

地层造斜力的计算与应用

杨 勋 尧

(四川石油管理局钻采工艺研究所)

摘 要

作者根据地层各向异性造斜理论,推导了地层造斜力的直接计算模式。利用这个模式不仅能简化钟摆钻具控制井斜的计算,准确而又方便地计算确定地层各向异性指数,还可以结合钻柱力学对钻头上的总偏斜力进行定量分析,利用这个模式作者还提出了定长度钟摆钻具控制井斜的计算方法。多口井的现场验证表明,作者提出的计算模式和方法是符合试验地区钻井实际情况的。

钻井实践表明,在影响井斜的两个基本因素即钻柱力学和钻头与岩石的相互作用力中,后者往往是主要的。其根据是在不同的地区和不同的构造部位甚至不同的地层,井斜问题的程度是显著不同的。当前有关钻柱力学的研究成果已经很多了,但对钻头和岩石的相互作用力,即一般通称的地层造斜力的研究却不够。近几年来,作者结合井斜控制实践,对这个问题进行了研究,提出了地层造斜力的简单计算模式,并进行了现场验证。

地层造斜力的计算模式

在50年代初期, A·鲁宾斯基和 H·B·伍兹就已经分析过地层因素对井斜的影响,并在他们的钟摆钻井计算图版中反映出来,但他们并没有提出地层造斜力 F_f 的直接计算式。

根据作者多年的实践经验认为,用鲁宾斯基等提出的地层各向异性理论,解释岩性比较稳定的地层的井斜机理是比较合乎实际情况的。在四川地区的井斜控制中,一个比较长的井段或层段的井斜趋势是特别值得注意的。由于相邻岩层的岩石硬度的差异一般并不很大,因而在岩层交界面上可能出现的井斜的变化在整个井斜问题中并不是主要的。

根据地层各向异性理论,利用各向异性指数 h 的概念和井斜是钻头前进的轨迹偏离原来并眼轴线方向的基本定义,可以很方便地推导出地层造斜力 F_f 的简单计算式:(公式推导见附录)

$$F_f = \frac{1}{2} h \sin 2(\beta - \alpha) \cdot P \quad (1)$$

或

$$F_f = K \cdot P$$

式中 β 是地层倾角, α 是井斜角, P 是钻压,而 K 就是反映地层造斜能力大小的综合造斜系数,它取决于地层的各向异性指数 h 和地层相对于井底平面的倾斜角,即相对地层倾角 $(\beta - \alpha)$ 。 K 和 h 成正比;而 K 和相对地层倾角 $(\beta - \alpha)$ 成正弦函数关系(图1),当 $(\beta - \alpha)$ 为 45° 时 K 有极大值。

从式(1)可知,地层造斜力 F_t 和钻压 P 成正比,当 $\alpha = \beta$ 时,地层造斜力为0值,而 $\alpha > \beta$ 时,地层力实际上是降斜力。

式(1)所反映的各个与井斜相关的参数与井斜趋势的关系,在钻井实践中可以得到充分的证实。同时它和鲁宾斯基钟摆钻井计算图版中所反映的是基本相同的。

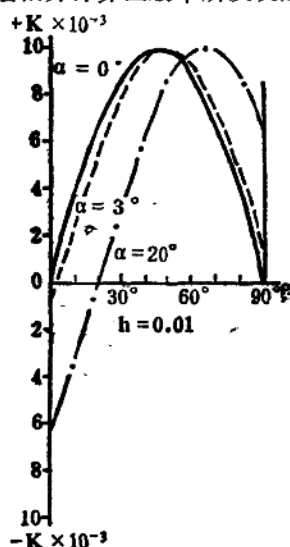


图 1

钻头上总的偏斜力的计算

利用钻柱力学的研究成果可以分析计算各种组合在特定钻井条件下钻头上的偏斜力或者合力角,从而对组合的特性作出评价。但是,由于没有考虑钻头和岩石的相互作用力即地层造斜力的重要作用,各种组合的实际钻井特性和仅仅根据钻柱力学所作的评价往往是不相符的。

