

基于 UG/OPEN 的 PDC 钻头切削参数仿真方法

况雨春¹, 陈玉中¹, 屠俊文², 张 智³

(1. 西南石油大学机电工程学院, 四川成都 610500; 2. 中国石油技术开发公司, 北京 100009; 3. 中国石油西南油气田分公司采气工程研究院, 四川广汉 618300)

摘 要:采用仿真方法进行 PDC 钻头切削参数的量化是钻头个性化设计的重要技术手段。为提高 PDC 钻头钻进仿真的效率及精度, 并与钻头三维设计系统实现无缝连接, 在 PDC 钻头切削参数理论及切削量计算方法的基础上, 利用 UG 软件的布尔运算功能进行了二次开发, 基于 UG/OPEN 快速获取切削量的原理建立了 PDC 钻头井底模型, 将钻头的切削过程等效为几何结构的布尔减运算, 通过数值运算获取切削体积、接触面积、切削力等参数。研究表明, 切削参数仿真结果与既有数值方法仿真结果的变化趋势相同, 并且具有更高的精度和仿真效率。基于 UG/OPEN 的 PDC 钻头切削参数仿真方法为切削参数获取提供了一种新的方法, 可以为个性化 PDC 钻头的快速设计提供参考。

关键词: PDC 钻头 切削参数 仿真

中图分类号: TE921⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2014)04-0111-05

Simulation of Cutting Parameters of PDC Bit Based on UG/OPEN

Kuang Yuchun¹, Chen Yuzhong¹, Tu Junwen², Zhang Zhi³

(1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. China Petroleum Technology and Development Corporation, Beijing, 100009, China; 3. Gas Production Engineering Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Guanghan, Sichuan, 618300, China)

Abstract: The quantification of PDC bit cutting parameters using simulation method is an important technique for drill bit customization. To improve the efficiency and accuracy of PDC bit drilling simulation and realize a seamless connection with 3D design system of drill bit, UG/OPEN was imported in the study. Based on PDC bit cutting parameters theory and original computing method of cutting volume, the Boolean operation of UG software was used for redevelopment. Meanwhile, the principle of UG/OPEN quick access to the cutting volume was utilized to build the bottomhole PDC bit model. In this way, the cutting process was simulated equivalent to the geometric Boolean subtraction, and numerical computation was made to obtain cutting volume, contact area, cutting force and other parameters. The study showed that the simulation of cutting parameters revealed the same tendency as the existing numerical simulation, and has higher accuracy and simulation efficiency. Therefore, the new method of cutting parameters simulation based on UG/OPEN provided a technical foundation for rapid customization of PDC bit.

Key words: PDC bit; cutting parameters; simulation

PDC 钻头因具有机械钻速高, 经济效益好的特点而被广泛运用, 目前, PDC 钻头进尺约占国内钻井总进尺的 80%。PDC 钻头的主要特点是结构变化多, 设计灵活性大, 对适用地层和适用条件敏感性强。因此, 针对地层性质和适用条件进行 PDC 钻头个性化设计是各钻头生产厂家的关键技术^[1]。在布齿参数初定的情况下, 量化钻头各齿接触面积、切削

收稿日期: 2014-02-17; **改回日期:** 2014-05-25。

作者简介: 况雨春(1971—), 男, 四川达州人, 1994 年毕业于西南石油学院机械工程专业, 1999 年获西南石油学院机械设计及理论专业博士学位, 教授, 主要从事计算机仿真、CAD/CAE/CFD 技术在机械及石油工程中的应用等教学及科研工作。

联系方式: swpikyc@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“单次冲击加载后岩石全程动态本构特性及应用研究”(编号: 51174173)资助。

