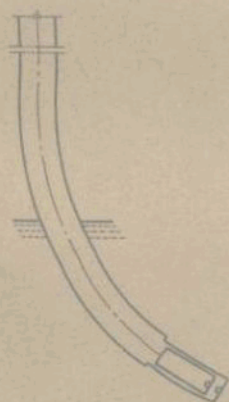


水 平 井 有杆抽油系统设计

董世民 李宝生 编著



石油工业出版社

登录号	127054
分类号	TE933
种次号	010

水平井有杆抽油系统设计

董世民 李宝生 编著



石油0121037

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在详细研究弯曲井眼内抽油杆柱弯曲变形的基础上,介绍了设计扶正器合理配置间距的几种方法;结合水平井井身结构的特点,介绍了系统动态参数的预测技术;给出有杆泵抽油系统机、杆、泵与抽汲参数优化设计的模糊综合评判方法。本书汇集了作者“八五”期间所从事的水平井有杆泵举升技术研究和实践探索的一些成果,所介绍的设计计算方法也适用于定向井、斜直井有杆泵抽油系统的设计。

可供从事有杆泵举升技术的研究人员和现场工程技术人员阅读,也可供高等院校有关专业的教师和学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水平井有杆抽油系统设计/李宝生,李宝生编著
北京:石油工业出版社,1996.12
ISBN 7-5021-1836-5

I. 水…

II. ①董…

III. 水平井抽油杆系统

N. TE933

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第18879号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

地矿部河北测绘印制中心印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 32开本 7印张 157千字 印1-1500

1996年10月北京第1版 1996年10月河北第1次印刷

ISBN 7-5021-1836-5 /TE·1551

定价: 16.00元

前 言

进入 80 年代后,随着水平井开采技术的逐步配套以及水平井所表现出的良好的增产效果与显著的经济效益,越来越多的国家已经开始利用水平井技术进行油田的开发。自从我国南海东部钻成第一口水平井以来,国内各油田相继开展了水平井钻采技术的研究工作,特别是经过“八五”的科技攻关,使我国水平井开采技术达到了国际先进水平。

国内外采油经验表明,有杆泵抽油仍然是水平井最主要的采油方式之一。当用有杆抽油系统开采水平井时,由于深井泵一般不会下入水平段,因此水平井有杆抽油系统的设计计算方法与定向井基本相同。定向井与水平井井身不仅存在着较大的倾斜角,而且还存在着严重的狗腿度,因此定向井与水平井有杆抽油系统的抽油杆柱上都安装有扶正器以避免抽油杆柱与油管的磨损;同时在预测系统的动态参数时,必须考虑抽油杆柱与油管之间的摩擦力,这些设计计算内容是直井有杆抽油系统所涉及不到的。于是水平井有杆抽油系统设计的内容除了包括机、杆、泵等设备的选择与抽汲参数的设计外,还包括抽油杆柱扶正器合理配置间距设计。虽然国内外有一些学术论文反映了这方面的研究成果,但在国内还未见到系统介绍定向井与水平井有杆抽油系统设计方法的著作,鉴于此,作者结合“八五”期间所从事的水平井机采井下设备改进与参数优选课题的研究成果,编著了此书,并不避粗陋,冒昧将它献给读者,以期促进定向井与水平井有杆抽油技术的发

展。

由于作者水平有限，书中错误及疏漏之处在所难免，热忱欢迎读者批评指正。

作者

一九九六年四月

目 录

第一章 基础知识	(1)
第一节 概述.....	(1)
第二节 水平井井眼轴线的数值模拟.....	(2)
第三节 抽油杆柱轴向负荷的简化计算	(12)
参考文献	(21)
第二章 水平井抽油杆柱的扶正	(23)
第一节 概述	(23)
第二节 扶正器的种类	(24)
第三节 应用简支梁模型设计扶正器的合理配置间距	(27)
第四节 应用连续梁模型设计扶正器的合理配置间距	(48)
第五节 应用有限元法设计扶正器的合理配置间距	(59)
参考文献	(73)
第三章 水平井有杆抽油系统动态参数预测	(74)
第一节 概述	(74)
第二节 系统动态参数预测模型	(79)
第三节 阻尼系数的确定	(88)
第四节 波动方程的求解方法	(94)
第五节 考虑电动机转速波动的预测技术及系统效率预测方法.....	(117)

