

小直径垂钻工具推力执行机构性能测试

柴麟^{1,2}, 张凯^{1,2}, 张耀澎^{1,2}, 刘宝林^{1,2}, 张龙^{1,2}, 李然然^{1,2}, 何晓东^{1,2}

(1.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 2.自然资源部深部地质钻探技术重点实验室,北京 100083)

摘要: 在实施科学钻探过程中,保证超深孔上部井眼的基本垂直,是使超深孔能够顺利钻达目标层的前提条件。许多钻探工程,均是因孔斜无法控制而被迫提前终孔,从而不能钻进到预期目标深度。自动垂直钻井工具的出现打破了传统防斜、纠斜方法的屏障,使井斜控制技术得到飞速发展。当前垂直钻井工具的执行机构直径较大,所需排量高,响应速度慢,且只能结合稳定平台进行整机性能测试。因此,本文介绍了一种采用钻井液压差作为动力来源的新型小直径推力执行机构,并对其性能测试系统进行设计。通过该系统单独对新型执行机构的内部压力、推靠力、泄流量及响应速度进行测试。试验结果表明,新型执行机构结构小巧简单,工作效率高,所需排量小,响应速度快。测试系统能够在垂钻工具整体样机测试前对新型执行机构进行可行性验证。

关键词: 自动垂直钻井工具;执行机构;性能测试;推靠力;科学钻探

中图分类号: P634;TE921 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)04-0087-07

Performance test of the pushing actuator of the small diameter vertical drilling tool

CHAI Lin^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, ZHANG Yaopeng^{1,2}, LIU Baolin^{1,2},
ZHANG Long^{1,2}, LI Ranran^{1,2}, HE Xiaodong^{1,2}

(1.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2.Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: In the process of scientific drilling, to ensure the basic verticality of the upper section of the ultra deep hole is the prerequisite for drilling the ultra deep hole to the target layer smoothly. Many drilling projects have to be completed prematurely, where the boreholes can not drill to the expected target depth due to the uncontrollable hole deviation. The availability of automatic vertical drilling tools breaks the limitation of traditional deviation prevention and correction methods, and drives the well deviation control technology to develop rapidly. At present, the actuator diameter of vertical drilling tools is large, the required displacement is high, the response speed is slow, and the whole performance test can only be carried out on the stable platform. This paper introduces a new small diameter actuator which uses mud pressure difference as the power source with the design of its performance test system. The internal pressure, pushing force, discharge and response speed of the new actuator were tested on the system separately, and the results showed that the new actuator had the advantages of small structure, high efficiency, small displacement and fast response. The test system can verify the feasibility of the new actuator before testing the whole prototype of the vertical drilling tool.

Key words: automatic vertical drilling tool; actuator; performance test; pushing force; scientific drilling

收稿日期:2020-02-19; 修回日期:2020-03-26 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.04.013

基金项目:国家重点研发计划项目“5000米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”课题五“智能地质钻探技术及装备仪器研制”(编号:2018YFC0603405);战略性国际科技创新合作重点专项“多金属矿岩心钻探关键技术装备联合研发及示范”(编号:2016YFE0202200)

作者简介:柴麟,男,汉族,1992年生,博士研究生,地质工程专业,主要从事井斜控制理论及自动垂直钻井技术的研究,北京市海淀区成府路29号,1533185881@qq.com。

通信作者:张凯,男,汉族,1989年生,实验师,博士,主要从事超硬材料在地质工程中的应用、岩石破碎机理与碎岩工具、井下工具研发等方面的研究,北京市海淀区成府路29号,zhangkai66@cugb.edu.cn。

引用格式:柴麟,张凯,张耀澎,等.小直径垂钻工具推力执行机构性能测试[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):87-93.

CHAI Lin, ZHANG Kai, ZHANG Yaopeng, et al. Performance test of the pushing actuator of the small diameter vertical drilling tool[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):87-93.

