

# 推靠式自动垂钻系统轨迹控制能力 实验评价装置及其实验方法

牛奕翔<sup>1,2,3</sup>, 刘永旺<sup>1,2,3\*</sup>, 秦晓兵<sup>1,2,3</sup>, 徐明磊<sup>4</sup>, 王炳英<sup>5</sup>, 裴学良<sup>6</sup>, 龙刚<sup>7</sup>, 尚捷<sup>8</sup>, 贾建波<sup>8</sup>

<sup>1</sup>非常规油气教育部重点实验室(中国石油大学(华东)), 山东 青岛

<sup>2</sup>中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛

<sup>3</sup>山东省深地钻井过程控制工程技术研究中心, 山东 青岛

<sup>4</sup>中国石油集团渤海钻探工程有限公司工程技术研究院, 天津

<sup>5</sup>中国石油大学(华东)材料科学与工程学院, 山东 青岛

<sup>6</sup>中石化胜利石油工程有限公司, 山东 东营

<sup>7</sup>中石化西南油气分公司新场联谊公司, 四川 德阳

<sup>8</sup>中海油田服务股份有限公司, 河北 燕郊

收稿日期: 2023年11月22日; 录用日期: 2023年12月22日; 发布日期: 2023年12月29日

## 摘要

综合考虑影响推靠式自动垂钻系统在直井钻进时井眼轨迹变化趋势的各个因素, 设计开发了推靠式自动垂钻系统轨迹控制能力实验评价装置, 介绍了实验评价装置实现功能情况, 装置主要结构组成及关键参数的确定情况, 不同工况井眼钻进趋势影响规律模拟过程功能设计及其特点。通过该实验评价装置, 能够了解推靠式自动垂钻系统轨迹控制的实现过程, 改变井眼趋势的原理、地质因素及钻进参数对轨迹控制效果的影响, 及综合考虑各因素情况下, 井眼的变化情况, 可开展新型推靠式自动垂钻系统研究及攻关。该评价实验装置为加深自动导向技术的认识和理解提供了平台, 为自动垂钻系统的创新和发展提供了支撑。

## 关键词

推靠式自动垂钻系统, 模拟, 实验评价装置, 钻进趋势, 防斜打直

# Experimental Evaluation Device and Working Principle for Trajectory Control Capability of Push-the-Bit Automatic Vertical Drilling System

\*通讯作者。

文章引用: 牛奕翔, 刘永旺, 秦晓兵, 徐明磊, 王炳英, 裴学良, 龙刚, 尚捷, 贾建波. 推靠式自动垂钻系统轨迹控制能力实验评价装置及其实验方法[J]. 石油天然气学报, 2023, 45(4): 421-427. DOI: 10.12677/jogt.2023.454051

**Yixiang Niu<sup>1,2,3</sup>, Yongwang Liu<sup>1,2,3\*</sup>, Xiaobing Qin<sup>1,2,3</sup>, Minglei Xu<sup>4</sup>, Bingying Wang<sup>5</sup>,  
Xueliang Pei<sup>6</sup>, Gang Long<sup>7</sup>, Jie Shang<sup>8</sup>, Jianbo Jia<sup>8</sup>**

<sup>1</sup>Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas under the Ministry of Education (China University of Petroleum (East China)), Qingdao Shandong

<sup>2</sup>School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong

<sup>3</sup>Shandong Deep Drilling Process Control Engineering Technology Research Center, Qingdao Shandong

<sup>4</sup>Engineering Technology Research Institute of China Petroleum Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Tianjin

<sup>5</sup>School of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong

<sup>6</sup>Sinopec Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd., Dongying Shandong

<sup>7</sup>Sinopec Southwest Oil and Gas Branch Xinchang Friendship Company, Deyang Sichuan

<sup>8</sup>CNOOC Oilfield Services Co., Ltd., Yanjiao Hebei

Received: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2023; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Taking into account various factors that affect the trajectory change trend of the Push-the-bit automatic vertical drilling system during vertical well drilling, an experimental evaluation device for the trajectory control ability of the Push-the-bit automatic vertical drilling system was designed and developed. The functional implementation of the experimental evaluation device, the determination of the main structural components and key parameters of the device, and the simulation process of the influence law of wellbore drilling trends under different working conditions were introduced. The functional design and characteristics of the simulation process were also discussed. Through this experimental evaluation device, it is possible to understand the implementation process of trajectory control for the push-the-bit automatic vertical drilling system, the principle of changing wellbore trends, the impact of geological factors and drilling parameters on trajectory control effectiveness, and the comprehensive consideration of changes in the wellbore under various factors. Therefore, research and breakthroughs can be carried out on a new type of push-the-bit automatic vertical drilling system. This evaluation experimental device provides a platform for deepening the understanding and comprehension of automatic guidance technology, and supports the innovation and development of automatic vertical drilling systems.