体积有助于判定布齿方案的优劣。因此,PDC 钻头切削参数的量化方法是 PDC 钻头个性化设计的关键技术。涡动是造成 PDC 钻头早期损坏的一个重要原因,而引起钻头涡动的主要原因是钻头工作时受到较大侧向力的作用。PDC 钻头单齿及整体三维受力也是钻头布齿参数优化需要考虑的关键因素。目前使用的切削参数量化方法中,数值法对钻头复杂工况实现较为困难,离散化方法计算速度慢,计算精度不高。为缩短 PDC 钻头设计周期,提高分析精度,并且能够分析复杂工况,笔者提出一种 PDC 钻头快速分析方法,一方面可以快速精确地获取切削参数,另一方面可以快速计算出各齿受力,最终对 PDC 钻头进行多目标优化。文中研究的 PDC 钻头切削参数包括切削体积、接触面积、切削力等,仿真时考虑了 PDC 齿的布齿位置、后倾角、侧倾角以及法向角。

1 切削参数计算方法概述

目前,主要是通过建立解析模型或数值模型计算得到 PDC 钻头切削参数。文献[2]先利用数值方法获得构成切削截面的“曲边”,然后再计算出接触面积和切削弧长。切削弧长 L 等于齿接触角 α 与齿半径 r 的乘积,即:

$$L = \alpha r \quad (1)$$

在计算切削齿与岩石接触面积时,将齿刃接触区作 N 等分,计算各等分点或微元端点在钻头坐标系中的坐标。通过每个等分点做一组与当前齿方向基准线平行的直线,计算每条直线与切削截面上部特征曲线交点的坐标。当计算出所有的等分点坐标以及所有与等分点相对应的平行线交点坐标后,就可以计算出每个微元的面积,对所有微元面积求和就得到接触面积 A 。计算切削体积时,先计算出切削区域的几何中心(R, H),再求出切削体积 V :

$$V = 2\pi RA \quad (2)$$

式中, R 为齿的中心到钻头旋转中心的距离。

上述方法主要采用解析模型,考虑的是理想工况。采用数值法计算速度快,但对钻头的复杂运动、复杂的切削结构及复杂地层条件不能做更多考虑。

文献[3,4]在钻头几何学研究的基础上,通过坐标变换建立了 PDC 钻头几何学仿真模型,并在 MATLAB 编程语言环境下实现其数据的可视化,获得反映钻头牙齿平面与齿侧面形状、大小和位置的三维实体模型。运用离散化方法可得到 PDC 齿、

井底和井壁表面上各离散点坐标的计算模型,再根据位置干涉原理计算切削参数,但受离散化网格密度的影响,该方法计算速度慢,计算精度不高,但可以考虑钻头的复杂运动、复杂的切削结构及复杂地层条件。

利用三维 CAD 软件的布尔运算功能^[5]可以建立 PDC 齿切削量的计算方法,进而可以进一步借鉴数值仿真的思路进行虚拟钻进仿真方法研究。笔者利用 CAD 软件的建模功能及切削力模型实现钻头的钻进过程仿真,并计算切削参数,也可以进一步利用软件的二次开发功能设置复杂地层、复杂运动等条件,实现更为复杂的钻进仿真分析。

2 基于 UG 的切削参数仿真方法

2.1 基本原理

UG 是目前机械三维设计及加工常用的软件。在机械零件仿真加工中经常应用 UG 的相关功能^[6],其中的一些功能也可应用在 PDC 钻头的钻进仿真中。在 UG 中对 PDC 钻头切削齿模型做虚拟钻进运动,假设切削为纯塑性切削,每钻进一个小的角度后,与井底模型做布尔减运算,井底模型被切削后形成连续切削带,同时可以进行接触面积、切削体积、切削力的计算,最终 PDC 钻头虚拟钻进一段时间后得到仿真后的井底模型。具体通过以下几个步骤实现:

- 1) 建立一个圆柱形的井底模型,使 PDC 钻头没入井底模型中;
- 2) PDC 钻头对井底模型做布尔减运算,去除井底模型材料;
- 3) PDC 钻头沿其轴线旋转,同时沿轴向给进,然后与井底模型做布尔减运算,同时进行切削参数计算。