0 引言

我国“十三五”国家科技创新规划中,将“深海、深地、深空、深蓝科学研究”列为战略性、前瞻性重大科学问题,近些年来科学钻井的作业量明显加大,且深度不断增加^[1]。在实施科学钻探过程中,保证超深孔上部井眼的基本垂直,是使超深孔能够顺利钻达目标层的前提条件,许多钻探工程,均是因孔斜无法控制而被迫提前终孔,从而不能钻进到预期目标深度。为了解决上述问题,自动垂直钻井技术应运而生^[2-5]。

自动垂直钻井技术是一种利用井下钻具主动进行防斜与纠斜的直井作业技术,从20世纪80年代末期开始,国外就已开展对自动垂直钻井工具(以下简称垂钻工具)的研究并先后成功开发出不同类型的垂钻工具。垂钻工具能在实现自动防斜的同时有效地释放钻压,可极大地提高钻井效率及安全性^[6-7]。国外垂钻工具比较有代表性的是贝壳休斯公司的VertiTrak系统^[8-9]、斯伦贝谢公司的Power-V系统^[10-11]以及哈里伯顿公司的V-Pilot系统。在国外公司对我国实施技术封锁的背景下,国内科研院所及高校在21世纪初陆续开展垂钻工具的研发工作,有的已经试制了样机,并成功进行了下井测试,但尚未有成熟的可实现商业应用的垂钻系统^[12-19]。

推力执行机构作为垂钻工具的“四肢”,其作用是对垂钻工具稳定平台的控制信号做出响应,为钻头提供纠斜所需的作用力与转角(如图1)^[20]。其中,执行机构作为垂钻工具中外径最大的部分,是垂钻系统中唯一与井壁接触的部件,直接影响着垂钻工具的纠斜能力与整体尺寸。因此在垂钻工具下井试验前对推力执行机构进行合理设计与性能测试十分必要。

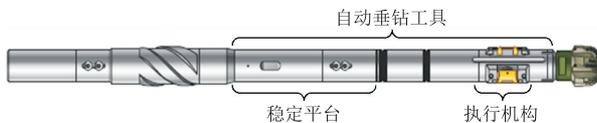


图1 自动垂钻工具结构

Fig.1 Structure of the automatic vertical drilling tool

当前执行机构及其测试装置尚存在如下问题。

(1)现有垂钻工具的设计目标大多为油气钻井,其执行机构多为液动活塞式,直径普遍较大,因此不能适应于深部地质钻探小直径井眼的钻进^[20]。

(2)现有执行机构采用泄压孔泄压,产生目标推

靠力所需的泥浆排量较大,地质钻探机泵排量普遍较小,执行机构对泥浆的过度分流导致钻头处泥浆的携岩及辅助破岩能力降低,影响机械钻速。

(3)在高转速工况下现有垂钻工具上部稳定平台的配流装置开闭间隔较短,其执行机构无法及时响应,所产生的推靠力具有一定的滞后性。

(4)现有执行机构测试系统的测试对象多属于垂钻工具整体样机^[21-22],测试周期长、精度低、成本高、数据少。设计问题不会及早暴露,从而使设计人员无法适应短周期内垂钻工具的研发及性能测试。

针对上述问题,本文介绍了一种采用钻井液压差作为动力来源的新型小直径推力执行机构,并对其性能测试系统进行设计。通过该系统单独对新型执行机构的内部压力、推靠力、泄流量及响应速度进行测试,从而能够在垂钻工具整体样机测试前完成新型执行机构的可行性验证。

1 小直径推力执行机构的结构及原理

根据深部地质钻探需求,自然资源部深部地质钻探技术重点实验室科研团队研发出了一套新型小直径推力执行机构^[23]。该机构主要由执行机构主体、推靠翼肋、高压流道及泄流缝隙等部分组成,其剖面结构示意图如图2所示。该执行机构省去了活塞与缸套,外径尺寸得到了大幅减小,满足深部地质钻探小直径井眼钻进要求。

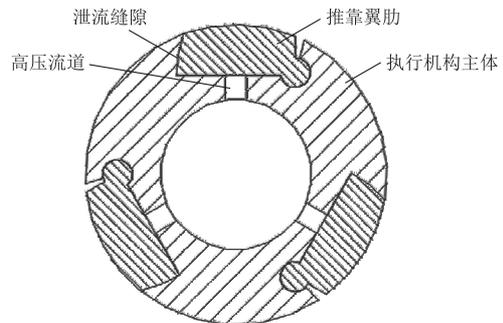


图2 小直径推力执行机构剖面结构示意图

Fig.2 Cross section of the small diameter pushing actuator

该执行机构的工作原理具体如下:垂钻工具在井下工作时,上部稳定平台的配流装置(盘阀或环阀)在旋转钻具的带动下使位于井眼高边方位的高压流道周期性的开启与关闭,高压流道开启时,高压钻井液进入执行机构内部,在钻具内外压差的作用下,推靠翼肋沿其圆弧形柱面的轴线转动推靠井壁,从而为底部钻头提供用于纠斜的侧向纠斜力。高压

