

# 遥控变径稳定器变径动作分析及现场试验

周志刚

(中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院,山东东营 257017)

**摘要:**由于遥控变径稳定器存在状态信号不可靠的问题,导致该类稳定器的状态有时无法辨识。为了研究影响该类稳定器状态信号的相关因素,针对其结构特点,根据液体不可压缩和物体受力平衡原理,对该类稳定器在地面和井下两种环境下的变径动作进行了分析,并利用现场试验进行了部分验证。该类稳定器依据MWD仪器提供的井斜信号进行状态控制,并利用相邻两次开泵的泵压差值确定其工作状态。分析认为,该类稳定器内平衡活塞出现上限、下限位置对其变径动作行程有减小的作用。现场试验发现,该类稳定器状态转换遵循控制活塞伸出与平齐的循环规律,活塞伸出泵压大于活塞平齐泵压,相邻泵压绝对差值约1.0 MPa,该类稳定器状态由第二次开泵时的泵压值判断其工作状态。研究表明,该类稳定器内平衡活塞出现上限、下限位置会导致状态信号减弱或无信号;利用相邻两次开泵泵压差值确定其状态的方法可靠,可为地面遥控稳定器提供依据。

**关键词:**遥控 变径稳定器 井眼轨迹 状态信号

中图分类号:TE921<sup>+</sup>.2 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2015)03-0120-05

## Analysis and Field Testing by Remote Control of the Action of a Variable Diameter Stabilizer

Zhou Zhigang

(Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257017, China)

**Abstract:** The remote-control variable diameter stabilizer developed is unreliable in the state signal, resulting in the fact that its state cannot be identified. In order to identify relevant factors affecting the state signal, the stabilizer action was analyzed for changing its diameter under both surface and downhole conditions based on the principle of liquid incompressibility and force equilibrium. Later, combined with its structural characteristics, the result of the analysis was partially verified by field test. The stabilizer can achieve state control by using well deviation signal from the MWD instrument and determine the working state by analyzing the pump pressure difference between two adjacent pump startups. The result of the analysis suggested that the upper and lower position limits of balance piston inside the stabilizer can reduce the action stroke for changing diameter. The field test showed that the state change of the stabilizer conforms to the changing regularity of controlling piston extension and alignment, the pump pressure on piston extension is higher than that of piston alignment, and the absolute difference of adjacent pump pressure is about 1.0 MPa. The working state of the stabilizer can be determined based on the pump pressure value of the second pump startup. The research results showed that, the upper and lower limits of the balance piston position inside the stabilizer would result in a weak state signal or no signal. The method to determine the stabilizer state according to pressure difference between two adjacent pump startups is reliable, and can provide the basis for remote control of stabilizer on the ground.

**Key words:** remote control; variable diameter stabilizer; hole trajectory; state signal

遥控变径稳定器是钻水平井、大位移井时控制井眼轨迹的重要工具,该类稳定器的状态信号直接反映其在井下的变径状态。遥控变径稳定器产生状态信号的准确性、同其他井下工具和仪器的兼容性以及状态信号的幅值,都对其状态的判断产生直接影响,并进一步影响到井眼轨迹的控制。尽管遥控变径稳定器技术于20世纪80年代就已经在欧美等发达国家发展成熟,并进行了较为广泛的应用,但在

国内相关研究起步较晚,到目前为止还没有进行产业化推广应用的产品<sup>[1-3]</sup>。分析认为,一个很重要的原因

收稿日期:2014-10-08;改回日期:2015-02-02。

作者简介:周志刚(1973—),男,湖北天门人,1997年毕业于江汉石油学院机械设计与制造专业,2005年获青岛科技大学机械设计及理论专业硕士学位,工程师,主要从事机械设计方面的研究工作。

联系方式:13561053044,zzgpln@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“致密油藏开发钻井技术优化及集成”(编号:2015ZX05076-003)、中石化石油工程技术服务有限公司科研项目“新型遥控变径稳定器研制与应用”(编号:SG13-03K)资助。

是其状态信号容易出现问题,这主要表现为两种形式:一是该类稳定器在深井中没有状态信号<sup>[4]</sup>;二是该类稳定器的状态信号时有时无<sup>[5]</sup>,不能有效确认稳定器的状态,有时不得不采取控制次数的方式辅助判断。针对上述问题,对新研制遥控变径稳定器的变径动作进行了分析,并进行了现场试验,证明该类稳定器的结构存在影响状态信号的因素,通过试验排除了MWD仪器同其共同工作时的相互影响。