## Keywords

**Push-the-Bit Automatic Vertical Drilling System, Simulation, Experimental Evaluation Device, Drilling Trend, Anti Skewing and Straightening**

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



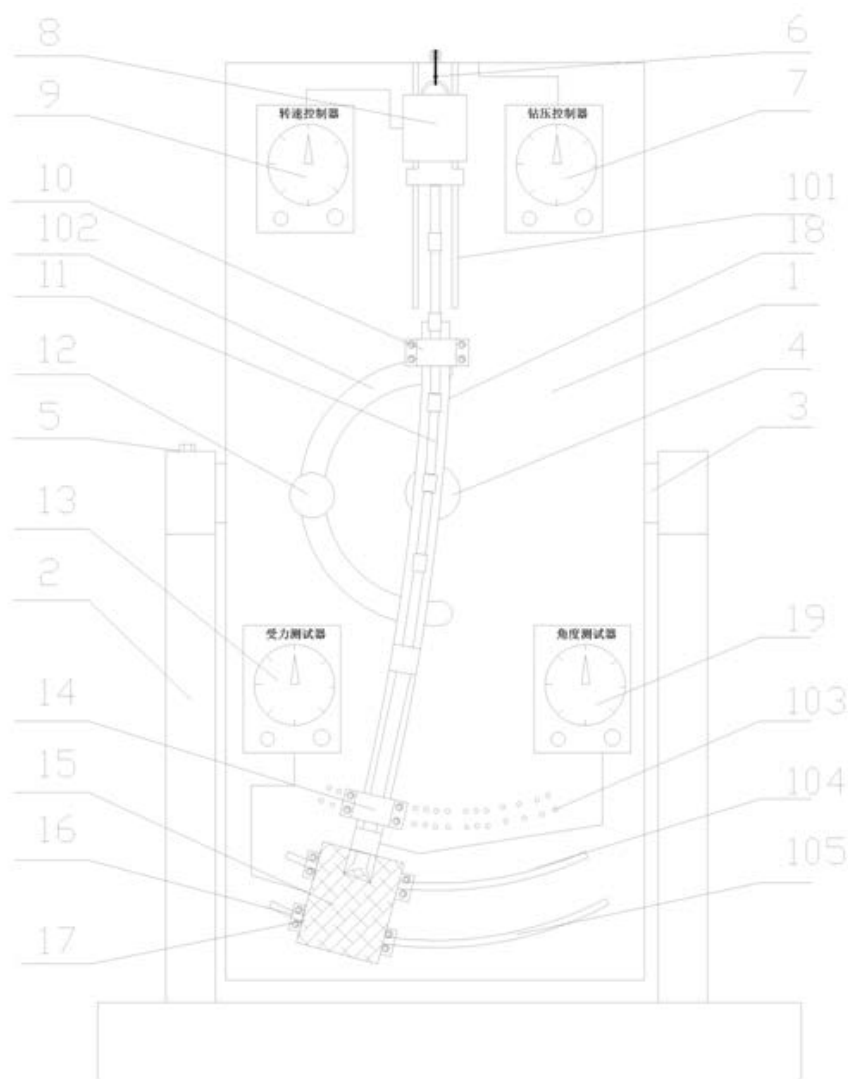
Open Access

## 1. 引言

推靠式自动垂钻系统是目前直井钻井的最先进装备，代表性的推靠式自动垂钻系统有斯伦贝谢 (Schlumberger) 公司的 Power-V 系统、贝克休斯 (Baker Hughes) 公司的 VertiTrak 系统以及哈里伯顿 (Halliburton) 公司的 V-Pilot 系统，国内中石油渤海钻探的 VDT 等 [1] [2] [3] [4] [5]。其工作原理是利用杠杆原理为钻头施加推靠力、通过推靠力诱发钻头侧向切削从而改变井眼轨迹。虽然目前上述推靠式自动垂钻系统已经在

