

岩心钻探定向钻孔轴线的设计方法

吴 光 琳

(成都地质学院)



在一般情况下进行定向钻探,多半采用平面弯曲定向钻孔(包括单底定向钻孔和分枝定向钻孔),并且以通过勘探线的垂直剖面作为设计立面,在此立面内设计孔身轴线。设计时只考虑钻孔顶角的变化,而不考虑方位角的变化。如果施工时地质条件和工艺技术因素不引起钻孔方位角的过分偏斜,那么这种设计方案是简单可行的。但是,当矿区岩层造斜强烈或工艺技术因素促斜严重时(例如岩层层理、片理发育或软硬交替频繁,且岩层走向与矿层走向又不一致;或者用钢粒钻进方法在均质岩层中打斜孔等),则施工的钻孔往往既产生顶角上漂,又产生较大的方位角偏斜。在此情况下,要控制钻孔在垂直立面内定向弯曲,就得花费很大的功夫,甚至最终还是控制不住,达不到预定的见矿位置。因此,有必要设计空间弯曲定向钻孔,以便充分利用地质和工艺造斜规律,取得比较理想的地质和经济效果。

此外,在岩心钻探中也会碰到一些特殊情况,例如原来设计的开孔位置正好处于山高坡陡之处,或者落在湖泊、沼泽、水库或其他大型工程建筑物界内,无法在原地修筑场地,安装钻探设备,必须移动孔位并偏离勘探线进行施工,而钻孔仍要求按照原来规定的勘探网格穿过矿层,在此情况下也有必要设计空间弯曲定向钻孔。

为此,根据实际需要,本文提出一种设计空间弯曲定向钻孔的方法,以供参考。

设计空间弯曲定向钻孔,除要求给出孔身

轴线在垂直面上的展开线以反映钻孔顶角的变化外,还要求给出孔身轴线在水平面上的投影(简称孔身水平投影),以反映钻孔方位角的变化。

在阐述设计方法之前,首先说明一下空间弯曲钻孔孔身轴线各点的顶角与其在垂直面上的投影(简称孔身垂直投影)各相应点顶角之间的关系,以及孔身轴线遇层角与其垂直投影同矿层倾向线交角之间的关系。

孔身轴线各点顶角与其垂直投影各相应点顶角的关系

如图1所示, ox 代表勘探线,垂直面 xoz 代表勘探线剖面,通常此剖面设计成与矿层(脉)走向垂直。 xoy 是水平面。折线 oAB 代表孔身轴线在垂直面 xoz 上的展开线,折线 $oA'B'$ 代表孔身轴线在水平面 xoy 上的投影,折线 $oA''B''$ 代表孔身轴线在垂直面 xoz 上的投影。

θ_1, θ_2 是孔身轴线各点的顶角(图中只用两点作代表), α_1, α_2 是孔身轴线各点的方位角与勘探线方位角的差值, θ'_1, θ'_2 是孔身轴线垂直投影各相应点的顶角。

$\overline{oC}$ 和 $\overline{oD}$ 是由于孔身弯曲而产生的见矿点沿勘探线的偏距和垂直于勘探线的偏距。 $\overline{oE}$ 是见矿点的垂深。 δ 是孔身轴线垂直投影与矿层倾向线的交角, ϵ 是孔身轴线水平投影与矿层走向线的交角, η 是矿层倾角。

由图1可知

$$\theta'_2 = \eta + \delta - 90^\circ \quad (1)$$

$$\epsilon = 90^\circ - \alpha_2 \quad (2)$$

θ_2 与 θ'_2 关系可由下法求出:

$$\begin{aligned} \because \quad & \operatorname{tg} \theta_2 = s_2 / z_2, \\ & \operatorname{tg} \theta'_2 = x_2 / z_2, \\ & x_2 = s_2 \cos \alpha_2 \\ \therefore \quad & \operatorname{tg} \theta_2 = x_2 / z_2 \cos \alpha_2 = \operatorname{tg} \theta'_2 / \cos \alpha_2 \\ & = \operatorname{tg} \theta'_2 / \sin \epsilon = \operatorname{tg}(\eta + \delta - 90^\circ) / \cos \alpha_2 \\ & = \operatorname{tg}(\eta + \delta - 90^\circ) / \sin \epsilon \quad (3) \end{aligned}$$

