



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊  
全国中文核心期刊  
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊  
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊  
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)  
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)  
中国科技论文统计源期刊  
RCCSE中国核心学术期刊

## 数字钻头技术现状与发展建议

黄哲 张伟强 吴仲华

### Status and Development Trend of Digital Bit Technologies

HUANG Zhe, ZHANG Weiqiang, WU Zhonghua

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024086>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 数字孪生技术在钻井领域的应用探索

Exploration for the Application of Digital Twin Technology in Drilling Engineering

石油钻探技术. 2022, 50(3): 10–16 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022068>

#### 智能钻井技术研究现状及发展趋势

Intelligent Drilling Technology Research Status and Development Trends

石油钻探技术. 2020, 48(1): 1–8 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020001>

#### 废弃井地热能开发技术现状与发展建议

Technical Status and Development Suggestions in Exploiting Geothermal Energy from Abandoned Wells

石油钻探技术. 2020, 48(6): 1–7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020120>

#### 大数据技术在石油工程中的应用现状与发展建议

Application Status and Development Suggestions of Big Data Technology in Petroleum Engineering

石油钻探技术. 2021, 49(2): 72–78 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020134>

#### 国内钻井液技术现状与发展建议

Current Situation and Development Suggestions for Drilling Fluid Technologies in China

石油钻探技术. 2023, 51(4): 114–123 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023028>

#### 随钻测控技术现状及发展趋势

Current Status and Development Trend of Measurement & Control while Drilling Technology

石油钻探技术. 2024, 52(1): 122–129 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024017>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2024086

引用格式: 黄哲, 张伟强, 吴仲华. 数字钻头技术现状与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(5): 124–129.

HUANG Zhe, ZHANG Weiqiang, WU Zhonghua. Status and development trend of digital bit technologies [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(5): 124–129.

## 数字钻头技术现状与发展建议

黄 哲<sup>1,2</sup>, 张伟强<sup>1,2</sup>, 吴仲华<sup>1,2</sup>

(1. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257000; 2. 中国石化超深井钻井工程技术重点实验室, 山东东营 257000)

**摘要:** 传统钻具组合力学结构和动力钻具工作特性的限制, 测量装置无法获取钻头位置处的真实数据, 导致智能钻井在决策与控制层面存在风险。国内外油服公司开发了多种数字钻头测量系统, 在不改变钻头结构的前提下能够安装在钻头内部进行数据采集, 为理论研究、钻井设计和钻井决策控制等提供了数据支持。为推动我国数字钻头的发展, 调研了现有各类数字钻头发展现状, 讨论了数字钻头技术的应用场景和发展趋势, 并提出了技术发展建议。

**关键词:** 数字钻头; 技术现状; 发展建议; 工况诊断; 优化钻井

中图分类号: TE921<sup>+</sup>.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2024)05-0124-06

### Status and Development Trend of Digital Bit Technologies

HUANG Zhe<sup>1,2</sup>, ZHANG Weiqiang<sup>1,2</sup>, WU Zhonghua<sup>1,2</sup>

(1. Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257000, China;  
2. Sinopec Key Laboratory of Drilling Engineering Technology for Ultra-Deep Wells, Dongying, Shandong, 257000, China)

**Abstract:** Due to the limitation of the operating characteristics of the conventional bottom hole assembly (BHA) and the power drilling tool, the measuring device fails to obtain the real data at the bit position, which leads to the risk of intelligent drilling at the decision-making and control levels. Chinese and foreign oilfield service companies have developed a variety of digital bit measurement systems. These digital bit measurement systems can be installed inside the bit for data acquisition without changing the structure of the bit, providing data support for theoretical research, drilling design, and drilling decision control. In order to promote the development of digital bits in China, various kinds of digital bits were investigated. The status, application scenarios, and development trend of digital bits were discussed, and development suggestions were put forward.

