

综合考虑成本和钻速的 PDC 钻头钻进参数优化设计

金业权¹, 王茂林²

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院, 四川德阳 618300)

摘 要:传统的钻进参数优化模型不适用于 PDC 钻头。针对传统模型的不足,在牙轮钻头钻进参数优化理论的基础上,引入钻井成本和钻速权重系数,结合 PDC 钻头钻速方程、磨损方程和钻速随累积进尺的变化规律等基本方程,建立了钻井成本和钻速双目标约束下的 PDC 钻头钻进参数优化模型。该模型可根据降低成本或提速的具体目标设置钻井成本系数和钻速系数,在同时考虑成本和钻速的条件下对钻进参数进行优化设计。川西新场地区实钻资料的计算结果显示,经过参数优化后 PDC 钻头的单位进尺成本降低,同时钻速提高,这表明该模型可以用于双目标下 PDC 钻头钻进参数的优化设计。

关键词:钻井成本 机械钻速 PDC 钻头 钻井参数 优化设计

中图分类号:TE921+.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2012)05-0013-04

PDC Bit Drilling Parameter Optimization Design Integrating Cost and Drilling Rate

Jin Yequan¹, Wang Maolin²

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. Oil Drilling & Production Technology Research Institute, Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, CNPC, Deyang, Sichuan, 618300, China)

Abstract: In order to make up the shortage of traditional drilling parameter optimization model that can't apply to PDC bits, based on the roller cone bit drilling parameter optimization theory, this paper introduced the parameters of drilling cost and drilling speed. Combined with PDC bit drilling rate equation, wear equation and variation of drilling rate with the cumulative footage, the dual-goal PDC bit drilling parameter optimization model was built taking drilling rate and cost into account. This model can set drilling cost coefficient and drilling rate coefficient according to the specific objectives of cost reduction or speed increase, optimize and design the drilling parameters taking into account the costs and drilling rate. The calculation of drilling data in Xinchang site in western area of Sichuan verified the validity of the model, which indicated that this modal could be used for PDC bit drilling parameter optimization design with the dual goals.

Key words: drilling cost; penetration rate; PDC bit; drilling parameter; optimization design

传统的钻进参数优化模型针对的是牙轮钻头,以单位进尺成本为目标函数,不能满足 PDC 钻头钻进参数优化设计的需求。为了降低钻井成本、提高钻速,笔者建立了综合考虑钻井成本和钻速的双目标 PDC 钻头钻进参数优化模型,该模型引入了钻井成本和钻速权重系数,按照一定的权重对钻井成本和钻速两个目标进行优化,可对不同作业要求下的 PDC 钻头钻进参数进行优化。

收稿日期:2011-12-13; **改回日期:**2012-08-09。

作者简介:金业权(1968—),男,湖北黄冈人,1992年毕业于江汉石油学院钻井工程专业,2006年获武汉大学岩土工程专业博士学位,副教授,主要从事油气井工程方面的教学科研工作。

联系方式:(0532)86981152, jinyequan156@126.com。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“完井井控安全评估体系研究”(编号:10CX04035A)资助。

1 基本方程

1.1 钻速随进尺的变化规律

通过分析现场实钻数据发现,在钻进参数不发生变化的情况下,钻头的钻速与其累积进尺成反比^[1],即:

$$v = \frac{dH}{dt} = v_0 \frac{1}{1 + cH} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad v_0 = k W_s^{a_1} N^{b_1} D^{c_1} e^{d_1 \Delta p} \quad (2)$$

式中: v 为钻速, m/h; H 为钻头累积进尺, m; t 为钻进时间, h; v_0 为钻头在未磨损时的钻速, m/h; c 为与钻头性能和岩石性质相关的系数; k 为与岩石可钻性等因素相关的综合系数; W_s 为比钻压, kN/cm; N 为钻头转速, r/min; D 为钻头比水功率, W/cm²; Δp 为静态负压差, MPa; a_1, b_1, c_1 和 d_1 分别为钻压、转速、水功率和井底负压差对钻速的影响系数。

1.2 PDC 钻头磨损方程

根据前人的研究结果,可得 PDC 钻头的磨损方程^[2]为:

$$\frac{dh_f}{dt} = \frac{A_f W^\alpha N^\beta}{1 + c_f h_f} \quad (3)$$

式中: dh_f/dt 为钻头磨损速度, mm/h; A_f 为与钻头性能和地层性质有关的无因次系数; W 为钻压, kN; α 为钻压指数; β 为转速指数; c_f 为切削齿高度对磨损速度的影响系数; h_f 为钻头的相对磨损量。