第六节 水平井有杆抽油系统三维模型的预测技术	(131)
参考文献	(142)
第四章 有杆抽油系统设计	(145)
第一节 水平井产能预测	(145)
第二节 有杆抽油系统设计	(157)
第三节 抽汲参数的优选	(192)
参考文献	(215)

第一章 基础知识

第一节 概述

早在 1928 年国外就发展了水平井技术。40 至 70 年代,美国、苏联等国钻成了一批水平井试验井,因受当时技术水平所限,各项技术不配套,虽然能钻成水平井,但难以用于生产,同时,因钻井费用高,因此限制了其发展。70 年代后,随着新技术的发展,加上一些特殊油藏用直井的方法已无法开发,或者效益很低,因而水平井技术又被提到议事日程上来。美国、加拿大、法国等国开展了水平井开发油气藏的研究,在水平井油藏工程、钻井、完井、测井、射孔、增产措施、井下工具、人工举升及井下作业等方面均有重大突破。进入 80 年代,随着水平井开采技术的逐步配套以及水平井所表现出的良好的增产效果与显著的经济效益,越来越多的国家已经开始利用水平井技术进行新油田的开发和老油田的改造。截止到 1990 年底,全世界已钻成水平井 1200 多口^[1],大多数水平井在生产中都见到了明显的效益。

一般的水平井由直井段、曲率段和水平段所组成。水平井同直井、斜井比较而言,由于它能钻遇较长的目的层,增加了与油藏的接触面积,增大了薄油层、非均质油层的泄油面积,从而提高了单井产能。对于天然垂直裂缝的油藏,水平井提供

了连通垂直裂缝的手段,若井眼的方位正好与这些裂缝相交,即使在裂缝发育较差的情况下,采油指数也能明显地提高。对于含水顶、底水等油层来说,利用水平井有利于延缓气水侵入井眼的时间,可望达到较高的采收率。正因为如此,世界各地利用水平井开发油田的数量逐年增加。自从我国南海东部钻成第一口水平井以来,我国各油田相继开展了水平井钻采技术的研究工作。经过“八五”期间的科技攻关,各油田都钻出了一定数量的水平井,取得了良好的经济效益和社会效益。

第二节 水平井井眼轴线的数值模拟

一、描述井眼轴线的参数

一般来说,水平井井眼轨道是一条连续光滑的空间曲线,要描述这样一条一般的空间曲线,通常有两个途径:一是用图形将其展示出来;二是用一些参数描绘出井眼轨道的形状。事实上,这两种方法是相辅相成、互为补充的,所以在实际应用时,往往是二者兼顾,既利用图示法形象、直观的特点,又发挥解析表达式在井眼轨道设计与计算中准确、灵活、方便的优势。为了了解井眼轨道的空间挠曲形态需要先对裸井眼进行测斜,从目前的技术条件来看,在许多的井眼轨道描述参数中,仅有几项是直接测得的参数,而大部分参数是根据直接测得的参数计算得来的。用于描述井眼空间挠曲形态的参数很多。主要分为:基本参数、坐标参数与挠曲参数。

(一) 基本参数

钻井工程上把井深、井斜角和方位角称为基本参数。从理

论上讲,如果已知井眼轨道上某一点的井深、井斜角和方位角,就可以确定其它参数,所以通常将它们称为基本参数。

1. 井深(x)

井眼轨道上任意一点到井口的井眼长度称为井深,它是一条曲线的长度,所以也称之为斜深。对于实钻井眼轨道来讲,测点处的井深称为测量深度,它通常以钻柱长度或测量电缆的长度来测量的。

2. 井斜角(α)

井眼轨道曲线上任意一点井眼的方向线与铅垂线的夹角称为该点处的井斜角。如图 1-1 所示。

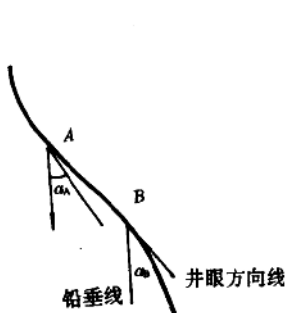


图 1-1 井斜角示意图

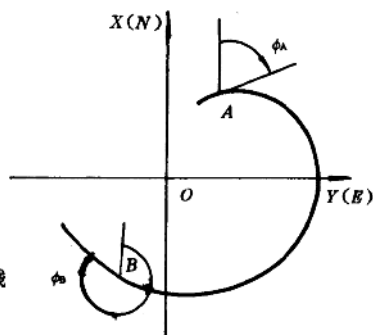


图 1-2 方位角示意图

3. 方位角(φ)

