

基于测井资料与判别分析法的钻头选型研究

刘远征¹ 薛峰² 夏宏泉¹ 钟文俊¹

(1 西南石油大学石油工程测井实验室 四川 成都 610500 2 华东石油局测井公司 江苏 扬州)

摘要:提高机械钻速是钻井工程永恒的主题,选择与工区地层特性相匹配的钻头是提高机械钻速直接而有效的方法。基于已有的测井、钻井资料,建立钻头优选的子模式与中心模式,并从待选井的测井资料中提取声波时差、地层密度、抗压强度、抗剪强度、可钻性级值等参数,为钻头选型提供可靠的地层特征依据。以判别分析理论为基础,利用VB语言编写钻头选型程序,实现自动合理地优选出钻头类型。将上述方法应用于潼南地区陆相地层钻井中,优选出与工区地层匹配性好、机械钻速较高的钻头类型。结果表明,该方法有较强实用性、值得推广应用。

关键词:测井曲线;可钻性级值;判别分析;钻头选型;机械钻速

0 问题的提出

目前常用的两种钻头优选方法:一是经验方法,从待钻井的地层测井资料中提取的某一个或几个岩石力学参数或抗钻参数,结合钻头厂家的使用说明进行钻头选型;二是钻头使用效果评价法,该方法从某地区已钻井的钻头使用情况入手,分地层段对钻头使用效果进行统计分析,按地质层位的不同选出使用效果较好的钻头类型。综上所述,从测井资料中提取的声波时差、地层密度、抗压强度、抗剪强度、可钻性级值等参数,建立工区的钻头选型样本模式,采用判别分析法自动优选出各地质层位的钻头类型。

1 地层岩石力学参数、抗钻参数计算方法

根据微钻头与声波时差的室内岩心实验结果分析认为,地层密度越大,声波时差越小,可钻性级值越高。泥质含量与岩石的可钻性也有密切的关系,泥质含量越高,岩石可钻性越好,可钻性级值越低。

地层的抗钻参数是钻头选型的重要依据(包括:抗压强度、抗剪强度、可钻性、研磨性、硬度等),可以通过GR、DEN、AC计算获得。以上8个参数作为钻头选型的重要数据,实际处理时应该分层计算。

1.1 泥质含量的计算

$$V_{sh} = (2^{\Delta GR \times GCUR} - 1) / (2^{GCUR} - 1) \quad (1)$$

$$\Delta GR = (GR - GR_{MN}) / (GR_{MX} - GR_{MN}) \quad (2)$$

式中, V_{sh} 为泥质含量,%; ΔGR 为自然伽马相对值; GR 为自然伽马值; GR_{mx} 为纯泥岩层自然伽马值; GR_{mn} 为纯地层自然伽马值; $GCUR$ 第三纪地层取3.7,老地层取2。

1.2 抗压强度与抗剪强度的计算

$$\text{杨氏模量(MPa): } G = \rho_b / \Delta t_s^2 \times \beta \quad (3)$$

$$\text{体积模量(MPa): } K_s = \rho_b \left(\frac{1}{\Delta t_s^2} - \frac{4}{3\Delta t_c^2} \right) \times \beta \quad (4)$$

$$\text{砂岩的抗压强度(MPa): } c_0 = 0.0045E(1 - V_{sh}) + 0.008E \cdot V_{sh} \quad (5)$$

$$\text{碳酸盐岩的抗压强度(MPa): } c_0 = 0.0026E(1 - V_{sh}) + 0.008E \cdot V_{sh} \quad (6)$$

$$\text{抗剪强度(MPa): } \tau_s = \frac{3.326 \times c_0 \times k_p}{10^6} \quad (7)$$

式中, $\beta = 9.290304 \times 10^7$; Δt_s 、 Δt_c 分别为横波时差、纵波时差,us/ft; ρ_b 为地层密度, g/cm³。

1.3 可钻性、研磨性、硬度的计算

$$\text{硬度(MPa): } Hd = 84.109 \times c_0 + 132.59 \quad (8)$$

可钻性级值: $K_d = 14.336 \times e^{-0.0133 \times AC}$ (9)

研磨性值(mg): $GD = (K_d / 3.641)^{10.3173}$ (10)

可钻性级值公式各个工区存在差异,可根据微钻头钻进实验测量获得,并与声波时差建立对数关系模型。公式(9)为潼南地区岩石可钻性级值与声波时差的关系模型。

2 钻头选型的判别分析法

2.1 数据标准化

由于各类地层特性参数的物理意义不同和量纲不同,因此需对原始数据进行预处理,可采用极差正规化方法使之产生无量纲和归一化的数据列。

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (11)$$

式中, X_{ij}, X'_{ij} 分别为标准化之前数列和标准化之后数列; $i=1, 2, 3, \dots, n$ (n 个已知的钻头类型子模式); $j=1, 2, 3, \dots, m$ (m 个变量)。