油气探采现场大范围应用,但其轨迹控制能力有待于进一步提高,工作寿命有待于进一步延长且钻井速度有待进一步提升[6] [7] [8]。若研制出一套推靠式自动垂钻系统轨迹控制能力实验评价装置可以直观展示装置防斜打直原理、评价装置轨迹控制能力、揭示不同因素对井眼钻进趋势的影响机制、展示多因素协同作用下井眼延伸形态变化规律,则可为自动垂直钻井系统轨迹控制能力进一步提高、工作寿命进一步延长及钻井速度进一步提升相关研究及发展提供研究手段,为新型自动垂钻系统的研发提供支撑。

## 2. 推靠式自动垂钻系统轨迹控制能力实验评价装置总体结构及关键参数



注: 1. 空间姿态调节面板; 2. 平衡支座; 3. 控制轴; 4. 安装销钉; 5. 俯仰定位销; 6. 钻压施加器; 7. 钻压控制器; 8. 电机; 9. 电机转速控制器; 10. 顶部井筒定位体; 11. 模拟钻柱; 12. 侧向偏摆控制销; 13. 受力测试仪; 14. 下部井筒曲率调节体; 15. 模拟地层; 16. 地层受力测试系统位置调节体; 17. 地层受力测试系统位置调节滑道; 18. 模拟井筒; 19. 侧向力施加系统; 101. 电机提升轨道; 102. 偏摆调节轨道; 103. 井筒曲率调节轨道; 104. 地层受力测试系统位置调节轨道; 105. 地层受力测试系统姿态调节轨道

**Figure 1.** Schematic diagram of the experimental evaluation device for trajectory control capability of push-the-bit automatic vertical drilling system

**图 1.** 推靠式自动垂钻系统轨迹控制能力实验评价装置结构示意图

推靠式自动垂钻系统轨迹控制能力实验评价装置结构示意图见图 1 所示, 该装置主要包括以下几个系统:

(1) 井眼状态调控系统。主要由平衡支座和空间姿态调节面板构成, 平衡支座上端带有一个可以俯仰旋转、可以锁紧的控制轴, 控制轴中部径向带有安装销钉, 空间姿态调节面板通过安装销钉安装于控制轴上, 可以相对控制轴侧向偏摆旋转, 通过控制轴俯仰旋转与空间姿态调节面板相对于控制轴的侧向偏摆旋转的合成可以使得空间姿态调节面板处于任意空间位置。空间姿态调节面板上带有偏摆调节轨道、电机提升轨道、井筒曲率调节轨道、地层受力测试系统位置调节轨道、地层受力测试系统姿态调节轨道。偏摆调节轨道用于实现平衡支座和空间姿态调节面板偏摆位置及锁定; 电机提升轨道为电机的提升下放提供轨道; 井筒曲率调节轨道用于调节模拟井筒在空间姿态调节面板上的相对位置; 地层受力测试系统位置调节轨道用于调节地层受力测试系统在空间姿态调节面板上的位置; 地层受力测试系统姿态调节轨道用于调节地层受力测试系统在空间姿态调节面板固定位置上的角度。井眼状态调控系统侧视图如图 2 所示。

(2) 模拟井筒及模拟钻柱系统。包括模拟井筒、模拟钻柱及辅助工具, 模拟井筒材料为有机玻璃, 安装于空间姿态调节面板上, 可在空间姿态调节面板上平面上实现沿平面的任意曲率弯曲; 模拟钻柱材料为 ABS 工程塑料, 模拟钻头为 40Cr。当模拟钻柱顶端施加钻压及扭矩时, 模拟钻柱可以带动模拟钻头旋转, 从而破碎钻头下部物质, 通过透明的有机玻璃可以直观观察到模拟钻柱的运动状态; 辅助工具可以为不同钻具的机理样机。

(3) 钻进工作状态控制系统。包括钻压控制系统和转速控制系统, 通过这两个系统可以实现对模拟钻柱上钻压和转速的实时控制。

(4) 模拟地层。模拟地层为均匀岩石块或者带有不同层理、不同层理角度的岩石块, 可以模拟均匀地层、非均匀地层及带有倾角地层工况。

(5) 近钻头施力系统。包括施力体及施力控制仪器, 施力体可以为模拟钻柱近钻头部分施加不同类型作用力, 本装置采用磁力作为作用力, 施力控制仪器控制施力体力的大小、方向及类型。

(6) 地层受力测试系统。安装于空间姿态调节面板上, 可沿着测试系统导轨移动及锁定, 内部安装模拟地层, 模拟地层周围安装受力测试传感器, 用于测试不同钻进状态下模拟地层所受侧向力及正压力。