利用地层造斜力的计算式就可能对组合在特定钻井条件下(包括地层倾角和各向异性指数)钻头上的总的偏斜力进行定量的分析。在这个基础上能够比较准确地预测组合所钻地层的特性。所以,提出一个比较符合客观实际情况的 F_t 的直接的计算模式是很有实际意义的。

按照W·B·勃莱特雷提出的光钻铤下部钻柱的小车模型(图2),同时考虑钻头与岩石的相互作用力,钻头上总的横向偏斜力 F_H 应是地层造斜力 F_t ,弯曲引起的偏斜力 F_B 和钟摆力 F_P 三部分的代数和:

$$F_H = F_t + F_P + F_B \quad (2)$$

按照比较流行的观点,当 F_H 的方向指向上井壁时,井斜就会增加,当 F_H 的方向指向下井壁时井斜就降低,而当 $F_H = 0$,即钻头上的合力指向与井眼轴线重合时,井眼就稳定不变。但是,钻头钻进方向是合力方向的结论是在忽略钻头偏斜(下部钻柱弯曲偏斜引起)对井斜影响的前题下提出来的。

必须特别指出,由于牙轮钻头的结构设计主要是沿轴线方向钻进,所以钻头偏斜对井斜的影响是不能任意忽略的。作者有这样的经验:如果钻头突然出现严重偏斜,往往造成井斜急剧增加的严重后果。根据计算分析和经验表明,当采用钟摆钻具(特别是用扶正器作支点

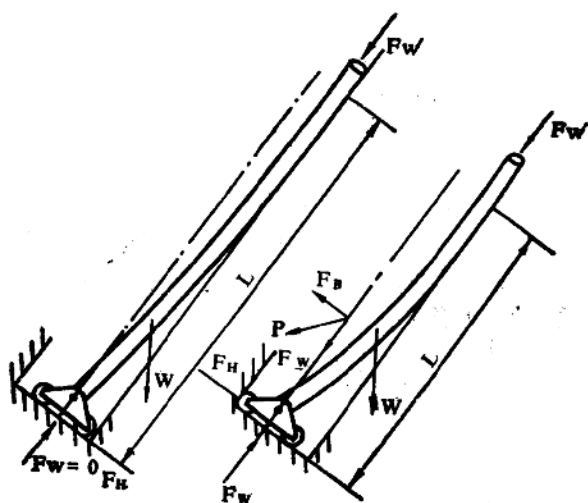


图 2

的钟摆钻具) 钻井时, 钻头偏斜对井眼曲率的影响很小, 可以忽略 (但下部钻柱弯曲引起的偏斜力 F_B 是不能忽略的), 这时可以近似的把钻头合力方向当作钻头钻进方向。但是如果采用满眼组合, 钻头偏斜对井眼曲率的影响就显著得多, 钻头的实际钻进方向不一定是合力的方向。这时就要综合考虑钻头偏斜和钻头在总的横向偏斜力的作用下的侧向切削影响, 作者在已经发表的文章中已经讨论了这个问题。

根据钻柱力学, 定量计算 F_P 和 F_B 是不困难的:

$$F_P = \frac{1}{2} L q \sin \alpha \quad (3)$$

$$F_B = P \cdot \sin \theta_B \quad (4)$$

上二式中, L 是切点以下钻铤长度, q 是钻铤单位长度的重量, θ_B 是钻头偏斜角即钻头轴线与井眼轴线的夹角。

地层各向异性指数 h 的确定

不同岩性的地层, h 值也是不同的。岩性一致的地层, h 应是一个定值。虽然鲁宾斯基等利用岩石在垂直层面和平行层面两个方向可钻性差异给地层各向异性指数下明确的定义, 但它不可能通过地面的岩石力学试验求得, 只有用实钻资料作分析计算。