流道关闭时,执行机构内部的高压钻井液经泄流缝隙泄压,使机构内外压差平衡,推靠翼肋不再产生推靠力。

2 试验系统测试原理及结构

作为垂钻工具研制初期可行性验证的关键设备,执行机构性能测试系统的研发能够快速有效地对新设计的执行机构方案进行动态性能测试,评测设计方案的优劣,可为后续垂钻工具的优化设计提供实验依据,有利于缩短研发周期,减少研发成本。

2.1 试验系统测试原理

自然资源部深部地质钻探技术重点实验室科研团队针对所设计的小直径推力执行机构,设计研发了一套执行机构性能测试系统^[24],如图 3 所示。其原理具体如下:在试验过程中,高压泵模拟泥浆泵向执行机构输入一定压力和流量的液体介质驱动翼肋向外推出,产生推靠力。翼肋产生的推靠力由压力传感器采集,执行机构内部的压力由泵压表测量,通过实时测量推靠力及内部压力曲线,实时分析执行机构的动态响应性能。由于新型执行机构的结构特点,执行机构在推靠的过程中会出现内部液体泄漏,内部液体泄漏量利用流体收集组件完成测量,测得的单位时间泄漏量即为执行机构产生有效推靠力时所需的排量。另外,该实验装置还可利用循环时间继电器配合高精度电磁阀实现高压流道的周期性开闭,模拟盘阀配流装置在不同转速下对执行机构高压流道的周期性开闭实际工况。

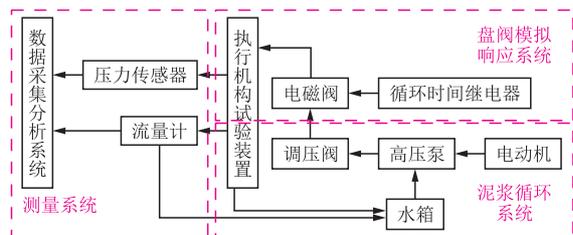


图 3 试验系统原理

Fig.3 Schematic of the test system

2.2 测试试验系统结构

执行机构性能测试系统结构示意图如图 4 所示。该试验系统主要由 4 部分组成:泥浆循环系统、盘阀模拟响应系统、测量系统及执行机构试验装置。

2.2.1 泥浆循环系统

泥浆循环模拟系统主要包括 3DSY-40 型电动试压泵、水箱、流量计、压力表等组件,其主要功能是

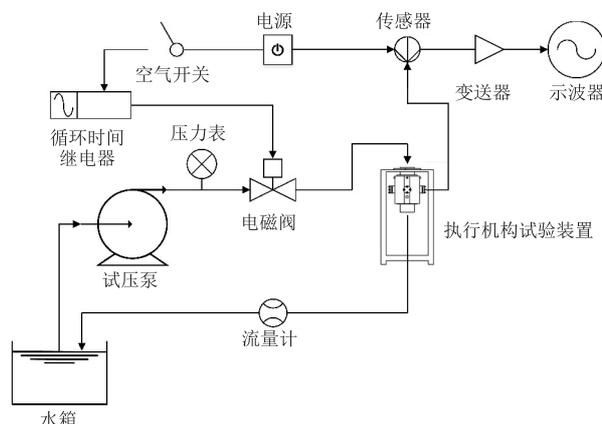


图 4 试验系统结构示意图

Fig.4 Structure of the test system

为执行机构提供动力。作为核心动力源,3DSY-40 型电动试压泵的具体工作参数如下:(1)最高排量 6 L/min;(2)最高工作压力 4.0 MPa;(3)可实现出口压力的无级调节。该试压泵采用电机驱动,可利用调压阀对出口压力和流量进行调节,模拟执行机构在纠斜作业过程中的液体介质输入。由于本次测试的主要目的为执行机构方案的原理性验证,故采用清水作为工作介质^[25]。后续开展执行机构的推靠性能研究时,可更换不同粘度的液体介质,模拟实际工况条件。

2.2.2 盘阀模拟响应系统

盘阀模拟响应系统主要由空气开关、循环时间继电器、高精度电磁阀等组件组成。其主要功能是模拟执行机构纠斜过程中的间歇接通状态,为测试提供真实的模拟环境。在实际纠斜钻进过程中,钻具一直处于旋转状态,其上部稳定平台的配流装置处于周期性开闭状态。转动过程中翼肋流道的开闭可以等效为同等时间间隔下流道的通断。因此,盘阀模拟响应系统利用循环时间继电器控制电磁阀的开闭时间间隔,从而模拟配流装置在不同转速下控制高压钻井液进入执行机构推靠翼肋内部的通断情况。