(7) 紧固配件。包括: 俯仰定位销、侧向偏摆控制销、下部井筒曲率调节体、地层受力测试系统位置调节体, 这些配件用调整好关键部件后, 锁紧定位。

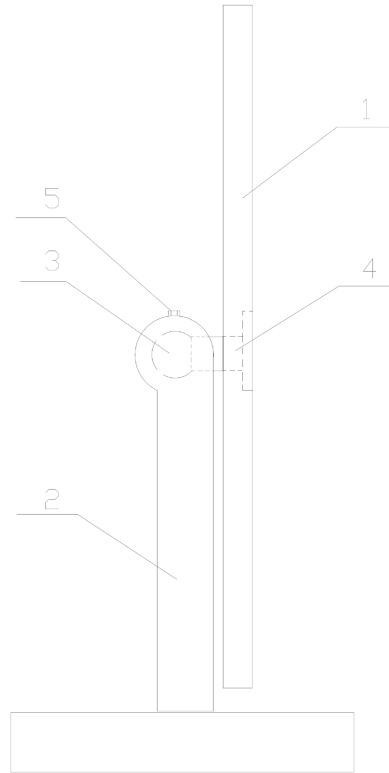
推靠式自动垂钻系统轨迹控制能力实验评价装置关键参数计算如下:

推靠式自动垂钻系统轨迹控制能力实验评价装置与实际钻井工况对应关系以相似准则按 1:10 (模型: 原型) 比例建立。单值条件中所有具有长度单位的物理量, 如模拟钻柱的内外径、长度, 以及模拟井筒内径等, 取相同的几何比。单值条件中所有具有角度单位的物理量, 如模拟钻柱弯角、井斜角等, 根据几何相似性质, 对应角度相等[9]。模型钻柱与井筒材料要与原型材料具有相同的“应力-应变”特性。实际钻柱的材料为钢、密度  $\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$ 、弹性模量  $E = 210 \text{ GPA}$ ; 模拟钻柱的材料为 ABS 塑料、密度  $\rho_m = 1.10 \text{ g/cm}^3$ , 弹性模量  $E_m = 2.30 \text{ GPA}$ 。钻压和转速是最关键的两个实验参数。转速  $\Omega$  和钻压  $P$  的相似变换式为[10]:

$$c_{\Omega} = \frac{\Omega_m}{\Omega} = \sqrt{\frac{c_E}{c_{\rho} \cdot c_l^2}} \quad (1)$$

$$c_w = \frac{P_m}{P} = c_E \cdot c_l^2 \quad (2)$$

式中： $c_{\Omega}$  为实验评价装置和原型的转速比； $c_w$  为实验评价装置和原型的轴向力之比； $c_l$  为实验评价装置和原型的几何尺寸比； $c_E$  为实验评价装置和原型的弹性模量比； $c_{\rho}$  为实验评价装置和原型的密度比； $\Omega_m$  为实验评价装置转速； $\Omega$  为原型转速； $P_m$  为实验评价装置钻压； $P$  为原型钻压。



**Figure 2.** Schematic diagram of wellbore state control system structure  
**图 2.** 井眼状态调控系统结构示意图

将模拟钻柱和真实钻柱的几何比，材料的弹性模量比、密度比代入上式，得到钻进参数与模拟实验参数的对应关系为[11]：

$$c_{\Omega} = \frac{\Omega_m}{\Omega} \cong 2.796 \quad (3)$$

$$c_w = \frac{P_m}{P} \cong \frac{1}{9130} \quad (4)$$

也就是说，当实验评价装置转速是现场的 2.796 倍，实验钻压是现场的 1/9130 时，能够用上述模拟实验评价装置来研究实际工况下钻柱的运动状态[12] [13]。实验评价装置的实验参数与实际工况钻进参数的对应关系为：实验评价装置 1.0 kg 相当于现场钻压 89.5 kN，实验评价装置转速 60 r/min 相当于现场转速 23.1 r/min。

### 3. 推靠式自动垂钻系统轨迹控制能力实验评价装置功能设计及实现

#### 1) 不同工况、不同井眼状态下钻柱静态屈曲实验

通过调节平衡支座与空间姿态调节面板相对位置、模拟井筒在空间姿态调节面板上的相对位置，确定出需要的井眼状态；改变工况参数，如钻压、钻具组合参数等，可演示出模拟钻柱与模拟井筒的相对