以正北方向为始边,顺时针旋转至井眼轨道方向线在水平面上的投影所转过的角度,称为该点处的井斜方位角。如图 1-2 所示。

井斜角与方位角是相互依存的,只要井斜角不为零,就存

在着什么方向的问题。事实上,井斜包括井斜角和井斜方位角两方面的含义。

(二) 坐标参数

用于描述井眼轨道上点的空间位置的参数,称为坐标参数。它是根据测斜资料的基本参数计算出来的。用北坐标、东坐标和垂深来表示。

(三) 挠曲参数

描述井眼轨道的弯曲程度和扭曲程度的参数,称为挠曲参数。挠曲参数是根据测得的基本参数推算出来的,它包括:弯曲角、扭转角、井眼曲率、井斜变化率和方位变化率等。

1. 弯曲角(β)

对于井眼轨道来讲,在井眼轨道前进的方向上,任意两个切线矢量之间所夹的角度称为弯曲角,也称之为狗腿角或全角。目前常用以下4种公式计算弯曲角 β :

$$\beta = \cos^{-1}(\cos\alpha_1\cos\alpha_2 + \sin\alpha_1\sin\alpha_2\cos\Delta\varphi) \quad (1-1)$$

$$\beta = 2\sin^{-1}\left[\sin^2\frac{\Delta\alpha}{2} + \sin^2\frac{\Delta\varphi}{2}\sin^2\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right)\right] \quad (1-2)$$

$$\beta = \sqrt{\Delta\alpha^2 + \Delta\varphi^2\sin^2\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right)} \quad (1-3)$$

$$\beta = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 - 2\alpha_1\alpha_2\cos\Delta\varphi} \quad (1-4)$$

上述4式中 $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$;

$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$;

α_1 ——井眼轨道上第一测点处的井斜角, (°);

α_2 ——井眼轨道上第二测点处的井斜角, (°);

φ_1 ——井眼轨道上第一测点处的方位角, (°);

φ_2 ——井眼轨道上第二测点处的方位角, (°)。

2. 狗腿严重度(β_s)

一般将井深增量为 30m 时, 井眼轨道的弯曲角称为狗腿严重度。狗腿严重度由下式计算:

$$\beta_s = \frac{30\beta}{x_2 - x_1} \quad (1-5)$$

式中 x_1 ——第一测点处的井深, m;

x_2 ——第二测点处的井深, m;

β ——井斜 x_1, x_2 之间井眼轨道的弯曲角, ($^\circ$);

β_s ——狗腿严重度, 度/30m。

3. 井斜变化率(K_α)

井斜变化率是指井斜角随井深变化的程度, 它是井斜角对井深的一阶导数:

$$K_\alpha = \frac{d\alpha}{dx} \quad (1-6)$$

4. 方位变化率(K_φ)

方位变化率是指方位角随井深变化的程度, 它是方位角对井深的一阶导数, 即:

$$K_\varphi = \frac{d\varphi}{dx} \quad (1-7)$$

5. 井眼曲率(K)

井眼曲率的几何意义是井眼轨道偏离直线的程度, 也是井眼切线矢量对于弧长的旋转速度。井眼曲率由下式计算:

$$K = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \left| \frac{\beta}{\Delta x} \right| = \left| \frac{d\beta}{dx} \right| \quad (1-8)$$

二、井眼轨道的计算方法

由于钻井过程中不能连续测量井身参数,只是每隔一定长度测量一次,这就给实际井眼参数的连续计算造成一定的困难,也就是如何确定相邻两个已知测点之间任意一点处的井斜角和方位角。为解决这个问题,目前已有许多方法,如正切法、平衡正切法、平均角法、曲率半径法与三次样条插值法。其中三次样条插值法较为精确。

