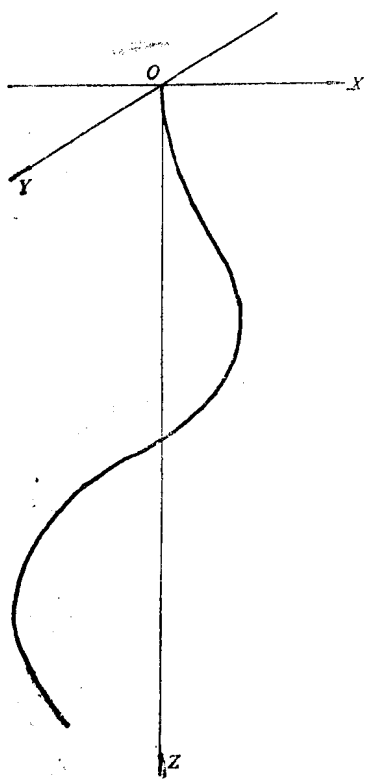


图 1-6 井眼轴线的三维坐标图示法

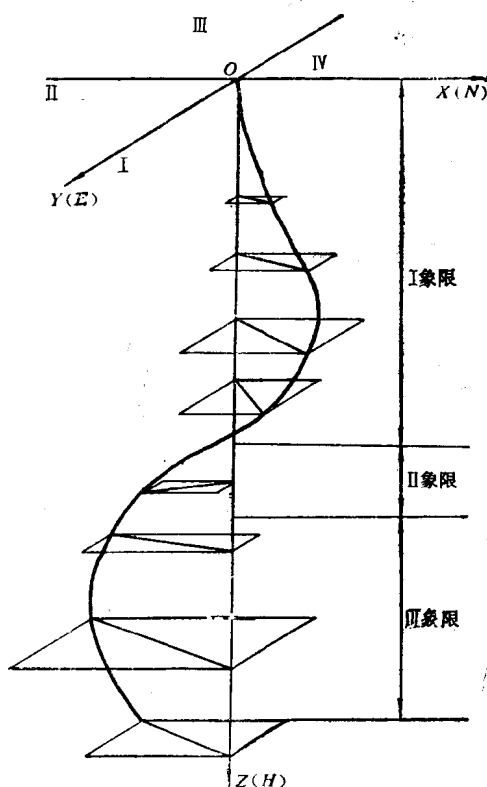


图 1-7 带辅助平面的三维坐标图示法

2. 投影图表示法

这种图示法相当于机械制图中的视图表示法，在国外使用广泛。这种图示法包括两张图，一张是水平投影图，一张是垂直投影图。水平投影图相当于俯视图。垂直投影图相当

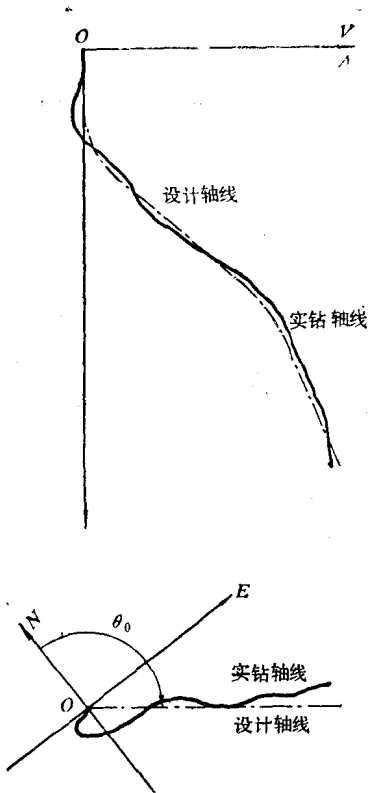


图 1-8 投影图表示法

一个显著特点，就是可以展平到平面上。当我们将这个柱面展平时，井眼轴线也被展到平面上，这就是井眼轴线的垂直剖面图。如图1-10所示，上图为垂直剖面图，下图为水平投影图。

柱面图表示法有以下几个优点：

(1) 不管井眼形状如何复杂，井眼轴线在空间如何变化，凭着这两张图，我们即可了解它的空间形状；想象将垂直剖面图按照水平投影图的形状进行弯曲，即可恢复井眼轴线在空间的柱面形状。