位置状态, 测试出钻头的受力状态及钻头面改变情况, 验证以往理论研究的正确性、为定向井控制方案制定提供理论依据。

#### 2) 不同工况、不同井眼状态下钻柱运动行为实验

在确定的井眼状态前提下, 通过调节钻进工作状态控制系统改变工况参数 - 钻压、转速, 可以演示钻头破岩钻进情况及井眼钻进趋势改变情况, 测试出钻头的受力状态及钻头面改变情况, 完成井眼轨迹趋势变化规律演示及测试。改变井眼状态, 可以研究井眼状态对井眼轨迹趋势影响规律。

#### 3) 钻进参数及井眼形态对钻进趋势影响实验

在钻具组合及模拟地层确定的前提下, 可以通过调节平衡支座与空间姿态调节面板相对位置、模拟井筒在空间姿态调节面板上的相对位置, 及改变不同的钻压及转速, 测试出同一钻具组合在不同钻进参数、不同井眼形态下的造斜性能, 从而演示及评价钻具组合的井眼趋势控制情况, 为钻具组合的评价及优化提供参考。

#### 4) 地层及钻头特性对钻进趋势影响实验

钻具组合、井眼形态、钻进参数固定前提下, 改变模拟地层特性, 可以演示出地层特性对钻进趋势影响的规律, 并测试出受力情况; 改变钻头布齿情况, 模拟钻进, 可以演示出钻头特性对钻进趋势影响的规律。改变钻具组合、井眼形态、钻进参数, 可以演示及测试出不同工况下地层及钻头特性对钻进趋势影响。

#### 5) 推靠式自动垂钻系统轨迹控制能力实验评价装置导向机理演示实验

模拟钻柱近钻头部分安装磁性短接, 通过近钻头施力体产生的磁力与磁性短接的相互作用为模拟钻柱施加侧向推靠力来推靠式自动垂钻系统改变钻进趋势的行为, 通过施力控制仪器控制侧向推靠力大小、方向及作用形式。推靠力方向恒定、改变推靠力大小, 可以演示及测试推靠式自动垂钻系统的机理及钻进趋势控制规律; 推靠力方向恒定、力作用形式改变为脉冲施力时, 可以演示及测试动态推靠式自动垂钻系统的机理及钻进趋势控制规律。模拟钻柱近钻头部分安装柔性磁性短接, 通过近钻头施力体产生的磁力与柔性磁性短接的相互作用可以使得柔性磁性短接产生形变, 从而演示及测试指向式自动垂钻系统的机理及钻进趋势控制规律。

上述 5 个实验设计可以完成推靠式自动垂钻系统直井钻进过程所有工况的模拟及研究。

## 4. 结束语

推靠式自动垂钻系统轨迹控制能力实验评价装置的研制, 为钻井科学研究过程中, 不同钻具组合改变井眼趋势的机理研究, 地质因素及钻进参数对轨迹控制效果影响研究, 及综合考虑各因素情况下, 井眼趋势的变化规律研究等提供了实验设备支撑。还为新型自动垂钻系统工具原理的验证及结构的优化提供了设备保证。

## 基金项目

中国石油大学(华东)本科教学改革项目重点项目(能源行业加速转型升级背景下的石油工程专业实践教学体系创新与实践 CZ2022003), 中国石油大学(华东)研究生教育教学改革研究项目(面向新工科的石油与天然气工程专业研究生创造力激励方法探索 YJG2021003), 教育部供需对接就业育人项目(20230103270、20230100515)。

## 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: 166-211.
- [2] 章扬烈. 钻柱运动学与动力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.

- 
- [3] 梁奇敏, 刘新云, 石李保, 等. 导眼与扩眼组合钻进模式在定向井轨迹控制中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(4): 9-11.
- [4] 赵新瑞, 姜敬华, 奚艳红. 井斜控制理论及防斜钻井技术综述[J]. 钻采工艺, 2000, 23(1): 4-9.
- [5] Warren, T. (1998) Rotary Steerable Technology—Part 1: Technology Gains Momentum. *Oil & Gas Journal*, **96**, 101-105.
- [6] 谢占魁, 谢锐. 动态应力测试实验装置的研制和实验项目的开发[J]. 实验技术与管理, 2009, 26(10): 29-31.
- [7] 宋象军. 虚拟实验室在高校实验教学中的应用前景[J]. 实验技术与管理, 2009, 22(1): 35-37.
- [8] 翟国栋, 董志峰, 林南英. 钻井动力学实验台试件车的研制[J]. 实验室研究与探索, 1998, 26(6): 84-85.
- [9] 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(5): 102-106.
- [10] 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.
- [11] 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): 159-162.
- [12] 闻邦椿, 顾家柳, 夏松波, 等. 高等转子动力学——理论、技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 202-211.
- [13] 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): 2-6.