

斜井的空间形态及其实用计算理论

龚 伟 安*

(长庆石油勘探局钻采工艺研究院)

摘 要 井眼曲率(全角变化率、狗腿度)是用来衡量井身质量的一个重要的现行标准。采用圆柱拟合方法首次建立了斜井井眼曲线的参数方程,应用微分几何原理获得了井眼曲率和挠率的新计算公式,并证明了同一测段井眼曲线上各曲率是不相同的。文中从各个侧面论述了“狗腿角平面”只是一个假想平面,指出使用的 Lubinski 公式进行的三维分析,只在井斜角和方位角变化很小时才是正确的。对井眼曲线空间形态的数学描述及其结论,能有效地指导斜井和水平井的剖面设计,弯曲井段的套管强度设计,以及井下组合钻具和套管扶正器的三维分析。

主题词 定向井 井眼 曲率 计算方法

井眼曲率是指井眼轴线的弯曲程度,它是井眼轴线在铅垂面的井斜角变化和水平面的方位角变化的综合反映,是定向斜井一个重要的井斜质量参数和钻井过程中的操作参数。“井眼曲率”的通俗叫法为“全角变化率”,形象的名称为“狗腿度”^[1],在定向斜井中,又称为“造斜率”。

过去如何计算井眼曲率,文献 [2] 和 [3] 已有详细的介绍。在实际钻井作业中常使用鲁宾斯基(Lubinski)公式:

$$\cos \gamma = \cos \alpha_A \cos \alpha_B + \sin \alpha_A \sin \alpha_B \cos (\Phi_B - \Phi_A) \quad (1)$$

式中: γ 为测点 A 和 B 之间井眼之间曲线前进方向变化的角度,即全角变化值; $\alpha_A, \alpha_B, \Phi_A, \Phi_B$ 分别为测点 A 和 B 处的井斜角和方位角。

这里要特别指出,过去的计算方法(解析法或向

量法),均假设井眼曲线为平面曲线,即存在着所谓的“狗腿平面”;这个面包含了井眼曲线及其两端点的曲率半径的交点,其交角即为“狗腿角”(全角变化值)。

井眼曲率在定向斜井工程上,一般采用每 30 m (美国使用每 100 ft)的角度变化作标准。

首先,要指出的是理论上的井眼轴线是一条空间曲线,其曲率中心并不交于某一空间点上,因而不存在“狗腿平面”。故, Lubinski 公式是建立在一个并不存在的、想象中的平面上的,因而只是一种近似算法,仅适用于井斜角和方位角变化小的情况。

井眼曲线的空间形态

首先讨论平面问题,即井眼的方位角没有变化。

3 正确选择部署排水井点

我们选择两口位于主要水侵方向,在原始气水边界附近,即在水淹长达 13 年的气井中 35 井和中 19 井开展阻水排水。边水被阻隔后,水侵区内水量得不到补充,效果很快表现出来。

4 排水工艺技术的正确选择、完善和配套

如果对排水井点的排水量预测不准,那么就很难保证被选择的排水工艺具有较好的适应性,以及能否达到合理排水的目的。对水淹井中 35 井和中 19 井依据产水量大小和构造位置以及主要水侵方向,分别采用电潜泵和气举强排水工艺。中 35 井的电潜泵排水工艺连续运行时间长达 8 个月,效果十分理想。

结 论

- (1) 气藏的水侵特征为沿裂缝水侵,边水能量小;
- (2) 气藏开展排水采气的充要地质条件是边水不活跃;
- (3) 在边水的主要水侵方向上开展阻水排水采气方式,排水效果最佳;
- (4) 排水工艺正确选择,是排水采气获得成功的重要保证。

审稿人 高级工程师 贺 伟
收稿日期 1996—03—07 编辑 华 桦

* 龚伟安,教授级高级工程师;1958年毕业于原北京石油学院钻采系;现从事石油钻采机械及钻采工艺研究工作,任副院长兼总工程师。地址:(745101)甘肃省庆阳县。电话:(029)3592695。