## 1 遥控变径稳定器结构及工作原理

### 1.1 遥控变径稳定器的结构

遥控变径稳定器主要由本体、上心轴、下心轴、平衡活塞、压差活塞、复位弹簧、控制器、节流杆等组成<sup>[6]</sup>,在本体上有加油塞孔和环空孔,其结构如图1所示。

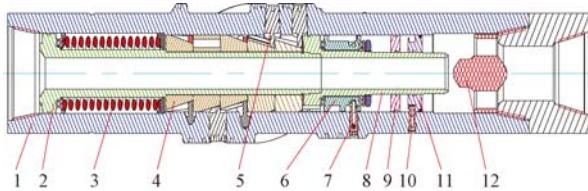


图1 遥控变径稳定器基本结构

Fig. 1 Structure for a remote control variable diameter stabilizer

1. 本体;2. 上心轴;3. 复位弹簧;4. 斜面块;5. 扶正活塞;6. 控制器;7. 加油塞孔;8. 下心轴;9. 平衡活塞;10. 环空孔;11. 压差活塞;12. 节流杆

### 1.2 遥控变径稳定器的工作原理

遥控变径稳定器工作时串接在井下钻具组合中,内外利用环空孔来连通,通过开关钻井泵来控制其状态。开泵时,由于稳定器内部钻井液的压强大于稳定器外部环空的压强,在稳定器的上、下心轴产生压差,产生使稳定器心轴向下运动的推动力,使稳定器心轴克服复位弹簧的弹力向下运动,从而带动斜面块也向下运动,推动径向布置的活塞伸出;停泵时,稳定器内外钻井液压差消失,稳定器心轴在复位弹簧的带动下向上运动,带动斜面块也向上运动,拉动扶正活塞缩回稳定器本体内。

由于稳定器内部控制器的作用,具体的变径动作过程为:在停泵状态下,稳定器扶正活塞缩在稳定器本体内,稳定器处于内缩状态,当首次开泵后,扶正活塞将伸至同稳定器本体外壳齐平,稳定器变为齐平状态,此时停泵,扶正活塞缩回,稳定器重回内缩状态;再次开泵后,扶正活塞将伸出稳定器本体外

壳外,此时稳定器工作外径最大,稳定器变为伸出状态,再次停泵,扶正活塞再次缩回稳定器本体内,稳定器重回内缩状态。通过不断地开泵和停泵,稳定器将在不同的3种状态下循环,形成稳定器的状态控制循环规律。在钻井过程中,稳定器一般同MWD仪器串接在一起共同工作,当MWD仪器监测到井斜角不满足要求、需要稳定器进行变径时,司钻通过关泵和开泵操作,并根据地面检测的泵压变化,确认稳定器的状态,改变稳定器状态后继续旋转钻进,达到改变井斜角的目的。

## 2 遥控变径稳定器变径动作分析

### 2.1 稳定器的状态信号

根据遥控变径稳定器的结构和变径动作原理,对内部结构进行简化,将上、下心轴合并为一根心轴,如图2所示(图2A为内缩状态,图2B为齐平状态,图2C为伸出状态)。当稳定器在齐平状态时,下心轴不会套住节流杆,稳定器内部不产生节流;当稳定器在伸出状态时,下心轴部分套住节流杆,稳定器内部产生节流,产生压力损失,反映在地面上即泵压上升。利用两次开泵后同流量下的不同泵压差值,也就是稳定器的状态信号,即能确定稳定器的井下工作状态,且泵压差值越大稳定器的状态信号越明显。

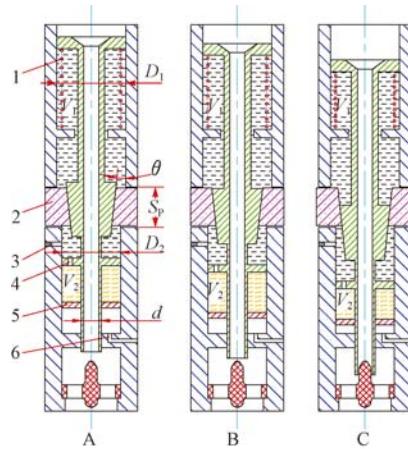


图2 稳定器内部结构及不同状态下充油腔容积的变化

Fig. 2 Internal structure of stabilizer and the change of oil-filled chamber volume in different states