当井斜稳定即钻头总的偏斜力 $F_H = 0$ 时, 由 (2) 式可得钻头上横向力的平衡方程 (按一般情况 F_P 是降斜力, F_P 和 F_B 均为造斜力):

$$\frac{1}{2} L \cdot q \cdot \sin \alpha_s - \frac{1}{2} P h \sin 2(\beta - \alpha_s) - P \sin \theta_B = 0 \quad (5)$$

式中的 α_s 是稳定井斜角或称平衡角。

根据纵横弯曲连续梁理论

$$L^4 = \frac{24EI \cdot r}{q \sin \alpha_s \cdot x} \quad (6)$$

$$\theta_B = \frac{L^3 q \sin \alpha_s \cdot x}{24EI} + \frac{r}{L} \quad (7)$$

上二式， EI 是钻铤的抗弯刚度， r 是钻铤和井眼间的视半径， X 是一个超函数，代表纵向力对横向弯曲的影响。

用逐步逼近法可以求解 L 和 θ_B 的数值。

由(5)式可以导出 h 的计算式：

$$h = \frac{\frac{1}{2} L q \sin \alpha_s - P \sin \theta_q}{\frac{1}{2} P \sin 2(\beta - \alpha_s)} \quad (8)$$

显然，利用实际地质和钻井资料可以确定井斜稳定井段地层的各向异性指数值（注意：地层倾角 β 和钻压 P 亦应是稳定的）。

简化钟摆钻井的计算

由(6)式可获得用光钻铤钻井时对应任何稳定井斜角 α_s 的钻压计算式：

$$P = \frac{\frac{1}{2} L q \sin \alpha_s}{\frac{1}{2} h \sin 2(\beta - \alpha_s) + \sin \theta_B} \quad (9)$$

当用扶正器作支点时，钟摆钻井的计算仍然可以简化，这里作者从实际情况出发，把扶正器模拟为固定支承（这种模拟对于接触长度较长的扶正器是适合的，在施工当中使扶正器支承状况更接近固定支承也是有利的），钻头仍模拟为铰支（图3）。

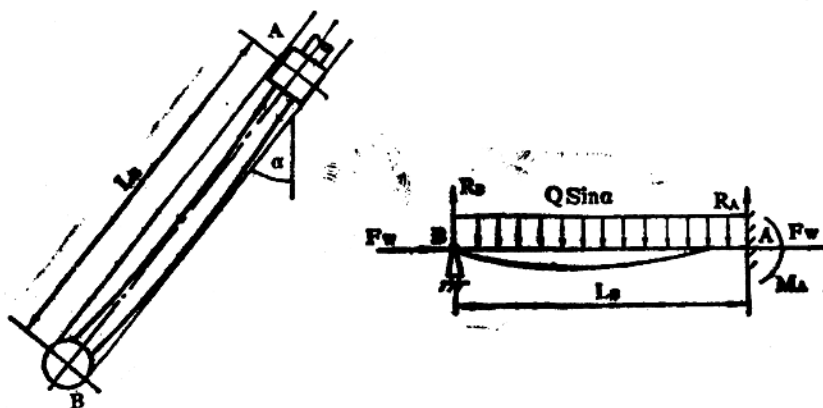


图 3

根据纵横弯曲理论可以得到扶正器与井眼直径相同时它的最大安放高度 L_s 的计算式：

$$L_s = \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \quad (10)$$

式中

$$a = \pi^2 q \sin \alpha$$

$$b = 82.04 Pr$$

$$c = -184.6 \pi^2 r EI$$

用此式的计算结果与鲁宾斯基无因次图版查算值是相符的（附表1）。

附表1

钟摆钻具支点扶正器的计算高度，米

计算条件：8-1/2"眼，7"钻铤，洗井液比重1.2，扶正器与井眼间隙为0。

钻压 (吨)	井 斜 角		
	3°	10°	15°
5	26.25 (~25)	19.05 (~19)	17.3 (~17)
10	24.31 (~24)	18.49 (~18.5)	(~17)
15	23.46 (~23)	18.30 (~18)	16.70 (16.5)

