

动态法优选钻井参数

张厚美 王棠青



张厚美

根据钻井过程钻头牙齿是连续不断地磨损,因此选择的最优转速、最优钻压也应是不断连续变化的,称这种优选方法为动态法。文中从微积分角度给出了钻井成本目标函数表达式。计算结果表明,最优转速、最优钻压随着钻头牙齿的磨损(是不断增大的)瞬时每米成本也是不断增大的,但在钻头所钻井段中的平均每米成本却存在着最低值。

主题词: 钻井成本 动态 方法 钻井参数 最优化 计算机应用

作者张厚美,1966年生。1987年毕业于江汉石油学院开发系钻井工程专业,同年考入石油大学北京研究生部,1990年获油气田开发工程专业硕士学位,现任江汉石油学院开发系助教。王棠青,1965年生。1987年

毕业于江汉石油学院开发系钻井工程专业,现任江汉石油管理局钻井部助理工程师。

最优化钻井的主要任务是根据所钻地层情况、地面设备性能等条件,确定出最佳钻压、转速及起钻时间,使所钻井段的每米成本达到最低。常规的优化钻井方法是:假设所钻井段的地层参数(如可钻性系数、研磨性系数等)、泥浆参数等不变的条件,根据最优化计算方法从每米成本目标函数中导出最优钻压及转速的配合,然后将最优钻压、转速固定起来成为最优点,一直钻到最优起钻时间。这就是说:常规方法把最优钻压和转速在整个钻井过程中当作不变的常数。实际上,随着进尺的增加,钻头牙齿磨损是增加的,机械钻速是下降的,最优钻压和转速不应是常数,而是随牙齿磨损而变化的,称最优钻压及转速随井深而变化的优选方法为动态优选钻井参数法。

数学推导

一、目标函数的确定

优化钻井的目标函数一般采用进尺成本模式,为

$$C = [C_B + C_R(T_i + T)]/y$$

该表达式描述了一只钻头在所钻井段总长上的平均每米成本,是一个宏观表达式。

如只考虑钻进过程的一个微井段,见图1。

设钻进 dy 井段所花时间为 dt , 钻头损耗成本(折旧费)为 dC_B , 该微

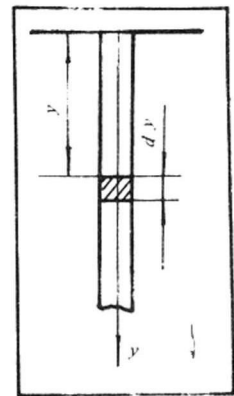


图 1

段应摊派的起下钻费用为 dC_T , 则该微段上所耗总成本为

$$dC = dC_B + C_R dt + dC_T$$

式中, 钻头折旧费 dC_B 跟钻头牙齿在该微段上的磨损量 dH 有关。可表示成 $dC_B = C_B(dH)$, 即 dC_B 是 dH 的某个函数。为简单起见, 视钻头折旧费和钻头牙齿磨损量成正比: $C_B(H) = H C_B$ 。这样, dC_B 就变为 $dC_B = C_B dH$, 同理, 假定起下钻、接单根费用在钻头牙齿磨损量上是均匀分布的, 即

$$dC_T = T_T C_R dH$$

将 dC_B, dC_T 表达式代入 dC 中得

$$dC = (C_B + T_T C_R) dH + C_R dt$$

将上式两端同除以 dy , 即得到微段上的瞬时每米成本为

$$C_m = dC/dy = (C_B + T_T C_R) \frac{dH}{dy} + C_R \frac{dt}{dy} \quad (1)$$

这就是从微分角度导出的瞬时每米成本目标函数表达式。

二、钻井数学模式的确定

它包括钻进速度模式和钻头牙齿磨损速度模式, 这里选用以微分形式表示的修正杨格模式⁽¹⁾

$$V(W, N, H) = dy/dt = K C_p C_H (W - M) N^3 / (1 + C_2 H) \quad (2)$$

$$u(W, N, H) = dH/dt = \frac{A_F (PN + QN^3)}{1000(D_2 - D_1 W)(1 + C_1 H)} \quad (3)$$