同理 $\operatorname{tg} \theta_1 = \operatorname{tg} \theta'_1 / \cos \alpha_1$

应当指出, 图 1 中 δ 角不是孔身轴线的真遇层角, 它与钻孔遇层角的关系可作如下推导。

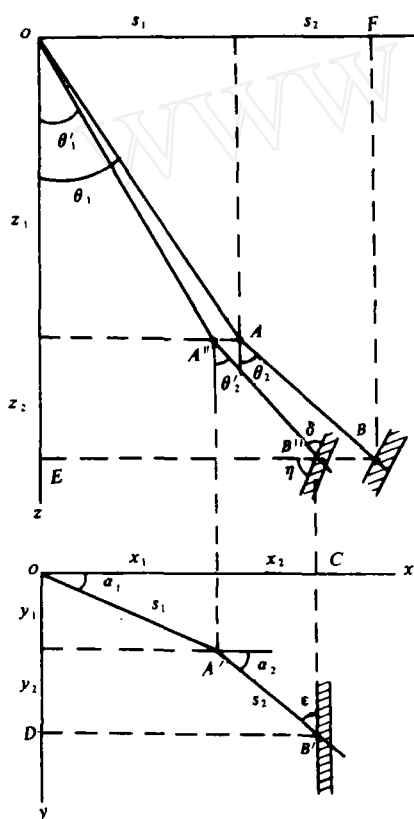


图 1 θ_2 与 θ'_2 关系图

孔轴线遇层角与其垂直投影同矿层倾向线交角的关系

如图 2 所示, AB 是钻孔与矿层相交的一段孔身轴线, AB 与其在层面上的正投影之间的夹角 δ_z 是钻孔的真遇层角, 而 AB 在垂直面上的投影与层面倾向线的交角 δ 不等于 δ_z (除非 $\alpha = 0$)。在三角柱 $BB''EFGH$ 中,

$$\begin{aligned} \cos(90^\circ - \delta_z) &= \cos \theta_2 \cos \eta + \sin \theta_2 \sin \eta \cos \varphi \\ \text{即} \quad \sin \delta_z &= \cos \theta_2 \cos \eta + \sin \theta_2 \sin \eta \cos \varphi \quad (7) \end{aligned}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \alpha \cos \eta = \operatorname{ctg} \epsilon \cos \eta$$

$$\text{即} \quad \varphi = \operatorname{tg}^{-1}(\operatorname{ctg} \epsilon \cos \eta) \quad (4)$$

在四面体 $AEB C$ 中,

$$\sin \lambda = \sin \eta \sin \psi / \sin(90^\circ - \delta_z)$$

$$\text{即} \quad \lambda = \sin^{-1}(\sin \eta \sin \psi / \cos \delta_z) \quad (5)$$

在四面体 $ABCB''$ 中,

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_z / \cos \omega \quad (6)$$

据几何关系知, 当 $\psi + \lambda < 90^\circ$ 时, ω 应为 $\varphi + \lambda$, 当 $\varphi + \lambda > 90^\circ$ 时, ω 应为 $180^\circ - (\varphi + \lambda)$ 。

