文章编号:1673-5005(2013)04-0100-04 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2013.04.015

水平旋转钻柱横向振动特性试验

邵冬冬, 管志川, 温 欣, 史玉才

(中国石油大学石油工程学院,山东青岛 266580)

摘要:利用水平井钻柱动力学特性模拟装置,对不同钻压和转速条件下水平旋转钻柱横向振动特性进行试验研究。结果表明:钻压和转速是影响水平井旋转钻柱横向振动特性的重要因素;随着转速增加,两横向振动的频率逐渐变大而相位差变小,两横向振动频率与钻柱自转频率呈线性关系;钻压增大对两横向振动频率的影响不大,但两横向振动的相位差会随着钻压的增大而逐渐变小;实际钻进中,钻柱一直处于井筒的右下部,转速选取时应尽量避开 52.1 r/min。

关键词:钻井; 水平旋转钻柱; 钻压; 转速; 横向振动; 试验

中图分类号:TE 243 **文献标志码**:A

Experiment on lateral vibration characteristics of horizontal rotary drilling string

SHAO Dong-dong, GUAN Zhi-chuan, WEN Xin, SHI Yu-cai

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

Abstract: By using horizontal well drilling string simulation experiment device, experiments on lateral vibration characteristics of horizontal rotary drilling string were curried out under different weight on bit and rotary speed. The results show that the weight on bit and rotary speed are the main factors affecting the lateral vibration characteristics of the horizontal rotary drilling string. With the increase of the rotary speed, the two lateral vibration frequencies become large, and the phase difference between the two lateral vibrations becomes small. The relationship between two lateral vibration frequency and the drilling string rotation frequency is linear. The increase of weight on bit has little influence on the two lateral vibration frequencies, but the phase difference of the two lateral vibrations becomes small. In actual drilling, the drilling string is always in the low right part of the wellbore and the rotary speed 52.1 r/min should be avoided.

Key words: drilling; horizontal rotary drilling string; weight on bit; rotary speed; lateral vibration; experiment

在钻井过程中,钻柱的横向振动对所钻井眼轨迹和钻柱的疲劳破坏都会产生非常大的影响。国内外很多专家学者和钻井工作者通过理论研究、现场测量以及室内模拟试验的方式进行了大量的钻柱振动规律方面的研究[1-10],其中对直井钻柱振动的研究较多,对水平井和大位移井等复杂结构井水平段钻柱振动规律的认识都是基于直井底部钻具组合运动规律的基础上的理论研究[11],对水平段钻柱运动规律和钻柱横向振动特性没有直观的认识,而水平段钻柱的运动规律和振动特性直接影响了钻进过程中井眼轨迹的控制、钻具组合和钻进参数的选取。笔者通过室内模拟试验,对水平钻柱旋转钻进过程中钻柱的横向振动规律进行研究。

1 模拟装置与试验方案

水平井钻柱动力学特性模拟试验装置示意图如

收稿日期:2013-03-29

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2010CB226706);国家高"863"计划(2012AA091501);"十二五"国家科技重大专项(2011ZX05021-001)

作者简介:邵冬冬(1984-),男,博士研究生,主要从事井下系统、信息与控制工程、油气井管柱力学研究。E-mail: shddong2007@163.com。

图 1 所示。利用该装置可以实现水平旋转钻柱在不同钻压、转速条件下的模拟试验,并且可以直观地观察水平旋转钻柱在模拟井筒中的运动状态。模拟装置可测得的数据包括钻柱自转转速、底部钻压、横向振动位移、纵向振动位移、钻压波动和钻头处侧向力。试验中用到的传感器类型有:应变式拉(压)力传感器 2 个,用于测量井底实际钻压和人为施加的钻压;涡流位移传感器 4 组,每组 3 个,用于测量距模拟井底 4 个不同位置处(1、3.5、5.5、8 m)纵向振动位移和 X、Y 两横向振动位移。横向振动位移测量示意图见图 2。