注意到在实际井斜测量中, 给出的两测点之间的井斜变化率, 为每 30 m 的角度值表示, 并用公式(2)的形式来算出井斜曲率。其曲率半径为:

$$r = 1/K = AB/\gamma \quad (2)$$

式中 AB 为测点之间井眼的实际长度。实际上认为两测点之间为一圆弧, 在两维常规定向斜井的井身剖面设计中, 造斜段一般使用不同造斜率(曲率)的圆弧曲线。因为它最简单, 也易实现。或者说, 只要两测点距离不超过 30 m, 实际井眼曲线也可作为半径为 r 的一段圆弧来处理。虽然对两测点之间井眼形状一无所知, 但是由于钻具具有一定的刚度, 井眼曲线在这样短的井段内不可能产生突变, 井眼曲线的弯曲将是光顺的、渐近的, 因此应用一段圆弧来拟合, 精度是足够的。

图 1 表示在平面内的斜井中两测点之间井身轴线的圆弧 AB 。铅垂坐标通过测点 B , 水平坐标的原点为 B , 在 A 点上, AB 的切线为 S , S 与铅垂线的交角即为 A 点的井斜角(α_A)。同理在测点 B 处, 井斜角为 B 点处, AB 的切线 P 与铅垂线交角为 B 点的井斜角(α_B)。

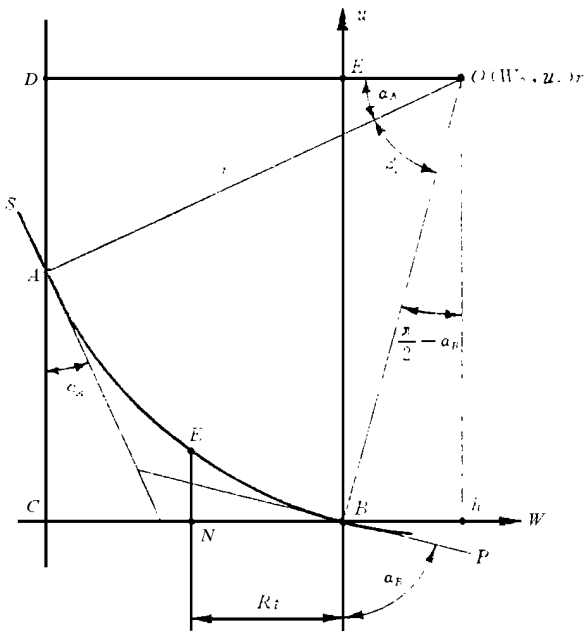


图 1 井眼曲线的直角坐标系

Fig 1 Rectangular coordinate system for borehole track

现在来计算圆心处的坐标, 以便在直角坐标系 UBW 中建立该圆的方程式。由图 1 可知, 在 AOD 中, $OA = r$ (曲率半径), $AOD = \alpha_A$, 而 BOH 中, $OB = r$, $BOh = \pi/2 - \alpha_B$, 于是:

$$\left. \begin{aligned} W_0 = Bh = r \sin(\pi/2 - \alpha_B) &= r \cos \alpha_B \\ u_0 = Oh = r \cos(\pi/2 - \alpha_B) &= r \sin \alpha_B \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

圆的一般方程为:

$$(u - u_0)^2 + (W - W_0)^2 = r^2$$

将(3)式代入, 得圆方程:

$$(u - r \sin \alpha_B)^2 + (W - r \cos \alpha_B)^2 = r^2$$

$$\text{或: } u = r \sin \alpha_B - [r^2 - (W + r \cos \alpha_B)^2]^{0.5} \quad (4)$$

上式开方时, 根号前取负号。

现在来计算距坐标原点为 $BN = Rt$ 处的纵坐标 NE 值, 此时只需将 $W = -Rt$ 代入(4)式, 化简得:

$$\begin{aligned} u = NE = r \sin \alpha_B - R \left[\left(\frac{r}{R} \right)^2 \sin^2 \alpha_B + \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{r}{R} \right) t \cos \alpha_B - t^2 \right]^{0.5} \end{aligned} \quad (5)$$