由于三次样条插值方法既有分段插值精度高的优点,又能使节点处保持光滑连续,而且三次样条函数最初的数学模型与钻井过程中钻柱的弯曲变形相似,因此用三次样条函数来模拟实钻水平井井眼轨道具有较高的计算精度^[2]。

实际上水平井井眼轨道模拟的目的就是根据井眼轨道上一些点所测得的井斜角与方位角来预测其它一些未测点的井斜角与方位角,显然可以将这些测点的测试结果看成为试验数据,用试验数据的回归分析方法也能解决这一问题。应用结果表明,这种回归分析方法也能较精确地模拟水平井井眼轨迹。

(一) 井斜角与方位角计算

1. 三次样条函数插值法

设已知水平井某段 $[a, b]$ 上有一组有序的测点:

井深: $a = x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_N = b$

所对应的井斜角和方位角为:

井斜角: $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$

方位角: $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$

将井斜角和方位角看成是随井深变化的函数。根据三次样条函数的定义,可以构造三次井眼样条函数 $S(x)$ 和 $Q(x)$,

使其满足:

(1) 在区间 $[a, b]$ 的每个子区间 $[x_{k-1}, x_k]$ ($k=1, 2, \dots, N$) 上, $S(x)$ 和 $Q(x)$ 是一个三次多项式。

$$(2) S(x_k) = a_k \quad (k=0, 1, 2, \dots, N)$$

$$Q(x_k) = \varphi_k \quad (k=0, 1, 2, \dots, N)$$

(3) 在 $[a, b]$ 上, $S(x)$ 和 $Q(x)$ 具有连续的二阶导数, 则称 $S(x)$ 和 $Q(x)$ 为 $[a, b]$ 上分别插值于井斜角 α 和方位角 φ 的三次井斜样条函数和三次方位样条函数。

根据三次样条函数的性质, 推导出 $S(x)$ 和 $Q(x)$ 的函数表达式如下:

$$S(x) = \frac{M_{k-1}(x_k - x)^3}{6L_k} + \frac{M_k(x - x_{k-1})^3}{6L_k} + \left(\frac{a_k}{L_k} - \frac{M_k L_k}{6} \right) (x - x_{k-1}) + \left(\frac{a_{k-1}}{L_k} - \frac{M_{k-1} L_k}{6} \right) (x_k - x) \quad (1-9)$$

$$Q(x) = \frac{m_{k-1}(x_k - x)^3}{6L_k} + \frac{m_k(x - x_{k-1})^3}{6L_k} + \left(\frac{\varphi_k}{L_k} - \frac{m_k L_k}{6} \right) (x - x_{k-1}) + \left(\frac{\varphi_{k-1}}{L_k} - \frac{m_{k-1} L_k}{6} \right) (x_k - x) \quad (1-10)$$

上 2 式中 $k=1, 2, 3, \dots, N$;

L_k —— 测段长度, $L_k = x_k - x_{k-1}$;

x —— 插值点处的井深;

N —— 测点个数;

x_k, x_{k-1} —— 相邻两测点的井深;

α_k, α_{k-1} —— 相邻两测点的井斜角;

φ_k, φ_{k-1} —— 相邻两测点的方位角;

$$M_k = S''(x_k), M_{k-1} = S''(x_{k-1});$$

$$m_k = Q'(x_k), m_{k-1} = Q'(x_{k-1})_0$$

为了确定 $S(x)$ 和 $Q(x)$, 必须求出 $M_k, m_k (k=0, 1, 2, \dots, N)$ 。利用三次样条函数的性质和边界条件可得到关于 M_k 和 m_k 的线性方程组如下:

$$\begin{bmatrix} 2 & \lambda_0 & 0 & 0 \cdots 0 & 0 \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & 0 \cdots 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & 2 & \lambda_2 \cdots 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \mu_{N-1} \cdots 2 & \lambda_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \cdots \mu_N & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_{N-1} \\ M_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_0 \\ D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_{N-1} \\ D_N \end{bmatrix} \quad (1-11)$$

$$\begin{bmatrix} 2 & \lambda_0 & 0 & 0 \cdots 0 & 0 \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & 0 \cdots 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & 2 & \lambda_2 \cdots 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \mu_{N-1} \cdots 2 & \lambda_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \cdots \mu_N & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 \\ m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{N-1} \\ m_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{N-1} \\ d_N \end{bmatrix} \quad (1-12)$$

