

井下液压脉冲发生器工作特性仿真

管志川, 张洪宁, 刘永旺, 梁德阳, 许玉强

(中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:井下液压脉冲发生器是一种可调制脉冲射流的井下提速工具,该装置的工作原理是利用井底钻柱振动能量,采用活塞激励的方式调制脉冲射流,基于该装置工作原理,利用 Matlab 环境下的 Simulink 系统建立装置工作状态下的仿真模型,对装置的工作特性进行仿真分析。结果表明:装置调制脉冲射流的压力变化值与装置内柱塞运动规律密切相关,装置产生的脉冲压力幅值随钻头压降的增大而增大,但增长幅度逐渐变缓,随钻井液流量的增加呈线性减小趋势,随钻压的增大而增大,随转速的升高而增大,合理选取钻进参数有助于装置工作性能的进一步提升。

关键词:钻井; 钻柱振动; 脉冲发生器; 仿真模型

中图分类号:TE 21 **文献标志码:**A

引用格式:管志川,张洪宁,刘永旺,等. 井下液压脉冲发生器工作特性仿真[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2015,39(3):84-88.

GUAN Zhichuan, ZHANG Hongning, LIU Yongwang, et al. Simulation of working characteristic of downhole hydraulically pulsed jet generator[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 84-88.

Simulation of working characteristic of downhole hydraulically pulsed jet generator

GUAN Zhichuan, ZHANG Hongning, LIU Yongwang, LIANG Deyang, XU Yuqiang

(School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The downhole hydraulically pulsed jet generator is a downhole tool that can transform the vibration of drill string into modulated pulse jet to improve the rate of penetration (ROP) in oil and gas well drilling. A simulation model of the device was established using the Simulink system of the Matlab software. The simulation results show that the pressure of the pulsed jet generated by the device is closely related to the motion of the piston in the jet generator. The amplitude of the jet pressure increases with the pressure drop over the drilling bit increasing, but decreases linearly with flow rate of the drilling fluid increasing. The jet pressure also increases with the increase of the weight on bit and the rotating speed of drilling string. Therefore, the efficiency of the pulsed jet generator can be improved by adjusting the parameters of drilling operation.

Keywords: drilling; drill string vibration; pulsed jet generator; simulation model

在深井、超深井钻进过程中,除了钻井设备、地层岩石可钻性等客观因素外,井底水力能量是影响机械钻速的重要因素^[1]。研究与现场实践表明:将井底连续喷射的钻井液调制为脉冲喷射,即脉冲射流,可有效提高井底水力能量的利用效率,提高井底岩屑的清洁能力,从而达到提高钻速的效果^[2-4]。井

下液压脉冲发生器是一种可调制脉冲射流的井下提速工具,该装置的工作原理是利用井底钻柱振动能量,采用活塞激励的方式调制脉冲射流,基于该装置工作原理,利用 Matlab 环境下的 Simulink 系统建立装置工作状态下的仿真数学模型,对装置的工作特性进行仿真分析。

收稿日期:2014-10-31

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05021-001);国家“973”计划项目(2010CB226706)

作者简介:管志川(1959-),男,教授,国家级教学名师,博士,博士生导师,主要从事油气井力学、井下测控技术、深井超深井钻井方面的研究。E-mail:guanzhch@upc.edu.cn。

1 井下液压脉冲发生器的工作原理

井下液压脉冲发生器的结构^[5-7]如图 1 所示。该装置在工作过程中以井底钻压波动力为动力源^[8-13],带动装置内的柱塞-弹簧系统往复运动,周期性的压缩柱塞缸内钻井液从而产生脉冲射流。柱塞缸与钻头内腔联通,柱塞缸内钻井液压力的脉动变化实现了钻头喷嘴的脉冲喷射。

