◀钻井技术与装备▶

# 钻头内置工程参数测量系统研制及实钻模拟试验*

索忠伟 朱祖扬 宗艳波 刘 洋
（中石化石油工程技术研究院有限公司）

索忠伟，朱祖扬，宗艳波，等. 钻头内置工程参数测量系统研制及实钻模拟试验［J］. 石油机械，2026，54（9）：47-53.

Suo Zhongwei，Zhu Zuyang，Zong Yanbo，et al. Development and simulation test of an engineering parameter measurement system built into drill bit［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：47-53.

**摘要：**针对传统测量系统安装位置远离钻头、测量数据滞后失真问题，开展钻头内置工程参数测量系统关键技术研究。构建钻头内置工程参数测量系统总体设计方案，针对钻头内部空间狭小、环境恶劣的特点，开展小型化低功耗电路模块设计。搭建模拟井下环境测试平台，在高温、强振动、高冲击等极端工况下对电路模块进行功能性与可靠性验证，迭代优化电路设计与固件程序，将测量模块集成至钻头内部，实现井下钻头处工程参数测量。通过实钻模拟试验验证系统性能。研究结果表明，采集模块成功记录到钻头处 $x$、$y$、$z$ 三轴振动加速度数据，测量范围覆盖 $-160g\sim200g$，有效捕捉到钻头破岩过程的冲击振动特征；同时准确测得钻头转速在 20～70 r/min 范围内的动态变化，数据采样率与精度均满足设计要求，验证了系统设计方案的可行性与可靠性。实现了钻头位置处井下工程参数的直接、真实测量，突破了传统测量的数据滞后与失真难题。研究成果可为钻井参数优化、井下工况识别、安全与优质钻井提供可靠的井下实测数据支撑，对推动智能钻井技术发展具有重要的工程应用价值。

**关键词：**钻头；工程参数；振动；转速；测量系统；数据采集

**中图分类号：**TE921 **文献标识码：**A DOI：10. 12473/CPM. 202505065

# Development and Simulation Test of an Engineering Parameter Measurement System Built into Drill Bit

Suo Zhongwei Zhu Zuyang Zong Yanbo Liu Yang
（*Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co. , Ltd.*）

**Abstract**: To address lagged and distorted measurements of traditional systems installed far from drill bits, an engineering parameter measurement system built into drill bit was studied in respect of key technologies. For such system, an overall design scheme was developed, and a miniaturized low-power consumption circuit module was designed in view of the narrow internal space and harsh working environment of the drill bit. A test platform simulating the downhole environment was built to verify the functionality and reliability of the circuit module under extreme working conditions, such as high temperature, strong vibration, and high impact. The circuit design and firmware program were iteratively optimized, and the measurement module was finally integrated into the drill bit to realize the measurement of engineering parameters downhole at the drill bit. The system performance was validated through drilling simulation test. The results show that the acquisition module successfully records the $x$-, $y$- and $z$-axis vibration acceleration data at the drill bit, with a measurement range from $-160g$ to $200g$, and effectively cap-

* 基金项目：中国石油化工股份有限公司科技部前瞻项目“钻头内置工程参数测量技术研究”（P24217）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

tures the impact vibration behaviors during rock breaking of the drill bit. Meanwhile, the dynamic variation of the drill bit rotational speed in the range of 20 ~ 70 r/min was accurately measured. The data sampling rate and accuracy meet the design requirements, verifying the feasibility and reliability of the system design scheme. The system delivers direct and true measurement of downhole engineering parameters at the drill bit, getting rid of the data lagging and distortion problems in traditional measurements. The research findings provide reliable downhole measurements for drilling parameter optimization, downhole condition identification, and safe and high-quality drilling operations, and are valuable for driving the development and application of intelligent drilling technology.

**Keywords**: drill bit; engineering parameter; vibration; rotational speed; measurement system; data acquisition

## 0　引　言

随着石油和天然气勘探开发的不断深入，钻井工程面临着越来越复杂的地质条件和更高的技术要求。传统的钻井工程参数测量方法存在数据滞后和失真等问题，难以满足现代钻井工程的需求[1-2]。钻头内置工程参数测量系统的开发，旨在解决这些问题，为钻井工程提供实时、准确的井下测量数据。

相比地面测量，井下测量极大减小了数据滞后性和偏差性[3-5]。国内井下工程参数测量仪主要以短节形式存在，未能集成在钻头上。随着钻井智能化的不断深入，需要更精确的井下数据引导。特别是近年来，井下工程参数测量在精细化钻井、无风险钻井和钻井优化方面重新受到重视。旋转导向技术、钻井远程专家系统、智能钻井都迫切需要准确和完备的井底工程参数作为支撑[6]。中石油、中石化和石油类高校都对钻井工程参数测量进行了较为深入的研究。近年来，国内陆续推出了多种井下工程参数测量短节，大部分以存储式为主[7-12]。井下工程参数测量技术历经数十年发展，已形成随钻测量成熟技术体系。然而，现有测量系统多安装于钻铤或无磁钻铤位置，距离钻头存在数十米的距离，难以直接捕捉钻头与地层相互作用的动态响应特征。钻头内置式测量方案能够实现工程参数的原位实时采集，更准确地反映井底真实工况。