2.2 变量的引入与剔除

假设已引入 s 个变量,考虑剔除变量(在已选入中的第 r 个变量的判别能力为 $U_r = \frac{U_{rs}}{W_{rs}}$),从 s 个 U 值中选出最大值进行检验: $F_r = \frac{1 - U_{rs}}{U_{rs}} \cdot \frac{N - g - (s - 1)}{g - 1}$,根据自由度为 $g - 1$ 与 $N - g - (s - 1)$,并在置信水平下查 F 分布表得 F_2 值,当 $F_2^* \leq F_2$,判别能力不显著,剔除变量;其次引入未选入变量(第 h 个变量的判别能力为 $U_h = \frac{U_{hs}}{W_{hs}}$),从未选入变量的 U 值中选出最小值进行检验: $F_h = \frac{1 - U_{hs}}{U_{hs}} \cdot \frac{N - g - (s - 1)}{g - 1}$,根据自由度为 $g - 1$ 与 $N - g - (s - 1)$,并在置信水平下查 F 分布表得 F_1 值,当 $F_2^* \geq F_1$,判别能力显著,引入变量;最后对 W 与 T 矩阵进行消去法计算,对选入或剔除变量的计算,公式是一样的。每选入一个变量或剔除一个变量都要对 W 或 T 按以下公式作一次计算。

$$y_{2l}^{(n+1)} = \begin{cases} y_{2l}^{(n)} / y_{2l}^{(n)} & (k=r, l \neq r) \\ y_{2l}^{(n)} - y_{2l}^{(n)} y_{2l}^{(n)} / y_{2l}^{(n)} & (k \neq r, l=r) \\ 1 / y_{2l}^{(n)} & (k=r, l=l) \\ -y_{2l}^{(n)} / y_{2l}^{(n)} & (k \neq r, l=r) \end{cases} \quad t_{2l}^{(n+1)} = \begin{cases} t_{2l}^{(n)} / t_{2l}^{(n)} & (k=r, l \neq r) \\ t_{2l}^{(n)} - t_{2l}^{(n)} t_{2l}^{(n)} / t_{2l}^{(n)} & (k \neq r, l=r) \\ 1 / t_{2l}^{(n)} & (k=r, l=l) \\ -t_{2l}^{(n)} / t_{2l}^{(n)} & (k \neq r, l=r) \end{cases}$$

2.3 判别函数的建立与检验

第 i 组的判别函数: $f_i(x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{ks}) = I_i N_{k1} + C_{i0} + \sum_{j=1}^s C_{ij} x_{kj}$, 其中, $C_{i0} = -\frac{N - G_i}{2} \overline{X_i}^{(M)} \overline{X_i}^{(M)}$, $C_{ij} = (N - G_i) W_i^{-1}(M) X_i'$; 样品归属第 i 组的概率: $P_i = \frac{e^{(f_i(x) - \max_k f_k(x))}}{\sum_{j=1}^s e^{(f_j(x) - \max_k f_k(x))}}$ 。

2.4 待钻井段的钻头类型选取

采用最大隶属原则 $F_{\max} = \max\{f_i(x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{ks})\}$,

最大值的对应样品组(实际使用的钻头类别)就可作为待钻井段的分类结果,即钻头类别, P_i 作为归属 i 组的概率。

3 实例应用分析

根据上述研究方法,利用 VB 语言编制了基于判别分析法的钻头优选程序。以潼南地区的 8 口井(潼南 001 井、潼南 104 井、潼南 107 井、潼南 108 井等)为研究对象,进行钻头选型及应用分析。

3.1 工区岩石力学参数与抗钻参数的计算

根据上述计算岩石力学参数与抗钻参数的公式,编制计算岩石力学参数的程序,处理了潼南 8 口井资料。限于篇幅,以潼南 110 井为例予以说明。图 1 为潼南 110 井 1280~1780m 地层的岩性、岩石力学参数与抗钻参数剖面。该井段地层岩性复杂,以中~细粒长石石英砂岩、岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩为主,夹杂部分介壳质灰岩。岩石抗钻参数值较高,并且波动范围大(例如:可钻性级值 2.0~6.98,平均值在 6.0 左右)。