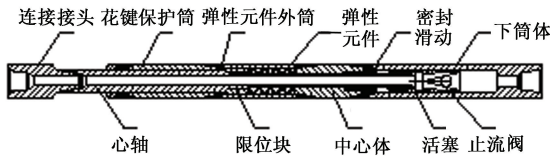


图 1 井下液压脉冲发生器结构

Fig. 1 Structure of downhole hydraulically pulsed jet generator

2 装置工作状态下的数学方程

装置的工作原理如图 2 所示。图 2 中 M-K 为柱塞-弹簧元件;V 为液压缸;PU 为容积腔; G_1 为流量入口控制单向阀; J_1 为钻头喷嘴。

图 2 中入口流量随单向阀内外压差的变化而变化,由此建立控制单向阀的压力-流量方程为

$$Q = C_d w \frac{A_d \Delta p}{K_d} \sqrt{\frac{2\Delta p_1}{\rho}} \quad (1)$$

式中, Q 为通过单向阀的钻井液流量, m^3/s ; C_d 为流量系数; w 为阀口长度, m ; A_d 为单向阀最大过流面积, m^2 ; K_d 为单向阀的弹簧刚度, N/m ; Δp_1 为单向阀内外压力差, Pa ; ρ 为钻井液密度, kg/m^3 。

令

$$R_C = C_d w x_{\max} \sqrt{2/\rho} \quad (2)$$

式中, x 为单向阀最大开度, m ; R_C 为单向阀稳定在最大开度时液导。

由式(1)和(2)联立可得:

$$Q_1 = \begin{cases} 0, & \Delta p \leq 0; \\ R_C \frac{A_d}{K_d x_{\max}} \sqrt{\Delta p^3}, & 0 < \Delta p < p_d; \\ R_C \sqrt{\Delta p}, & \Delta p \geq p_d. \end{cases} \quad (3)$$

式中, p_d 为单向阀在最大开度处的压力降, Pa 。

图 2 中柱塞-弹簧元件 M-K 与液压缸 V 共同组成压力控制系统,由连续流量方程及振动阻尼方程可建立压力控制系统的数学模型:

$$Mx'' + Bx' + K(x + x_0) = F - \sum \Delta p_2 \Delta A - \sum f \quad (4)$$

式中, M 为柱塞质量, kg ; B 为弹性元件阻尼系数; K 为弹性复位系统的弹性刚度, N/m ; x 为柱塞运动位移, m ; x_0 为柱塞平衡时位移, m ; x' 为柱塞运动速度, m/s ; x'' 为柱塞运动加速度, m/s^2 ; F 为钻压波动力, N ; Δp_2 为柱塞内部压差, Pa ; ΔA 为柱塞上下端面受力面积差, m^2 ; f 为摩擦阻力, N 。

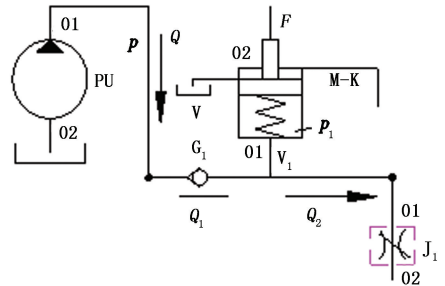


图 2 井下液压脉冲发生器工作原理

Fig. 2 Working principles of downhole hydraulically pulsed jet generator

摩擦阻力表达式为

$$f = \mu \pi D L F_N \quad (5)$$

式中, μ 为组合密封的动摩擦系数; D 为组合密封外径, m ; L 为组合密封长度, m ; F_N 为预压力, N 。

根据质量守恒定律,对于某一控制体积 V_i ,其流入与流出量之和为零。考虑液体的可压缩性和系统的泄漏量,以装置内液压缸为对象建立流量连续方程,即

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{K_m}{V - Ax} (Q_1 - Q_2 + Ax') - C_L \Delta p_1 \quad (6)$$

式中, p_1 为液压缸内的压力, Pa ; K_m 为钻井液体积弹性模量, Pa ; A 为柱塞面积, m^2 ; V 为液压缸体积, m^3 ; Q_1 为液压缸输入流量, m^3/s ; Q_2 为液压缸输出流量, m^3/s ; C_L 为泄漏系数。