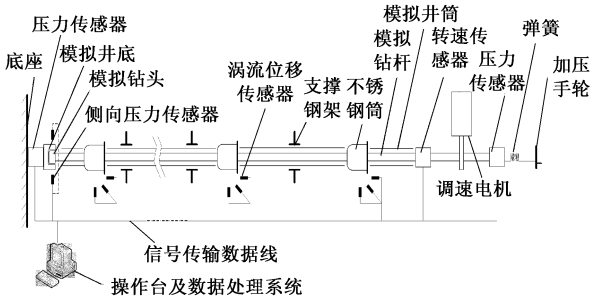

图 1　水平井钻柱振动模拟试验装置示意图

Fig. 1　Sketch map of experimental simulation device of drilling string vibration in horizontal well

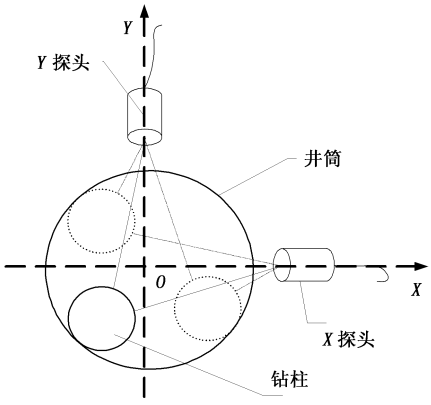

图 2　横向振动位移测量示意图

Fig. 2　Sketch map of measuring lateral vibration displacement

根据相似理论[12-13],当钻压和转速关系符合式(1)时,试验观察到的现象与钻井工程实际相似,可以将试验得到的结论用于工程实际。

$$\Omega_m = 2.88\Omega,\ P_m = \frac{P}{9\,130}. \tag{1}$$

式中,Ω_m 为模型的转速,r/min;P_m 为模型钻压,kN;Ω 为工程实际转速,r/min;P 为工程实际钻压,kN。

为了研究旋转钻柱在不同钻压和转速条件下的横向振动规律,分别对距井底 1、3.5、5.5、8 m 处钻柱振动的横向位移进行测量。试验通过固定钻压值、调整转速的方式进行。试验钻压和转速及其对应关系见表 1。

表 1　模型参数和实际参数

Table 1 Model parameters and actual parameters

模型转速 Ω_m/(r·min^{-1})	原型转速 Ω/(r·min^{-1})	模型钻压 P_m/kg	原型钻压 P/kN
50	17.36	0.5	44.7
100	34.72	1.0	89.5
150	52.08	1.5	134.2
200	69.44	2.0	178.9
300	104.17	2.5	223.7

注:为了模拟试验操作及参数测量方便,模拟钻压单位取为 kg。

2　不同转速下旋转钻柱的横向振动

试验结果分析表明,所有测点处钻柱的横向振动频率的变化规律一致,并且位移的变化规律差别非常小,可看为近似一致。距离井底 1 m 处测点距离钻头最近,分析其频率及位移变化规律对轨迹控制及钻进参数选取更具实际的指导意义。距井底 1 m 处,钻压值为 0.5 kg,将分别调整转速值所测得的试验数据进行快速傅里叶变换(FFT),试验所得数据的时域信号转换为频域信号,得到底部钻具组合的横向振动频率,对钻柱的横向振动规律进行分析。

2.1　横向振动频率

钻压为 0.5 kg 时,距井底 1 m 处钻柱横向振动频率与自转转速之间的变化关系曲线如图 3 所示。钻柱自转转速 Ω_{sf} 与自转频率 f_{sf} 之间的关系为