**Key words:** digital bit; technical status; development suggestions; condition diagnosis; optimized drilling

受国家能源局势与人口老龄化综合影响, 少人、无人、智能的新型工业模式成为了钻井行业变革的迫切需求。以信息化分析为基础、智能化决策为手段、自动化控制为目标, 开展智能钻井技术体系建设与规模应用, 是解决前述需求的重要方法。但是, 可靠数据的采集是一切分析与决策的前提。钻头作为破岩钻进的直接执行机构, 其动力学响应是钻进参数、地质特性、钻具组合等数据关系的直

接体现<sup>[1]</sup>, 对其工作数据进行采集挖掘是进行提速分析与优化决策的必然要求。受钻具组合力学结构与动力钻具工作特性的影响, 钻具的动力学响应在不同位置处表现出明显的特征差异, 安装于螺杆上方的传统工程参数测量装置难以获得钻头位置处的真实数据<sup>[2]</sup>, 以此为基础开展的理论研究与模型训练存在严重的数据偏见, 智能钻井在决策与控制层面存在不可预料的实施风险。为此, 国内外油服公

收稿日期: 2024-07-18; 改回日期: 2024-09-05。

作者简介: 黄哲 (1990—), 男, 山东东营人, 2013 年毕业于中国石油大学 (北京) 石油工程专业, 2016 年获中国石油大学 (北京) 石油与天然气工程专业工程硕士学位, 2020 年获中国石油大学 (北京) 油气井工程专业工学博士学位, 高级工程师, 主要从事微小井眼轨迹测控、井下装备研制、优化参数钻井、智能钻井和软件开发等方面的研究工作。E-mail: bob202303@163.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“智能钻头参数感知与优化控制技术”(编号: P23219)、山东省中央引导地方科技发展专项资金项目“海洋油气钻井数字化技术创新平台建设”(编号: YDZX2022015) 和中石化石油工程有限公司课题“PDC 钻头四参数采集系统研制与应用”(编号: AMBG220089) 联合资助。

司相继研制了数字钻头参数测量系统，并在井下工具设计改进、钻井参数优化决策等领域开展了应用探索。为推动我国数字钻头的发展，笔者对数字钻头的技术现状与典型应用场景进行了梳理、归纳，探讨了目前数字钻头技术的不足和发展趋势，并提出了发展建议。

## 1 数字钻头技术现状

根据 SPE 自动化钻井技术路线图 (DSA-R) 的构思<sup>[3]</sup>，数字钻头是一种小型化、嵌入式的工程参数测量系统。近年来随着技术的发展与场景的扩充，数字钻头已不再局限于钻头内参数的测量，而是围绕钻头参数的采集与分析以及工艺、工具的优化与控制等方面开展了探索与应用尝试，为智能钻井优化决策与自动控制提供了数据与决策支持。

### 1.1 数字钻头工程参数测量系统

#### 1.1.1 探管式数字钻头参数测量系统

基于 MEMS 惯性传感器的小型化探管是早期数字钻头参数测量系统最常见的实现方式。以哈里伯顿公司 Cerebro、中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院探管式数字钻头为例，钻头参数测量系统通过简易支撑结构安装于钻头接箍的中心位置（见图 1），对钻头改动较小，具有结构简单、可靠性高、续航能力强、易于实现的特点<sup>[4-5]</sup>。由于测量探管与钻头坐标系重合，传感器数据能够直接反映钻头的三轴振动与转动情况，因此可以直接采用信号时频方法分析钻头的动力学响应特征，为井下工况识别、提速工具设计、钻井参数优化等提供数据支撑<sup>[1,6]</sup>。此外，也可以根据惯性导航原理，开展钻头姿态识别与井眼轨迹参数的动态推演<sup>[7-9]</sup>。

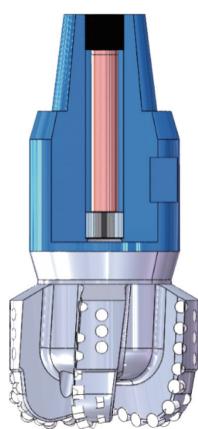


图 1 探管式数字钻头

Fig.1 Probe type digital drill bit

然而，受安装方式的限制，探管式数字钻头参数测量系统的支撑结构极易在连接处出现应力集中（见图 2），导致钻头在复杂环境下的应力应变无法有效传递至探管本体，不具备测量钻头位置处钻压、扭矩的硬件基础。此外，由于探管与钻头的中心轴线重合，加速度不含离心加速度分量，钻头转速只能通过 MEMS 陀螺测得，其量程相对较小。