图 2 中 J_1 为钻头喷嘴,即该系统的泄流孔,由小口节流方程可得:

$$Q_2 = C_d \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p_3}{\rho}} \quad (7)$$

式中, d 为喷嘴当量直径, m ; Δp_3 为钻头喷嘴压降, Pa 。

3 仿真模型及结果分析

Simulink 是 Matlab 内可以进行动态系统建模、仿真与分析的软件包,利用 Simulink 进行模拟,将上述方程利用 S-Function 编写文件,分模块封装后搭建仿真模型,模拟装置的工作过程^[14-16]。为便于分析各参数对装置工作特性的影响规律,采用单因素法确定仿真参数,通过改变装置工作状态,确定单一因素对装

置调制脉冲射流幅值的影响。装置的工作参数包括当量喷嘴面积、钻井液排量、钻压、转速等,根据钻井过程中的实际情况,确定钻进参数的变化范围。

根据装置工作原理,模拟装置在一定参数下调制脉冲压力的变化规律及柱塞运动规律,仿真曲线如图3所示。

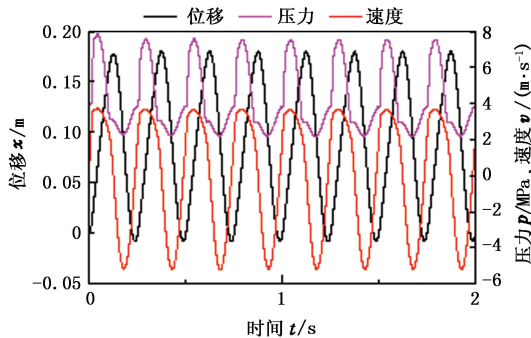


图3 井下液脉冲发生器工作特性仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of performance characteristics of downhole hydraulically pulsed jet generator

在钻井液排量为30 L/s、钻压40 kN、转速80 r/min、钻井液密度 1.2 g/cm^3 、钻头当量喷嘴直径22 mm(在常规钻井条件下钻头压降约为4 MPa)的条件下,液压缸内的压力在2.2~7.9 MPa呈周期性波动,脉冲压力幅值(一个周期内液压缸内最大压力与最小压力之差)为5.7 MPa;柱塞在液压缸内上下往复运动(图3中下行速度为正,上行速度为负),其位移及速度曲线均呈正弦周期波动。在一个周期内,柱塞从初始位置($x=0$)开始运动,随着柱塞运动速度的增大,液压缸内的压力同步升高,当柱塞达到最大速度时,液压缸内压力达到最高值,此时柱塞位于平衡位置($x=0.09 \text{ m}$),下行增压过程完成;柱塞速度开始减小,液压缸内压力同步降低,柱塞速度降低为零后开始反向运动,随着反向速度逐渐增大到最大值时,液压缸内压力达到最低值,此时柱塞回到平衡位置,上行减压过程完成,此时装置完成了一个工作周期。活塞运行频率与转速有关,在转速80 r/min时,活塞的运行频率为4 Hz。井下液脉冲发生器使用过程中直接与钻头联接,装置液压缸与钻头内腔联通为一体,钻头喷嘴即为液压缸的泄流口,液压缸内的压力即钻头喷嘴处压降,液压缸内压力周期性脉动变化即实现了井底钻井液的脉冲喷射。

3.1 当量喷嘴面积对脉冲压力幅值的影响

常规钻井中,钻井液排量、钻井液性能及喷嘴结构确定后,当量喷嘴面积决定了钻头压降,钻头压降与当量喷嘴面积为——对应关系。为更直观地分析当量喷嘴面积对装置工作性能的影响,以钻头压降

代表当量喷嘴面积,本文中钻头压降均指常规钻井中的钻头压降。在钻井液密度为 1.2 g/cm^3 时,不同钻井液排量条件下钻头压降与当量喷嘴面积的对应关系如图4所示。