2.2.3 测量系统

测量系统主要由推靠力测量组件和泄漏量测量组件组成。推靠力测量组件主要包括电源、压力传感器、变送器、示波器等。推靠力测量主要通过压力传感器采集推靠力的电信号并经变送器放大后在示波器上实时显示收集。泄漏量测量组件主要包括管路接头、引流管路、流量计以及回流管路等,通过管

路接头以及引流管路将执行机构试验装置泄漏的液体进行收集,并导入流量计进行测量。

2.2.4 执行机构试验装置

执行机构试验装置主要由支撑台架、待测执行机构组件、推靠力测量组件等部分组成,其上部与试压泵管路相连接,下部与节流阀以及回流管路连接,泄漏量测量组件通过螺纹与该装置相连接。其主要功能为通过更换待测执行结构组件完成不同结构的执行机构的性能测试。以小直径推力执行机构(图2)为例,其工作过程如下:试压泵管路输入的高压流体由上部入口进入执行机构内部,后经翼肋高压流道进入翼肋与执行机构主体形成的密封腔内,推动翼肋旋转,产生推靠力。其产生的推靠力和液体泄漏量分别由推靠力测量组件和泄漏量组件收集获取。

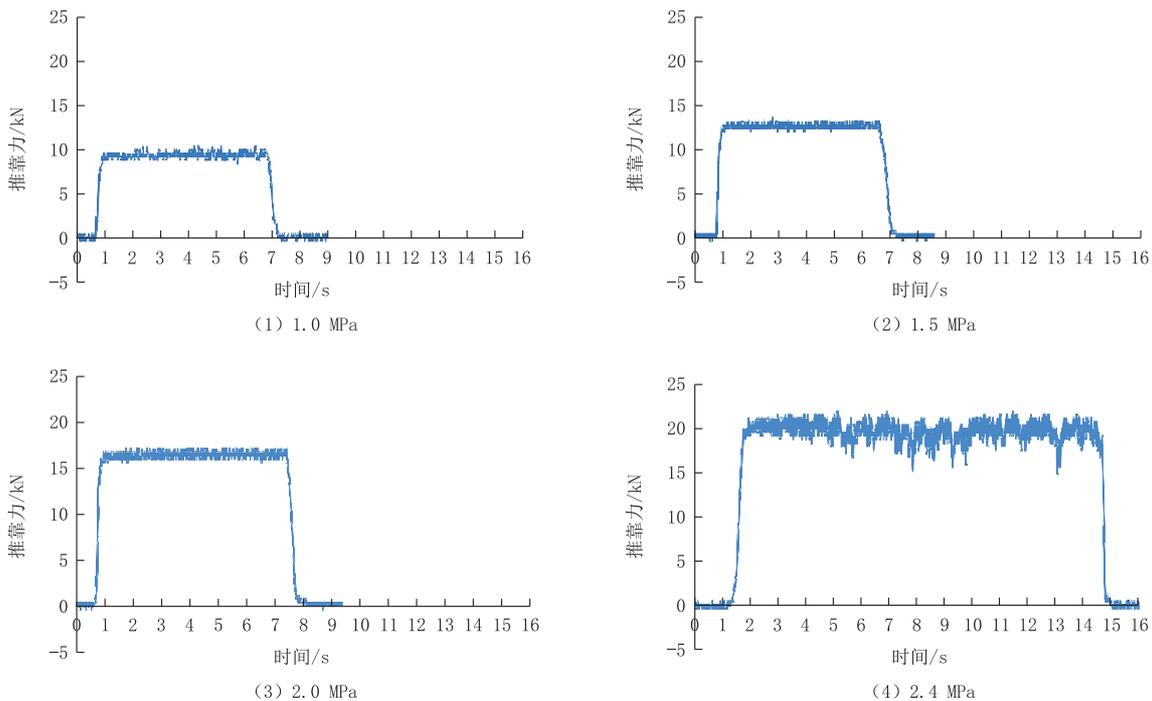


图5 不同泵压下推靠力变化曲线

Fig.5 Variation curve of pushing forces at different pump pressures

根据静力学平衡原理,将推靠翼肋简化为杠杆,利用杠杆原理对执行机构的理论推靠力进行计算^[26]。其理论推靠力公式为:

$$F_b = Fl_1/l_2 \quad (1)$$

式中: F_b ——推靠翼肋受到井壁的反作用力,kN; F ——高压流体对推靠翼肋的合力,kN; l_1 ——翼肋销轴中心点到力 F 的作用线的距离,mm; l_2 ——翼肋销轴中心点到力 F_b 的作用线的距离,mm。