1. 复位弹簧;2. 扶正活塞;3. 加油塞孔;  
4. 充油腔1和2间的通道;5. 平衡活塞;6. 环空孔

### 2.2 稳定器变径动作分析

图2B、图2C为稳定器心轴下行后相对于图2A

内部各容积腔大小变化的情况。稳定器内部充油，故封闭的总体积不变。设计稳定器时，要求扶正活塞以下部分尽可能短，因此内部设计十分紧凑，心轴和平衡活塞轴向运动受空间限制，各容积腔的变化相应受限，并对稳定器的变径动作产生影响。

### 2.2.1 充油腔容积的变化

假设以下心轴的上平面为分界面，其上部至上心轴顶部封闭空间为充油腔 1，容积为  $V_1$ （图 2 短横线区域）；下部至平衡活塞的封闭空间为充油腔 2，容积为  $V_2$ （图 2 波浪线区域）。图 2 中，充油腔 1 和 2 之间是相通的； $D_1$  为上心轴上部直径， $S_p$  为扶正活塞直径，扶正活塞数量为 15 个， $D_2$  为平衡活塞直径， $\theta$  为斜面块的倾斜角， $d$  为下心轴压差活塞处直径。

设下行程为  $h$ ，平衡活塞在心轴下行过程中相对稳定器外壳先不动（假设油液具有可压缩性），充油容积的减少量为  $\Delta V_m$ ，则：

$$\Delta V_m = \pi \left[ \left( \frac{D_1}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} \right)^2 \right] h - 15\pi \left( \frac{S_p}{2} \right)^2 h \tan \theta \quad (1)$$

但油液实际是不可压缩的，故平衡活塞的下行量  $H_{bp}$  应为：

$$H_{bp} = \frac{\Delta V_m}{\pi \left[ \left( \frac{D_2}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

举例说明（记为实例 A）：假设  $D_1 = 117$  mm， $D_2 = 108$  mm， $d = 60$  mm， $S_p = 60$  mm， $\theta = 7^\circ$ ，则  $\Delta V_m \approx 2716.4 h$ ， $H_{bp} \approx 0.43 h$ （若扶正活塞完全伸出，下行程  $h = 100$  mm，则  $H_{bp} \approx 43$  mm）。

假如稳定器中充油腔 1 和 2 之间是不相通的，则充油腔 1 的容积减小  $\Delta V_{1m}$ ：

$$\Delta V_{1m} = \pi \left[ \left( \frac{D_1}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_2}{2} \right)^2 \right] h - 15\pi \left( \frac{S_p}{2} \right)^2 h \tan \theta \quad (3)$$

该情况下， $\Delta V_{1m} \approx -3167 h$ 。由于  $\Delta V_{1m}$  为负值，故  $V_1$  变大。这样，心轴下行过程中  $V_1$  变大， $V_2$  变小，油液从充油腔 2 流向充油腔 1，两容积腔间的交换流量为  $\Delta V_{1m}$ 。总体积变小了，但由于油液体积不变，所以平衡活塞下行，内部容积增大，进行补偿。心轴上行回位过程中，充油腔 1 和 2 的容积变化正好相反。

### 2.2.2 上下限位置稳定器变径动作分析

由于平衡活塞在稳定器内部的活动空间极其有

限，运动中可能会出现一个上限位置和一个下限位置，使运动产生问题。上限位置是心轴下行未完成，但平衡活塞已同心轴上部限位零件相接触，如图 3A 所示；下限位置是心轴下行未完成，但平衡活塞已同压差活塞相接触，如图 3B 所示。

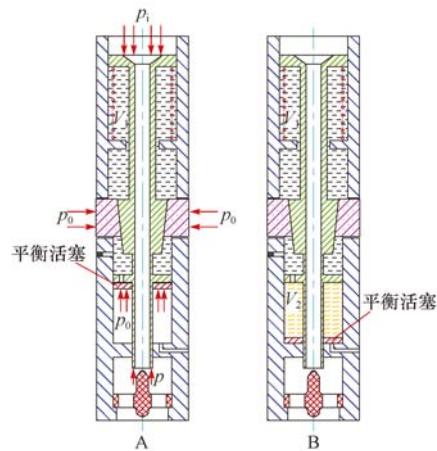


图 3 限位位置受力分析示意

Fig. 3 Diagram for force analysis in the limited position of balance piston

#### 2.2.2.1 上限位置稳定器变径动作分析

稳定器内的液体量小于合理值，平衡活塞上移，心轴下行未完成时，平衡活塞同心轴上部限位零件已相接触，若稳定器密封良好，心轴能继续下行，稳定器内部油液将不能通过平衡活塞和环空孔同外部压强保持相同，因  $V_1$  变大，稳定器充油腔内将出现真空。