括号内的数字是鲁宾斯基无因次图版查算值。

由于把扶正器简化为固定支承， F_P 和 θ_B 以及稳定井斜时钻压的计算亦应作相应的修正：

$$F_P = \frac{3}{8} L_s q \sin \alpha \quad (11)$$

$$\theta_B = \frac{L_s^3 q \sin \alpha \cdot \pi}{48 EI} \quad (12)$$

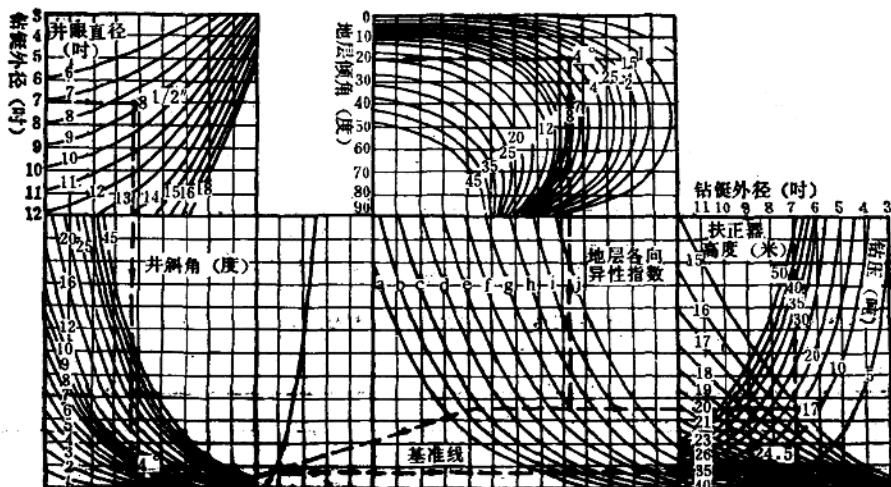
$$P = \frac{\frac{3}{8} L_s q \sin \alpha_s}{\frac{1}{2} h \sin 2(\beta - \alpha_s) + \sin \theta_B} \quad (13)$$

把(10)、(12)及(13)三式联解（此时 $\alpha = \alpha_s$ ），就可以求出任何计算稳定井斜角时扶正器的安放高度和钻压。利用程序计算器可以很方便地得到计算结果。在实际施工中也可以用图版确定 L_s 和钻压 P 。附图1是按作者提出的简化计算方法制作的计算图版，它比鲁宾斯基等求解同一问题的计算图版（需经三次转换）简单方便得多，而计算结果是很相近的。