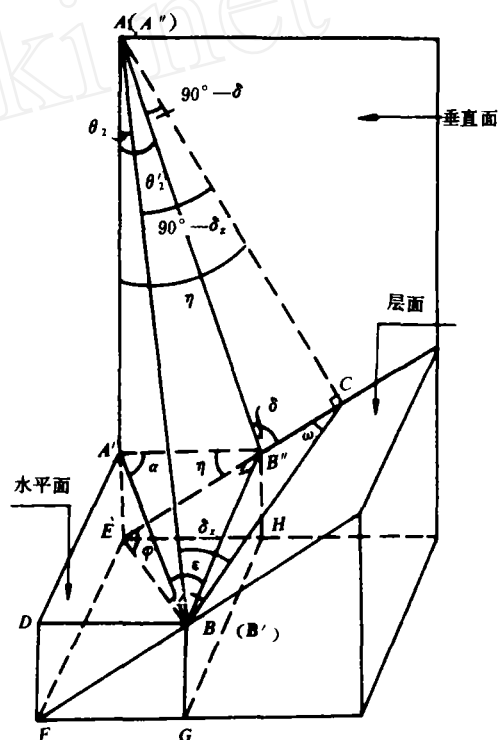


图 2 δ_z 与 δ 的关系图

设计空间弯曲定向钻孔时, 可以根据事先给定的钻孔遇层角 δ_z 、钻孔轴线水平投影与矿层走向线在见矿点处的交角 ϵ 和已知的矿层倾角 η 。按 (6) 式计算出钻孔轴线垂直投影与矿层倾向线在见矿点处的交角 δ , 然后再按 (3) 式求出孔身轴线在见矿点处的真正顶角 θ_2 。

另一种方法是事先直接给定 δ , 按 (3) 式计算出 θ_2 , 然后再根据以下公式校核孔身轴线遇层角 δ_z 是否满足地质要求大于 30° 。

在四面体 $AEB C$ 中,

此处 φ 仍按 (4) 式计算。

有了 θ_2 的数据, 我们就可以仿效设计平面弯曲定向钻孔的方法, 根据矿区钻孔顶角和方位角弯曲强度 (或所用造斜工具的造斜能力), 计算出开孔顶角和方位角, 见矿点沿勘探线的偏距和垂直勘探线的偏距。有了两个偏距的数据, 即能定出开孔位置。

进行以上分析时, 我们把孔身轴线看成是一条空间折线。但是, 实际上孔身轴线一般都是半径单一的圆弧, 或者是半径不同的圆弧连接而成的弧线。因此, 下面将以孔身轴线是弧线为例来说明空间弯曲定向钻孔的设计方法。

空间弯曲定向钻孔孔身轴线的设计方法

空间弯曲定向钻孔孔身轴线设计的全部内容就是: 在已知矿层 (脉) 倾角 η , 见矿点垂深 Z , 钻孔顶角弯曲强度 i_θ 和钻孔方位角弯曲强度 i_a 的前提下, 给定孔身轴线在垂直面上投影与矿层倾向线的交角 δ (或者给定孔身轴线遇层角 δ_z) 和孔身轴线在水平面上投影与矿层走向线在见矿点处的交角 ϵ , 计算出开孔顶角和方位角、开孔点位置、钻孔长度和全曲率。设计图如图 3。

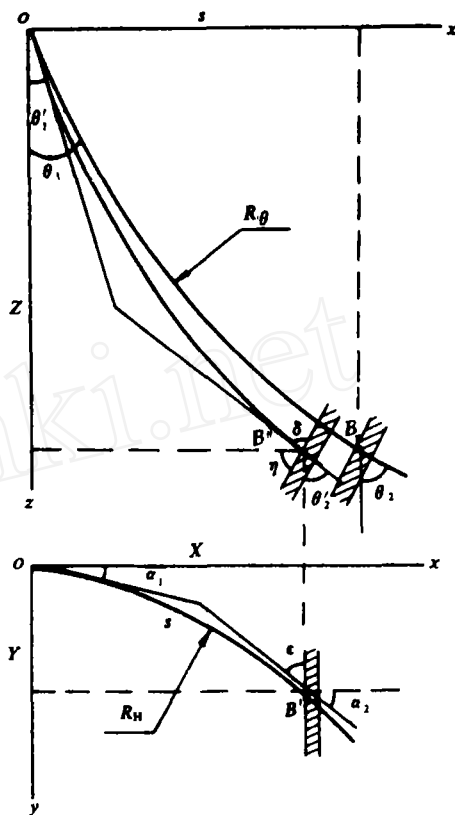


图 3 空间弯曲设计图

一、孔身轴线在垂直面上展开线的设计

1. 见矿点钻孔顶角 θ_2

$$\theta_2 = \text{tg}^{-1} [\text{tg} (\eta + \delta - 90^\circ) / \sin \epsilon], \quad (\text{度}) \quad (8)$$

$$L = 0.01745 R_\theta (\theta_2 - \theta_1) \quad (\text{米}) \quad (12)$$

二、孔身轴线在水平面上投影的设计,

1. 见矿点钻孔方位角 α_2

$$\alpha_2 = 90^\circ - \epsilon \quad (\text{度}) \quad (13)$$

2. 孔身轴线水平投影长度 S

$$S = R_\theta (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (\text{米}) \quad (14)$$