(2) 这两张图可以反映出井身参数的真实值。这是其它所有图示法难以做到的。例如，井深和井斜角的真实值可以在垂直剖面图上反映出来；井斜方位角可以在水平投影图中表示出来。以后我们还要讲到其它井身参数，多数都可以在这两张图中找到它们的真实值。它的这个优点具有重要意义。

(3) 这两张图作图容易。实际作图时，当然不是作垂线→得柱面→展平面。而是利用测斜资料算出每个测点的坐标位置，即可作图。甚至可以利用测斜资料不经过计算而直接作图。对于三维坐标图和投影图来说，算出测点的坐标位置以后还需进一步计算，才能画出图来。

正因为以上三个优点，柱面图表示法在定向井的设计（特别在三维定向井设计中）和施工中得到了广泛的应用。

于侧视图，其投影面选在原设计方位线所在的铅垂平面上。如图1-8所示，点划线为设计井眼轴线，实线为实钻井眼轴线。

这种投影图对于指导施工是很有好处的。从图上可以直接看出，是需要增斜还是需要降斜，是需要增方位还是需要减方位。而且，根据这两张图，可以想象出井眼轴线的空间形状。但这种图示法的垂直投影图不能反映出井身参数的真实值，这是它的缺点。

3. 柱面图表示法

这种方法曾在我国油田现场得到了广泛使用。它包括两张图，一张是水平投影图，一张是垂直剖面图。水平投影图相当于俯视图，与投影图表示法相同，所不同的是垂直剖面图不是在某个垂直平面上。

可以这样来理解垂直剖面图的形成：实钻井眼是一条空间曲线，设想经过这条曲线上的每一个点作一条铅垂线，所有这些铅垂线就构成了一个曲面，如图1-9所示。这个曲面与水平面的交线就是这口井的水平投影图。这个曲面乃是柱面，它有一个

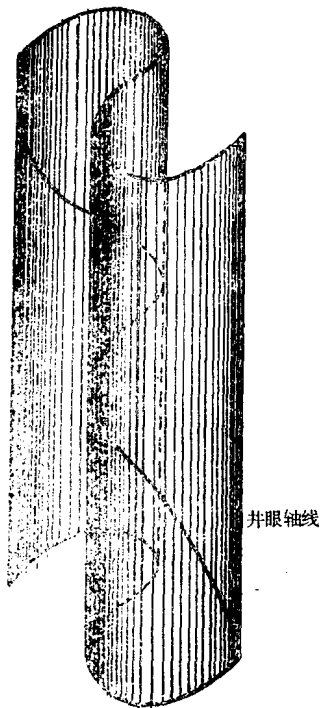


图 1-9 柱面的形成

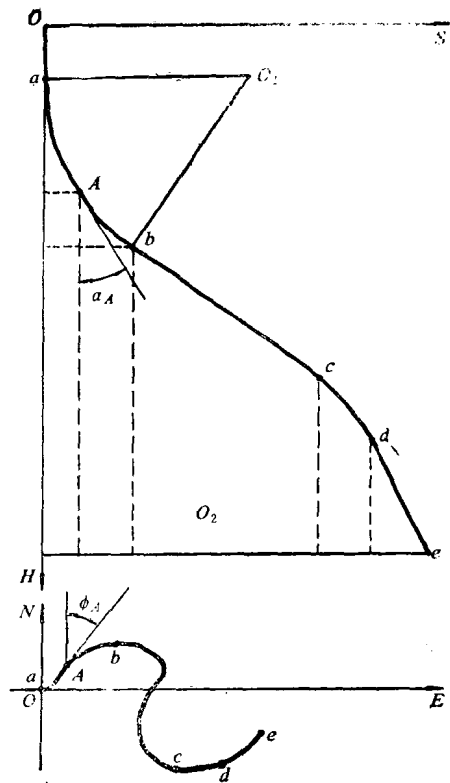


图 1-10 柱面图表示法

四、定向井的其它井身参数

前面已讲了井深 (L)、井斜角 (α) 和井斜方位角 (ϕ) 三项基本参数, 以及它们的增量 ΔL 、 $\Delta \alpha$ 和 $\Delta \phi$ 。还讲了井斜变化率 (K_α) 和井斜方位变化率 (K_ϕ)。除此以外, 井身参数还有以下几项。