2.2 单齿切削模型

假设 PDC 钻头沿井筒中心线作无偏心匀速旋转的纯塑性切削,PDC 钻头上每个齿沿各自螺旋线切削井底模型。将 PDC 钻头模型导入 UG 中提取每个齿的齿面圆弧。以某型号钻头为例,选择 PDC 钻头顶部 8 颗齿的齿面圆弧,运用 UG 的扫描功能建立 8 个齿旋转一周的切削轨迹,并与虚拟岩层做布尔减运算,得到 PDC 钻头触底时的井底模型,如图 1 所示。

建立一个平面,使 8 颗齿的切削轨迹到该平面为止。将其中 7 颗齿与虚拟岩层做布尔减运算,另一颗齿与岩层做布尔交运算,得到该齿实际切削岩石

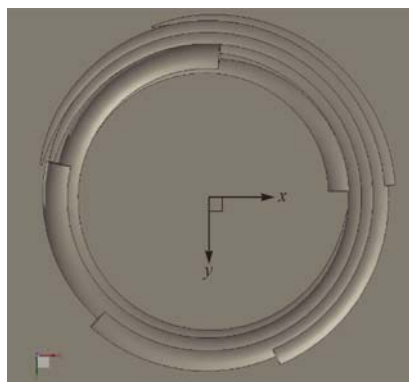


图 1 PDC 钻头触底时的井底模型

Fig. 1 Bottomhole PDC drill bit model

的形状。利用该方法得到单齿切削岩层三周时的形状,如图 2 所示。经过截面对比,当钻头没入岩层一定深度后其切削岩石的截面相同,因此各齿切削体积为接触面轮廓沿其轨迹螺旋线扫掠体的体积。

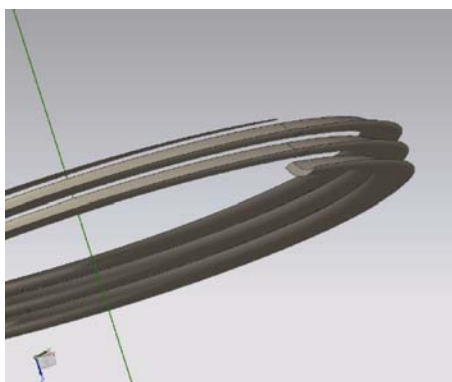


图 2 单颗齿切削岩石三周时的连续破碎带形状

Fig. 2 The shape of continuous broken zone formed by single tooth cutting rock three circles

2.3 仿真切削参数的获取

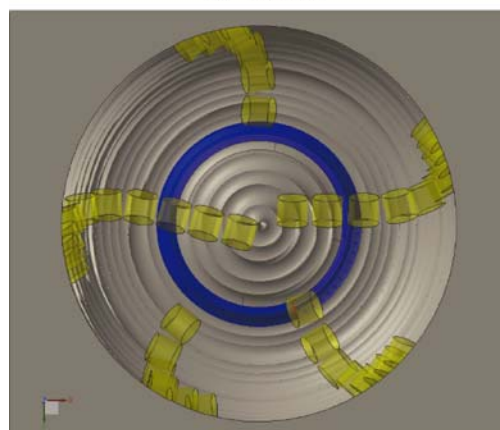
钻头仿真切削量的计算本质上是对去除材料模型的体积进行测量^[5],同理,基于 UG 的去除材料仿真就是对研究对象中刀具与坯体实际运动的仿真,运用布尔运算去除材料,最终得到模型的外形及相关参数。

基于 UG 的切削量获取方法是:首先遍历 PDC 钻头模型的边曲线,识别圆弧类型边并提取中点坐标、半径及圆弧所在平面法向量等定位参数;与 PDC 齿半径对比过滤非齿面圆弧的定位参数,按圆心坐标排序并对比,排除重复的齿面圆弧定位参数;再经过对圆心坐标的排序获取相应的刀翼号与齿号;利用定位参数建立圆弧,沿轨迹螺旋线建立各个齿旋转若干周的切削轨迹,并与虚拟岩层做布尔运算,得到钻进过程中某一时刻的井底模型;井底模型与切削轨迹末端圆面相交形成每个齿的切削接触