$$\Omega_{sf} = 60 f_{sf}.$$

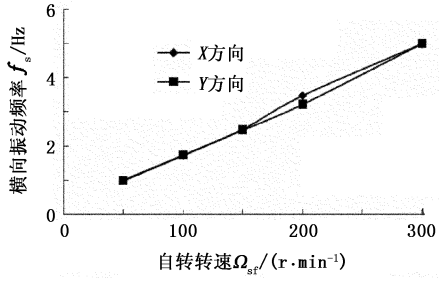

图 3　钻柱横向振动频率随自转转速的变化

Fig. 3　Variation of lateral vibration frequency with drill string rotation speed

由图 3 可以看出,当转速小于 150 r/min 时,X 方向与 Y 方向振动的基频相等,且随着转速的增加钻柱横向振动频率与钻柱自转频率的比值逐渐变小并趋向于 1,且都大于钻柱的自转频率,两者相差最大为 0.2 Hz,钻柱的横向振动频率与钻柱的自转转速近似符合线性关系;当转速大于 150 r/min 时,两横向振动的频率出现分化,X 方向基频大于钻柱自转频率,Y 方向基频小于钻柱自转频率,两者之间相差不大,钻

柱沿 X 方向的振动比 Y 方向的振动更为剧烈。

2.2　合运动轨迹

钻柱 X、Y 两横向振动位移的耦合叠加即为钻柱中心在井筒中的实际运动轨迹。由文献[14]和[15]可知,当二分振动的频率和初相位符合一定关系时,合运动的轨迹为闭合曲线,并且具有一定的周期性,这种图形就是利萨如图形。钻压为 0.5 kg,不同转速时的合运动轨迹曲线如图 4 所示。图 4 中,黑色圆圈代表井筒内径,圆圈内实线为钻柱在井眼中的实际运动轨迹,右侧实线为钻柱运动轨迹的放大图。

由轨迹曲线可以看出:钻柱一直在井眼的右下部摆动,不存在直井中的“涡动”现象;当钻速较小(小于 150 r/min)时,运动的轨迹较规则,近似为圆形,此时 X、Y 二分振动的频率相等,这点可以从频率分析得到验证;当钻速较大(大于 150 r/min)时,钻柱的运动轨迹近似为“8”字形,符合利萨如图形的特点,此时两个分振动的频率不相等,随着转速的增加,图形变得较扁,两个分振动的相位差较小。

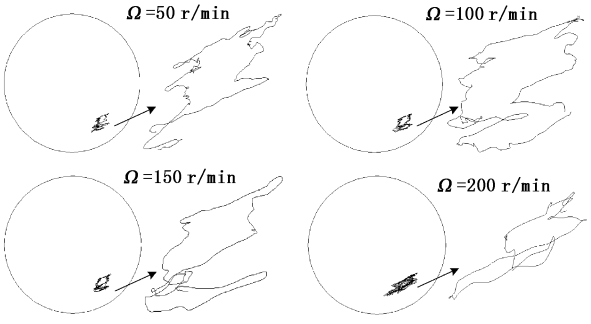

图 4　合运动轨迹曲线随自转转速的变化

Fig. 4　Variation of closing movement trajectory with rotation speed

3　不同钻压下旋转钻柱的横向振动

不同钻压条件下,距井底 1 m 处的钻柱横向振动频率随自转转速的变化曲线如图 5 所示。合运动轨迹曲线如图 6 所示。

由图 5、6 分析可得:

(1)钻压 1 kg。转速小于 150 r/min 时 X 方向振动基频小于 Y 方向振动基频,两者相差约 0.25 Hz,合运动轨迹为“8”字形;转速等于 150 r/min 时 X 方向振动基频与 Y 方向振动基频相等,且都为钻柱的自转频率,合运动轨迹近似为圆形;转速大于 150 r/min 时 X 方向振动基频大于 Y 方向振动基频,两者相差不大,约等于钻柱自转频率,合运动轨迹为“8”字形,但“8”字较扁,说明两者的相位差很小,合运动轨迹近似为一圆弧线,钻柱做圆弧线摆动。