处于工作状态时（见图 3A）稳定器外为钻井液，外部压强为钻柱环空液柱压强  $p_o$ ，上心轴上部所受钻井液压强为  $p_i$ ，下心轴下部所受钻井液压强为  $p$ （此处钻井液流动后产生沿程损失，因而  $p_i > p$ ；但沿程损失较小，未节流时  $p \approx p_i$ ），平衡活塞下侧及扶正活塞外侧均受钻柱环空液柱压强  $p_o$ 。

心轴下行过程中所受钻井液向下的推力  $F_d$  为<sup>[7]</sup>：

$$F_d \approx \frac{\pi}{4} p_i (D_1^2 - d^2) - \frac{\pi}{4} p_o (D_2^2 - d^2) \quad (4)$$

稳定器中  $D_1 \approx D_2$ ，则：

$$F_d \approx \frac{\pi}{4} (D_1^2 - d^2) (p_i - p_o) \quad (5)$$

扶正活塞作用于斜面块产生的上推心轴力  $F_u$  为：

$$F_u = \frac{15\pi}{4} p_o S_p^2 \tan \theta \quad (6)$$

假设钻井液密度  $\rho = 1.3$  g/cm<sup>3</sup>，稳定器处于井深 1 000 m 位置，则  $p_o \approx 12.74$  MPa。钻柱内外压差一般为 2~5 MPa。按实例 A 的数据和条件， $p_i - p_o = 5$  MPa，则  $F_d \approx 39619.4$  N， $F_u \approx 66459.7$  N。

心轴向下和向上的总动力可表示为:

$$F_{wd} = F_d + F_g + F_{fd} \quad (7)$$

$$F_{wu} = F_u + F_s + F_{fu} \quad (8)$$

式中: $F_{wd}$ 为心轴向下的总动力,N; $F_g$ 为向下运动件的合重力,N; $F_{fd}$ 为流体对心轴产生的向下的摩擦力(值较小,可忽略),N; $F_{wu}$ 为心轴向上的总动力,N; $F_s$ 为弹簧回复力,N; $F_{fu}$ 为心轴向下运动产生的向上的摩擦阻力,N。

实例A中,弹簧回复力 $F_s$ 最小为5 000 N,远大于 $F_g$ ( $F_g < 1 000$  N)。因此,稳定器处于井深1 000 m位置时, $F_{wu} > F_{wd}$ ,故心轴不能向下运动。也就是说,出现上限位置,稳定器在下入一定深度后,内部会出现运动受限的情况,且井越深 $F_{wu}$ 和 $F_{wd}$ 的差值越大,心轴越不可能向下运动。

室内试验工况分析:稳定器外部压强为大气压,内外压差可以控制为与井下一样,但 $p_0$ 变为0.1 MPa,则 $F_u \approx 521.7$  N,可使 $F_d$ 不变, $F_{wu} < F_{wd}$ ,故心轴能向下运动,充油腔1出现真空。

稳定器心轴在上行过程中由于内部油液压强同外部压强平衡,所以上行不受影响,稳定器可以正常回到内缩状态。

### 2.2.2 下限位置稳定器变径动作分析

稳定器内液体量大于合理值,平衡活塞下移,在心轴下行过程中,行程未完成则平衡活塞已同压差活塞相接触,无进一步活动空间(见图3B),内部压强上升,下行停止,扶正活塞不能完全伸出。当刚出现下限位置前,由于环空孔的联通作用,稳定器内部油液通过平衡活塞同外部压强保持相同。稳定器心轴在上行过程中由于内部油液压强同外部压强平衡,所以上行过程中不受影响,稳定器可以正常回到内缩状态。