3 执行机构性能测试

为了对新型小直径推力执行机构的可行性及执行机构试验系统的功能性进行验证,采用上述试验测试系统对新型执行机构分别开展了推靠力测试、泄漏量测试及响应速度测试,试验测试结果如下。

3.1 推靠力测试

不同泵压下的执行机构推靠力随时间变化曲线如图5所示。由曲线可以看出,试压泵开启后,新型执行机构可以快速响应,推靠力迅速增长达到某一数值后进入围绕某一均值的上下波动状态,关泵后,推靠力数值迅速下降为零,执行机构不再产生推靠力。试验结果表明,新型执行机构在不同连续泵压的条件下均能够迅速产生较为连续且平稳的推靠力。同时也反映出试验装置的数据测量及采集组件反映灵敏,响应迅速。

不同泵压下执行结构的理论推靠力及稳定段的实际平均推靠力变化曲线如图6所示。可以看出,推靠翼肋产生的推靠力随着泵压的增大而线性增加,测试结果与推靠力的理论计算结果基本吻合。当泵压为2.4 MPa时,推靠翼肋推靠力测量值与理论计算值均接近20 kN。测试结果表明,该执行机构具有较好的工作性能,小泵压下即可产生较大推靠力,响应灵敏,对动力要求较低。

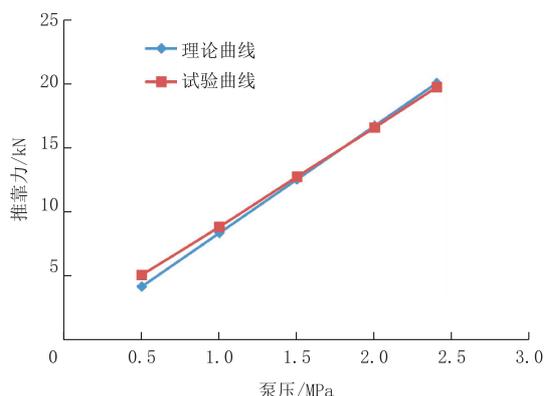


图 6 泵压与推靠力关系曲线

Fig.6 Relation curve of pump pressure vs pushing force

由于推靠力的稳定阶段数据具有一定的波动性,因此对推靠力测试结果进行了显著性分析。图 7 为根据各试验稳定段数据所计算出的方差与对应的泵压的关系曲线。由图 7 可以看出,随着泵压的升高,方差逐渐变大,即稳定段的推靠力数值波动性增大。由此可以看出,泵压越大,执行机构产生的推靠力波动越大,稳定性愈低。持续增大泵压,虽可获得较大的推靠力,但是剧烈波动的推靠力对钻头钻进也会产生不利影响。因此,为获得较优的工具纠偏性能,应合理控制执行机构的输入泵压。

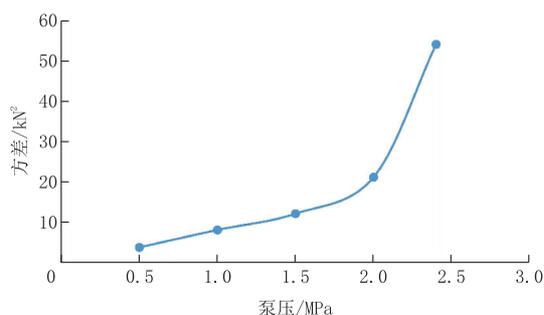


图 7 泵压与推靠力方差关系曲线

Fig.7 Curve of pump pressure vs pushing force variance

3.2 执行机构泄漏量试验

由于泵压存在波动性,为了试验结果更加接近真实的泄漏情况,取同一泵压下 4 次实验中的泄漏量的平均值作为该泵压下执行机构的泄漏量,泵压与泄漏量的关系曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出,随着泵压逐渐增大,其泄漏量逐渐增大,且增幅逐渐增加。可以看出,泄漏量随着泵压的增大近似呈指数增长趋势,后续可综合考虑机泵能力,探寻新型执行机构最为经济高效的泵压状态。图 9 为泵压与 4 次泄漏量的方差的关系曲线,可以看出,随着泵

压的增大,泄漏量的方差逐渐增大,且增长趋势和泵压与泄漏量关系曲线相同。因此泄漏量的波动随着泵压加大而逐渐增大。测试结果还表明,新型执行机构能够在较小的泄漏量(排量)下输出较高的推靠力,对钻头处泥浆的分流微乎其微,有利于泥浆对井底岩石的辅助破岩及携岩上返。