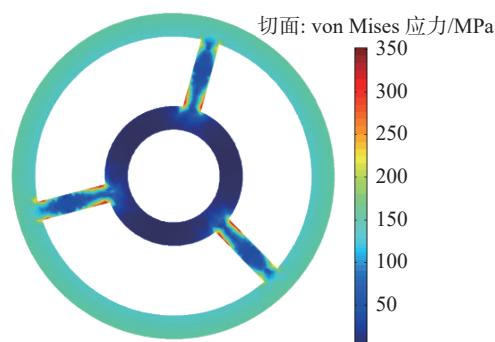


图 2 探管在钻压、扭矩作用下的应力分布

Fig.2 Stress distribution of probe under weight on bit and torque

#### 1.1.2 偏置式数字钻头参数测量系统

不同于探管式数字钻头参数测量系统，偏置式数字钻头参数测量系统以刚性嵌入的方式安装于钻头侧壁（见图 3），在一定程度上规避了适配钻头尺寸的限制，并使之具备了测量钻头位置处应力的结构基础，具有更好的钻头适配性与拓展能力，是目前主流的系统设计方案。该类数字钻头以国民油井华高的 BlackBox Eclipse II、贝克休斯公司的 MultiSense2.0、哈里伯顿公司的 Cerebro Force™ 为代表<sup>[10-12]</sup>，已在全球应用 100 余井次。

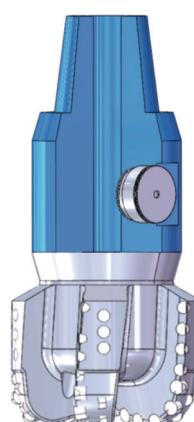


图 3 偏置式数字钻头

Fig.3 Offset type drill bit

但是，由于此类系统需要在钻头侧壁上开槽，

对钻头本体结构强度具有一定影响,在恶劣工况下使用时存在一定的作业风险。同时,由于采用偏置式的安装方式,测量系统坐标系与钻头本体坐标系不重合,求解钻头运动参数时,需要进行复杂运算或对模型进行简化<sup>[13]</sup>,难以表征钻头真实的振动与转动情况。此外,同样由于其偏置式非对称的安装方式,钻压、扭矩、弯矩、热应力等在复杂应力环境下的解耦上也存在一定的困难。

### 1.1.3 阵列式数字钻头参数测量系统

阵列式数字钻头参数测量系统是笔者以贝克休斯公司 MultiSense 1.0 为原型提出的一种改进方案(见图 4)。与探管式数字钻头参数测量系统类似,阵列式数字钻头参数测量系统也安装于钻头接箍位置,通过错位花键与紧固端盖实现系统硬件骨架与钻头本体之间的刚性连接。一方面,得益于其工字形的轴对称结构设计,可以使用惠斯通电桥实现钻头钻压、扭矩、弯矩等在复杂应力下的解耦;另一方面,通过采用棱柱式的传感器空间阵列设计,使测量系统等效坐标系与钻头坐标系重合,解决了偏置式数字钻头参数测量系统参数反演和探管式数字钻头参数测量系统转速量程有限的问题。相比于传统数字钻头参数测量系统,阵列式数字钻头参数测量系统融合了探管式数字钻头参数测量系统中心安装与偏置式数字钻头参数测量系统刚性连接的优势,

同时具备了钻头运动与应力参数的解耦能力,具有数据可靠性高、结构安全性强、应用场景多和拓展潜力大的特点<sup>[1,14]</sup>。

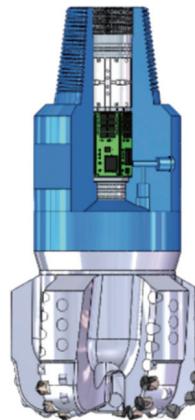


图 4 阵列式数字钻头

Fig.4 Array type drill bit

阵列式数字钻头参数测量系统安装在钻头接箍内部,受空间尺寸的限制,阵列式数字钻头参数测量系统目前仅能适配  $\phi 215.9\text{ mm}$  及以上钻头,且安装较为复杂,续航时间相对较短。需要注意的是,探管式、偏置式和阵列式等 3 种数字钻头参数测量系统各有优劣,适配不同的应用需求,其性能参数由 MEMS 元件选型决定,并没有明显的先进性与技术代差之分(见表 1)。

表 1 典型数字钻头参数测量系统的对比

Table 1 Comparison of typical digital drill bit parameter measurement systems

系统类型	工作方式	运动测量	应力测量	续航能力	数据可靠性	可拓展性	结构复杂程度	适配钻头尺寸/mm
探管式		直接测量	不能测量	高	高	无	简单	$\geq 142.9$
偏置式	锂电池供电,离线采集、事后分析	简化模型	简化模型	中	中	高	简单	$\geq 120.7$
阵列式		阵列解耦	电桥解耦	低	高	高	复杂	$\geq 215.9$