面,该接触面就是每个齿与岩石的实际接触面;利用 UG 的分析功能测量出每个齿的接触面积及接触弧长;将每个齿接触面的边曲线沿其切削轨迹螺旋线扫掠一周,测量得到每个齿实际的切削体积,同时得到井底模型。基于 UG 获取切削量的方法能够自动识别并提取 PDC 钻头模型中 PDC 各齿的参数,可提高获取切削量的效率。图 3 为 PDC 钻头实钻井底与仿真井底。从图 3 可以看出,基于 UG 仿真获取的井底模型与试验井底无明显差异。



(a) 实钻井底



(b) 仿真井底

图 3 PDC 钻头实钻井底与仿真井底

Fig. 3 Actual bottomhole and simulated bottomhole cut by PDC bit

2.4 PDC 钻头单齿受力分析

切削齿受力与后倾角、岩石可钻性、接触面积和接触弧长存在一定的函数关系。由试验得出切削齿的受力模型式(3)。由受力模型可以计算出各齿的轴向力、径向力及侧向力^[7]。

$$\begin{cases} F_c = a_1 A_c S_c + b_1 \\ F_n = a_2 A_c S_c + b_2 \\ F_v = F_n \cos \gamma \\ F_r = F_n \sin \gamma \end{cases} \quad (3)$$

式中: F_c 为侧向力, N; F_n 为正压力, N; F_v 为轴向力, N; F_r 为径向力, N; A_c 为接触面积, mm^2 ; S_c 为接触弧长, m; γ 为法向角, ($^\circ$); K_d 为可钻性级值; a_1 , a_2 , b_1 和 b_2 为通过试验获得的与齿的后倾角、 K_d 有关的系数。

3 仿真流程

由 PDC 钻头模型获取切削参数的过程如下:

1) 将 PDC 钻头导入 UG, 提取出 PDC 钻头每一个齿的齿面圆弧, 同时可以测得各个圆弧半径及圆心坐标;

2) 根据各齿面圆心坐标及 PDC 钻头每转进尺

绘制各齿切削轨迹螺旋线若干圈;

3) 建立虚拟地层并与 PDC 钻头各齿做布尔减运算, 得到钻进过程中某时刻的井底模型;

4) 由几何模型测量出各项切削参数;