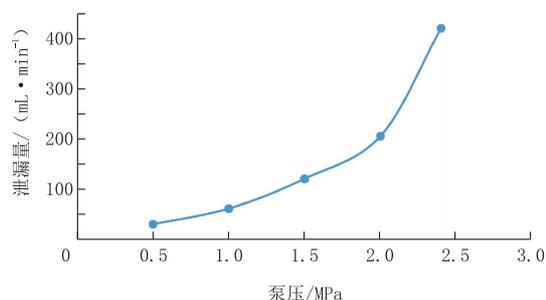


图 8 泵压与泄漏量关系曲线

Fig.8 Relation curve of pump pressure vs leakage rate

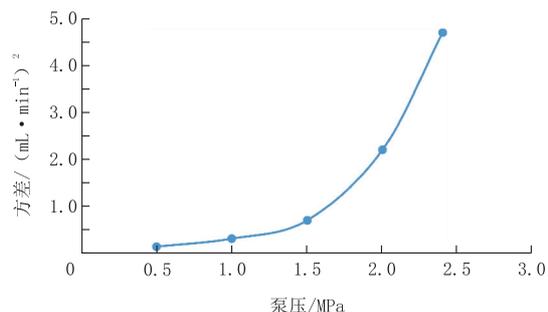


图 9 泵压与泄漏量方差关系曲线

Fig.9 Curve of pump pressure vs leakage rate variance

3.3 执行机构响应试验

2 MPa 泵压下,新型执行机构在不同开闭间隔下的响应结果如图 10 所示。

由图 10 可以看出,开闭时间间隔较长时,新型执行机构的推靠力具有明显的上升与下降过程,机构内部升压与降压过程明显,且相邻降压与升压过程中存在明显的时间间隔。随着开闭时间的逐渐缩短,执行机构尚未完全降压后即进入升压状态,升压和降压过程变得越来越不明显。当盘阀机构控制高压流体进入执行机构的响应时间间隔为 0.1 s 左右时,执行机构的升压和降压时间基本可以忽略不计,此时执行机构可以持续提供较为稳定的推靠力。此外,开闭时间对推靠力的数值基本没有影响,其值与之前测得的 2 MPa 泵压下的推靠力基本一致。试验结果表明,新型执行机构响应迅速,反应灵敏,能在较高的转速工况下提供持续有效的推靠力。