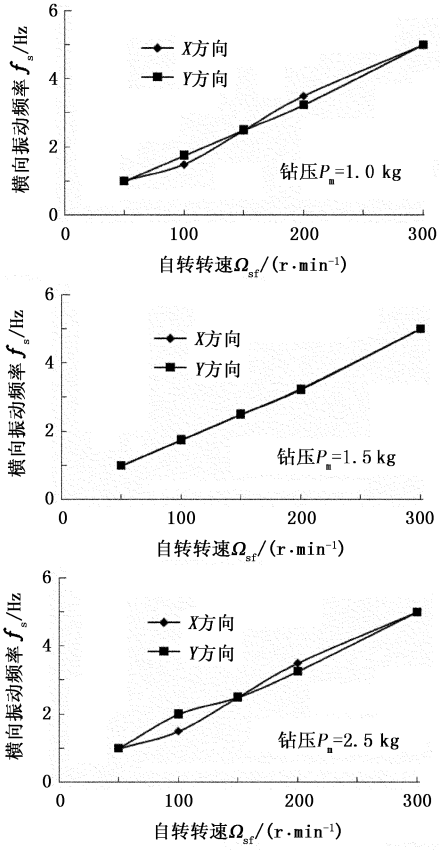

图 5　不同钻压时钻柱横向振动频率变化曲线

Fig. 5　Curve of lateral vibration frequency under different weight on bit

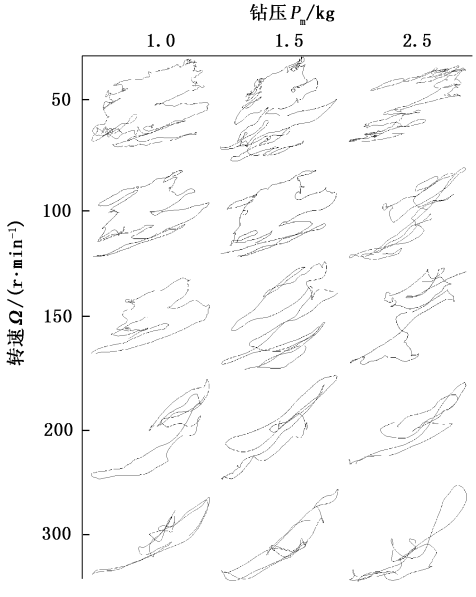

图 6　不同钻压下合运动轨迹曲线

Fig. 6　Curve of closing movement trajectory under different weight on bit

(2)钻压 1.5 kg。X 方向振动基频与 Y 方向始终相等,随着转速的增加,两者振动基频与钻柱自转频率趋向相等;但合运动轨迹曲线变化较大,随着转

速的增加,二分振动的相位差逐渐变小,转速大于 200 r/min 时,合运动轨迹近似为圆弧线。

(3)钻压 2.5 kg。转速小于 150 r/min 时 X 方向振动基频小于 Y 方向振动基频,两者之差最大为 0.5 Hz,合运动轨迹为“8”字形,转速大于 150 r/min 时 X 方向振动基频大于 Y 方向振动基频,两者相差不大,且皆趋向于钻柱自转频率;合运动轨迹皆为“8”字形,且“8”字都比较扁,说明 X、Y 方向横向振动的相位角相差不大,合运动轨迹近似为圆弧线。

综合以上分析,钻柱自转转速 150 r/min 为钻柱横向振动的一个临界点。在此转速前后,X、Y 方向横向振动的频率以及两横向振动的合运动轨迹变化较大;钻压对钻柱横向振动的影响很大,随着钻压的增大,X、Y 方向横向振动的频率变化不大,但相位差逐渐变小,合运动轨迹“8”字形变扁。

4　结　论

(1)水平段钻柱旋转钻进时,钻柱在井眼的右下部摆动,不存在类似于直井中的“涡动”现象。

(2)钻柱两横向振动频率随着转速的增加逐渐增大,两者之间呈线性关系。随着转速的增加,两横向振动的频率与钻柱的自转频率趋于相等,两个分振动的相位差逐渐变小。

(3)随着钻压的增加,两横向振动的频率变化不大,但其相位差逐渐变小,表现为两横向振动的利萨如图形即钻柱的实际运动轨迹变化较大。

(4)水平旋转钻柱自转转速 150 r/min(对应实际工程实际钻柱转速 52.1 r/min)为钻柱横向振动的一个临界点,此转速前后,两个分振动的频率和相位差变化较大,在实际钻井过程中,为了有效控制井眼轨迹、合理选取钻进参数,应避开此转速。