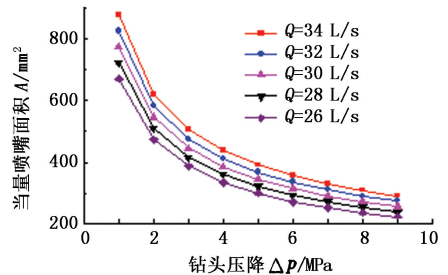


图4 当量喷嘴面积与钻头压降的对应关系

Fig. 4 Relationship between equivalent nozzle area and bit drop pressure

在钻压40 kN、转速80 r/min的条件下,通过变化钻头压降,研究不同钻井液排量条件下脉冲压力幅值的变化特点,结果如图5所示。

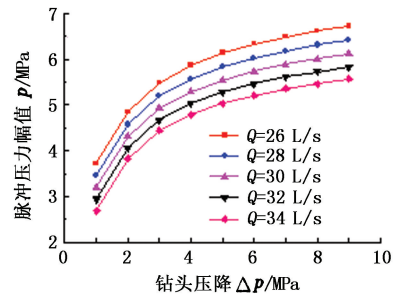


图5 钻头压降对装置工作特性的影响

Fig. 5 Influence of bit drop pressure on performance characteristic of device

如图5所示,在钻井液流量一定的条件下,随着钻头压降的增大,脉冲压力幅值不断增大,但增长幅度逐渐降低,也就是说,脉冲压力幅值随钻头当量喷嘴面积的增大不断减小。钻头压降为1~4 MPa时,脉冲压力幅值随钻头压降的变化幅度较大;当钻头压降高于4 MPa后,脉冲压力幅值的变化趋于平稳。钻头压降代表当量喷嘴面积,钻头压降增大即当量喷嘴面积减小,钻头喷嘴作为装置液压缸的泄流口,其面积越小液压缸内产生的压力震荡越大,因此随着钻头压降的增大,脉冲压力幅值不断增大。

3.2 钻井液排量对脉冲压力幅值的影响

钻井液流量是钻井过程中水力参数优化设计的重要参数之一^[17],在钻压40 kN、转速80 r/min的条件下,通过改变钻井液流量,研究不同钻头压降条件下的脉冲压力幅值的变化特点。

图6为脉冲压力幅值随钻井液流量的变化曲线。在钻头压降一定的条件下,随钻井液流量的增加,脉冲压力幅值线性减小。这是由于钻井液流量增加导

致装置液压缸内钻井液流速变大,柱塞运动速度与钻井液流速间的相对速度减小,该装置采用活塞激励的方式调制脉冲射流,只有当柱塞下行运动速度高于钻井液流速时,液压缸内才能实现增压,并且两者的相对速度越大,增压效果越显著,脉冲压力幅值越大,所以随着钻井液流量的增大,脉冲压力幅值减小。

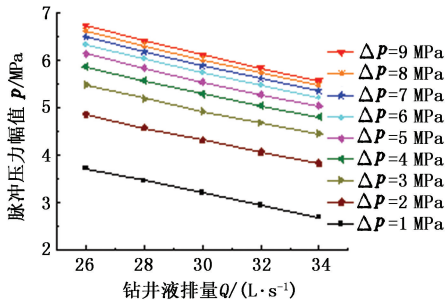


图6 钻井液排量对装置工作特性的影响

Fig. 6 Influence of flow rate of drilling fluid on performance characteristic of device

3.3 钻压对脉冲压力幅值的影响

由装置工作原理可知,钻压波动力作为动力源促使柱塞-弹性系统柱塞往复运动^[18-19],实现脉冲射流调制,钻压波动力与脉冲压力幅值密切相关。

钻井液排量 30 L/s、转速 80 r/min 条件下,脉冲压力幅值随钻压的变化曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出,在钻头压降一定的条件下,随着钻压的增加,脉冲压力幅值线性增大,并且钻头压降越大,关系曲线的斜率越大。钻压波动力作为活塞运动的动力源,激励力越大活塞运动速度越快,在钻井液流速一定的情况下,活塞运动速度与钻井液流速间的相对速度越大,液压缸内的增压效果越明显,脉冲压力幅值越大,因此装置使用过程中,适当提高钻压有助于装置提速效果的进一步发挥。