5) 利用切削齿的受力模型计算出切削齿的受力。

4 仿真实例

利用文献[4]中的仿真方法和本文方法仿真某型号 PDC 钻头的钻进过程, 获取切削参数, 并将 2 种方法获取的切削参数进行对比, 结果如图 4 所示。

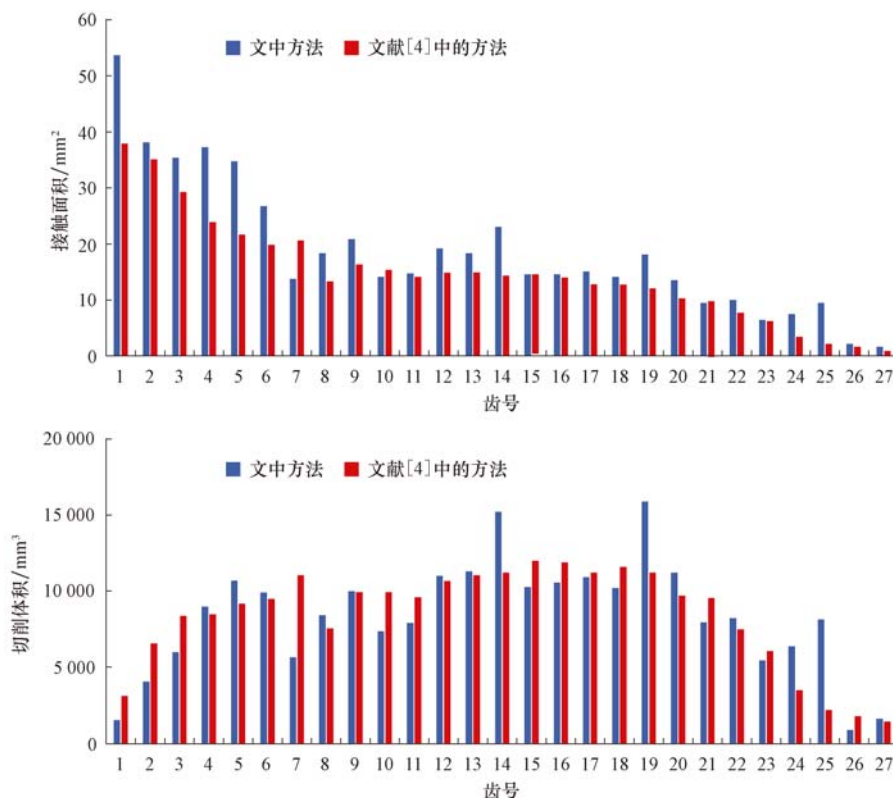


图 4 PDC 钻头切削量对比

Fig. 4 Comparison of PDC drill bit cutting volume

笔者在同一台计算机上利用文献[4]中的方法和本文方法进行了 PDC 钻头钻进过程仿真, 文献[4]中的方法虚拟钻进 1 圈的时间为 72 min, 而本文方法虚拟钻头钻进 11 圈的时间为 4 min, 计算效率大大提高。从理论上讲, 文献[4]中的方法采用正交网格离散井底和钻头切削齿模型, 网格大小不仅影响计算时间, 更影响接触面积和切削体积的计算精度, 即网格越大, 计算精度越低, 实例中采用的井底计算网格尺度为 1 mm (也可以采用 0.001 mm,

但计算时间将以几何级数增加); 本文方法采用的 CAD 二次开发技术利用的是三维软件内部的矢量化算法, 不需要做模型离散化处理, 计算精度 (尺度量级) 为 0.001 mm。

同时, 根据文中所列单齿受力模型, 利用 UG/OPEN 编制计算切削力的代码, 直接在 UG 软件内部计算了各切削齿的轴向力及径向力, 结果见图 5。由于采用的是定钻速, 因此, 可以根据轴向力之和预测达到该钻速需要加载的钻压以及钻头的轴向不平衡力。