上2式中 $D_0 = \frac{6}{L_1} \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{L_1} - \alpha'_0 \right);$

$$D_N = \frac{6}{L_N} \left(\alpha'_N - \frac{\alpha_N - \alpha_{N-1}}{L_N} \right);$$

$$d_0 = \frac{6}{L_1} \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{L_1} - \phi'_0 \right);$$

$$d_N = \frac{6}{L_N} \left(\phi'_N - \frac{\varphi_N - \varphi_{N-1}}{L_N} \right);$$

$$\lambda_0=1, \mu_N=0;$$

$$D_k=6 \left[\frac{\frac{\alpha_{k+1}-\alpha_k}{L_{k+1}} - \frac{\alpha_k-\alpha_{k-1}}{L_k}}{L_k+L_{k+1}} \right]$$

$$(k=1, 2, 3, \dots, N-1);$$

$$d_k=6 \left[\frac{\frac{\varphi_{k+1}-\varphi_k}{L_{k+1}} - \frac{\varphi_k-\varphi_{k-1}}{L_k}}{L_k+L_{k+1}} \right]$$

$$(k=1, 2, 3, \dots, N-1);$$

$$\lambda_k = \frac{L_{k+1}}{L_k+L_{k+1}}, \mu_k = 1 - \lambda_k$$

$$(k=1, 2, \dots, N-1)。$$

其中 α'_0, α'_N 和 φ_0, φ_N 由边界条件确定, 这里选用固定边界条件。

上述方程组是对角占优的三对角方程组, 宜用追赶法求解, 将解 $M_i, m_i (i=0, 1, \dots, N)$ 分别代入 $S(x)$ 和 $Q(x)$ 的表达式中, 就可求出 $[a, b]$ 井段上任意井深处的井斜角和方位角。

2. 多项式回归法

应用如下的多项式模拟任意井深 x 处的井斜角与方位角:

$$\alpha(x) = a_0 + a'_1 x + \sum_{i=1}^K a_i \sin \frac{i\pi x}{L} \quad (1-13)$$

$$\varphi(x) = b_0 + b'_1 x + \sum_{i=1}^K b_i \sin \frac{i\pi x}{L} \quad (1-14)$$

上2式中 $a_0, a'_1, a_1, a_2, \dots, a_K$ ——回归系数;

$b_0, b'_1, b_1, b_2, \dots, b_K$ ——回归系数;

L ——所模拟井眼轴线段的最大井深。

应用最小二乘法确定上述多项式中的回归系数 $a_0, a'_1,$

$a_1, a_2, \dots, a_K$ 与 $b_0, b'_1, b_1, b_2, \dots, b_K$ 。

(二) 水平井井眼坐标的计算

用上述方法求出已知井段上任一点的井斜角和方位角后,便可以按照曲率半径法确定对应点的空间坐标及井眼的曲率。这种方法假设测段内的井眼轨道是一条等变螺旋角的圆柱螺旋线,该螺旋线在端点处分别与上下两测点的井眼方向相切。于是,测段内的井眼轨道在垂直剖面图和水平投影图上都是圆弧。如图 1-3 所示。

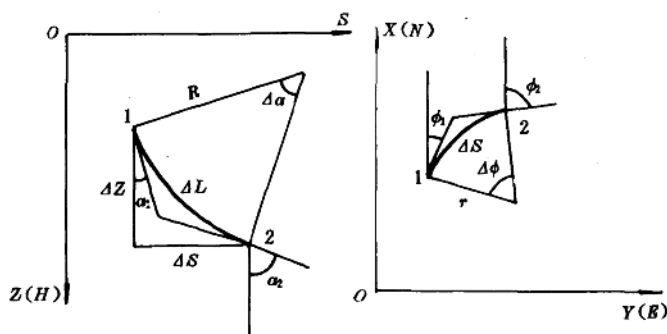


图 1-3 曲率半径法计算坐标值

测段计算公式如下:

$$\begin{cases} \Delta x = r(\sin\phi_2 - \sin\phi_1) \\ \Delta y = r(\cos\phi_1 - \cos\phi_2) \\ \Delta z = R(\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1) \end{cases} \quad (1-15)$$

其中