(1) 垂深: 即测点的垂直深度, 以 H 表示, 是指井身上任一点至井口所在水平面的距离。可在垂直剖面图上反映出真实值, 如图1-11所示, A 、 B 点的垂深分别为 H_A 、 H_B 。对于测段来说, 有垂深的增量简称垂增, 以 ΔH 表示。

(2) 水平长度: 即测点井深的水平投影长度, 以 S 表示, 是指自井口至测点的井眼长度在水平面上的投影长度。在水平投影图上可反映出水平长度的真实值。如图1-12所示, A 、 B 点的水平长度分别为 S_A 、 S_B 。对于测段来说, 有水平长度的增量简称平增, 以 ΔS 表示。

(3) 平移: 即测点的水平位移, 以 A 表示, 是指测点至井口所在的铅垂线的距离。在水平投影图上可反映出平移的真实值。如图1-13所示, A 、 B 点的平移分别为 A_A 、 A_B 。

在我国油田现场, 将完钻时井底的水平位移称为闭合距。在国外, 所有各测点的水平位移均可称为闭合距 (Closure Distance)。

(4) 平移方位角: 以 θ 表示, 是指以正北方位线为始边顺时针转至平移方位线上所转

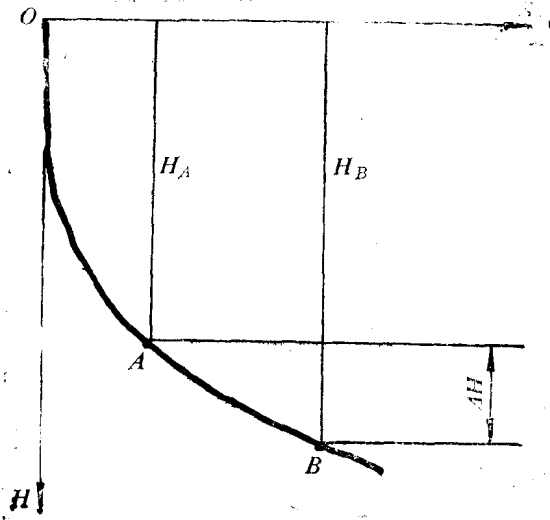


图 1-11 垂深示意图

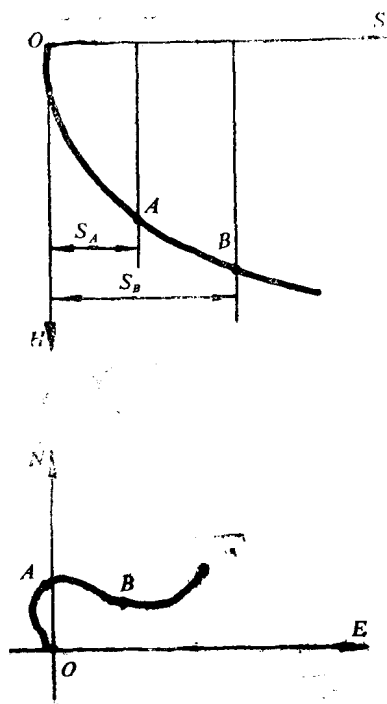


图 1-12 水平投影长度

过的角度。在水平投影图上可反映出平移方位角的真实值。如图1-14所示， A 、 B 点的平移方位角分别为 θ_A 、 θ_B 。

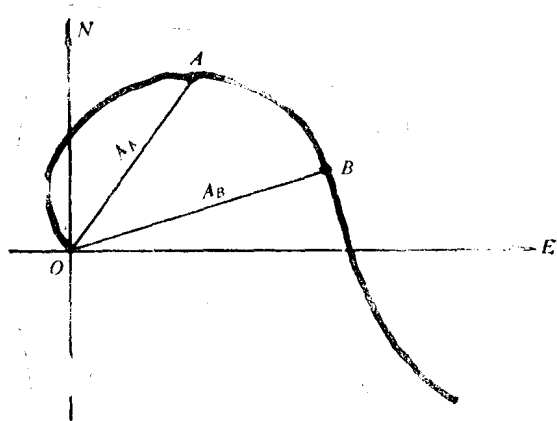


图 1-13 水平位移

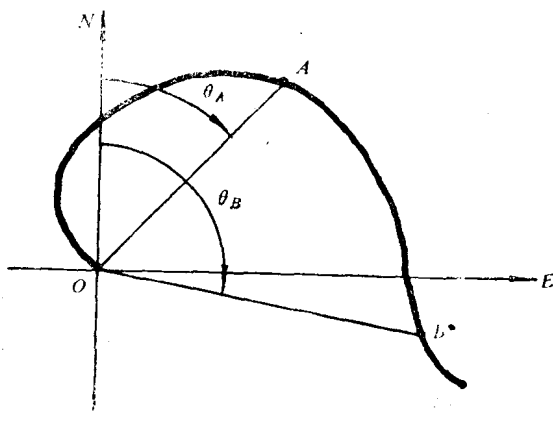


图 1-14 平移方位角

在我国现场上，将完钻时井底的平移方位角称为闭合方位角。可是，在国外，全井所有各点（包括井底）的平移方位角均称为闭合方位角（Closure Azimuth）。

(5) N 坐标和 E 坐标：以 N 和 E 表示，是指测点在以井口为原点的水平面坐标系里的坐标值。这个水平面坐标系的两个坐标轴，一根是正北方向，一根是正东方向。如图1-15所示， A 、 B 点的水平坐标分别为 (N_A, E_A) 和 (N_B, E_B) 。