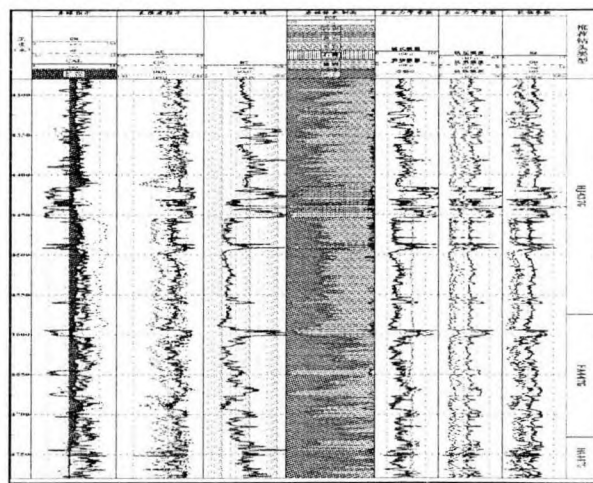


图 1 潼南 110 井 1280~1780m 地层的岩性、岩石力学参数与抗钻参数剖面

3.2 工区钻头优选判别模型的建立

分析潼南地区 8 口井的钻头使用效果,选出机械钻速较高、钻头进尺较长的不同井段地层的岩石可钻性、强度等 8 个参数建立工区钻头优选的子模式(如表 1 所示)。根据钻头选型子模式,统计出关键井中各种钻头出现的概率,并计算出某种钻头的岩石可钻性、强度等参数的均值,构建二维数据表即为钻头优选的中心模式(如表 2 所示)。中心模式包括了 10 种钻头类型(包括 7 个牙轮钻头、2 个 PDC 钻头、一个刮刀钻头)。将子模式与中心模式组合成为

表 1 基于岩石可钻性和研磨性地层参数的钻头优选子模式(部分)

NO	SIP (m)	BIP (m)	厚度 (m)	DEN (g/cc)	AC (us/ft)	Vsh (%)	SST (MPa)	SC (MPa)	HD (MPa)	GD (mg)	Kd (级值)	钻头 类型
1	333.50	976.00	622.50	2.51	73.54	48.05	12.99	20.90	736.82	2.10	4.55	FA437G
2	976.00	1304.00	328.00	2.53	71.38	63.08	13.49	136.19	828.39	2.40	4.77	FA437G
3	1304.00	1332.00	28.00	2.48	69.97	42.74	15.24	211.25	881.43	2.95	4.98	FA437G
4	1332.00	1394.00	62.00	2.48	67.94	53.16	15.66	207.88	953.76	3.15	5.16	HA447G
5	1394.00	1472.00	78.00	2.76	65.13	48.09	22.74	243.83	1223.95	4.62	6.62	HA447G
6	1472.00	1571.75	99.75	2.52	75.74	61.64	11.36	187.03	690.05	1.80	4.34	HA447G
7	1578.00	1694.00	116.00	2.47	71.15	60.90	13.50	135.88	845.94	4.59	6.82	HA447G
8	1694.00	1735.00	41.00	2.77	68.05	53.65	22.09	245.66	987.21	3.18	5.16	HA447G
9	1735.80	1982.00	246.20	2.60	67.50	42.99	19.14	231.21	1025.45	3.47	5.27	HA517G
10	1984.00	2101.00	117.00	2.51	62.87	14.75	22.00	255.84	1117.15	4.31	5.76	HA517G
11	2101.00	2447.75	346.75	2.68	65.49	50.91	21.58	236.40	1177.57	4.00	5.49	HA517G
12	2447.75	2556.00	108.25	2.62	66.75	61.05	17.57	213.70	1090.86	3.46	5.32	HA517G
13	350.00	1355.00	1005.00	2.4	72.13	46.11	9.76	172.70	754.70	2.35	4.71	FA447
14	1355.00	1366.38	41.38	2.34	64.10	23.53	13.08	183.91	1047.14	4.11	5.62	FA447
15	1366.38	1426.13	59.75	2.49	61.97	23.76	15.69	189.15	1368.81	5.68	6.03	FA447
...												