上式中及以下各式的符号含义见文后说明。

由(2)、(3)式可知, 影响钻速和磨损速度的因素有很多, 但当所钻井段、钻头类型及泥浆参数等确定后, 可以改变的只有钻压、转速、水马力、磨损量等4个参数, 其中机械钻速总是随水马力增大而增大。实际工作时, 总是尽可能采用大的水马力, 所以可改变的参数也就只有3个, 把3个以外的参数当作常数, 以隐函数形式简单表示为

$$dy/dt = V(W, N, H) = V \quad (2')$$

$$dH/dt = u(W, N, H) = u \quad (3')$$

三、求解最优钻压、转速

将(2')、(3')式代入目标函数式(1)中得

$$C_m = (C_B + T_T C_R) \frac{u}{V} + \frac{C_R}{V} \quad (1')$$

现在要求使任意时刻的瞬时每米成本都处于最小值的钻压和转速。对微井段 dy , 可以认为牙齿磨损累计量 H 不变, 所以目标函数中可改变的参数只有钻压 W 和转速 N , 即化为二元目标函数。求(1')式的最小值, 可令

$$\frac{\partial C_m}{\partial W} = 0, \quad \frac{\partial C_m}{\partial N} = 0$$

得

$$(C_B + T_T C_R)(V u_w' - u V_w') - C_R V_w' = 0 \quad (4)$$

$$(C_B + T_T C_R)(V u_N' - u V_N') - C_R V_N' = 0 \quad (5)$$

由(4)、(5)两式可解出两个变量 W, N , 它们都是 H 的函数, 简单表示为

$$W = \psi_w(H) \quad (6)$$

$$N = \psi_N(H) \quad (7)$$

由(2')、(3')式可得

$$\frac{dH}{dy} = \frac{u(W, N, H)}{V(W, N, H)}$$

将(6)、(7)式代入上式得

$$dy = \frac{V[\psi_w(H), \psi_N(H), H]}{u[\psi_w(H), \psi_N(H), H]} dH \quad (8)$$

(8)式只含 H, y 两个变量, 由此可解得 H 与 y 的函数关系为

$$H = \xi(y) \quad (9)$$

将(9)式代入(6)、(7)式得

$$W = \psi_w[\xi(y)] \quad (6')$$

$$N = \psi_N[\xi(y)] \quad (7')$$

至此, 得到以进尺 y 表示的最优钻压、转速。

四、求钻头的最高进尺

(9)式是在最优钻压、转速下牙齿磨损量 H 与钻头进尺 y 的函数关系。将最大磨损量 H_{\max} 代入(9)式, 得钻头最高进尺为

$$y_{\max} = \xi^{-1}(H_{\max}) \quad (10)$$

五、求钻进总成本

由于(6')、(7')及(9)式中已将最优钻压、转速、牙齿磨损量等表示成进尺 y 的函数, 所以目标函数(1')式也化为只有一个变量 y , 记

$$C_m = C_m(y) \quad (11)$$

这样, 从井深 y_0 钻到 y 的总成本为

$$C_T(y) = \int_{y_0}^y C_m(y) dy \quad (12)$$

从 y_0 钻到 y 的平均每米成本为

$$C_a(y) = C_T(y) / (y - y_0) = \int_{y_0}^y C_m(y) dy / (y - y_0) \quad (13)$$

六、求最佳起钻进尺

当钻头总进尺的平均每米成本达到最低时就要起钻, 此时的钻头进尺称最佳起钻进尺。(12)式中的总成本只计算了钻机作业费、钻头折旧费和所摊派到的部分起下钻接单根费用。实际上, 当起钻后, 钻头一般是不再用了, 所以起钻后钻头还剩余的部分价值也应加到总成本中, 起下钻接单根费用也应加到总成本中。这样总成本就变为

$$C_T(y) = \int_{y_0}^y C_m(y) dy + (H_0 - H)C_B + (H_0 - H)T_T C_R \quad (14)$$

式中 $H = \xi(y)$ 。

相应得到总平均每米成本为

$$C_a(y) = C_T(y) / (y - y_0) \quad (15)$$

令 $\partial C_a(y) / \partial y = 0$, 就可解出使总平均每米成本 $C_a(y)$ 最小的最佳起钻进尺。

以上, 从数学上分析了求解最优钻压、转速函数及最佳起钻进尺的可行性步骤。这样求出的结果, 在理论上达到了钻进过程的每时每刻钻压、转速总是处于最优组合, 这种组合是随着

钻进过程动态而连续变化的。

计算机求解方法

无论是牙轮钻头还是 PDC 钻头,只要知道其钻进的数学模式(须以微分形式表达)都可按上述方法求解最优钻压、转速函数及最佳起钻进尺。但一般钻井数学模式都比较复杂,这种求解过程也变得复杂,特别是解微分方程,很难直接求出理论值,所以只好在计算机上利用数值方法求解。