由此可见,在上限和下限位置,只要不出现运动件因泥沙卡死的情况,心轴在上行过程中均可全回位至内缩状态,对下一次的变径动作没有影响,能保证起下钻安全。

### 2.3 异常变径动作对状态信号的影响

变径稳定器工作在高温高压条件下,环境温度可达150 ℃以上,绝对压强可达60 MPa以上,且受剧烈振动及井壁摩擦作用,工况恶劣,可能造成以下问题:1)当稳定器由于充油量不合适或出现单向泄漏时均可能出现上限、下限位置,这时心轴不能下行到位,节流长度减小,状态信号强度减弱,减弱程度随限位前的心轴下行位移而定,下行位移越小状态信号越弱;2)外部钻井液侵入稳定器内部,使内部各运动件

间夹杂泥沙,摩擦变大,运动条件变差,可能出现运动件卡死的情况,无变径动作,导致无状态信号。

## 3 遥控变径稳定器现场试验

遥控变径稳定器内部的状态信号装置采用节流杆示位机构,由环形缝隙流产生状态信号<sup>[8]</sup>,其稳定性与两次开泵的流量、心轴下行量、钻井液性能等多个参数相关。该类稳定器能否产生正确可靠的状态信号,与其内部信号装置运动是否按稳定器状态控制循环规律是一致的,而且也可能与配套使用的其他利用节流产生信号或动作的井下仪器和工具相互影响(如MWD仪器)。通过对稳定器在井口和井下进行现场工况试验,可直观地对部分影响因素进行验证,同时也可以正面检验稳定器变径动作分析的正确性。为此,按容积分析充油量,严控平衡活塞出现上限和下限位置,利用稳定器加油塞孔完成充油后进行了相关试验。

### 3.1 井口试验和井下试验

为了验证遥控变径稳定器与MWD仪器是否相互影响,在胜利油田营87-斜69井进行了井口试验;为了验证变径稳定器能否在井下正常工作,在胜利油田河76-斜26井进行了井下试验。

#### 3.1.1 井口试验1

试验钻具组合为牙轮钻头+转换接头+MWD+变径稳定器+方钻杆,某相邻两次开泵的泵压曲线(记为曲线1)如图4所示。

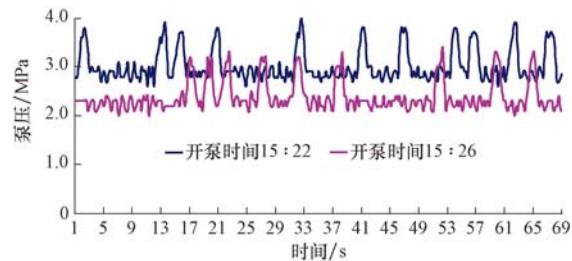


图4 井口试验某相邻两次开泵泵压曲线1

Fig.4 Pump pressure curve 1 of two adjacent pump startups at wellhead test

#### 3.1.2 井口试验2

试验钻具组合为牙轮钻头+转换接头+变径稳定器+MWD+方钻杆,某相邻两次开泵的泵压曲线(记为曲线2)如图5所示。

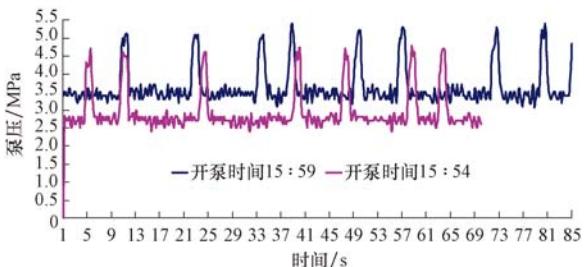


图 5 井口试验某相邻两次开泵泵压曲线 2

Fig. 5 Pump pressure curve 2 of two adjacent pump startups at wellhead test

### 3.1.3 井下试验

试验钻具组合为 PDC 钻头 + 双母接头 + 钻铤 + 变径稳定器 + 钻铤 + 加重钻杆 + 钻杆。井深 400.00 m 处相邻两次开泵的泵压曲线如图 6 所示。