3. 孔身轴线水平投影的曲率 K_H 和曲率半

径 R_H

$$K_H = \Delta \alpha / 57.3 S = \Delta \alpha / 57.3 L \sin [(\theta_1 + \theta_2) / 2] = i_a / 57.3 \sin [(\theta_1 + \theta_2) / 2] \quad (\text{弧度/米}) \quad (15)$$

$$R_H = 57.3 \sin [(\theta_1 + \theta_2) / 2] / i_a \quad (\text{米}) \quad (16)$$

4. 开孔方位角 α_1 因 $i_H = (\alpha_2 - \alpha_1) / S$,

所以 $\alpha_1 = \alpha_2 - i_H S$

$$= \alpha_2 - i_a S / \sin [(\theta_1 + \theta_2) / 2] \quad (\text{度}) \quad (17)$$

5. 见矿点沿勘探线的偏距 x

$$K = \{K_\theta^2 + K_a^2 \sin^2 [(\theta_1 + \theta_2) / 2]\}^{1/2} = \{K_\theta^2 + K_H^2 \sin^4 [(\theta_1 + \theta_2) / 2]\}^{1/2} \quad (\text{弧度/米}) \quad (20)$$

$$i = 57.3 K \quad (\text{度/米}) \quad (21)$$

6. 见矿点垂直勘探线偏距 Y

$$Y = R_H (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (\text{米}) \quad (19)$$

三、孔身轴线全曲率 K 和全弯曲强度 i 的计算

$$\text{或 } i = \gamma/L = \{2\sin^{-1}[\sin^2(\Delta\theta/2) + \sin^2(\Delta\alpha/2)\sin\theta_1\sin\theta_2]^{1/2}\}/L \text{ (度/米)} \quad (22)$$

此处 γ —孔身轴线全弯曲角, 度;

L —孔身轴线长度, 米;

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1, \quad \Delta\theta = \theta_2 - \theta_1。$$

在石油钻井中规定, 孔身全弯曲强度 (或狗腿严重度) 一般不得超过 $5^\circ/100$ 英尺 ($16.4^\circ/100$ 米), 可供岩心钻探参考。全弯曲强度太大, 一方面粗径钻具难以通过弯曲孔段, 另一方面钻杆易发生磨损和折断。但是, 全弯曲强度太小, 又会使造斜孔段太长, 造斜费用增大。

空间弯曲定向孔孔身轴线设计举例

$$\text{按 (4) 式} \quad \varphi = \text{tg}^{-1}(\text{ctg}50^\circ \cos 30^\circ) = 36^\circ$$

$$\text{按 (5) 式} \quad \lambda = \sin^{-1}[(\sin 30^\circ \sin 36^\circ)/\cos 73^\circ] = 46.15^\circ,$$

$$\text{因} \quad \varphi + \lambda < 90^\circ, \quad \text{故} \omega = 36^\circ + 45.15^\circ = 81.15^\circ,$$

$$\text{按 (16) 式} \quad \delta = \text{tg}^{-1}[(\text{tg}73^\circ)/\cos 81.15^\circ] = 87.3^\circ$$

二、孔身轴线在垂直面上展开线的设计

1. 见矿点的孔顶角

$$\text{按 (8) 式} \quad \theta_2 = \text{tg}^{-1}\{\text{tg}(30^\circ + 87.3^\circ - 90^\circ)/\sin 50^\circ\} = 33.97^\circ$$

