

地层各向异性的评估方法

高德利*

(石油大学 北京)

提 要

只有正确地理解地层的各向异性性质,才能在钻井过程中科学地利用这一特性。本文根据钻头与正交各向异性地层相互作用模型,导出了反演计算地层各向异性的物理模型。将该模型与下部钻具组合分析程序相结合,便可利用井史资料定量评估所钻地层的各向异性性质,评估方法简单易行,便于现场应用。

主题词 地层各向异性 岩石可钻性 定向井 井眼轨迹控制

1 引言

在钻井过程中,所钻地层的各向异性及几何产状,是影响井斜变化和方位漂移的重要因素之一^[1~5]。如何切实可行地定量评估这些地层因素,是钻井技术人员十分关心的迫切问题。本文研究一种钻后分析方法,利用井史资料评估所钻地层的各向异性性质。

地层的各向异性可用岩石各向异性指数来表征,后者又可根据岩石可钻性概念来定义。假设所钻地层具有正交各向异性,沿地层法向、倾向和走向的岩石可钻性分别表示为 D_n 、 D_{dip} 和 D_{str} ,则这种地层的岩石各向异性指数有两个(I_{r1} 和 I_{r2}),可定义如下:^[1]

$$\left. \begin{aligned} I_{r1} &= D_{dip}/D_n \\ I_{r2} &= D_{str}/D_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

若 $I_{r1}=I_{r2}=I_r$,则正交各向异性地层退化为横观各向同性地层。

本文的研究可为现场技术人员提供一个确定 I_{r1} 和 I_{r2} 的实用方法。

2 物理模型

由于钻头各向异性和地层各向异性的影响,从而导致钻头的钻进方向不与钻头机械合力方向相一致。利用下部钻具组合分析程序,可以计算钻头的机械作用力及其转角,但要确定任一状态下钻头的钻进方向,还必须综合地层和钻头的各向异性等因素的影响,建立一个合理的钻头与地层相互作用模型。为此,取OXYZ笛卡儿坐标系(图1),其中OXY表示井底平面,

* 高德利, 1958年生, 1981年毕业于华东石油学院开发系, 钻井专业, 1990年获工学博士学位, 现为石油大学副教授。
通讯地址: 北京902信箱。邮政编码: 100083。

X轴指向井眼低边, Y轴与之正交, Z轴与井底平面中心法线重合。 F_x 、 F_y 、 F_z 表示钻头对地层的机械净作用力分量; V_x 、 V_y 、 V_z 表示机械钻速分量; \vec{e}_0 表示钻头指向。 F_x 和 V_x 以增斜作用为正; F_y 和 V_y 以减方位作用为正; F_z 可取净钻压值(钻压值减去岩石的门限压力值), V_z 为相应的机械钻速。按文献[1]关于钻头各向异性及地层各向异性的定义, 通过力学分析及数学推演, 可得钻头与正交各向异性地层相互作用的三维钻速方程如下:

$$\begin{aligned} \{V\} &= D_n \{T\} \{F\} \\ \{V\} &= [V_x \ V_y \ V_z]^T \\ \{F\} &= [F_x \ F_y \ F_z]^T \\ [T] &= \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} = (t_{ij})_{3 \times 3} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, D_n 表示沿地层法向的可钻性; $[T]$ 是一个三阶非对称矩阵, 其中的元素表达如下:

$$\begin{aligned} t_{ij} &= I_b I_{r1} \delta_{ij} + I_b (1 - I_{r1}) a_{ij} + I_{r1} (1 - I_b) b_{ij} + I_b (I_{r2} - I_{r1}) C_{ij} \\ &\quad + (1 - I_{r1}) (1 - I_b) \sum_{k=1}^3 a_{ik} b_{kj} + (1 - I_b) (I_{r2} - I_{r1}) \sum_{k=1}^3 C_{ik} b_{kj} \\ \delta_{ij} &= \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, I_b 表示钻头各向异性指数; I_{r1} 和 I_{r2} 按式(1)定义; a_{ij} 和 C_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$)是与井斜角、井斜方位角、地层倾角及地层走向方位角有关的元素; b_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$)是与钻头转角有关的元素。关于 I_b 的定义及 a_{ij} 、 b_{ij} 、 C_{ij} 的表达式详见文献[1]。

$$\begin{aligned} \text{令} \quad \begin{cases} d_{ij} = I_b (\delta_{ij} - a_{ij}) + (1 - I_b) \left(b_{ij} - \sum_{k=1}^3 a_{ik} b_{kj} \right) \\ e_{ij} = I_b C_{ij} + (1 - I_b) \sum_{k=1}^3 C_{ik} b_{kj} \\ f_{ij} = I_b a_{ij} + (1 - I_b) \sum_{k=1}^3 a_{ik} b_{kj} \\ \Delta I_r = I_{r2} - I_{r1} \\ F_1 = F_x \\ F_2 = F_y \\ F_3 = F_z \\ V_1 = V_x \\ V_2 = V_y \\ V_3 = V_z \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