一、目标函数表达式

(2)、(3)式代入(1'),整理得

$$C_m = \frac{A_F C_B (1 + C_2 H) (PN + QN^3) + 1000 C_R (1 + C_1 H) (1 + C_2 H) (D_2 - D_1 W)}{1000 K C_P (1 + C_1 H) (D_2 - D_1 W) (W - M) C H N^2}$$

二、求最优钻压、转速

由目标函数表达式可见,表达式是很繁杂的,如令 $\partial C_m / \partial W = 0, \partial C_m / \partial N = 0$,将得到一个超越方程,无法直接求解 W, N 。为此采用修正的杨格模式(数值算法),把求解 W, N 使 C_m 最小的问题转化为非线性规划问题,通过计算机求解每个 H 值下对应的 W, N 值。

引进约束条件:

牙齿磨损量约束条件为 $0 \leq H \leq 1$

钻压约束条件为 $M \geq 0$ 时, $D_2/D_1 > W > M$

$M < 0$ 时, $D_2/D_1 > W > 0$

转速约束条件为 $N_{\max} > N > 0$

钻压、转速乘积约束条件为 $WN < PD$

其中 N_{\max} 可根据钻头或钻机最大转速确定, PD 是钻头厂家推荐的最大允许 WN 值。

用惩罚函数法(内点法)求解,其障碍函数构造为⁽²⁾

$$-T(W, N) = \frac{G}{[(D_2/D_1) - W]^2} + \frac{G}{(W - M)^2} + \frac{G}{(N_{\max} - N)^2} + \frac{G}{N^2} + \frac{G}{(PD - WN)^2}$$

式中 G 为障碍因子。

三、求 W, N 与 H 的函数关系

用内点法算出对应于每个 H 值的最优钻压、转速值,当 H 在 0 至 1 区间取一系列点时,便得到对应的一系列 W, N 值。这样就可以采用多项式曲线拟合法得到 W, N 与 H 的各自函数关系。多项式模式为

$$W = W_0 + a_1 H + a_2 H^2 + \dots + a_n H^n \quad (16)$$

$$N = N_0 + b_1 H + b_2 H^2 + \dots + b_n H^n \quad (17)$$

式中 W_0, N_0 的物理意义是:当钻头牙齿还未磨损时,所对应的最优钻压、转速。

一般,多项式取前 4 到 5 项就可满足要求。

四、求 H 与进尺 y 的函数关系

将杨格模式(2)、(3)式代入(8)式,整理得

$$\frac{1 + C_1 H}{1 + C_2 H} dH = \frac{A_F (PN + QN^3) N^2}{1000 K C_P C_H (D_2 - D_1 W) (W - M)} dy$$

式中 W, N 可由 (16)、(17) 式表示成 H 的函数。这样该微分方程就只剩 H 和 y 两个变量, 两边积分后得到对应于一系列 H 值的一系列 y 值, 然后再用多项式拟合得到 H 与 y 的近似函数关系。

五、求最优起钻进尺

将以 W, N 与 H 及 H 与 y 的函数关系代入总平均每米成本表达式 $[C_a(y)]$ 中, 就得到 $C_a(y)$ 与 y 的关系, 此时可用一维搜索方法求得使 $C_a(y)$ 最小的 y 值。