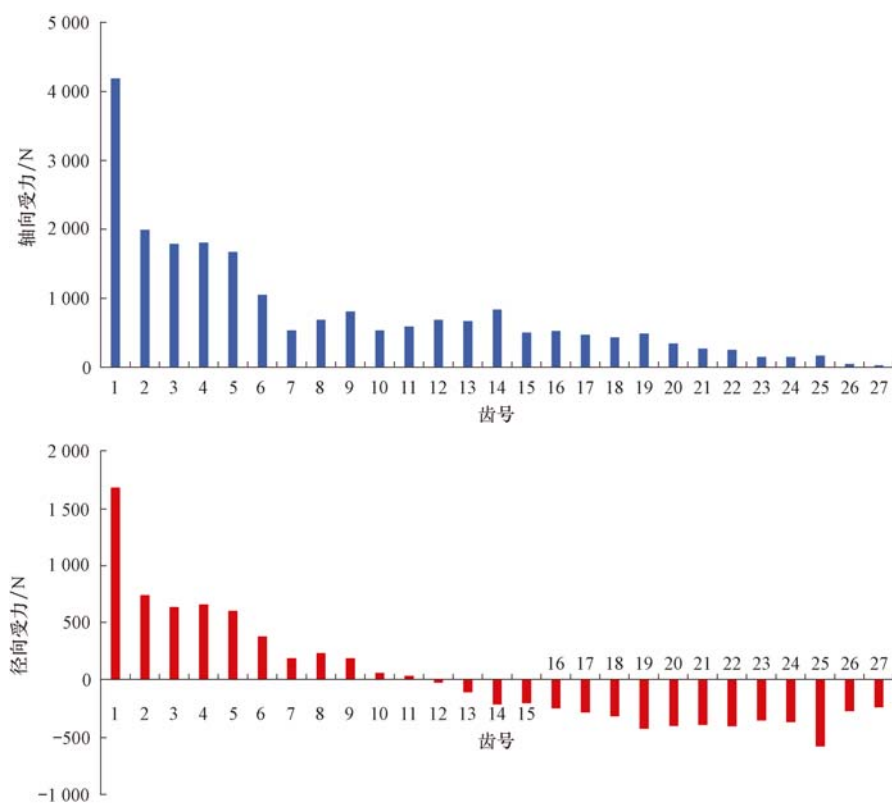


图 5 PDC 钻头单齿受力

Fig. 5 Force on a single tooth of PDC bit

5 结 论

1) 运用 UG/OPEN 编程自动获取 PDC 钻头齿与工作面相关的参数, 可以自动建立井底模型以及对井底模型进行测量获取切削参数。

2) 在整合了切削力的计算之后, 建立的方法可以作为钻头切削性能分析评价模块与 PDC 钻头三维设计系统进行无缝对接, 实现快速设计评价。

3) 基于 UG 的仿真方法不需要单独编制计算接触面积和切屑体积的程序, 同时切削参数的计算利用了 UG 的矢量化算法, 不仅计算速度快, 理论计算精度也更高。

参 考 文 献

References

- [1] 陈国庆. PDC 钻头的发展趋势[J]. 石油机械, 2003, 31(增刊 1): 103-106.
Chen Guoqing. The development trend of PDC bit[J]. China Petroleum Machinery, 2003, 31(supplement 1): 103-106.
- [2] 田丰, 杨迎新, 任海涛, 等. PDC 钻头切削齿工作区域及切削量的分析理论和计算方法[J]. 钻采工艺, 2009, 32(2): 51-53.
Tian Feng, Yang Yingxin, Ren Haitao, et al. Analytical theory and computational method of contact area and cutting volume

of PDC bit cutters[J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(2): 51-53.

- [3] 王亚萍, 况雨春, 杨高. 基于 MATLAB 的 PDC 钻头几何学仿真模型[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(增刊 2): 116-118.
Wang Yaping, Kuang Yuchun, Yang Gao. The geometry emulation model of PDC bit by using MATLAB[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(supplement 2): 116-118.
- [4] 任海涛, 杨迎新, 陈炼, 等. PDC 钻头钻进仿真系统数字化方法研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(5): 26-29.
Ren Haitao, Yang Yingxin, Chen Lian, et al. Research on the digital method of the PDC bit drilling progress simulation system[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2010, 32(5): 26-29.
- [5] 廖忠民, 吴泽兵, 魏秦文. 利用 Pro/TOOLKIT 计算 PDC 齿切削量参数[J]. 石油矿场机械, 2005, 34(1): 47-50.
Liao Zhongmin, Wu Zebing, Wei Qinwen. Calculating the cutting parameters of PDC bit with Pro/TOOLKIT[J]. Oil Field Equipment, 2005, 34(1): 47-50.
- [6] 刘凯, 夏继强, 石侃. 基于 UG 的椭圆锥齿轮的仿真加工[J]. 机械传动, 2012, 36(8): 112-115, 118.
Liu Kai, Xia Jiqiang, Shi Kan. Simulation processing of elliptic bevel gear based on UG[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2012, 36(8): 112-115, 118.
- [7] 邹德永, 张将海, 王瑞和. PDC 钻头力学模型的试验研究[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(2): 41-43.
Zou Deyong, Zhang Jianghai, Wang Ruihe. The experiment study on mechanical model of PDC bits[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(2): 41-43.

[编辑 刘文臣]