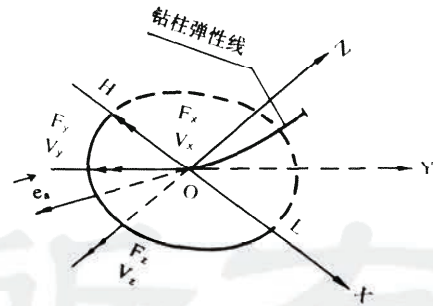


图 1 钻头与地层相互作用
Fig.1 Rock-bit interaction

将式(4)代入式(3)中, 则有

$$\begin{aligned} t_{ij} &= I_{r1} d_{ij} + \Delta I_r e_{ij} + f_{ij} \\ &\quad (i, j = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (5)$$

假设钻头机械作用力为 $\{F_b\} = [F_{b1} \ F_{b2} \ F_{b3}]^T$, 其中, $F_{b1} = S F_x$ 表示钻头机械造斜力, 以

增斜力为正, $F_{b2}=SF_Y$ 表示钻头机械变方位力,以减方位作用为正, $F_{b3}=W_{0b}$ 表示轴向钻压,恒为正值。用 S_r 表示钻头侧切岩石的门限压力,它恒取正值。这样可将式(2)中的 $\{F\}$ 表达为如下形式:

$$\begin{cases} \{F\} = \{F_b\} - S_r \begin{Bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{Bmatrix} \\ \lambda_1 = \text{SGN}(SF_x) = \begin{cases} 1, & SF_x > 0 \\ 0, & SF_x = 0 \\ -1, & SF_x < 0 \end{cases} \\ \lambda_2 = \text{SGN}(SF_y) = \begin{cases} 1, & SF_y > 0 \\ 0, & SF_y = 0 \\ -1, & SF_y < 0 \end{cases} \\ \lambda_3 = I_b \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\{F_b\}$ 可根据钻柱力学分析求得; S_r 是引起钻头产生侧向切削的最小钻头机械侧向力(取绝对值),当机械侧向力绝对值小于 S_r 值时,则钻头只是侧向研磨地层。 S_r 值与钻头的侧向切削特性及所钻地层的岩石机械性质均有关,可由室内试验测定,也可利用实钻资料反算。根据Millheim的研究结果^[6],中软至中硬地层的 S_r 值,大约在1kN至9kN之间。

先将方程(2)展开,再把式(5)代入,可得

$$I_{r1} \sum_{k=1}^3 d_{ik} F_k + \Delta I_r \sum_{k=1}^3 e_{ik} F_k + \sum_{k=1}^3 f_{ik} F_k = V_i / D_n \quad (7)$$

($i=1, 2, 3$)

在瞬态稳斜平衡条件下, $V_1=V_2=0$,代入方程组(7)中,即得 I_{r1} 、 ΔI_r 及 D_n 的表达式:

$$\begin{cases} \begin{Bmatrix} I_{r1} \\ \Delta I_r \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum d_{1k} F_k & \sum e_{1k} F_k \\ \sum d_{2k} F_k & \sum e_{2k} F_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \sum f_{1k} F_k \\ \sum f_{2k} F_k \end{Bmatrix} \\ D_n = V_z \cdot [I_{r1} \sum d_{3k} F_k + \Delta I_r \sum e_{3k} F_k + \sum f_{3k} F_k]^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)便是反演计算地层各向异性的物理模型,其中 V_z 可近似取相应地层段的平均机械钻速,这样求得的 D_n 值只能是该地层的近似平均值。在式(8)中,钻头侧切岩石的门限压力 S_r 值需要用其它方法获取。

对于横观各向异性地层,则 $I_{r1}=I_{r2}=I_r$,代入方程组(7)中,则有:

$$I_r \sum d_{ik} F_k + \sum f_{ik} F_k = V_i / D_n \quad (9)$$

($i=1, 2, 3$)

将式(6)代入方程组(9)中,并令 $V_1=V_2=0$,则得如下方程组:

$$\begin{cases} I_r \sum d_{1k} F_{bk} - [S_r I_r \sum d_{1k} \lambda_k + S_r \sum f_{1k} \lambda_k] = - \sum f_{1k} F_{bk} \\ I_r \sum d_{2k} F_{bk} - [S_r I_r \sum d_{2k} \lambda_k + S_r \sum f_{2k} \lambda_k] = - \sum f_{2k} F_{bk} \\ D_n = V_z / (I_r \sum d_{3k} F_k + \sum f_{3k} F_k) \end{cases} \quad (10)$$