式中的 R 和 t 均为参变量, 详见后述。

现在来讨论三维问题。 AB 在 A 点所测得的方位角为 Φ_A , 钻进至 B 点后所测方位角为 Φ_B , 特别值得注意的是, 方位角是在水平面内测得的。因此, 在水平面内井眼曲线的投影实际上是曲率半径为:

$$R = BC/(\Phi_A - \Phi_B) \quad (6)$$

的圆弧。在图 1 上, $BC = B'C' = r(\cos \alpha_A - \cos \alpha_B)$

因此, 井眼在空间的形状, 可以认为是用二维平面上的圆弧曲线, 沿着一圆柱(半径为 R) 旋转而成, 如图 2 所示。同样, 考虑到钻具的刚度, 影响井眼的挠曲也将是渐进的、光顺的, 应用空间圆柱面对该井眼曲线进行拟合已足够精确。

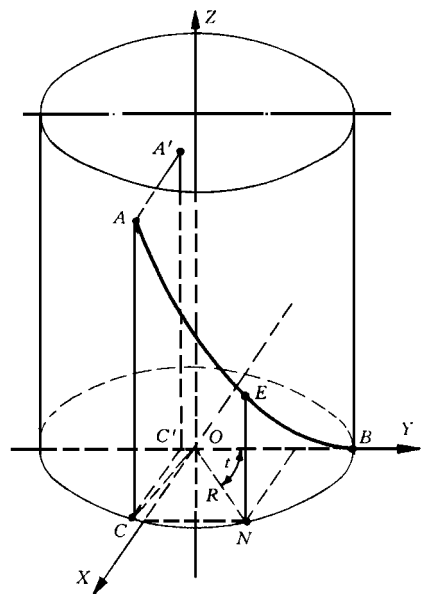


图 2 井眼曲线的圆柱坐标系

Fig 2 Cylindrical coordinate system for borehole track

对于其他一些特殊的斜井剖面, 如二次抛物线、悬链线等, 与圆弧曲线一样, 当存在方位角变化时, 也可以沿着圆柱表面旋转成新的空间曲线。这些新

的空间曲线很容易用参数方程来描述。

图2是井眼曲线的圆柱坐标系。为了建立AB的空间曲线方程,引入参数极角(t),于是:

$$\left. \begin{aligned} X &= R \sin t \\ Y &= R \cos t \\ Z &= r \sin \alpha_0 - R \left[(r/R)^2 \sin^2 \alpha_0 + \right. \\ &\quad \left. + 2(r/R) t \cos \alpha_0 - t^2 \right]^{0.5} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

井眼曲线的曲率问题

(7)式即为井眼轴线在圆柱坐标系中的参数方程。

由此可以看出,这是一条空间曲线,它的曲率并不是一个常数。由微分几何得知,该曲线的曲率由下式计算。

$$K = \{[(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2)(\ddot{X}^2 + \ddot{Y}^2 + \ddot{Z}^2) - (\dot{X}\ddot{X} + \dot{Y}\ddot{Y} + \dot{Z}\ddot{Z})^2]/(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2)^3\}^{0.5} \quad (8)$$

式中: $\dot{X}$ 、 $\dot{Y}$ 、 $\dot{Z}$ 和 $\ddot{X}$ 、 $\ddot{Y}$ 、 $\ddot{Z}$ 分别是三个变量对参数t的一次和二次导数。由(7)式得到:

$$\left. \begin{aligned} \dot{X} &= dX/dt = R \cos t, \quad \ddot{X} = d^2X/dt^2 = -R \sin t \\ \dot{Y} &= dY/dt = -R \sin t, \quad \ddot{Y} = d^2Y/dt^2 = -R \cos t \\ \dot{Z} &= dZ/dt = -R/2(H^2 P^{-0.5}) \\ \ddot{Z} &= d^2Z/dt^2 = -R/2(H^2 P^{-1.5} + 2P^{-0.5}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} P &= [(r/R)^2 \sin^2 \alpha_0 - 2(r/R) t \cos \alpha_0 - t^2], \\ t &\leq (\Phi_0 - \Phi_A) \\ H &= [-2(r/R) \cos \alpha_0 - 2t] \\ r &= AB/(\alpha_0 - \alpha_A) = 180L/(\alpha_0 - \alpha_A)\pi \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$R = BC/(\Phi_0 - \Phi_A)$$

$$= (180/\pi)^2 L (\cos \alpha_0 - \cos \alpha_A)/(\alpha_0 - \alpha_A) (\Phi_0 - \Phi_A) \quad (11)$$

$$(r/R) = (180/\pi) (\Phi_0 - \Phi_A)/(\cos \alpha_0 - \cos \alpha_A) \quad (12)$$

$L = AB$, 即所测井段的长度。

将一、二阶导数,代入(8)式,化简得到曲率及曲率半径:

$$K = \sqrt{P^2 + (r/R)^2}/r(r/R) \quad (13)$$

$$\rho = 1/K = r(r/R)/\sqrt{P^2 + (r/R)^2} \quad (14)$$

对于仅有方位变化的斜直井段,其井眼曲线为一空间螺旋线,参数方程为:

$$\left. \begin{aligned} X &= R \cos t \\ Y &= R \sin t \\ Z &= ht/2\pi \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: $h = 2\pi R \tan \alpha$, α 为斜直井井斜角。

将(15)式代入(8)式化简得到斜直井的井眼空间曲线的曲率

$$K = (1/R)/(1 + \tan^2 \alpha) \quad (16)$$

$$\text{曲率半径 } \rho = R(1 + \tan^2 \alpha) \quad (17)$$

式中: $R = 180 \times 30/(\Phi_0 - \Phi_A)\pi$

这里需要特别提出的是,由微分几何导出的空间曲线上某一点的曲率的计算公式为依据而得到下列公式:

$$K = (\Delta \alpha/L)^2 + (\Delta \Phi/L)^2 \sin \alpha_c \quad (18)$$

式中: $\alpha_c = (\alpha_A + \alpha_0)/2$, 为平均井斜角。

公式(18)实际上已默认了所测井段的井眼空间曲线在垂直和水平面内的投影均为圆弧曲线。前面已经阐述了这种状态是不可发生的,故公式(18)也同Lubinski公式一样,存在着同样的问题。因为将适用于“曲线上一点”的公式加以扩延用于“曲线上一段”无疑也是一种假设,需要考虑误差问题。

井眼轴线的曲率中心问题

圆柱表面上在同一平面内空间曲线,只有椭圆曲线一种。特殊情况下,例如该平面与铅垂线垂直,其交线为圆。因此,过去假定井眼曲线在垂直平面与水平平面内的投影都是圆弧曲线仅是一种近似处理。

曲率半径的方向实际上与曲线的主法线方向是一致的,二者相重合。由微分几何得知,在 $M(X_0, Y_0, Z_0)$ 点上的主法线方程为(参数方程):

$$\frac{X - X_0}{\begin{vmatrix} \dot{Y}_0 & \dot{Z}_0 \\ m & n \end{vmatrix}} = \frac{Y - Y_0}{\begin{vmatrix} \dot{Z}_0 & \dot{X}_0 \\ n & l \end{vmatrix}} = \frac{Z - Z_0}{\begin{vmatrix} \dot{X}_0 & \dot{Y}_0 \\ l & m \end{vmatrix}} = t \quad (19)$$

式中:

$$l = \begin{vmatrix} \dot{Y}_0 & \dot{Z}_0 \\ \ddot{Y}_0 & \ddot{Z}_0 \end{vmatrix}; \quad m = \begin{vmatrix} \dot{Z}_0 & \dot{X}_0 \\ \ddot{Z}_0 & \ddot{X}_0 \end{vmatrix}; \quad n = \begin{vmatrix} \dot{X}_0 & \dot{Y}_0 \\ \ddot{X}_0 & \ddot{Y}_0 \end{vmatrix}。$$