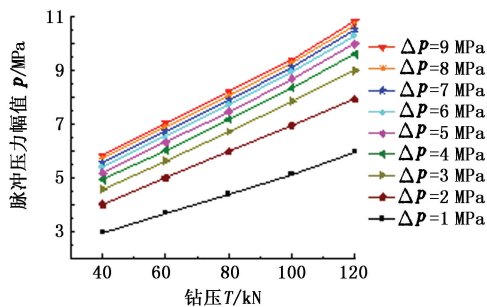


图7 钻压对装置工作特性的影响

Fig. 7 Influence of bit pressure on performance characteristic of device

3.4 转速对脉冲压力幅值的影响

直井钻柱动力学研究表明,钻柱纵向振动的频率是转盘转速的 3 倍,钻柱的纵向振动伴随着井底钻压的波动,两者的频率一致^[8],活塞运动频率也

与钻压波动频率一致即也是转速的 3 倍。转速值与脉冲射流的频率关系密切。

钻井液排量 30 L/s、钻压 40 kN 条件下,脉冲压力幅值随转盘转速的变化曲线如图 8 所示。转盘转速为 60 ~ 120 r/min 时,对应脉冲射流的频率为 3 ~ 6 Hz。随着转速升高,脉冲压力幅值增大,但增长幅度逐渐减缓。转速越高井底钻柱振动越剧烈,振动频率越高,单位时间内钻柱振动所蕴含能量值越高,钻压波动力的变化越剧烈,从而促使液压缸内压力在周期内震荡更剧烈,产生的脉冲压力幅值更大,因此提高转盘转速有助于提升装置使用效果。

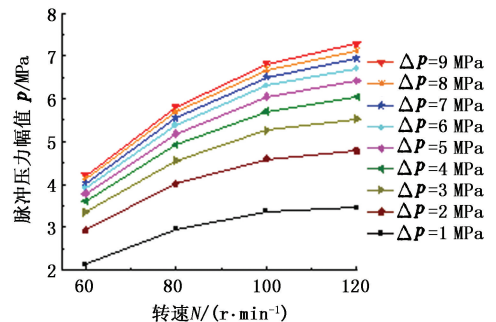


图8 转速对装置工作特性的影响

Fig. 8 Influence of rotate speed of drilling string on performance characteristic of device

4 结论

(1) 井下液压脉冲发生器所调制脉冲压力幅值随钻头当量喷嘴面积的增大而减小,但减小幅度逐渐降低;脉冲压力幅值随钻井液流量的增加呈线性减小趋势,钻头当量喷嘴面积和钻井液排量与装置的工作性能密切相关,有必要在常规水力参数设计的基础上进一步进行优化钻头当量喷嘴直径及钻井液排量,保证装置达到最优使用效果。

(2) 脉冲压力幅值随钻压的增大而增大,随着转盘转速的升高而增大,但增长幅度逐渐减缓。在现场操作过程中,合理选取钻进参数有利于装置工作性能的进一步提升。

参考文献:

- [1] 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.
 - [2] 杨永印,吴志坚,沈忠厚,等. 低压脉冲射流的调制机理及调制器振动模拟[J]. 石油大学学报:自然科学版,2003,27(3):40-42.
- YANG Yongyin, WU Zhijian, SHEN Zhonghou, et al. Modulation mechanism of low pressure pulse jet and modulator working simulation[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27