参考文献:

[1] 陈乐平. 钻柱横向非线性振动分析[J]. 中国工程机械学报,2010,8(2):138-142.
CHEN Le-ping. Analysis on transverse nonlinear vibration for drilling shafts [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2010,8(2):138-142.

[2] 闫向宏,孙建孟,张美玲. 钻柱扭转和纵向振动的等效网络分析[J]. 工程力学,2011,28(2):229-233,245.
YAN Xiang-hong, SUN Jian-meng, ZHANG Mei-ling. Analysis of torsional and longitudinal vibration of drill string using equivalent network [J]. Engineering Mechanics, 2011,28(2):229-233, 245.

[3] 刘伟,周英操,王先国. 井下振动技术研究[J]. 石油钻探技术,2010,38(6):42-47.
LIU Wei, ZHOU Ying-cao, WANG Xian-guo. Study on downhole vibration control technology [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010,38(6):42-47.

[4] 祝效华,刘清友,童华. 三维井眼全井钻柱系统动力学模型研究[J]. 石油学报,2008,29(2):288-291, 295.
ZHU Xiao-hua, LIU Qing-you, TONG Hua. Research on dynamics model of full hole drilling-string system with three-dimensional trajectory [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008,29(2):288-291,295.

[5] GAO G H, STEFAN M. Dynamics buckling and snaking motion of rotating drilling pipe in a horizontal well[R]. SPE 113883,2008.

[6] 章扬烈. 钻柱运动学与动力学[M]. 北京:石油工业出版社,2001: 30-89.

[7] 韩春杰,王瑛,闫铁. 水平井侧钻过程中钻柱振动规律的研究[J]. 科学技术与工程,2010,10(21):5138-5140.
HAN Chun-jie, WAN Ying, YAN Tie. Analysis about drill string vibration of horizontal well during side-drilling [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(21):5138-5140.

[8] 李之光. 相似与模化[M]. 北京:国防工业出版社,1982:16-35.

[9] 郑明新. 工程材料[M]. 北京:清华大学出版社,1991:25-37

[10] 管志川,靳彦欣,王以法. 直井底部钻柱运动状态的实验研究[J]. 石油学报,2003,24(6):102-106.
GUAN Zhi-chuan, JIN Yan-xin, WANG Yi-fa. Experimental research on motion behavior of bottom drill string in straight hole[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(6):102-106.

[11] 黄本生,刘清友. 水平井钻柱动力学研究进展[J]. 特种油气藏,2009,16(3):1-6.
HUANG Ben-sheng, LIU Qing-you. Research progress of drill string dynamics of horizontal well [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2009,16(3):1-6.

[12] 史玉才,王军,管志川. 下部钻柱涡动机理及规律的实验研究[J]. 广西大学学报:自然科学版,2007,32(2):126-129.
SHI Yu-cai, WANG Jun, GUAN Zhi-chuan. Research on whirling mechanism of bottom drillstring and its rules by inner simulated experiments[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2007,32(2):126-129.

(下转第 108 页)

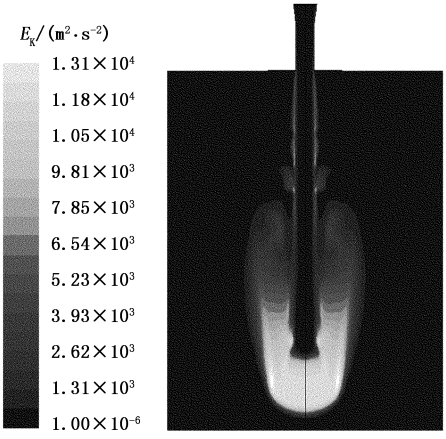

图 8 240 μs 时刻射流湍动能云图

Fig. 8 Cloud chart of turbulent kinetic energy at 240 μs

4 结 论

(1)组合 VOF 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 湍动模型,并采用 UDF 文件定义入口压力边界的方法,计算获得了与试验结果一致的动态射流结构。