表 2 基于可钻性和研磨性地层抗钻参数的钻头选型的中心模式

NO	DEN (g/cc)	AC (us/ft)	SH (%)	SST (MPa)	SC (MPa)	HD (MPa)	GD (mg)	Kd (级值)	钻头 类型
1	2.40	74.87	38.75	7.91	154.79	656.83	1.91	4.42	QT
2	2.59	62.22	21.70	19.89	253.67	1308.45	4.58	5.84	FA437G
3	2.47	73.64	11.83	11.69	181.42	821.56	2.61	4.71	FA447
4	2.44	71.07	13.88	10.96	186.17	703.69	1.71	4.29	FA447G
5	2.55	68.08	42.81	16.51	217.35	929.26	3.00	5.13	GS605
6	2.66	68.38	77.10	17.38	220.65	1025.29	2.99	5.10	HA437G
7	2.58	66.84	42.85	15.17	210.33	992.10	3.32	5.281	HA447G
8	2.59	63.14	24.47	17.14	196.67	1131.49	4.13	5.71	HA517G
9	2.59	63.18	54.15	18.61	224.28	1234.30	4.31	5.73	HJ447G
10	2.51	66.36	25.86	13.04	168.97	951.27	3.31	5.32	MQP

工区钻头优选的判别样本模式。

3.3 钻头选型结果分析

根据以上钻头样本类别,建立了工区 10 种钻头类型判别函数,以下为部分钻头类别的判别函数。判别函数中的变量有 7 个,由于抗剪强度判别能力不显著而被剔除。

$$FCQT = \ln(0.0727) - 349051 - 548 * DEN + 5292 * AC + 91795 * Vsh - 18773 * SC + 224 * HD + 160 * GD - 3263 * Kd$$

$$FFA437G = \ln(0.0545) - 3694.36 - 5.59 * DEN + 53.76 * AC + 95075 * Vsh - 19295 * SC + 236 * HD + 1.79 * GD - 3732 * Kd$$

$$FFA437G = \ln(0.0909) - 376958 - 632 * DEN + 5551 * AC + 96609 * Vsh - 23579 * SC + 229 * HD + 123 * GD - 2029 * Kd$$

$$FFA447G = \ln(0.1091) - 362282 - 615 * DEN + 5362 * AC + 98086 * Vsh - 23157 * SC + 219 * HD + 1.13 * GD - 1754 * Kd$$

.....

表 3 是利用判别分析程序对潼南 110 井全井段的钻头选型结果。在 12 个层段钻头选型结果中,有一半的钻头选型结果与实钻钻头不符。根据邻井

钻头使用效果分析得出,推荐钻头使用效果好于实钻钻头(例如:潼南 106 井沙二段采用 HA437 钻头机械钻速 15.62m/h、纯进尺 268.23h;潼南 109 井须六段采用了江汉的 HA447G 钻头,机械钻速达到 3.33m/h、纯进尺 112.2h;潼南 105 井须二段采用 HA517G 牙轮钻头,机械钻速达到 2.88m/h、纯进尺 46.58h)。表 3 中的概率 P 都大于 0.85,表明待选井所选的钻头类型与已知井钻头类型的符合率较高。这说明利用判别分析法进行钻头类型优选,结果合理、值得推广应用。表 4 为潼南地区地层分层段钻头选型推荐。

表 3 潼南 110 井可钻性参数及钻头选型推荐结果

No	起始深度	终止深度	Fmax	概率 P	推荐钻头	实钻钻头
1	308.75	976.00	3624.50	0.86	HA437	HJ447G
2	983.50	1304.00	3548.73	0.89	HJ447G	HJ447G
3	1307.38	1350.00	3462.61	0.97	HJ437G	HJ437G
4	1353.63	1394.00	3481.90	0.87	HA437G	HA437G
5	1397.13	1472.00	3580.13	0.89	HA437G	HA437G
6	1474.38	1566.00	3617.24	0.89	HA437G	HA437G
7	1568.25	1718.00	3512.10	0.85	FA447G	HA517G
8	1720.50	1844.00	3597.49	0.92	HA447G	HA517G
9	1848.38	1984.00	3714.34	0.86	HA447G	HA517G
10	1989.38	2153.88	3556.99	0.89	FA437G	HJ517G
11	2174.75	2249.75	3683.19	0.87	HA517G	C201-2
12	2256.63	2273.38	4140.51	0.98	HA517G	HA517G

表 4 潼南地区地层分层段钻头选型推荐

地质分层	地层岩性	Kd(级值)	推荐钻头类型
沙溪组	暗紫红色泥岩夹砂岩, 底部夹粉砂岩	2.05-5.34	HA437、HJ447G
凉高山组	黑色页岩夹灰白色细砂岩、灰质砂岩	3.30-5.91	HJ437G、FA447G、HJ447G
自流井组	紫红色泥岩夹砂岩、灰质砂岩黑色页岩夹介壳灰岩	2.94-6.62	HA437G、FA447G、HJT447G
须六	细砂岩夹黑色页岩, 上部见暗紫色泥岩	1.89-7.09	FA447G、FA447
须五	浅灰色、灰白色细砂岩	3.29-7.36	HA447G、FA447G、HA517G
须四	黑色页岩夹灰质粉砂岩、煤、炭质页岩	1.75-6.85	FA437G、FA447G、HA447G
须三	浅灰色、灰白色细砂岩、黑色页岩夹灰质粉砂岩、煤、炭质页岩	1.75-6.84	HA517G、HA447G
须二	灰岩、泥质灰岩夹石膏	7.02-7.99	HA517G、H517A
雷口坡组			