为此，笔者开发了钻头内置工程参数测量系统。通过构建钻头内置工程参数测量系统设计方案，设计小型化低功耗的钻头内置工程参数电路模块，并进行温度、振动和冲击下的功能性和可靠性测试，最终实现在钻头处测量井下工程参数，为实现安全钻井、优质钻井提供井下测量数据。

## 1　系统设计

钻头内置工程参数测量系统的总体设计思路是将测量模块集成到钻头内部，实现井下工程参数的实时测量和数据传输。系统主要由传感器模块、数据采集模块和电源管理模块组成。传感器模块感知井下振动、加速度和转速等信号；数据采集模块将这些信号数字化，并进行数据处理和实时存储；电源管理模块包括电池和电压转换电路，生成不同芯片级电压和管理电路功耗[13-15]。钻头内置工程参数测量设计如图 1 所示。振动、转速和温度测量模块作为一个单独测量单元，置于钻头上体一侧槽孔内，实现对振动、转速、温度的测量和数据采集；钻压扭矩测量和存储模块置于钻头上体另一侧槽孔内，用于测量和存储钻压扭矩参数。通过机械结构设计实现各模块的封装设计，实现对测量模块密封、防脱。最后对整体结构设计进行了强度校核，安全系数满足实钻要求。

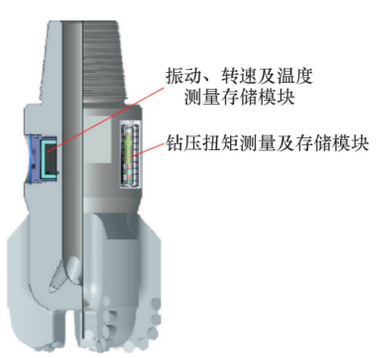



图 1　钻头内置工程参数测量系统设计

Fig. 1　Design of the engineering parameter measurement system built into drill bit

系统硬件设计采用低功耗设计思想，传感器模块和数据采集模块均采用低压供电和微安级工作电流的电性参数。传感器模块选用高精度、高可靠性的加速度传感器和转速传感器；数据采集模块采用低功耗、封装尺寸小的微控制器，微控

制器自带 AD 转换模块，进行模拟信号的高精度采集。

系统软件设计主要包括下传电路模块启动命令、设置电路时钟信息、设置工程参数采集信息和上传采集数据等功能，对采集到的数据进行滤波、校准和存储，实时绘制振动、加速度、转速和温度等曲线。软件设计采用模块化思想，便于系统维护和升级[16-17]。

## 2　电路模块设计

电路模块小型化设计是钻头内置工程参数测量系统的关键技术之一。本研究采用低功耗微控制器 STM32 作为主芯片，读取加速度传感器和角速度传感器的数据，获得钻头处的振动和转速数据。另外采集温度传感器的模拟信号和应变片的模拟信号，获得钻头处的温度和钻压扭矩数据，上述数据均实时存储于大容量存储器。该电路模块使用了 2 路 I2C 通信通道、1 路 SPI 通信通道和 1 路 485 通信通道。485 通道作为调试口与系统软件通信，接收系统软件的对钟指令和发送存储的数据。该电路模块由 3.3 V 电池供电，电路模块尺寸为 ø40 mm×15 mm，即直径 40 mm、厚度 15 mm，能够满足钻头内置的空间要求，如图 2 所示。研究采用低功耗芯片和元器件，优化电路设计，降低电路模块的功耗。同时，采用智能电源管理技术，根据系统工作状态动态调整电路模块的功耗。测试结果表明，电路模块的平均功耗仅为 50 mW，满足 200 h 以上的井下工作要求。

电路模块的可靠性设计包括温度、振动和冲击等方面。在温度设计方面，选用宽温范围的芯片和元器件，并采用散热设计，确保电路模块在 0 ~ 150 ℃正常工作。在振动和冲击设计方面，采用加固设计和减振设计，提高电路模块的抗振动和抗冲击能力。可靠性测试结果表明，电路模块能够在 20$g$（$g$ 为重力加速度）的振动加速度和 200$g$ 的冲击加速度下正常工作。