$\dot{X}_0, \dot{X}_0$ 分别指在一、二阶导数下,代入 X_0 值

的结果, $\dot{Y}_0$ 和 $\dot{Z}_0$ 意义与上述相同。

由此可知,在井眼曲线上的各点上,有不同的主法线方程,因此,曲率中心在与 M_0 点相距为曲率半径的主法线上。故曲率中心点将组成一条空间曲线。

井眼曲线的全角变化率及挠率概念

在定向斜井中,两测点的曲线的曲率分别为 K_A 和 K_B 。那么,对于 $AB = L$ 测段来说,全角变化率取其平均值来作近似表示:

$$K = (K_B + K_A) / 2 \quad (20)$$

式中: K_A 和 K_B 可由(13)式分别求出。

严格地说(20)式也并不科学,它只是近似地表明了该井段的曲率特性。如要提高其安全性,应增加测点密度,并取其中曲率最大的值作为衡量标准。

空间曲线既有弯曲,有又扭曲。对其扭曲的大小,常用挠率来衡量。如果井眼两个点A和B之间的弧线用 ΔS 表示,两点副法线的夹角为 $\Delta\epsilon$,则挠曲率:

$$T = d\epsilon/dS = 1/\tau$$

式中: τ 为挠度半径。在参数方程条件下:

$$T = \rho^2 \frac{\begin{vmatrix} \dot{X} & \dot{Y} & \dot{Z} \\ \ddot{X} & \ddot{Y} & \ddot{Z} \\ \dddot{X} & \dddot{Y} & \dddot{Z} \end{vmatrix}}{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2)^{3/2}} \quad (21)$$

式中: ρ 为曲率半径。

因此,要评价井眼曲率的光顺程度,同时采用曲率和挠率两个参数,则更全面。

对于既有井斜角的变化,又有方位角变化的井眼曲线[见方程(7)],其挠率和挠度半径分别为:

$$T = (1/R)H \sqrt{P [3(r/R)^2 + P]} / 2(r/R)^2 [(r/R)^2 + P] \quad (22)$$

$$\tau = 2(r/R)^2 [(r/R)^2 + P] / (1/R)H \sqrt{P [3(r/R)^2 + P]} \quad (23)$$

对于只有方位角变化的斜直井的井眼曲线[见方程(15)],其挠率和挠度半径分别为:

$$T = (1/R) \operatorname{tg}^2 \alpha / (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha) \quad (24)$$

$$\tau = R (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha) / \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (25)$$

新方法在测斜计算中的应用

目前,国内外测斜计算方法上,大体可分为直线法、截线法和曲线法三种,从而推导出了现有各种公式。由于井眼轨迹是一条铅垂平面和水平面上都有挠曲的空间曲线。因此,当前关于测斜计算公式导出

前提已经不够精确,提出一种新公式进行修正是必要的。

假定测斜段的井眼曲线在铅垂面(井眼剖面)上的垂直位移为 ΔH ,水平位移为 ΔS 。由图2可以看出,AEB井段在水平面上的投影为CNB圆弧。

ΔS 相当于CNB的弦长,于是

$$\Delta S = 2R \sin(\Delta\Phi/2)$$

而

$$R = CNB / \Delta\Phi$$

$$CNB = L / \Delta\alpha (\cos\alpha_A - \cos\alpha_B)$$

于是

$$R = L (\cos\alpha_A - \cos\alpha_B) (180/\pi)^2 / \Delta\Phi \Delta\alpha$$

从而得到:

$$\Delta S = [2(180/\pi)^2 (\cos\alpha_A - \cos\alpha_B) L \sin(\Delta\Phi/2)] / \Delta\Phi \Delta\alpha \quad (26)$$