4 结论与建议

(1) 建立钻头优选的判别模型是判别分析法选钻头的关键,必须选择工区钻井中机械钻速较高、进尺较长的钻头作为样本模型,并采用极差正规化方法归一化所有地层特征数据。从地层的岩性、弹性、岩石力学性质和抗钻特性等方面考虑,需要选取 AC、DEN、Vsh、Sc、Kd、HD、GD 等参数参与钻头选型的判别分析建模。

(2) 工区多口井的钻头优选结果及其使用效果说明,基于判别分析理论编制的 VB 钻头优选程

序,能够快速有效优选出与地层相匹配的钻头类型,值得推广应用。

(3)建议在建立钻头选型样本模式时,最好将经验方法和钻头使用效果评价法结合起来,即钻头优选模式中不但要有描述地层岩性、可钻性和研磨性等参数变量,而且要引入钻井机械和水力等工程参数,例如钻压、转速、排量等参数。

参考文献:

[1]夏宏泉、刘远征,合川、潼南地区岩石可钻性测量应用研

究[M],西南石油大学科研报告,2009,2

[2]H.I.Bilgesuetal. A New Approach for Drill Bit selection America. JPT 2000.12

[3] Mason K. I Tricone Bit Selection Using Sonic Logs. In SPE, 13256

[4] 李士斌、艾池, PDC 钻头的优选方法[J],大庆石油学院学报,1999,23(3):86-88

[5] 汤小燕、牛林林,一种基于测井信息的钻头选型方法[J],国外测井技术,1999,19(1):43-44

[6] 张厚美、张良万,钻头选型方法研究[J],天然气工业,1994,14(5):38-41

·企业风采·

长庆立体勘探拿下立体油气田

经过长庆几代石油人近 40 年的呕心沥血,目前在纵向 3000 多米的跨度上已经探明 22 个油层、18 个气层,累计达 40 个油气层,立体勘探让长庆油田终于拿下了一个纵向多层位的立体大油气田。根据有关部门 10 月 25 日提供的资料显示,仅今年新发现的油气层就有 8 个。

面对鄂尔多斯盆地典型的低压、低渗、低丰度隐蔽型岩性油气藏地质特征,几代长庆人经过顽强拼搏和创新,油气勘探在地域上实现了从宁夏到甘肃、陕西、山西以及内蒙古等覆盖盆地 25 万平方公里的跨越,探寻到马岭、安塞、靖安、西峰、姬塬等亿吨级大油田以及靖边、榆林、苏里格、子洲、神木等千亿立方米大气田,勘探成果令世人瞩目。他们还取得了从侏罗系延安组到三叠系延长组,从下古生界海相碳酸盐岩到上古生界陆相碎屑岩层层推进、步步为营的重大成果,实现了油气勘探由开始个别油气层的“单打独奏”到几十个油气层的“联合演奏”。

安塞油田、靖边气田的重大发现,进一步增强了

长庆油田油气并举、立体勘探的信心。随着靖安油田、榆林气田的发现与探明,长庆油田油气勘探逐渐步入了快速、高效、跨越式的发展阶段,子洲、神木等千亿立方米级大气田、苏里格万亿立方米大气区以及西峰、姬塬、华庆等亿吨级的大油田,一个个极具新面孔的油气田,势如破竹地矗立在长庆油田的版图上。截至 2008 年底,长庆油田共找到油田 28 个,古生界气田 9 个,2007、2008 两年,每年新增的油气三级储量当量均超过 10 亿吨,预计 2009 年油气三级储量当量可再次实现历史性突破。长庆油田油气勘探取得的丰硕成果为中国石油事业的蓬勃发展,为长庆油田公司实现油气当量 5000 万吨奋斗目标不断奠定了坚实的资源基础。

放眼长庆千里油气区,从最浅几百米的安定、直罗油层到深达 4000 多米的下古生界马家沟气层,立体勘探带给我们一个个大油气田,逐次展示在了世人面前。

(杨文礼 袁朝旭 崔子岳)