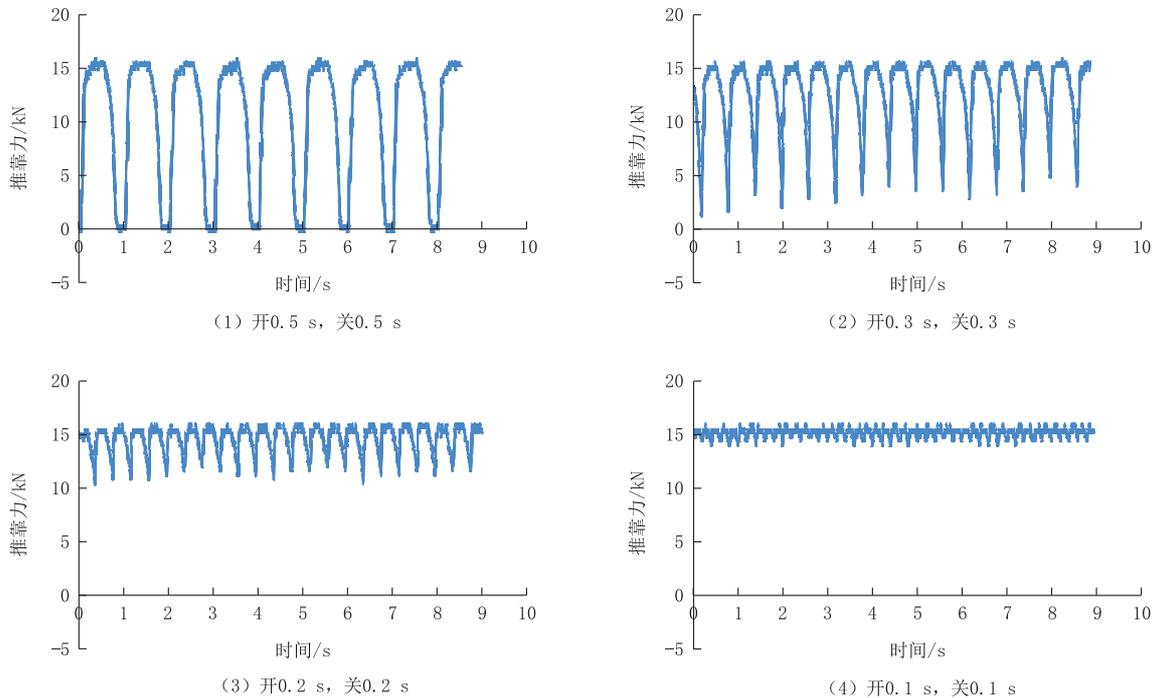


图 10 执行机构推靠力与时间间隔关系曲线

Fig.10 Relation curve of pushing force vs time interval of the actuator

4 结论

本文介绍了一种采用钻井液压差作为动力来源的新型小直径推力执行机构及其性能测试系统,通过该性能测试系统对新型执行机构的内部压力、推靠力、泄流量及响应速度进行了测试,得出如下结论:

(1)新型执行机构结构小巧而简单,工作效率较高,利用较小的泵压即能产生较大的推靠力;推靠力与泵压呈线性关系且机构的实际推靠力与理论计算数值吻合度较高;泵压越大,推靠力的波动越大。

(2)新型执行机构的泄流量(所需排量)及其方差随着泵压的增大而递增,且增速逐渐增大;新型执行机构能够在较小的泄流量(排量)下输出较高的推靠力,对钻头处泥浆的分流微乎其微,有利于泥浆对井底岩石的辅助破岩及携岩上返。

(3)新型执行机构开闭间隔短,响应速度快,能够在较高的转速工况下输出有效而持续的推靠力。

(4)性能测试系统的数据测量及采集组件反映灵敏,响应迅速,能够在整机试验前对执行机构部分进行单独测试。

参考文献 (References):

[1] 叶建良,张伟,谢文卫.我国实施大洋钻探工程的初步设想[J].

探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):1-8.

YE Jianliang, ZHANG Wei, XIE Wenwei. Preliminary thoughts on implementation of the ocean drilling project in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(2):1-8.

[2] Kurt B, Johann D, Cottfried H, et al. The KTB borehole—Germany's superdeep telescope into the earth's crust[J]. Oil-field Review, 2004(1):4-22.

[3] Chur C, Oppelt J. Vertical drilling technology: A milestone in directional drilling[J]. SPE, 1993:25759.

[4] J Oppelt, C Chur, et al. New concepts for vertical drilling of boreholes[J]. SPE, 1991:21905.

[5] C Claus, B Thomas, et al. KTB—4 years experience at the limits of drilling technology[J]. SPE, 1995:29412.

[6] Kostikov M S. Advanced technologies in directional drilling[J]. Geology and Petroleum Engineering, 2009,18:937-938.

[7] Steve J, Chad F, Juan C. Fully mechanical vertical drilling system delivers RSS performance in vertical drilling applications while providing an economical alternative conventional rotary steerable systems set-Up for vertical hold mode [j]. IADC/SPE, 2016:178788.

[8] 刘文忠,易炳刚,范宇,等. VertiTrak 垂直钻井技术在高陡构造天东 004-X3 井的应用[J]. 钻采工艺, 2010, 33(6):36-39.

LIU Wenzhong, YI Binggang, FAN Yu, et al. Application of VertiTrak in the high-steep structures of Tiandong004 - X3 well[J]. Drilling & Production Technology, 2010,33(6):36-39.

[9] 汪海阁,苏义脑.直井防斜打快理论研究进展[J].石油学报, 2004,25(3):86-90.