其它如 ΔH , ΔN 和 ΔE 均与圆柱螺旋法相同。

算例

算例1:在斜井的30m井段AB两端测得的井斜角分别为 $\alpha_A = 30^\circ$, $\alpha_B = 45^\circ$;测得的方位角分别为 $\Phi_A = 200^\circ$, $\Phi_B = 220^\circ$ 。试计算井眼的全角变化率,曲率半径。由(10)、(11)及(12)式得到A点的数据:

$$r = 30 \times 180 / (45 - 30) \pi = 114.5916$$

$$R = 30(180/\pi)^2 (\cos 30^\circ - \cos 45^\circ) / (45 - 30) (20 - 200)$$

$$= 52.1699$$

$$(r/R) = 2.1965$$

在A点的参数极角为:

$$t = (220 - 200) \pi / 180 = 0.3491$$

$$P = 2.1965^2 \sin^2 45^\circ + 2 \times 2.1965 \times 0.3491 \cos 45^\circ + 0.3491^2 = 3.3748$$

由(13)和(14)式求得A点的曲率和曲率半径为:

$$K_A = 0.0159977 (1/m)$$

$$\rho_A = 62.51(m)$$

表1列出了不同参数极角时的曲率及曲率半径

表1 $K_A (10^{-2}, 1/m)$, $\rho(m)$ 与极角的对应关系

Table 1 The corresponding relation between $K_A (10^{-2}, 1/m)$, $\rho(m)$ and polar angle

t	20°	18°	16°	14°	12°	10°	8°	6°	4°	2°	0°
K	1.5998	1.5715	1.5426	1.5132	1.4833	1.4530	1.4222	1.3911	1.3596	1.3290	1.2962
ρ	62.51	63.63	64.83	66.09	67.42	68.82	70.31	71.89	73.55	75.30	77.15

值。

表1中 $t = 20$ 在测点A处, $t = 0$ 在测点B处, $t = 10$ 系AB井段的中点。

由Lubinski公式(1)计算出的曲率和曲率半径

为:

$$K_L = 0.011147 (1/m)$$

$$\rho_L = 89.71(m)$$

如用每30m来表示“全角变化率”,则有Lubinski

公式:

$$K_L = 19\ 160\ 3\ \text{‰}30\ \text{m}$$
$$\text{测点 A: } K_A = 27\ 498\ 5\ \text{‰}30\ \text{m}$$
$$\text{测点 B: } K_B = 22\ 280\ 0\ \text{‰}30\ \text{m}$$
$$\text{测中点: } K_{10} = 24\ 975\ 2\ \text{‰}30\ \text{m}$$

由此例可以看出: 由 Lubinski 公式计算出的“全角变化率”比本文所给出的精确公式计算结果均小。也就是说 Lubinski 公式低估了井眼实际的弯曲曲率, 与 A 测点相比误差达到 30.32%, 与中值相比误差为 23.28%。通过分析和对比计算得知, 当井眼为斜直井段和方位稳定的井段时, 二者误差在 5% 以下。因此 Lubinski 公式只在井斜和方位变化小时才可使用。

算例 2: 原始条件与算例 1 相同, 试计算该段的挠率及挠度半径。

根据公式 (10) 和 (11) 算出在 A 点的 $R = 52\ 169\ 92$, $(r/R) = 2\ 196\ 51$, $P = 3\ 374\ 79$, $H = 2\ 408\ 20$ 。由此得到:

$$T = 0\ 019\ 13(1/\text{m}), \text{ 即 } 32\ 88\ \text{‰}30\ (\text{m})$$
$$\tau = 52\ 229\ 6(\text{m})$$

由此看来, 在此条件下, 井眼扭曲的变化比弯曲更严重, 这是在实际作业中井眼曲率并不大, 但出现下钻遇阻严重, 并加不上钻压的重要原因。

在计算中, 如果遇到斜直井($\alpha_k = \alpha_k$)或方位稳定($\Phi_k = \Phi_k$)的井段, 公式中将出现分母为零的情况。此时只要人为地给 α_k 或 Φ_k 增加一个 Δ 值, 例如 $\alpha_k = \alpha_k + 0\ 1^\circ$; $\Phi_k = \Phi_k + 0\ 1^\circ$; 再进行计算即可。这样做将不会影响精度。