有了上述结果后, 就可求出任意进尺下所对应的总成本 C_T 、平均每米成本 C_a 、钻头最大进尺、机械钻速、瞬时每米成本等。其程序说明见图 2。

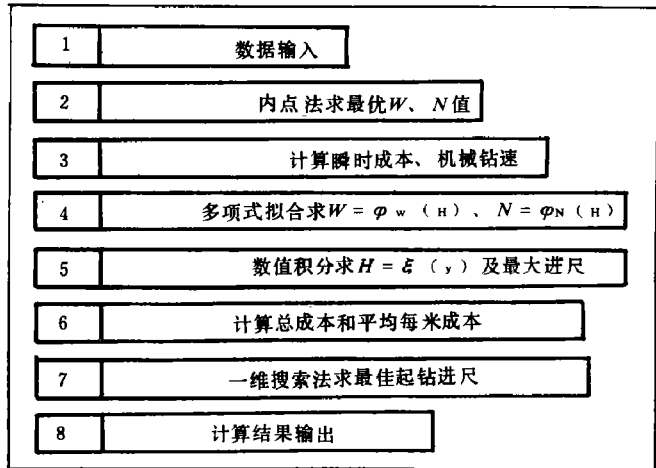


图 2

计算实例

实例选用《最优化钻井理论基础与计算》一书中的例题^[1]来进行计算。

例 已知某井段地层特性 $A_F = 1.2306, K = 0.024, M = -1, \lambda = 0.68$, 下一趟钻拟下 $\varnothing 250.80$ mm (9 7/8") 钻头, 其成本 $C_B = 850$ 元, 钻头类型参数与尺寸为: $P = 1.5, Q = 6.525 \times 10^{-5}, C_1 = 5, D_1 = 0.1433, D_2 = 6.44$ 。修正后的牙齿磨损因素 $C_2 = 3.68, b = 250400$ 。该地区钻机作业费 $C_R = 350$ 元/h, 该井深起下钻时间 $T_T = 3$ h, 试求可行最优的 W, N, H_r 配合, 并预测其技术经济指标。

将上述数据输入程序, 便可算得结果, 绘出各种曲线。

一、最优钻压、转速及机械钻速曲线

最优钻压、转速及机械钻速随钻头牙齿磨损量 H 变化而变化曲线见图 3。

由图 3 可见, 最优钻压曲线近似线性增大, 但增大幅度较小(从 $H=0$ 时的 31.2t 增大到 $H=1$ 时的 33.9t)。最优转速曲线近似指数函数关系, 其增加幅度较大(从 $H=0$ 时的 100.6r/min 到 $H=1$ 时的 179.5r/min)。机械钻速曲线都是不断下降的, 开始时下降较急剧, 以后较平缓。

将图 3 中横坐标改为钻头进尺 y , 便可得到最优钻压、转速随进尺的变化曲线, 见图 4。

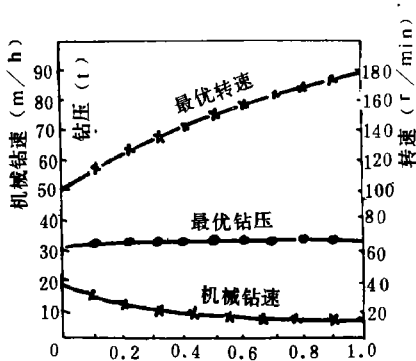


图 3

图4的曲线变化趋势与图3相似。由图4可按进尺变化不断调整钻压、转速组合,使它尽量接近最优组合。

二、进尺 y 和牙齿磨损 H 的关系曲线

在最优钻压、转速组合下工作时,钻头牙齿的磨损量 H 和钻头的进尺是一一对应的,其关系近似为指数曲线,见图5。

由图5,可根据钻头进尺来判断牙齿磨损情况,还可查到钻头所能达到的最大进尺。如图5中, $y=54.8\text{m}$ 时, $H=0.5$; $H=1$ 时, $y_{\text{max}}=95\text{m}$ 。

三、成本曲线

首先说明一下几条成本曲线的含义:瞬时每米成本是指任意时刻的单位井段长成本,它是随进尺增加而不断增加的。平均每米成本是指钻头从开始钻进到某一进尺,整个区间段上的每米平均成本,它是随进尺呈线性增加。总成本是指钻头从开始钻达某一进尺这个区间段上的累计成本,它只包括钻头已磨损部分的折旧费,应摊派部分的起下钻和纯钻时间的钻机作业费,该曲线随进尺增加也呈指数关系增加。总平均成本是指钻头在某一进尺下起钻,此时钻井段上的平均每米成本,它包括钻头的全部成本、全部起下钻和纯钻时间的钻机作业费。见图6。