1.3 单只钻头的累积进尺和使用时间

由式(1)和式(2)可得钻头总进尺表达式为:

$$H = \sqrt{\frac{2v_0}{cA_f W^\alpha N^\beta} \left(h_f + \frac{c_f}{2} h_f^2 \right) + \frac{1}{c^2} - \frac{1}{c}} \quad (4)$$

由式(3)可得钻头使用时间的表达式为:

$$t = \frac{1}{A_f W^\alpha N^\beta} \left(h_f + \frac{c_f}{2} h_f^2 \right) \quad (5)$$

2 目标函数的建立

2.1 传统钻进参数优化的目标函数

传统钻进参数优化以单位进尺的钻井成本为目标函数^[3],目标函数表达式为:

$$C = \frac{C_B + C_R(t_T + t)}{H} \quad (6)$$

式中: C 为单位进尺成本, 万元/m; C_B 为钻头成本, 万元; C_R 为钻机费用, 万元/h; t_T 为起下钻时间, h; t

为钻头纯钻进时间, h; H 为钻头进尺, m。

2.2 以钻速最优的目标函数

正常钻进过程中,所耗费的时间主要由纯钻进时间和起下钻、接单根时间两部分组成。行程钻速是将起下钻、接单根时间计算在内的钻进速度,其表达式为:

$$v_p = \frac{H}{t_T + t} \quad (7)$$

由式(7)可得单位进尺所用的平均时间。

2.3 双目标下的目标函数

钻井过程中,一方面希望钻井成本越小越好,另一方面希望钻井速度越快越好,实际在同一钻进参数情况下不可能同时满足以上两方面的要求,为此笔者建立了综合考虑钻井成本和钻速的钻进参数优化模型。为了便于计算,用最低钻时来等效最快钻速。为了消除钻井成本与钻速之间量纲的差异,需要对目标函数进行无量纲化处理,令:

$$f_c = \frac{C}{C_m} \quad (8)$$

$$f_v = \frac{v_{pm}}{v_p} \quad (9)$$

式中: C_m 为指定条件下的最优单位进尺成本, 万元/m; v_{pm} 为指定条件下的最优钻速, m/h。 f_c 为钻井成本系数; f_v 为钻速系数。

钻井成本 C 越小, f_c 越小,表示指定条件下的钻井成本越低,其最小值为 1。钻速 v_p 越大, f_v 越小,表示指定条件下钻速越大,其最小值也为 1。在实际施工过程中,希望 f_c 和 f_v 都越小越好。

设钻井成本和钻速的权重系数分别为 m 和 n , $0 \leq m \leq 1, 0 \leq n \leq 1$, 且 $m + n = 1$ 。对于传统的参数优化模型来说,其实就是“ $m=1, n=0$ ”;若只考虑钻速最优,则 $m=0, n=1$ 。

建立如式(10)所示的综合考虑钻井成本和钻速的目标函数:

$$f = \frac{m}{C_m} C + n \frac{v_{pm}}{v_p} = \frac{m}{C_m} \frac{C_B + C_R(t_T + t)}{H} + n v_{pm} \frac{t_T + t}{H} \quad (10)$$

假设初始井深为 H_0 ,则钻头钻达的最终井深为 $H_0 + H$,因而:

$$t_T = \frac{H_0 + H}{v_T} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)得:

$$f = \frac{\frac{m}{C_m} C_B + R \frac{H_0}{v_T} + R t}{H} + \frac{R}{v_T} \quad (12)$$

$$\text{其中} \quad R = \frac{m}{C_m} C_R + m v_{pm} \quad (13)$$

3 参数优化

根据最优理论, 寻求目标函数极值点的首要步骤, 是对各个变量求偏导数, 并令其等于 0, 然后求得特定条件下目标函数最优的钻进参数^[3-4]。

3.1 最优磨损量

在 W - N - h_f 的三维空间中, 对于特定的钻头, 用以钻进某一特定地层时, 如果钻压和转速恒定, 就可以求得一个使目标函数最小的钻头磨损量, 这个磨损量即为该条件下的最优磨损量。求目标函数 f 对磨损量 h_f 的偏导数, 令其为 0, 求得最优磨损量, 即求解方程为:

$$R \left[\frac{2Sv_0}{A_f W^\alpha N^\beta} + \frac{1}{c} - \sqrt{\frac{2Sv_0}{c A_f W^\alpha N^\beta} + \frac{1}{c^2}} \right] - v_0 \left[\frac{m}{C_m} C_B + \frac{R H_0}{v_T} + \frac{RS}{A_f W^\alpha N^\beta} \right] = 0 \quad (14)$$

$$\text{其中} \quad S = h_f + \frac{c_f}{2} h_f^2 \quad (15)$$

3.2 最优钻压

一定条件下的最优钻压同理可求, 方程式为:

$$-R\alpha \left[\frac{2Sv_0 \left(\frac{W}{W_0} \right)^{a_1 - \alpha}}{A_f W_0^\alpha N^\beta} + \frac{1}{c} - \sqrt{\frac{2Sv_0 \left(\frac{W}{W_0} \right)^{a_1 - \alpha}}{c A_f W_0^\alpha N^\beta} + \frac{1}{c^2}} \right] - \left[\frac{m}{C_m} C_B + \frac{R H_0}{v_T} + \frac{RS}{A_f W^\alpha N^\beta} \right] \left(\frac{W}{W_0} \right)^{a_1} = 0 \quad (16)$$

3.3 最优转速

一定条件下的最优转速求解方程为:

$$-R\beta \left[\frac{2Sv_0 \left(\frac{N}{N_0} \right)^{b_1 - \beta}}{A_f W^\alpha N_0^\beta} + \frac{1}{c} - \sqrt{\frac{2Sv_0 \left(\frac{N}{N_0} \right)^{b_1 - \beta}}{c A_f W^\alpha N_0^\beta} + \frac{1}{c^2}} \right] - \left[\frac{m}{C_m} C_B + \frac{R H_0}{v_T} + \frac{RS}{A_f W^\alpha N_0^\beta} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{-\beta} \right] (b - \beta) v_0 \left(\frac{N}{N_0} \right)^{b_1} = 0 \quad (17)$$

4 实例计算

川西地区新场构造机械钻速低, 严重影响油气勘探开发进程, 这就要求在钻井作业中要采用一切技术手段, 提高钻井效率和油气勘探开发速度。新 22 井从三开开始钻进千佛崖组、白田坝组及须家河组等复杂地层。笔者以该井三开钻井过程中第 2 只钻头的实钻数据为例, 对该钻头钻进过程中的钻进参数进行优化, 优化时用到的相关参数为: 钻压 130 kN, 转速 80 r/min, 钻头相对磨损量 0.35, 纯钻进时间 70 h, $c_f = 40$, $A_f = 4.72 \times 10^{-5}$, 钻压指数 $\alpha = 0.8$, 转速指数 $\beta = 0.65$, 钻头成本 (C_B) 20 万元, 钻机日费 5 万元。

假设设计方对钻速和成本同等看重, 即 $m = 0.5$, $n = 0.5$, 按照上述方法将相关参数分别带入式 (12), (14), (16) 进行相关计算, 优化结果见表 1。

表 1 新 22 井三开第 2 只钻头参数优化结果

Table 1 Parameter optimization results for the second drill bit of the third spud for Well Xin 22

数据类型	钻压/kN	钻头转速/ (r · min ⁻¹)	钻头相对 磨损量	钻头使用 时间/h	钻头累积 进尺/m	单位进尺成本/ (万元 · m ⁻¹)	钻速/ (m · h ⁻¹)
实钻数据	130	80	0.35	70.0	411.0	0.173	4.01
参数 优化	A	130	80	122.2	655.7	0.151	4.16
	B	135	80	68.0	423.5	0.166	4.21
	C	130	65	80.0	478.0	0.160	4.23

注: A 表示以实际钻压、转速以及该条件下的最优磨损量钻进; B 表示以实际钻速、磨损量以及该条件下的最优钻压钻进; C 表示以实际钻压、磨损量以及该条件下的最优转速钻进。

实际施工条件下及 PDC 钻头钻进参数优化后最优磨损量、最优钻压、最优钻头转速条件下的钻速和单位进尺成本如图 1 所示。

由表 1 和图 1 可知,经过参数优化后 PDC 钻头的单位进尺成本有所降低,同时钻速有不同程度的提高。设计方还可根据钻井的最终目标,结合甲方的意愿调整钻井成本和钻速的权重系数,进行不同作业要求下的参数优化。