## 1.2 基于数字钻头的分析优化与决策

### 1.2.1 钻头工况诊断分析

基于实测数据的工况诊断分析,是数字钻头最为直接的应用场景。贝克休斯、艾克森美孚、阿帕奇、斯伦贝谢等油服公司曾合作进行了井下钻具动力响应测量机制、分析策略、数据与钻具行为特征、评价标准与量化指标的梳理与讨论<sup>[15]</sup>。国内外油服公司以此为基础,开发了分析数字钻头测量数据的相关软件:一方面,通过阈值分析法对整趟钻的轴向振动、侧向振动、转动粘滑的严重程度进行定量分析与定性评价;另一方面,通过频谱分析与模态分解等手段识别异常工况数据的主频,结合功率谱

密度计算与知识库查询,锁定异常工况诱因,为后续破岩提速、风险控制、优化设计、分析决策等提供技术与数据支撑。此外,随数字钻头应用数据的积累与挖掘,相关企业、学者已开展了利用皮尔逊相关性系数进行智能化工况模式识别的研究工作。

### 1.2.2 破岩钻进提速提效

从机理角度讲,破岩钻进实质上是钻头在外部能量作用下“吃入地层—形成密实核—密实核破碎—岩屑剥离”的从能量积蓄到能量释放的往复循环过程。因此,破岩钻进提速提效有增大外部能量输入与提高能量利用率 2 种方法。然而,传统测量装置位于螺杆上方,无法获得钻头位置处的真实数

据, 难以进行提速工具与地质特性、钻进参数间的适配性优化, 提速方案相对盲目, 提速效果并不稳定。

对此, 国际石油公司通过分析部分重点区块数字钻头采集的数据, 对钻头齿形结构进行优化设计、控制钻头自适应吃入深度(DOC)、优化底部钻具组合等, 提高钻头破岩能量利用效率、维持钻头平稳工作<sup>[2,16–18]</sup>。与之类似的, 阿特拉公司采用与数字钻头近似的思路, 在其 Mitigator 减振器两侧植入振动传感器, 通过对比分析两侧的振动数据, 为钻头和减振器优化设计提供支持。

此外, 随着油气行业自动化、智能化变革的深入, 基于数据驱动的智能化钻井参数路线决策成为了近些年研究热点。现场数据表明, 钻头总是在

一定的钻井参数区间范围内表现出相似的作业工况与数据特征(见图 5)。当采集的数据足够多时, 即可基于低钻速、高粘滑、振动、涡动等将其更新为钻井参数优化图版, 从而实现对自动化钻机钻进参数路线的优化控制。其中, 国民油井华高公司基于其 IntelliServ 信息钻杆实现了井下数据实时采集传输, 通过地面分析锁定优化空间, 通过机械比能、钻速双目标的优化, 实现了钻进参数的优化。黄哲等人<sup>[1,5]</sup>通过挖掘数字钻头的实测数据, 建立了振动、钻速、进尺成本等多个指标的超前预测模型, 通过时效、风险、经济等多目标的博弈竞争, 利用邻井与目标井的前序历史数据, 实现了钻进参数路线的博弈优化。