WANG Haige, SU Yinao. Progress of theoretical research on

- deviation control and drilling fast for vertical wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004,25(3): 86-90.
- [10] 刘峰. POWER - V 和 PD - XCEED 垂直导向钻井技术在渤海油田的应用[J]. *石油钻采工艺*, 2009,31(5):29-32.
LIU Feng. Application of POWER - V and PD - XCEED steering vertical drilling technique in Bohai Oil Field[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2009,31(5):29-32.
- [11] 张俊良,肖科,吕俊川. 旋转导向系统 POWER - V 钻井技术应用简介[J]. *西部探矿工程*, 2008,20(4):79-82.
ZHANG Junliang, XIAO Ke, LÜ Junchuan. Brief introduction to the application of drilling technology with the rotary steering system "POWER - V"[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2008,20(4):79-82.
- [12] 孙峰,吕官云,马清明. 捷联式自动垂直钻井系统[J]. *石油学报*, 2011,32(2):360-363.
SUN Feng, LÜ Guanyun, MA Qingming. A strap-down automatic vertical drilling system [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011,32(2):360-363.
- [13] 苏义脑,李松林,葛云华,等. 自动垂直钻井工具的设计及自动控制方法[J]. *石油学报*, 2001,22(4):87-91.
SU Yinao, LI Songlin, GE Yunhua, et al. The design and control ways of the downhole automatic closed loop of vertical drilling tool[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001,22(4):87-91.
- [14] 彭国朋. 自动垂直钻井系统及其相关技术研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2006.
PENG Guopeng. The research on automatic vertical drilling system and related technology[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2006.
- [15] 汝大军,张健康,马哲,等. BH - VDT5000 自动垂直钻井系统工具[J]. *石油科技论坛*, 2012,31(3):64-65,68.
RU Dajun, ZHANG Jianguang, MA Zhe, et al. BH - VDT5000 automatic vertical drilling system tool[J]. *Petroleum Technology Forum*, 2012,31(3):64-65,68.
- [16] 韩来聚,倪红坚,赵金海,等. 机械式自动垂直钻井工具的研制[J]. *石油学报*, 2008,29(5):766-768.
HAN Laiju, NI Hongjian, ZHAO Jinhai, et al. Development of mechanical tool for automatic vertical drilling[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008,29(5):766-768.
- [17] 王闻涛,王进全,王小通,等. 全旋转推靠式自动垂直钻井工具的研制[J]. *石油机械*, 2015,43(8):47-50.
WANG Wentao, WANG Jinquan, WANG Xiaotong, et al. Development of full rotation and push-the-bit type automatic vertical drilling tool[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015,43(8):47-50.
- [18] 陈若铭,穆总结,艾才云,等. Ø311 垂直钻井系统的研制[J]. *石油钻采工艺*, 2010,32(1):31-33.
CHEN Ruoming, MU Zongjie, AI Caiyun, et al. Research for Ø311 automatic vertical drilling system[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2010,32(1):31-33.
- [19] 王闻涛,王小通,杨晓勇,等. 全旋转推靠式自动垂直钻井工具现场试验分析[J]. *石油机械*, 2015,43(9):24-27.
WANG Wentao, WANG Xiaotong, YANG Xiaoyong, et al. Field test of full-rotation backup-type automatic vertical drilling tool[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015,43(9):24-27.
- [20] 柴麟,张凯,刘宝林,等. 自动垂直钻井工具分类及发展现状[J]. *石油机械*, 2020,48(1):1-11.
CHAI Lin, ZHANG Kai, LIU Baolin, et al. Classification and development status of automatic vertical drilling tools[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020,48(1):1-11.
- [21] 王小通,王闻涛,孟瑞斌,等. 自动垂直钻井工具系统整体性能试验台架设计[J]. *石油机械*, 2017,45(2):13-16.
WANG Xiaotong, WANG Wentao, MENG Ruibin, et al. Design of integrative performance test rack for automatic vertical drilling tool system [J]. *China Petroleum Machinery*, 2017,45(2):13-16.
- [22] 汝大军,张健康,李立昌,等. 垂直钻井系统地面测试装置: 200920272051.4[P]. 2010-09-01.
RU Dajun, ZHANG Jianguang, LI Lichang, et al. Ground test device of vertical drilling system: 200920272051.4[P]. 2010-09-01.
- [23] 张凯,柴麟,刘宝林,等. 一种小直径取心式垂直钻井工具推力执行机构: 201910644494.X[P]. 2019-09-10.
ZHANG Kai, CHAI Lin, LIU Baolin, et al. A small diameter vertical drilling tool actuator: 201910644494.X[P]. 2019-09-10.
- [24] 张凯,张耀澎,柴麟,等. 一种垂钻系统推靠机构的试验装置: 201910644689.4[P]. 2019-09-20.
ZHANG Kai, ZHANG Yaopeng, CHAI Lin, et al. A test device for pushing mechanism of vertical drilling system: 201910644689.4[P]. 2019-09-20.
- [25] 汤楠,霍爱清,汪跃龙,等. 旋转导向钻井工具稳定平台控制功能试验研究[J]. *石油学报*, 2008,29(2):284-287.
TANG Nan, HUO Aiqing, WANG Yuelong, et al. Experimental study on control function of stabilized platform for rotary steering drilling tool[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008,29(2):284-287.
- [26] 李立鑫. 自动垂直钻井机械式稳定平台动力学及优化方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
LI Lixin. Research on dynamics and optimization method of mechanical stable platform in automatic vertical drilling tools [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.

(编辑 周红军)