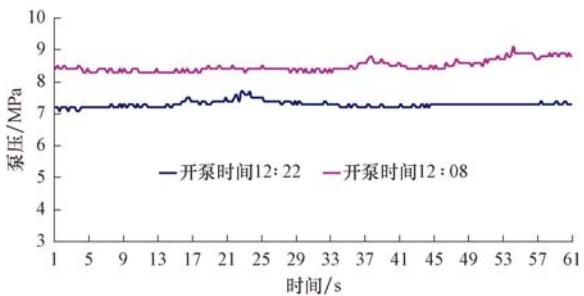


图 6 井下试验某相邻两次开泵泵压曲线

Fig. 6 Pump pressure curves of two adjacent pump startups in downhole test

### 3.2 试验数据分析

井口试验中,不管变径稳定器在 MWD 仪器(正脉冲)上部还是下部,其状态转换(齐平状态、伸出状态和内缩状态之间)动作顺畅,各状态运动到位,动作循环严格遵循状态控制循环规律。从图 4、图 5 可以看出,稳定器状态变换后泵压发生明显变化,相邻两次开泵泵压相差约 1.0 MPa,分离清晰,大于泵压波动噪声信号,状态信号明显,且 MWD 自身的信号可以正确解析,说明 MWD 仪器与该稳定器在变径动作和信号上相互无影响。

从图 6 可以看出,井下试验中,相邻两次开泵泵压相差约 1.0 MPa,分离清晰,状态信号明显,稳定器状态发生变化,可以在井下受控工作。

综合上述试验结果表明,遥控变径稳定器的变径动作在井口和井下均符合状态控制循环规律,这从正面验证了变径动作分析的正确性。

## 4 结论与建议

- 1) 遥控变径稳定器内平衡活塞出现上限、下限位置,对稳定器的变径动作行程有减小的作用,是导致状态信号减弱或无信号的因素。
- 2) 遥控变径稳定器同正脉冲 MWD 仪器配合使用,在各自的动作和信号上相互无影响。
- 3) 利用相邻再次开泵泵压差值确定稳定器状态的方法可靠,可为地面遥控稳定器提供依据。
- 4) 遥控变径稳定器是钻井中控制井眼轨迹的重要工具,在国内旋转导向技术还不是特别成熟的工程背景下,建议加强延长该工具工作寿命和提高其可靠性的研究,并将其进行系列化。

## 参 考 文 献

### References

- [1] Lawrence L, Stymiest J, Russell R. Adjustable-gauge stabilizer in motor provides greater inclination control[J]. Oil & Gas Journal, 2002, 100(7): 37-41.
- [2] 祝效华, 刘少胡, 聂荣国, 等. KWQ-216型地面可控井下变径稳定器[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(1): 120-122.  
Zhu Xiaohua, Liu Shaohu, Nie Rongguo, et al. KWQ-216 surface controlled downhole variable diameter stabilizer[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(1): 120-122.
- [3] 肖仕红, 梁政. 旋转导向钻井技术发展现状及展望[J]. 石油机械, 2006, 34(4): 66-70.  
Xiao Shihong, Liang Zheng. Development status and prospect of the rotary steerable drilling technology[J]. China Petroleum Machinery, 2006, 34(4): 66-70.
- [4] 张明江, 彭新明. TRACS 可调变径稳定器的使用情况[J]. 石油钻采工艺, 1998, 20(增刊 1): 52-59.  
Zhang Mingjiang, Peng Xinming. Application of TRACS adjustable stabilizer[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998, 20(supplement 1): 52-59.
- [5] 赵小充, 金学智. 可变径稳定器在定向钻井中的有效应用[J]. 国外石油机械, 1996, 7(4): 14-18.  
Zhao Xiaochong, Jin Xuezhi. The effective application of the variable diameter stabilizer in directional drilling[J]. Foreign Petroleum Machinery, 1996, 7(4): 14-18.
- [6] 巩同标. 遥控变径稳定器在胜利油田钻井中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2007, 35(6): 82-84.  
Gong Tongbiao. Application of remote controlled variable-diameter stabilizer in Shengli Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(6): 82-84.
- [7] 刘英辉, 苏义脑, 汪海阁, 等. 井下机液控制变径稳定器的设计与改进[J]. 河南石油, 2000, 14(3): 29-30, 61.  
Liu Yinghui, Su Yinao, Wang Haige, et al. Design and improvement of downhole mechanical-hydraulic control variable diameter stabilizer[J]. Henan Petroleum, 2000, 14(3): 29-30, 61.
- [8] 林雅玲, 马汝涛, 任荣权. 井下节流杆机构设计及其使用条件[J]. 石油机械, 2013, 41(8): 76-80, 93.  
Lin Yaling, Ma Rutao, Ren Rongquan. Design of downhole throttle lever mechanism and its service conditions[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(8): 76-80, 93.

[编辑 令文学]