原则上,通过方程组(10)可求得横观各向同性地层的 I_r 值、 S_r 值及 D_n 值。

无论是方程(8)还是方程(10),只有与钻柱力学分析程序相结合,才能进行有关计算。

3 评估方法

首先要获取准确可靠的实钻井史资料。从这些资料中,提取有关下部钻具组合(BHA)结构、钻头结构特性、操作参数及实钻井眼几何等数据,并加以必要的整理。然后,根据这些数据,可通过BHA三维分析程序^[6,7]计算出钻头的机械作用力和转角,即求出上述方程中的 $\{F_b\}$ 和 $b_{ij}(i,j=1,2,3)$ 。同时,根据实钻井眼轨迹各计算点的井斜角和井斜方位角,以及相应的地层倾角和走向等数据,可计算确定 a_{ij} 和 $c_{ij}(i,j=1,2,3)$ 的大小。假设钻头各向异性指数 I_b 为已知(可由室内实验确定)^[8],最后便可依据式(8)或(10)评估所钻地层的各向异性。已知地层的各向异性,就可以掌握该地层对井斜变化和方位漂移的影响规律^[2,3],从而更有效地进行井眼轨迹的预测和控制。将本文的物理模型与BHA权余法分析程序^[7]相结合,可编制成一个简便的钻后分析程序,它可以在普通微机上使用,能快速评估所钻地层的各向异性性质,便于在现场推广应用。

对于BHA二维分析程序,则 $\{F\}$ 和 $b_{ij}(i,j=1,2,3)$ 均可简化。当方程(10)与BHA二维分析程序配合使用时,可得如下近似表达式^[9]:

$$\begin{aligned}
 I_r &= 1 - Q_t / Q_h \\
 Q_t &= F_x [I_b + (1 - I_b) A_t^2] + F_z (1 - I_b) A_t \\
 Q_h &= F_x \{I_b (1 - a_{11}) + (1 - I_b) [A_t (1 - a_{11}) - a_{13}] A_t\} \\
 &\quad - F_z [a_{13} - (1 - I_b) (1 - a_{11}) A_t] \\
 F_z &= W_{ob} - I_b S_r \\
 F_x &= \begin{cases} SF_b - S_r, & SF_b > 0 \\ SF_b, & SF_b = 0 \\ SF_b + S_r, & SF_b < 0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{11}$$

式中, SF_b 、 W_{ob} 和 A_t 分别表示钻头的侧向力、钻压和转角,可利用BHA二维分析程序求得^[9],其它符号的意义同前。

利用大港羊三木油田丛式井的井史资料,按式(11)评估所钻地层的各向异性,部分计算结果见表1。由表中数据,我们可以对羊三木丛式井所钻遇的明化镇和馆陶组地层的各向异性情况有所了解。

4 结束语

利用井史资料评估地层的各向异性,是一个切实可行的有效方法。钻头与地层相互作用的反演模型,是这种评估方法所依据的关键物理模型。本文所建立的物理模型,较全面地考虑了有关因素的影响,是比较先进的合理模型。将这样的物理模型与BHA分析程序配合使用,便可以进行地层各向异性的评估计算。

另外,准确可靠的井史资料及其数学处理方法(特别是实钻井眼几何的定量描述方法),对于正确评估地层的各向异性是很重要的。在应用评估结果时,要注意适用条件的限制。

表 1 地层各向异性的评估 (羊丛13: $\varphi_t=52^\circ$, $\gamma=6.5^\circ$)

Table 1 Assessment of the formation anisotropy

(Yang Cong 13, $\varphi_t=52^\circ$, $\gamma=6.5^\circ$)