用简化计算方法同样可以作出与鲁宾斯基图版相似的光钻铤钟摆钻并计算图（附图2），它们的计算结果亦基本上是相同的。

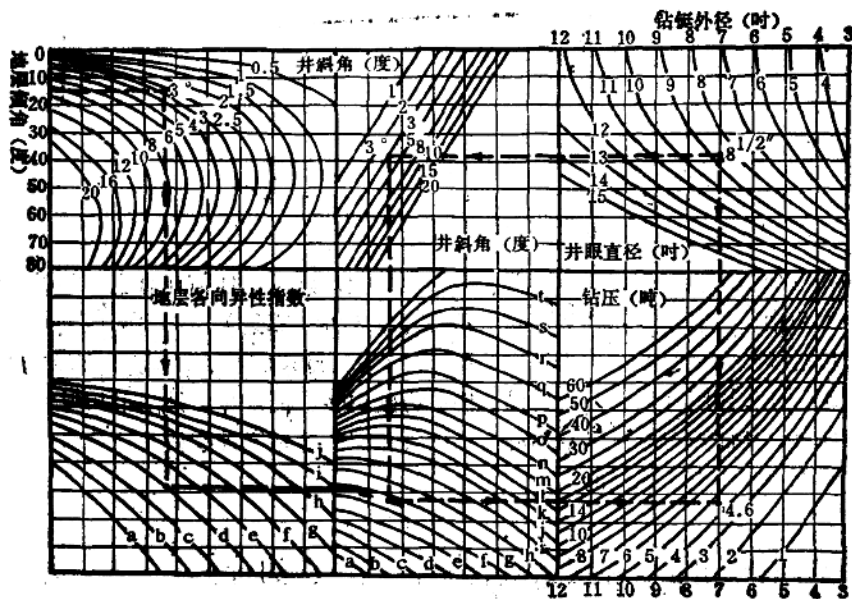
定长钟摆钻具稳斜钻进钻压的计算

如果没有可以直接安放在钻铤单根中间任何位置的特殊扶正器，要想按上节计算的最合理的位置安放扶正器是很困难的。所以目前在现场大多采用一定长度如18米左右（两根单根）或27米左右（三根单根）的钟摆钻具。鲁宾斯基等没有讨论过用定长钟摆钻具稳斜钻进时钻压和井斜的计算方法。利用作者提出的方法可以很方便的解决这个问题：钻压可以用(13)



附图1 钟摆钻井支点扶正器高度和钻压计算图

图中举例: 8-1/2"井眼7"钻铤
 地层倾角20°计划井斜角4°
 h值0.017 (g级)
 计算结果: 扶正器高度24.5米
 钻压17吨



附图2 光钻铤钟摆钻井计算图

图中举例: 8-1/2"井眼7"钻铤
 地层倾角15°计划井斜角3°
 h值0.001 (d级)
 计算结果: 钻压4.6吨

式计算, 式中的 L_0 应改为所采用的定钟摆长度 L_{dp} , 但同时还要根据计算的钻压用(10)式校核 L_{dp} 是否小于在该钻压下扶正器计算最大允许安放高度, 以保证 L_{dp} 段钻铤在纵横载荷作用下不致于与井壁接触。

用本文提供的方法还可以根据用定长钟摆钻具钻进的实钻资料, 用前述(8)式的修正式计算出稳斜井段地层各向异性指数:

$$h = \frac{\frac{3}{8} L_{dp} q \sin \alpha_s - P \sin \theta_B}{\frac{1}{2} P \sin 2(\beta - \alpha_s)} \quad (14)$$

这也是鲁宾斯基过去没有研究而又很有实际意义的问题, 鲁宾斯基提供的方法只能在作光钻铤钻进的前提下推算地层的 h 值的分级。

现场验证

作者近两年在川东地区的一些井上进行了用钟摆钻具(主要是定长钟摆钻具)定量控制井斜的试验, 取得了满意的结果。

试验方法是根据地层倾角 β 、各向异性指数 h 和对井斜控制的要求(即计划井斜角 α), 以及实际钻具组合。计算出理论钻压并据此施加钻压, 然后测量实际井斜与计划井斜对比。附表2列出了部分井的试验数据, 显然实际井斜和计划井斜基本上是一致的。

在计算钻压时, 地层倾角是根据地震提供的构造剖面资料确定的。而各地层的各向异性指数则是根据该地区已钻的数十口井的实际资料, 用前述(8)式或(14)式作单井单层计算, 并进行统计处理得到的。现场验证表明作者提出的地层造斜力 F_f 等计算模式和方法是符合试验地区钻井实际情况的。

结 论

1. 作者根据地层各向异性理论, 推导出的地层造斜力 F_f 计算模式所反映的各个影响参数与井斜趋势的关系, 在五口井的钻井实践中已经得到证实, 是基本正确的。
2. 利用作者提出的模式可以大大简化钟摆钻井的计算。特别是定长钟摆钻具稳斜钻进钻压和各向异性指数的计算方法是过去的研究者没有讨论过而又很具有实际意义的。这些方法经五口井的现场验证是可行的。
3. 地层造斜力的定量计算和钻柱力学结合为定量的分析钻头侧向切削从而解决井眼曲率的定量计算和控制创造了条件, 这方面还要作很多研究工作。