2. 孔轴线在垂直面上展开线曲率及曲率半径

$$\text{按 (9) 式} K_\theta = 0.035/57.3 = 0.000618 \text{ 弧度/米} \quad \text{按 (10) 式} R_\theta = 57.3/0.035 = 1637.14 \text{ 米}$$

$$\text{3. 开孔顶角} \quad \text{按 (11) 式} L = 0.010745 \times 1637.14 \times (33.97 - 11.09) = 653.64 \text{ 米}$$

三、孔身轴线水平投影的设计

$$\text{1. 见矿点钻孔方位角} \quad \text{按 (13) 式} \alpha_2 = 90^\circ - 50^\circ = 40^\circ$$

2. 孔身轴线水平投影长度

$$\text{按 (14) 式} S = 1637.14 (\cos 11.09^\circ - \cos 33.97^\circ) = 248.84 \text{ 米}$$

3. 孔身轴线水平投影曲率和曲率半径

$$\text{按 (15) 式} K_H = 0.02/57.3 \sin [(11.09^\circ + 33.97^\circ)/2] = 0.0009109 \text{ 弧度/米}$$

$$\text{按 (16) 式} R_H = 1/K_H = 1097.82 \text{ 米}$$

4. 开孔方位角

$$\text{按 (17) 式} \alpha_1 = 40^\circ - 0.02 \times 248.84 / \sin [(11.09^\circ + 33.97^\circ)/2] = 27.01^\circ$$

5. 见矿点沿勘探线的偏距

$$\text{按 (18) 式} x = 1097.82 \times (\sin 40^\circ - \sin 27.01^\circ) = 207.09 \text{ 米}$$

6. 见矿点垂直勘探线的偏距

$$\text{按 (19) 式} Y = 1097.82 \times (\cos 27.01^\circ - \cos 45^\circ) = 137.10 \text{ 米}$$

四、孔身轴线全曲率和全弯曲强度计算,

按 (20), (21), (22) 式分别有:

$$K = \{0.0006108^2 + 0.0009109^2 \sin^4 [(11.09^\circ + 33.97^\circ)/2]\}^{1/2} = 0.0006253 \text{ 弧度/米}$$

$$i = 57.3 K = 57.3 \times 0.0006253 = 0.036 \text{ 度/米}$$

$$i = 2\sin^{-1}\{\sin^2[(33.97^\circ - 11.09^\circ)/2] + \sin^2[(40^\circ - 27.01^\circ)/2]\} \times \sin 11.09^\circ \sin 33.97^\circ\}^{1/2} / 653.64 = 0.0356 \text{ 度/米}$$

已知—矿体倾角 $\eta = 30^\circ$, 要求钻孔见矿点垂直深度 $Z = 600$ 米, 钻孔顶角自然弯曲强度 $i_\theta = 0.035^\circ/\text{米}$, 方位角自然弯曲强度 $i_\alpha = 0.02^\circ/\text{米}$ 。如果给定钻孔轴线遇层角 $\delta_z = 73^\circ$, 孔身轴线水平投影与矿体走向线的交角 $\varepsilon = 50^\circ$ 。试设计空间弯曲定向钻孔, 确定开孔位置 x 和 y , 开孔顶角 θ_1 和开孔方位角 α_1 , 并计算钻孔长度 L 。

一、孔身轴线垂直投影与矿体倾向线的交角 δ 的确定

如果直接给定孔身轴线在垂直面上的投影与矿体倾向线的交角 $\delta = 87.3^\circ$ ，则按(7)式校核 δ_z 是否大于 30° 。

$$\text{按(7)式 } \delta_z = \sin^{-1}(\cos 33.97^\circ \cos 30^\circ + \sin 33.97^\circ \sin 30^\circ \cos 36^\circ) = 70.78^\circ$$

由此可见,该值与原先给定的 δ_z 相差 2.22° ,这一误差是由于我们把空白诸角度归结为球面三角关系,并采用了球面三角正弦和余弦公式进行运算,而图3中 $\triangle EBC$ 是平面三角形,被看作是球面三角形。在球心三面角 $AEB C$ 中 θ_1, θ_2 和 η 的值越大,则运算结果的误差也越大。大量的计算表明,如果上述诸角度的值小于 30° ,则误差将不超过 2° ,我们在设计时先给定 δ ,然后校核 δ_z 是否大于 30° ,倘若运算结果 δ_z 的值大大超过 30° ,则几度误差对满足地质要求的 δ_z 大于 30° 不会有什么影响。