井 深 (m)	方位角 度($^\circ$)	井斜角 度($^\circ$)	$I-I_r$	注 释
610.0	250.00	13.83	.00834	DB=311.11mm, EC=1.05 $I_s=.70734$, $S_r=0.4905\text{kN}$ WOB=147.15kN, $W_m=1.19$ CH=2.6965 $^\circ$ /30m 明化镇 (上>下)
657.0	250.00	17.17	.00944	
702.0	253.50	20.00	.02085	
747.0	255.50	26.00	.03826	
794.0	259.00	30.00	.04722	
813.0	259.00	32.00	.05153	DB=215.9mm, EC=1.00 $I_s=.76446$, $S_r=0.7848\text{kN}$ WOB=117.72kN, $W_m=1.19$ CH=0.689 $^\circ$ /30m 明化镇(下)
842.0	258.00	33.00	-.00012	
870.0	258.00	33.00	-.00012	
900.0	258.00	34.00	.00254	
927.0	258.00	35.00	.00511	
956.0	257.00	35.00	.00512	
984.0	257.00	36.00	.00762	
1013.0	257.00	36.00	.00762	
1041.0	256.00	37.00	0.01008	
1070.0	257.00	39.00	-.00591	
1098.0	257.00	39.00	-.00591	
1127.0	255.00	40.00	-.00347	
1156.0	256.00	40.00	-.00347	
1184.0	257.00	41.00	-.00107	
1213.0	258.00	41.00	-.00107	
1242.0	259.00	41.00	-.00107	
1271.0	259.00	41.00	-.00107	DB=215.9mm EC=1.00 $I_s=.76446$ $S_r=0.7848\text{kN}$ WOB=147.15kN $W_m=1.16$ CH=0.717 $^\circ$ /30m 馆陶组
1299.0	270.00	41.00	.00036	
1329.0	270.00	42.00	.00225	
1356.0	270.00	42.00	.00225	
1385.0	270.00	42.00	.00225	
1414.0	270.00	43.00	.00411	
1443.0	270.00	43.00	.00411	
1471.0	270.00	44.00	.00596	
1500.0	270.00	45.00	.00780	
1528.0	270.00	46.00	.00964	
1557.0	270.00	47.00	.01149	
1586.0	270.00	47.00	.01149	
1614.0	270.00	47.00	.01149	
1643.0	270.00	48.00	.01334	
1649.0	270.00	49.00	.01521	
1672.0	271.00	50.00	.01711	
1700.0	272.00	50.00	.01770	

符 号 说 明

 I_{s1} , I_{s2} , I_r —地层的岩石各向异性指数; γ —地层倾角(度); ϕ_t —地层走向方位角(度); S_r —钻头侧切岩石的门限压力(kN); W_m —钻井液比重(无量纲);{ V }—钻头机械钻速列阵(m/s);{ F_s }—钻头对地层的机械作用力列阵

(kN);

{ F }—钻头对地层的机械净作用力列阵

(kN);

 \vec{e}_s —钻头指向的单位矢量;

DB—钻头直径(mm);

EC—井径扩大系数(无量纲);

CH—井眼曲率(度/30m);

D_{ii} —沿地层倾向的可钻性($\text{m}(\text{s} \cdot \text{kN})^{-1}$);

D_{rr} —沿地层走向的可钻性($\text{m}(\text{s} \cdot \text{kN})^{-1}$);

BHA—表示下部钻具组合。

致谢 本研究得到了刘希圣教授和徐秉业教授的热情指导和支持,在此表示衷心感谢!

(本文收到日期1991年1月16日)

(编辑 张君娥)

参考文献

- [1] 高德利, 刘希圣. 钻头与地层相互作用的新模型. 石油钻采工艺, 1989, 11 (5).
- [2] 高德利, 刘希圣. 正交各向异性地层对井斜的影响. 石油学报, 1990, 11 (2).
- [3] 高德利, 刘希圣. 典型地层的各向异性钻井特性. 石油大学学报, 1990, 14 (5).
- [4] Chenevert M E et al. Mechanical anisotropies of laminated sedimentary rocks. SPEJ, March 1965, 67~77.
- [5] Brown E T et al. The influence of rock anisotropy on hole deviation in rotary drilling—a review, Int.J.Rock Mech, Sci, and Geomech, Abstr, 1981, 18: 387-401.
- [6] Millheim K K. Computer Simulation of the Directional Drilling Process, the Int. Tech. Symposium of SPE, Beijing, China, 3, 1982, 9990.
- [7] 高德利, 刘希圣. 水平井下部钻具组合的力学分析方法. 第二届中国~加拿大稠油开采技术研讨会论文集, 中国·涿州, 1990年10月.
- [8] 高德利等. 钻头的各向异性钻井特性. 石油大学学报, 1991.
- [9] 高德利, 刘希圣. 井眼轨迹控制的多功能微机程序. 石油钻采工艺, 1989, 11 (6).
- [10] 刘希圣, 高德利, 崔孝秉. 底部钻具组合三维静力分析的权余法. 石油大学学报, 1988, 12 (3).

A METHOD FOR THE EVALUATION OF FORMATION ANISOTROPY

Gao Deli

(University of Petroleum, Beijing)

Abstract

Only after obtaining the true data about formation anisotropy anisotropic drilling characteristics of the formation can be used scientifically in drilling operations. This paper presents a physical model for evaluating formation anisotropy, which is in the inverse mode of a rock-bit-formation interaction model. Combined with a BHIA analysis program, this model can be used to estimate formation anisotropy from field drilling data. Such a method of assessment can be readily used by field engineers.