附表 2

钟摆钻具重量控制井斜试验数据

井号	井 段 米	地 层	β	h	钻 具 组 合	钻 压, 吨		井 斜	
						计 算	实 际	计 划	实 际
59	300~383	J ₀	40°	0.040	Δ $12\frac{1}{4}''$ $5'' \times 27''$ $\frac{V}{\Delta}$	7.94	7~9	4°	3°40'
	824~906	J ₁	40°	0.026	同 上	8.9	9~10	3°	2°30'
	1471~1580	J ₂	35°	0.010	Δ $12\frac{1}{4}''$ $9''$	21	20	4°	4°30'
	1580~2470	T ₀	30°	0.023	同 上	19	20	6°	6°30'
60	1166~1482	J ₁	30°	0.026	Δ $12\frac{1}{4}''$ $9'' \times 27''$ $\frac{V}{\Delta}$	19.5	20	6°	5°30'
	1680~2047	J ₂	30°	0.010	同 上	26.5	25	4°	4°30'
	2047~2751	T ₀	30°	0.023	Δ $12\frac{1}{4}''$ $9''$	23.7	20~23	7°	7°30'
	3700~4800	P	30°	0.017	Δ $8\frac{1}{4}''$ $7''$	17	15~16	8°	8°30'
70	1520~1700	T _r	35°	0.023	Δ $12\frac{1}{4}''$ $5'' \times 27''$ $\frac{V}{\Delta}$	10.5	10	3°	3°
66	2758~2867	T _r	10°	0.023	Δ $12\frac{1}{4}''$ $5''$	19	20~22	2°	1°30'
	2867~3382	T _c	10°	0.023	Δ $12\frac{1}{4}''$ $5'' \times 27''$ $\frac{V}{\Delta}$	21.5	20~23	2°	1°30'
26	158~1000	J ₀	8°	0.023	同 上	14	15~16	1°	30'~1°
	1000~1311	J _c	8°	0.023	同 上	23.6	23	2°	1°30'
	1311~1925	J _a	8°	0.026	同 上	23	20~23	2°	1°30'~2°
	1975~2446	J _b	8°	0.01	同 上	23.6	25	1°	1°30'~2°
	2446~3320	T _{r-c}	8°	0.023	同 上	23.6	23	2°	2°

附录 地层造斜力 F_f 计算式的推导

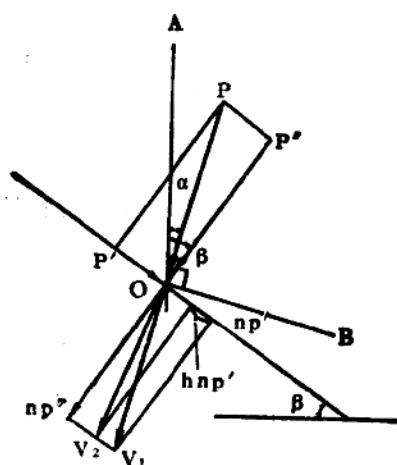


图 4

如图 4 所示：设地层倾角为 β ，井斜角为 α ，这里暂不考虑钻具弯曲，设钻压 P 的作用方向与井眼轴线重合。

把钻压 P 分解为与地层面平行的分力 P' 和与层面垂直的分力 P'' 。由图可知：

$$P' = P \sin(\beta - \alpha) \quad (15)$$

$$P'' = P \cos(\beta - \alpha) \quad (16)$$

如果是在各向同性地层中，平行层面方向的可钻性 s_1 与垂直层面方向的可钻性 s_2 相同，地层没有造斜作用。钻头在两个方向上的位移或钻速分别为 np' 和 np'' 。其中 n 是比例系数，显然这时钻头的位移方向 (V_1 的指向) 与钻压作用方向一致，井眼不会发生偏斜。

但是，如果是在各向异性地层中，情况就大不一样，由于平行层面方向的可钻性比垂直层面方向的可钻性低，即 s_1 小于 s_2 ，钻头在平行层面方向的位移要比在各向同性地层小，此位移或钻速可计为 $h'np'$ ，其中 h' 为小于 1 的正值因素。