据计算结果,可绘出孔身轴线在垂直面上的展开线和在水平面上的投影(图4)。

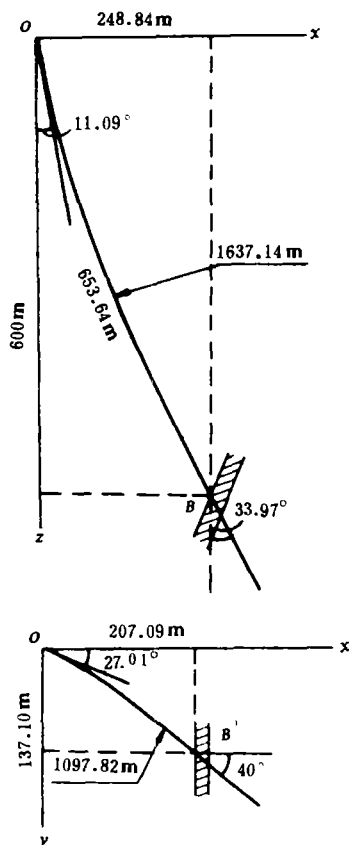


图4 据计算结果绘制定向孔空间弯曲图

据此图或公式可确定出孔深任意点的顶角与方位角数据,例如,孔深300米处的顶角及方位:

$$\theta_{300} = \theta_1 + \Delta\theta = \theta_1 + L_{300}/0.01745R_H$$

$$= 11.09^\circ + 300/0.01745 \times 1637.14 = 21.59^\circ$$

$$\alpha_{300} = \alpha_1 + \Delta\alpha = \alpha_1 + S_{300}/0.01745R_H$$

$$\begin{aligned} \text{而 } S_{300} &= R_H(\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \\ &= 1637.14 \times (\cos 11.09^\circ - \cos 21.59^\circ) \\ &= 84.29 \text{米} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{故 } \alpha_{300} &= 27.01^\circ + 84.29/0.01745 \times 1097.82 \\ &= 31.41^\circ \end{aligned}$$

如定向钻孔在300米处的测斜数据与图线或公式结果不符,则表明孔已离开了设计轨道,应及时采取纠偏等措施。

本法不仅适用于设计孔身轴线为单一圆弧或复合圆弧线的空间弯曲定向钻孔,而且适用于设计上直下弯型或上弯下直型空间弯曲定向钻孔。如果设计上直下弯型孔身轴线,则先求出钻孔直线段终点(也是钻孔弯曲段的起点)的座标 x, y, z 。开孔位置为 $x+X, y+Y$,见矿点垂深为 $z+Z$ 。

$$\begin{aligned} x &= L_o \sin\theta_1 \cos\alpha_1 \\ y &= L_o \sin\theta_1 \sin\alpha_1 \\ z &= L_o \cos\theta_1 \end{aligned} \quad (23)$$

式中 L_o —钻孔直线段长度;

θ_1, α_1 —钻孔直线段终点(弯曲线起点)的顶角和方位角。

如果设计上弯下直型孔身轴线,则先求出钻孔弯曲段终点坐标到钻孔直线段终点坐标的增量 x', y', z' 。开孔位置为 $X+x', Y+y'$,见矿点垂深为 $Z+z'$ 。

$$\begin{aligned} x' &= L'_o \sin\theta_2 \cos\alpha_2 \\ y' &= L'_o \sin\theta_2 \sin\alpha_2 \\ z' &= L'_o \cos\theta_2 \end{aligned} \quad (24)$$

式中 L'_o —钻孔直线段长度;

θ_2, α_2 —钻孔弯曲段终点(直线段起点)的顶角和方位角。

参 考 文 献

- [1] Е. Л. Лиманов и др. Направленное бурение разведочных скважин 1978
- [2] 吴光琳 定向钻探分枝孔孔身剖面的设计问题《探矿工程》1984. No 1