- (3):40-42.
- [3] 李根生,史怀忠,沈忠厚,等.水力脉冲空化射流钻井机理与试验[J].石油勘探与开发,2008,35(2):239-243.
LI Gensheng, SHI Huaizhong, SHEN Zhonghou, et al. Mechanisms and tests for hydraulic pulsed cavitating jet assisted drilling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008,35(2):239-243.
- [4] 王智锋.负压脉冲钻井技术理论和方法[J].石油钻采工艺,2005,27(6):13-15.
WANG Zhifeng. Discussion on theory & methodology of suction-pulse drilling technique[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005,27(6):13-15.
- [5] 管志川,刘永旺,张洪宁,等.井下液脉冲发生器及其钻井方法;中国,ZL201310047969.X[P].2015-03-11.
- [6] 管志川,张洪宁,刘永旺.井下全排量增压装置;中国,ZL201320133787.X[P].2013-09-04.
- [7] 刘永旺.井下减振增压装置设计研究[D].东营:中国石油大学石油工程学院,2007.
LIU Yongwang. Design research on drill string absorption & down hole hydraulic pressurizing system[D]. Dongying: College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2007.
- [8] 魏文忠,管志川,刘永旺,等.直井眼钟摆钻具纵向振动特性的实验研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(2):64-68.
WEI Wenzhong, GUAN Zhichuan, LIU Yongwang, et al. Experimental study on longitudinal vibration characteristics of pendulum assembly in straight hole[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(2):64-68.
- [9] 管志川,王以法,靳彦欣.直井中底部钻柱运动状态的实验研究[J].石油学报,2003,24(6):102-106.
GUAN Zhichuan, WANG Yifa, JIN Yanxin. Experimental research on motion behavior of bottom drill string in straight hole[J]. Acta Petroleum Sinica, 2003,24(6):102-106.
- [10] 魏文忠,管志川,刘永旺,等.钟摆与偏轴钻具钻压波动规律对比实验研究[J].石油天然气学报,2008,30(1):157-160.
WEI Wenzhong, GUAN Zhichuan, LIU Yongwang, et al. Correlation experimental study on weight on bit (WOB) fluctuation characteristics of pendulum assembly and unbalanced assembly[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008,30(1):157-160.
- [11] 刘永旺,管志川,魏文忠,等.井底钟摆类钻具转动规律的实验研究[J].钻采工艺,2008,31(5):27-29.
LIU Yongwang, GUAN Zhichuan, WEI Wenzhong, et al. Experimental study on rotary characteristics of bottom pendulum assembly[J]. Drilling & Production Technology, 2008,31(5):27-29.
- [12] 管志川,史玉才,夏焱,等.底部钻具组合运动状态及钻进趋势评价方法研究[J].石油钻探技术,2005,33(5):24-27.
GUAN Zhichuan, SHI Yucai, XIA Yan, et al. Research on motion state of bottom hole assembly and the evaluation method of drilling tendency[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005,33(5):24-27.
- [13] 史玉才,苑燕燕,武春芳.应用相似方法模拟研究底部钻具组合的公转运动规律[J].广西大学学报:自然科学版,2006,31(增1):159-162.
SHI Yucai, YUAN Yanyan, WU Chunfang. Setting up a simulate device on motion behavior of bottom-hole assembly according to similitude principles[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2006,31(sup1):159-162.
- [14] 李颖,朱伯立,张威. Simulink 动态系统建模与仿真[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [15] 蔡廷文.液压系统现代建模方法[M].北京:中国标准出版社,2002.
- [16] 黄文梅.系统仿真分析与设计[M].长沙:国防科技大学出版社,2001.
- [17] 管志川,魏凯.利用已钻井资料构建区域地层压力剖面的方法[J].中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(5):71-75.
GUAN Zhichuan, WEI Kai. A new method for establishing regional formation pressure profile based on drilled wells data[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(5):71-75.
- [18] 邵冬冬,管志川,温欣,等.水平旋转钻柱横向振动特性试验[J].中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(4):100-103.
SHAO Dongdong, GUAN Zhichuan, WEN Xin, et al. Experiment on lateral vibration characteristics of horizontal rotary drilling string[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(4):100-103.
- [19] 邵冬冬,管志川,温欣,等.水平井段旋转钻进时钻头侧向力及钻进趋势试验研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(3):61-67.
SHAO Dongdong, GUAN Zhichuan, WEN Xin, et al. Experimental study on bit side force and drilling tendency in a horizontal well using rotary drilling technique[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(3):61-67.