按照一般定义， h' 即是平行和垂直层面方向岩石可钻性之比值：

$$h' = \frac{s_1}{s_2} \quad (17)$$

而所谓岩石的各向异性指数 h 就可写为：

$$h = 1 - h' = 1 - \frac{s_1}{s_2} \quad (18)$$

各向异性指数 h 反映了地层两个方向上可钻性差异的程度，如设 $h = 0.1$ ，即意味着平行于层面方向的可钻性比垂直层面方向的可钻性低 10% 这时 h' 等于 0.9，意即 s_1 只为 s_2 的 90%。

由以上分析及 (15) 式，在各向异性地层中，钻头在平行层面方向的位移或钻速可记为：

$$n \sin(\beta - \alpha) \cdot P - h n \sin(\beta - \alpha) \cdot P$$

显然，由于地层的各向异性，钻头在平行层面方向的位移或钻速将比各向同性地层减少一定量，即：

$$h n \sin(\beta - \alpha) \cdot P$$

这时钻头的位移或钻速将变为 V_2 ，显然，钻头将偏离井眼轴线而产生井斜变化，这就是一般所说的地层造斜作用。去掉比例系数 n ，就可以得平行层面方向的地层造斜力 F'_t 的表达式：

$$F'_t = h \sin(\beta - \alpha) \cdot P \quad (19)$$

投影到井眼轴线垂直的方向（OB轴），可得一般地层造斜力的表达式：

$$F_t = h \sin(\beta - \alpha) \cdot \cos(\beta - \alpha) \cdot P \quad (20)$$

按倍角公式，上式化作：

$$F_t = \frac{1}{2} h \sin 2(\beta - \alpha) \cdot P \quad (21)$$

符 号 表

- F_t 地层造斜力，公斤；
- h 地层各向异性指数（无量纲）；
- β 地层倾角，度；
- α 井斜角，度；
- P 钻压，公斤；
- K 地层综合造斜系数（无量纲）；
- F_H 钻头上总的横向偏斜力，公斤；
- F_B 作用在钻头上的弯曲偏斜力，公斤；
- F_p 作用在钻头上的钟摆力，公斤；
- L 钻铤和井壁的切点与钻头之间的距离，米；
- q 单位长度钻铤的重量，公斤/米；
- θ_B 钻头偏斜角即钻头轴线与井眼轴线的夹角，度；
- EI 钻铤的抗弯刚度，公斤·米²；
- α_s 稳定井斜角（或称平衡井斜角），度；
- r 钻铤和井眼间的视半径，米；
- X 超越函数

$$x = \frac{3(\operatorname{tg} u - u)}{u^3}$$

$$u = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}}$$

- L_s 钟摆钻具支点扶正器的计算高度，米；
- L_{sp} 定长钟摆钻具支点扶正器高度，米；
- P' 与地层平面平行的钻压分力，公斤；

- P'' 与地层平面垂直的钻压分力, 公斤;
 n 钻速(或位移)与钻压之间的比例系数;
 S_1 平行层面的岩石可钻性;
 S_2 垂直层面的岩石可钻性;
 h' S_1 与 S_2 之比值;
 V_1 在各向同性地层中钻头钻进的方向;
 V_2 在各向异性地层中钻头钻进的方向;
 F' 平行层面方向的地层造斜力。

参 考 文 献

- [1] Lubinski, A. and Woods, H.B., "Factors Affecting The Angle of Inclination and Doglegging in Rotary Boreholes", (Drilling and Production Practices), API (1953).
 [2] Bradley, W.B., "Factors Affecting The Control of Borehole Angle in Straight and Directional Wells". (J.P.T.) 1975, No6, 679~688.
 [3] 杨勋尧, "满眼防斜钻具的最优组合设计", 《石油学报》1982年增刊。
 [4] S. 铁摩辛柯著 《弹性稳定理论》, 中译本。
 [5] 白家祉, "应用纵横弯曲连续梁理论求解钻具组合的受力与变形", 《国际石油工程会议论文集》, 石油工业出版社, 1982年3月。