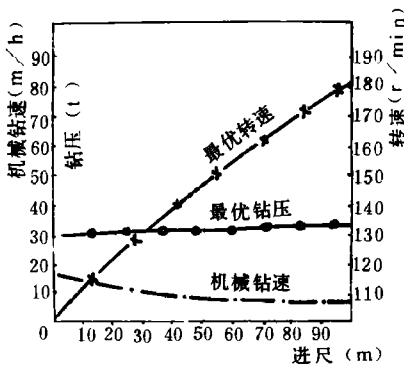


图 4

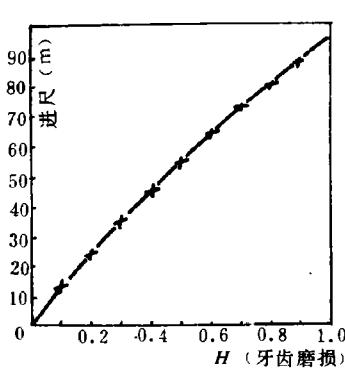


图 5

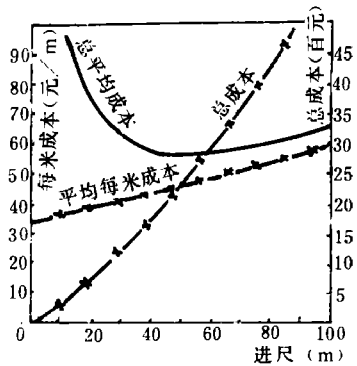


图 6

可见总平均成本曲线随进尺增加开始急剧下降,然后又慢慢上升,它有一最低点,此点对应的进尺即是最佳起钻进尺。图6中最佳起钻进尺为100m,但钻头最大进尺只能达到95m,所以到钻头牙齿全部磨损时就该起钻,此时总平均每米成本约为56元/m。

小 结

本文主要考虑了钻头牙齿磨损,说明了这种动态优选钻井参数法的原理和求解过程。若按钻头轴承寿命进行规划,还有待于进一步研究。

本文方法的结果,最优钻压、转速随 H 或 y 的增加而连续增加,可是现场绝大多数钻机达不到连续增压和无级调速(转速),所以本法结果很难应用。如果将来,钻机可以做到连续自动增压和无级调速(转速),则本文方法就可直接应用了。

(下转第36页)

由表3可见,漂珠的主要成份是 SiO_2 , CaO 含量很少,因此,在油井水泥中掺入漂珠起减轻作用的同时,还可以降低水泥中 CaO 与 SiO_2 的摩尔比,可部分代替硅粉作为水泥高温稳定剂。漂珠一般加量为20~100%(占水泥重量百分比),所提供的 SiO_2 尚不能完全使水泥石中 CaO/SiO_2 摩尔比接近于1,因此,需要附加一定量的硅粉。具体可根据漂珠加量,计算出可以提供的 SiO_2 的摩尔数,然后计算需要附加的硅粉用量,以保证水泥石中 CaO 与 SiO_2 摩尔比接近于1。

(本文收到日期:1991年7月22日)

[本文责任编辑 应硕源]

参 考 文 献

- [1]赵凯民,倪荣富:低密度水泥浆的应用与问题,《石油钻采工艺》1989年第3期
 [2]解伯寿,郑明光:微珠低密度水泥固井,《天然气工业》1988年第1期
 [3]刘付那等:使用气窜控制剂提高高压油气井的固井质量,《石油钻采工艺》1988年第5期
 [4]吴忠孚等:高强度低密度水泥及其外加剂的研究与应用,《钻井液与完井液》1990年第2期

(上接第18页)

符 号 说 明

- | | |
|---|-------------------------------|
| W —— 钻压, t; | C_R —— 钻机作业费, 元/h; |
| H —— 钻头牙齿磨损量(分为10级); | u —— 钻头牙齿磨损速度, l/h; |
| t —— 时间, h; | C_m —— 瞬时每米成本, 元/m; |
| V —— 机械钻速, m/h; | C_A —— 平均每米成本, 元/m; |
| C_T —— 总成本, 元; | C_B —— 钻头成本, 元/只; |
| N —— 转速, r/min; | y —— 钻头进尺, m; |
| P, Q, C_1, C_2, D_1, D_2 —— 钻头类型和尺寸参数, 可由表查到; | |
| A_F, K —— 分别为岩石研磨性和可钻性系数; | λ, M —— 分别为转速指数及门限钻压; |
| C_P, C_H —— 分别为压差系数及水力净化系数; | T_T —— 起下钻、接单根时间, h。 |

作者附言:在江汉石油管理局钻井工艺研究所定向井组帮助下及微机室为笔者提供上机条件,在此表示衷心感谢。

(本文收到日期:1991年6月26日)

[本文责任编辑 应硕源]

参 考 文 献

- [1]郭学增:《最优化钻井理论基础与计算》,北京,石油工业出版社,1987年,第13~17页,第91页
 [2]叶庆凯:《优化与最优控制中的计算方法》,北京,科学出版社,1986年,第132~136页