对于测段来说,有 N 坐标和 E 坐标的增量 ΔN 和 ΔE 。

(6)视平移:英文原文是Vertical Section,意思是井身上某点在垂直投影面上的水平位移,这个“水平位移”不是真实的水平位移,所以我们称之为视平移。显然,垂直投影面所在的位置不同,视平移也就不同。对于一口井来说,水平投影面只有一个,而垂直投影面则有无数个。在实际工作中,对于正在钻进的井作垂直投影图时,都是将垂直投影面选在设计方位线上。在特殊情况下,对于完钻井,有时也将垂直投影面选在闭合方位线上;在作丛式井的垂直投影图时,垂直投影面可根据需要任选在某个方位线上。在正常情况下,都是对正在钻进的井,而且是单井,作垂直投影图来指导施工,投影面都是选在设计方位线上,所以我们常说的视平移也可以定义为水平位移在设计方位线上的投影。

视平移以 V 表示,如图1-16所示, A 、 B 点的视平移分别为 V_A 和 V_B 。

视平移是垂直投影图作图的重要数据。对于一个测段来说,可以有视平移的增量,可称为视平移增 ΔV 。

测点的视平移与平移越接近,说明该井井眼方位控制得越好。平移都是正值,而视平移则可能是正值,也可能是负值。负值的视平移不仅说明该井的方位控制很不好,而且平移方位线与设计方位线是背道而驰的。

五、井眼轴线在柱面图上的曲率

下面我们进一步研究井眼轴线在柱面图的垂直剖面图和水平投影图上的曲率。显然,井眼轴线在这两张图上仍然是曲线,不过已变成了平面曲线。根据数学定义,曲线的曲率是指曲线的方向对于曲线长度的一阶导数,或者是指曲线的倾角对于曲线长度的一阶导数。

在垂直剖面图上,如果我们以重力线为基准,则曲线的倾角就是井眼的井斜角,曲线长度就是井眼长度(井深)。那么井眼轴线在垂直剖面图上的曲率(以 K_H 表示),就是井斜角对于井深的一阶导数,即 $K_H = \frac{d\alpha}{dL}$ 。对于一个井段来说,假设曲率均匀不变,则

$$K_H = \frac{\Delta\alpha}{\Delta H}。前面我们已经讲过,井斜变化率 $K_s = \frac{d\alpha}{dL}$ 和 $K_s = \frac{\Delta\alpha}{\Delta L}$ 。可见 $K_H = K_s$,$$