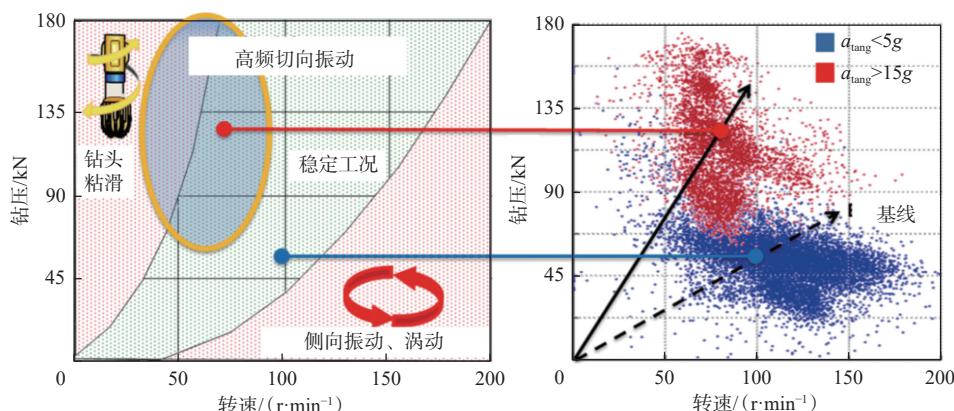


图 5 钻头工况稳定性图版  
Fig.5 Stability chart of drill bit working condition

### 1.2.3 井下工具行为控制

目前, 仅有国民油井华高公司基于信息钻杆高速通讯技术解决了数据通讯的实时性问题, 实现了钻井参数的实时优化控制。黄哲等人<sup>[1]</sup>通过挖掘钻头的实测数据, 建立了井底-地面数据的映射关系, 利用时间窗口滑动的形式开展了模型更新与钻井参数的优化。这些做法, 在一定程度上仍然属于被动优化的范畴。

钻头数据的深入挖掘、研究表明<sup>[19–21]</sup>, 钻进中钻头在千赫兹以上的主频信号与地质特性、钻具组合直接相关, 可以作为随钻地质资料反演与地质卡层的有效补充。虽然在现有技术条件下, 千赫兹级以上采样频率的数据难以长时间存储或实时上传至地面, 但仍存在以数字钻头为井下数据处理中枢或决策中枢的技术路线, 如 Huang Zhe 等人<sup>[22]</sup>提出的井下主动调振和斯伦贝谢公司的 NeoSteer 钻头旋转导向等。

## 2 技术趋势

数字钻头可以在不改变现有钻具组合的前提下直接获取钻头位置处的真实数据, 为探究钻探功能障碍、预估作业风险、改进提速工具和优化钻井参数等提供可靠的数据, 是决定智能钻井技术走向的关键。随着井下数据总量和地面分析样本需求量的增加, 现有钻井液脉冲等已不能满足井下-地面实时数据通讯的要求, 必然会挤占磁耦合信息钻杆、光纤传输等新一代通讯链路的带宽资源, 对井下-地面数据通讯与指令传输的实时性、稳定性和可靠性产生巨大压力。而且由于钻头在破岩提速与导向钻进中的特殊地位, 以数字钻头为锥形的近钻头或钻头内数据汇聚分析与决策控制中枢(井下智脑)将成为该技术发展的最终趋势。

依托井下测-传-控工具环网, 以数字钻头为井

下数据汇聚分析与决策控制中枢, 基于实时数据分析开展钻头工况诊断与关键参数预测评价, 为井下电控提速工具参数适配、导向轨迹规划控制等提供数据支撑与控制指令, 实现井下闭环控制; 利用信息钻杆等井下-地面双向通讯技术, 以工况识别码或信号统计特征的形式向地面汇报决策依据与决策

指令, 实现地面/云端监督与控制介入; 融合地面综合录井与装备运行数据, 通过实时数据沿时间窗口滑动开展科学钻井优化决策与智能模型的自学习校正; 配套自动化钻井系统, 实现井下工具与地面系统闭环协同的智能化科学钻井, 其架构如图 6 所示。

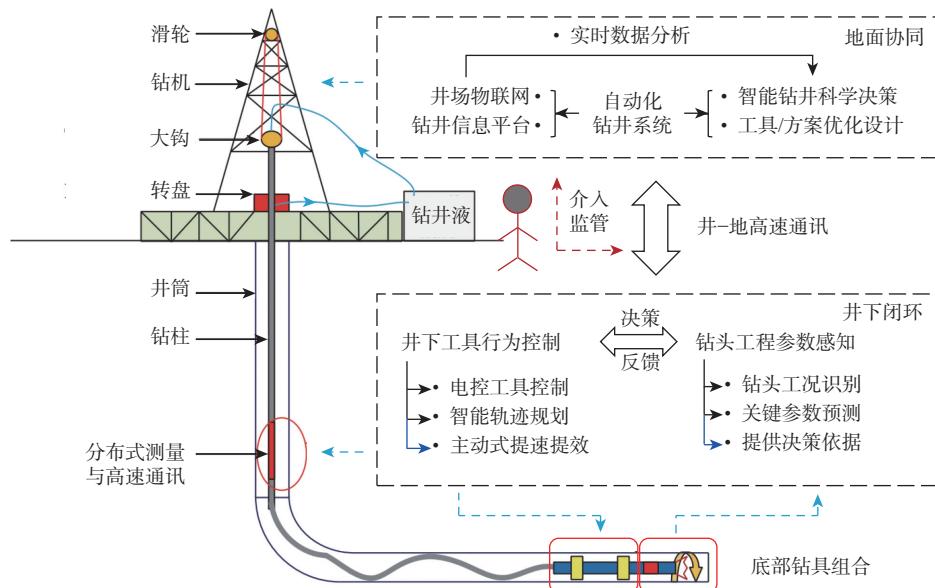


图 6 以数字钻头为核心的智能化科学钻井技术架构

Fig.6 Technical framework of intelligent and scientific drilling based on digital drill bit