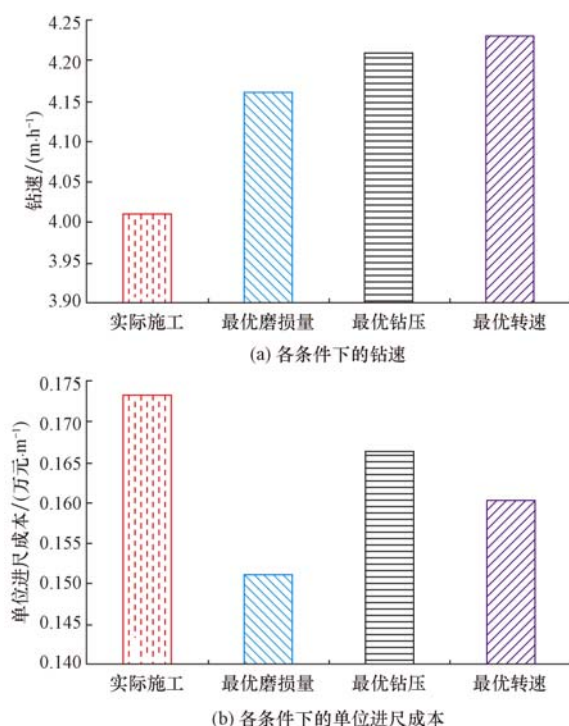


图 1 实际施工和参数优化后的钻速与单位进尺成本
Fig.1 Comparison of drilling rate and unit footage cost during the drilling operation and after parameter optimization

5 结 论

1) 综合考虑钻井成本和钻速的 PDC 钻头钻进参数优化模型,弥补了传统牙轮钻头钻进参数优化模型的不足,现场实钻资料计算表明,该模型可用于 PDC 钻头的提速和降耗优化设计。

2) 这种建立成本和钻速双目标的钻进参数优化模型思想,可以用于其他钻头和钻井方式下的钻进参数优选。

参 考 文 献

References

- [1] 韩颖. 切削式 PDC 钻头钻速方程建立及其应用[D]. 大庆: 大庆石油学院石油工程学院, 2007.
Han Ying. Establishment and application of the chip PDC bit drilling rate equation[D]. Daqing: Daqing petroleum institute, College of Petroleum Engineering, 2007.
- [2] 孙明光, 陈庭根. PDC 钻头切削齿磨损规律的试验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1996, 20(增刊 1): 26-29.
Sun Mingguang, Chen Tinggen. Experimental study on the wear laws of PDC cutter[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1996, 20 (supplement 1): 26-29.
- [3] 陈庭根, 管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 135-141.
Chen Tinggen, Guan Zhichuan. Drilling engineering theory and technology[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2000: 135-141.
- [4] 郭学增. 最优钻井理论基础与计算[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987: 1-109.
Guo Xuezheng. Optimization of drilling theoretical basis for computing[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987: 1-109.

欢迎订阅 2013 年《石油地质与工程》

《石油地质与工程》杂志创刊于 1987 年,是由中国石油化工集团公司主管、河南油田分公司和河南省石油学会主办、面向国内外公开发行的技术类期刊,中国标准连续出版物号 CN 41-1388/TE, ISSN 1673-8217。《石油地质与工程》是中国期刊方阵“双百期刊”,全国优秀科技期刊(二等奖),中石化集团公司优秀科技期刊,河南省优秀科技期刊和中国学术期刊综合评价数据库来源期刊。《石油地质与工程》主要报道国内石油天然气勘探开发、油气藏工程及石油钻采工程技术专业科研和生产方面的新理论、新技术、新工艺、新成果和先进经验,以及国内外相关专业发展水平综述等。设有地质勘探、油田开发、石油工程栏目。读者对象包括石油勘探开发行业的科技人员、管理干部和大专院校师生。

《石油地质与工程》为双月刊,大 16 开本 120 页;每期定价 25 元,全年定价 150 元,逢单月 25 日出版。国内邮发代号 36-117。单位或个人在全国各地邮政局所均可征订,也可直接向我杂志社订阅。

地址:河南省南阳市油田中山路《石油地质与工程》杂志社;邮编:473132;联系人:桑晓克。

电话:(0377)63830612 传真:(0377)63830777;E-mail: hnsy@sohu.net。