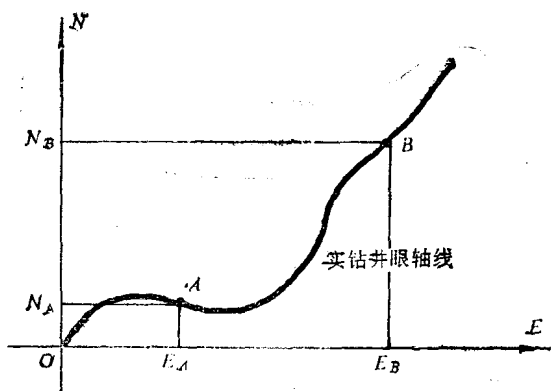


图 1-15 测点的水平坐标

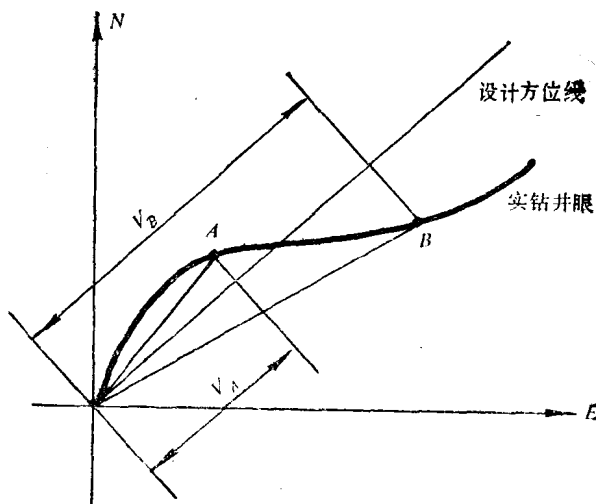


图 1-16 视平移示意图

即井眼轴线在垂直剖面图上的曲率就等于井斜变化率。

在水平投影图上，如果以正北方位线为基准，曲线的倾角就是井斜方位角，曲线长度就是井眼的水平投影长度，那么井眼轴线在水平投影图上的曲率（以 K_A 表示），就是井斜方位角对于水平投影长度的一阶导数，即 $K_A = \frac{d\phi}{ds}$ 。对于一个测段来说，假设井斜方位角均匀变化，则 $K_A = \frac{\Delta\phi}{\Delta s}$ 。对照我们前面讲过的井斜方位变化率 $K_\phi = \frac{d\phi}{dL}$ 和 $K_\phi =$

$\frac{\Delta\phi}{\Delta L}$ ，可知， $K_A \approx K_\phi$ 。在垂直剖面图上，我们可以得到 $ds = dL \sin \alpha$ ，则

$$K_A = \frac{d\phi}{ds} = \frac{d\phi}{dL \sin \alpha} = \frac{K_\phi}{\sin \alpha}$$

或者写作

$$K_\phi = K_A \cdot \sin \alpha$$

即井眼轴线在水平投影图上的曲率，等于井斜方位变化率除以井斜角的正弦。

$K_H = K_A$ 和 $K_A = \frac{K_\phi}{\sin \alpha}$ 是两个重要的关系式。

六、井眼曲率及其计算方法

井眼曲率也是一个重要的井身参数。这里，我们不去讲数学上对于空间曲线的曲率的严格定义，我们感兴趣的首先是井眼曲率的实际意义。

当人们认识到实钻的直井并不是一条铅垂线，而是偏离了铅垂线时，是用井斜角来衡量和表示井眼偏离铅垂线的程度。后来又认识到，井眼偏离铅垂线并不是固定在一个铅垂平面内，井眼倾斜还有方位的变化，于是又引出了井斜方位角的概念。通过对实钻井眼的测斜人们认识到，随着井眼的前进，井斜角和井斜方位角都在不断变化，实际上反映了井眼前进方向的变化。从一个点到另一个点，井眼前进方向变化的角度（两点处井眼前进方向线之间的夹角），既反映了井斜角的变化，又反映了井斜方位角的变化。人们将此角度称为两点间的全角变化值，或称为两点间的狗腿角。狗腿角通常以 γ 来表示。