### 3 发展建议

#### 3.1 硬件升级完善与分布式测量探索

目前, 现有各类数字钻头参数测量系统在应力测量、参数解耦和适配尺寸等方面存在不足, 未能形成较为完善的钻头运动与应力测量方案; 深层、非常规资源钻探开发也对现有数字钻头测量系统的耐温性与钻头尺寸适配性提出了更高的要求。另外, 随着钻头数据挖掘技术的发展, 钻头高频响应信号用于辅助地质资料反演、导向钻进与地质卡层正逐渐成为新的研究热点。此外, 数字钻头参数测量系统可以嵌入式安装在任意钻具内, 具有分布式的应用潜力, 能够为沿井筒分布式测量与数字孪生提供硬件条件。因此, 数字钻头参数测量硬件应持续在多参数(地质-工程一体化)、高频率、小型化、嵌入式、耐高温和长续航等方向进行优化完善。

#### 3.2 跨螺杆通讯技术配套

实时数据分析优化始终是钻井工程的根本需求, 无论数字钻头最终是以井下智脑的形式实现井

下闭环控制, 还是以数据采集工具的形式辅助地面决策, 都需要解决数字钻头与其他井下工具的数据通讯问题。因此, 需要探索数字钻头配套数电螺杆或数字钻头集成涡轮发电+微波短传等多种技术方案, 并评估其可行性, 其技术关键包括但不限于小型化涡轮发电、振动能量捕集发电、复杂环境微波通讯、无源通讯、螺杆电力载波或非接触式供电通讯、多设备灵活组网等。

#### 3.3 多源数据挖掘与理论、模型研究

通过新技术研究与应用, 挖掘曾经被忽视的隐藏信息, 推动基础理论的发展, 在根本上实现产业的升级, 是行业智能化变革的本质需求。研究表明, 数字钻头实测信号特征与破岩工况、钻具组合、钻进参数、地质特性等因素存在映射关系, 其高频数据的分析挖掘为管柱力学、钻进破岩等基础理论研究提供了新的视角与验证证据。因此, 应持续推进数字钻头的应用与数据积累, 基于多源数据融合挖掘, 在深层钻井管柱力学等传统理论与井下-地面数据映射、振动模式识别、关键指标预测等智能钻井模型领域进行深入探索, 促进工况诊断、钻具