(2)喷嘴出口的水动力特征是影响射流结构及变化的最主要外在因素,射流前部生成的伞状结构能限制射流中心区表面气体涡的发展,有利于提高有效中心射流的收敛度;射流前部轴心速度发展至最大时,射流前端形成一层厚度约为 2 倍喷嘴直径的低速高湍动层。

(3)冲击挤压式脉冲射流装置的腔体内水的动力学特征可较容易地由理论推导或测试的办法获得,将获得信息定义到 CFD 数值模拟的入口边界,对射流流场进行瞬态分析,可为冲击挤压式脉冲射流生成装置的设计及优化提供参考依据。

参考文献:

[1] BOWDEN P F, BRUNTON J H. The deformation of solids by siquid impact at supersonic speeds[J]. Mathematical and Physical Sciences (ser A), 1958, 263(1315): 433-450.

[2] O'KEEFE D J, WRINKLE W W, SCULLY N C. Supersonic liquid jets[J]. Nature, 1967, 213:23-25.

[3] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 北京:石油大学出版社,2000.

[4] MATTHUJAK A, HOSSEINI R H S, TAKAYAMA K, et al. High speed jet formation by impact acceleration method, shock waves[J]. Shock Waves, 2007, 16(6): 405-419.

[5] RYHMING L I. Analysis of unsteady incompressible jet nozzle flow[J]. Zeitschrift Für Angewandte Mathematik and Physik (ZAMP), 1973, 24(2): 149-164.

[6] REHBINDER G. Investigation of water jet pulses generated by an impact piston[J]. Applied Scientific Research, 1983, 40(1): 7-37.

[7] 徐立,汪志明,王瑞和,等. 高速超高压水射流喷管内外湍流流场的数值模拟[J]. 石油大学学报:自然科学版,1997,21(4):18-22.
XU Li, WANG Zhi-ming, WANG Rui-he, et al. Numerical simulation for the ultra-high water jet flow and out of the pipes[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 1997, 21(4): 18-22.

[8] 陈春, 聂松林, 吴正江,等. 高压水射流的 CFD 仿真及分析[J]. 机床与液压,2006,2:103-105.
CHEN Chun, NIE Song-lin, WU Zheng-jiang, et al. A study of high pressure water jet characteristics by CFD simulation[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006, 2: 103-105.

[9] SRINIVASAN V. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(8): 3710-3730.

[10] FLUENT. Fluent 6.3 documentation[M]. Lebanon: Fluent Inc, NH, 2006.

[11] WILCOX C D. Turbulence modeling for CFD [M]. La Cañada: DCW industries, 2006.

[12] BLOOR M. Hypersonic liquid jets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1978, 84(2): 375-384.

(编辑 李志芬)

(上接第 103 页)

[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(增刊):159-162.
SHI Yu-cai, YUAN Yan-yan, WU Chun-fang. Setting up a simulate device on motion behavior of bottom-hole assembly according to similitude principles [J]. Journal of Guangxi University (Edition of Natural Science), 2006, 31(sup): 159-162.

[14] 屈维德. 机械振动手册[M]. 北京:机械工业出版社,1992:9-10.

[15] 王文军,张景生,杨瑞雪,等. 两个互相垂直的简谐振动合成的几个问题[J]. 聊城师院学报:自然科学版,1997,10(4):40-43.
WANG Wen-jun, ZHANG Jing-sheng, YANG Rui-xue, et al. Several question about composition of two mutual vertical simple harmonic vibration[J]. Journal of Liaocheng Teachers College (Edition of Natural Science), 1997, 10(4): 40-43.

(编辑 李志芬)