显然，在井段长度不变的情况下，狗腿角越大则表示井眼前进方向变化得越快，井眼弯曲越厉害。为了表示井眼前进方向变化的快慢或井眼弯曲的程度，人们引出了井眼曲率

的概念。井眼曲率以 K 表示，则 $K = \frac{\gamma}{\Delta L}$ 。井眼曲率也称为全角变化率，又称狗腿严重度

（简称为狗腿度），它们都是同一个概念，是指单位长度井段内狗腿角的大小。

井眼曲率并不表示井斜的程度。井眼曲率很大并不表示井斜得很厉害（也许井斜角并不很大），而是反映了井眼方向变化很剧烈，井眼弯曲很厉害。

井眼曲率的重要性是每个钻井工作者所了解的，这里不必多说。下面介绍一下井眼曲率的计算方法。

目前，计算井眼曲率的方法很多，有公式计算法、查图法、图解法、查表法和尺算法等五种。后四种方法皆来源于公式计算法，只是为了计算方便而采用的。在公式计算法中，又有许多种计算公式，这些公式按照它们的出处又可分为三套。

1. 第一套公式

这是根据空间微分几何原理推导出来的，推导过程见附录一。对于一个测点来说，公式的形式为：

$$K = \sqrt{K_a^2 + K_d^2 \sin^2 \alpha} \quad (1-1)$$

$$K = \sqrt{K_H^2 + K_d^2 \sin^4 \alpha} \quad (1-2)$$

对于一个测段来说，以 $K_a = \frac{\Delta \alpha}{\Delta L}$ 和 $K_d = \frac{\Delta \phi}{\Delta L}$ 代入 (1-1) 式中，并以测段平均井斜角 α_c 代替公式中的 α ，得到：

$$K = \sqrt{\left(\frac{\Delta \alpha}{\Delta L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \phi}{\Delta L}\right)^2 \sin^2 \alpha_c} \quad (1-3)$$

式中 $\alpha_c = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$ 。 α_1 和 α_2 分别为上、下两个测点的井斜角。

根据测斜资料，可以利用 (1-3) 式直接算出测段的井眼曲率。在 (1-3) 式中，若用 $K = \frac{\gamma}{\Delta L}$ 代入，则可得：

$$\gamma = \sqrt{\Delta \alpha^2 + \Delta \phi^2 \sin^2 \alpha_c} \quad (1-4)$$

将用 (1-4) 式可以先求得测段的狗腿角 γ ，然后再用 $K = \frac{\gamma}{\Delta L}$ 求得井眼曲率 K 。

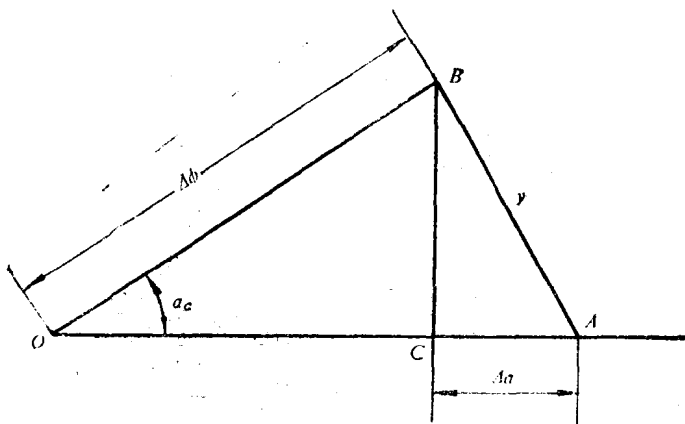


图 1-17 第一套公式的图解法

根据 (1-4) 式求 γ ，也可以使用图解法。图解法的步骤如下（参看图1-17）：

- (1) 作水平射线 OA ；
- (2) 作角 $\angle BOA = \alpha_c$ ；
- (3) 以一定长度代表单位角度，量 $OB = \Delta \phi$ ；
- (4) 自 B 点向 OA 作垂线，垂足为 C 点；
- (5) 按步骤 (3) 中的比例（以长度代表角度的比例），量 $CA = \Delta \alpha$ ；
- (6) 连接 A, B ，并量 AB 长度，按步骤 (3) 中的比例换算成角度，此角度即狗腿角 γ 。

2. 第二套公式

这个公式最先是由美国人鲁宾斯基 (Lubinski) 推导出来。他在推导公式时作了假