优化、风险评价和参数决策等方法的改进。

## 4 结束语

传统的工程参数测量装置无法获得钻头位置处的真实数据,以此为基础开展分析与决策时存在严重的数据偏见与实施风险。因此,国内外相继研制出小型化、嵌入式的钻头内工程参数采集系统,形成了以钻头参数采集-分析-优化-控制为特征的数字钻头技术。目前,虽然已有探管式、偏置式和阵列式等3类数字钻头参数测量系统,并开展了商业化应用,但在应力测量、参数解耦、适配尺寸等方面仍存在不足,需在多参数、耐高温、长续航、分布式等方面进行硬件升级。同时,应大量开展数字钻头现场应用与数据积累挖掘,持续提高基础理论与优化决策模型的研究深度。此外,实时数据分析优化始终是钻井工程的根本需求,将来数字钻头技术无论是以井下智脑的形式实现控制闭环,还是以数据采集工具的形式辅助地面决策,都要解决数字钻头的长时间高功率供电以及与其他井下测-控工具间的数据通讯问题,需配套开展小型化井下发电、跨螺杆短传、井下工具环网等技术攻关。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 黄哲,吴仲华,李成,等.智能钻头技术研究与应用探索[J].石油机械,2023,51(10):67–76.  
HUANG Zhe, WU Zhonghua, LI Cheng, et al. Research and application of intelligent bit technology[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(10): 67–76.
- [2] DONG Guangjian, CHEN Ping. A review of the evaluation, control, and application technologies for drill string vibrations and shocks in oil and gas well[J]. Shock and Vibration, 2016, 2016: 7418635.
- [3] de WARDT J P. Current state 2019 & future state 2025[EB/OL]. [2024-07-15]. <https://dsaroadmap.org/wp-content/uploads/2019/06/4-of-14-Current-State-Future-State-190531.pdf>
- [4] Halliburton. Cerebro® in-bit sensing[EB/OL]. [2024-07-15]. <https://www.halliburton.com/en/products/cerebro-bit-sensor-package>.
- [5] CHEN Xiwu, HUANG Zhe. Novel tool of in-bit measurement for new clean geo-energy exploitation[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Green Energy, Environment and Sustainable Development (GEESD2022). Amsterdam: IOS Press, 2022: 1223–1232.
- [6] 黄哲.探管式智能钻头参数测量装置研制与现场试验[J].石油钻探技术,2024,52(4):34–43.  
HUANG Zhe. Development and field test of probe-type intelligent bit parameter measurement device[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(4): 34–43.
- [7] HUANG Zhe, HUANG Zhongwei, SU Yinao, et al. A feasible method for the trajectory measurement of radial jet drilling laterals[J]. SPE Drilling & Completion, 2020, 35(1): 125–135.
- [8] HUANG Zhe, HUANG Zhongwei, SU Yinao, et al. Where the laterals go? A feasible way for the trajectory measurement of radial jet drilling wells[R]. SPE 192140, 2018.
- [9] HUANG Zhe, HUANG Zhongwei, WU Long, et al. Trajectory measurement of radial jet drilling wells: Improved tool and data processing[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2020, 142(3): 032902.
- [10] NOV. BlackBox eclipse II tool[EB/OL]. [2024-07-15]. <https://www.nov.com/products/blackbox-eclipse-ii-tool>.
- [11] Baker Hughes. MultiSense dynamics mapping system[EB/OL]. [2024-07-15]. <https://www.bakerhughes.com/drilling/drilling-optimization-services/multisense-dynamics-mapping-system>.
- [12] Halliburton. Cerebro Force™ in-bit sensing[EB/OL]. [2024-07-15]. <https://www.halliburton.com/en/products/cerebro-force-bit-sensing>.
- [13] 刘伟,周英操,王瑛,等.井下振动测量、分析原理研究[J].石油钻采工艺,2012,34(1):14–18.  
LIU Wei, ZHOU Yingcao, WANG Ying, et al. Study on downhole vibration measurement and analysis theory[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(1): 14–18.
- [14] 黄哲.面向油气钻井振动测量的空间三轴加速度传感器阵列研究[J].电子测量技术,2021,44(8):155–160.  
HUANG Zhe. Method of drilling vibration measurement based on spatial array of accelerometers[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(8): 155–160.
- [15] MACPHERSON J D, PAUL P, BEHOUNEK M, et al. A framework for transparency in drilling mechanics and dynamics measurements[R]. SPE 174874, 2015.
- [16] PHILLIPS A, GAVIA D, NOEL A, et al. Adaptive PDC drill bit reduces stick-slip and improves ROP in the midland basin[R]. SPE 189706, 2018.
- [17] WU S X, PAEZ L, PARTIN U, et al. Decoupling stick-slip and whirl to achieve breakthrough in drilling performance[R]. SPE 128767, 2010.
- [18] LEDGERWOOD L W W, JAIN J R, HOFFMANN O J, et al. Downhole measurement and monitoring lead to an enhanced understanding of drilling vibrations and polycrystalline diamond compact bit damage[J]. SPE Drilling & Completion, 2013, 28(3): 254–262.
- [19] SUGIURA J, JONES S. A drill bit and a drilling motor with embedded high-frequency (1600 Hz) drilling dynamics sensors provide new insights into challenging downhole drilling conditions[J]. SPE Drilling & Completion, 2019, 34(3): 223–247.
- [20] BAUMGARTNER T, VAN OORT E. Pure and coupled drill string vibration pattern recognition in high frequency downhole data[R]. SPE 170955, 2014.
- [21] CHEN Gang, CHEN Mian, HONG Guobin, et al. A new method of lithology classification based on convolutional neural network algorithm by utilizing drilling string vibration data[J]. Energies, 2020, 13(4): 888.
- [22] HUANG Zhe, YAN Xiuliang, DAI Yanan. Vibration control in optimized drilling and key issues to be applied in new clean geo-energy exploitation[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Green Energy, Environment and Sustainable Development (GEESD2022). Amsterdam: IOS Press, 2022: 38–48.