算例 3: $L = 30\ \text{m}$, $\alpha_k = 33^\circ$; $\alpha_k = 37^\circ$; $\Phi_k = 196^\circ$; $\Phi_k = 216^\circ$; 试计算 ΔS 。

根据 (26) 式:

$$\Delta S = 2 \times 30(180/\pi)^2(1/4 \times 20) \times$$
$$\times (\cos 33^\circ - \cos 37^\circ) \sin 10^\circ \approx 17\ 116\ 589\ 0(\text{m})$$

根据文献 [2] 提供的资料, 今将几种常见计算方法的对比结果列于表 2。

表 2 七种方法计算结果

Table 2 Calculation results from 7 ways

名 称	ΔH (m)	ΔS (m)	与圆柱拟合法相对误差(‰)	
			ΔH	ΔS
平衡正切法	24 559 591	17. 196 811	- 4 054	4 687
校正平均角法	24 659 571	17. 203 797	0	5 095
圆柱螺旋法	24 659 571	17. 203 799	0	5 095
平均角法	24 574 561	17. 207 293	- 16 782	5 299
最小曲率法	24 651 221	17. 260 970	- 0 339	8 435
弦步法	24 697 061	17. 293 068	1 520	10 310
圆柱拟合法	24 659 571	17. 116 589	0	0

由表 2 可以看出, 最小曲率法每测段的 ΔH 比圆柱拟合法小 0.008 35 m, 而 ΔS 则要大 0.144 38 m。

认识及结论

(1) 过去国内外许多学者对如何正确地计算井眼曲率做过大量的研究工作, 基本上都是以平面假设作依据。本文证明了在一般情况下, 井眼曲线上各点的曲率是不相同的,

(2) 本文采用不同半径的圆柱面拟合不同井段的井眼空间曲线, 不失为一种较简单的适用方法。它不但解决了降斜或增斜的圆弧曲线井段, 斜直井段, 同样也很容易解决二次抛物线井段、悬链线井段空间曲线的坐标参量方程。有了数学表达式, 应用微分几何的现有知识, 则可很方便的得到正确的结论。

(3) 井眼曲率的大小是衡量斜井井身质量的一个重要参数(但不是唯一的)。同样, 井眼曲线的挠率也是井身质量的一个重要参数。二者虽然有数学上的内在联系, 但各有所侧重。如何计算井眼曲线的挠率已有公式可循。因此, 建议今后在制定井身质量标准时应给予考虑。因为挠率大小对斜井机械采油的管、杆运动及受力影响较大。

(4) 一般情况下, 斜井的井眼轴线为一空间曲线, 如果同时存在着方位角和井斜角的变化, 这种双向均有弯曲变形的曲线是任何方向的平面均无法包络的空间曲线。因此, 不存在“狗腿角平面”。

(5) 根据本文的对比计算可知, 在井斜角和方位角变化较大的情况下, 现用的一些公式大大低估了井眼实际的弯曲程度。

(6) 按照空间曲线观点来计算定向斜井的井底位移和垂直剖面, 其精度较其他方法更可靠。

参 考 文 献

1 龚伟安 “狗腿严重度”问题 石油钻采工艺, 1982; 4(3): 9~ 17

2 韩志勇主编 定向井设计与计算 北京: 石油工业出版社, 1989

3 周大千主编 井眼轨道实用理论基础 北京: 石油工业出版社, 1993

4 Guo B, Lee R L, Miska S Constant- Curvature equations improve design of 3- D well trajectory. OIL & GAS J A P R, 1993: 38~ 40, 45~ 47

审稿人 教授 施太和

收稿日期 1995—12—16 编辑 钟水清