## 3　系统测试与分析

为验证钻头内置工程参数测量系统的性能，进行了温度、振动和冲击下的功能性和可靠性测试。温度测试在 0 ~ 150 ℃进行。测试结果表明，系统在高温和常温环境下均能正常工作，测量精度满足要求。振动测试在 20$g$ 的振动加速度下进行。测试结果表明，系统在振动环境下能够稳定工作，测量数据无明显波动。冲击测试在 200$g$ 的冲击加速度下进行。测试结果表明，系统在冲击环境下能够正常工作，无元器件损坏。

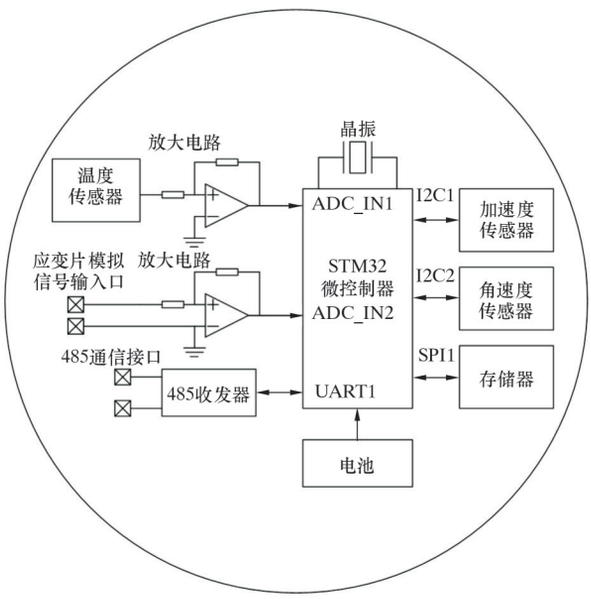



图 2　小型化电路模块框图

Fig. 2　Block diagram of the miniaturized circuit module

数据采集与分析是系统测试的重要环节[18-19]。采用专业的数据采集设备和分析软件，对系统采集到的振动加速度和转速数据进行分析。分析结果表明，系统能够准确记录 $x$、$y$、$z$ 轴振动加速度，并准确记录转速。数据采集频率和精度满足钻井工程参数测量的要求。

系统性能评估包括测量精度、可靠性、功耗等方面。测量精度评估结果表明，振动加速度测量精度达到±1$g$，转速测量精度达到±1 r/min。可靠性评估结果表明，系统在高温、振动和冲击环境下均能正常工作。功耗评估结果表明，系统平均功耗为 50 mW，满足长时间井下工作要求。

### 3.1　钻压、扭矩参数测试

设计了模拟钻头短节，在短节上完成了钻压应变片和扭矩应变片的粘贴。把模拟钻头短节放置在力加载系统上完成了钻压测试，把模拟钻头短节固定在上扣机上完成了扭矩测试。模拟钻头短节通过钻压应变片测量到 0 ~ 313.6 kN 范围的钻压，测量精度为 9.8 kN。钻压测量曲线如图 3 所示。通过扭矩应变片测量到 0 ~ 27 kN·m 范围的扭矩，测量精度为 3 kN·m。扭矩测量曲线如图 4 所示。

### 3.2　振动测量标定试验

微型振动转速模块采集到了 4 个加速度，分别为 5.2$g$、10.6$g$、14.1$g$ 和 19.3$g$，与实际值最大

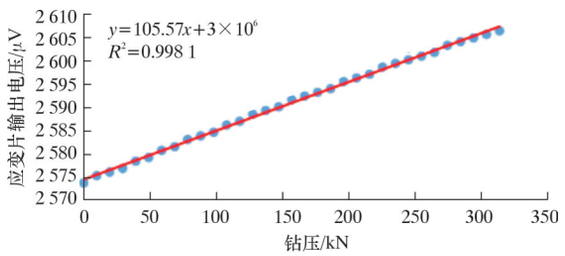



图 3　钻压测量曲线

Fig. 3　Measurement of weight on bit

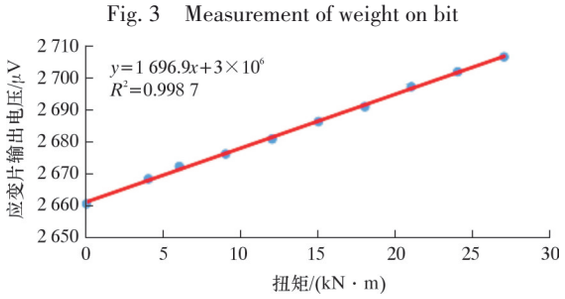



图 4　扭矩测量曲线

Fig. 4　Measurement of torque

偏差为 0.9***g***。微型振动转速模块通过夹具固定在振动台台面上，在振动过程中夹具固定不紧密会导致采集的数据出现偏差。说明微型振动转速模块采集的数据准确可靠，能够用于钻头振动数据的采集。振动加速度曲线如图 5 所示。

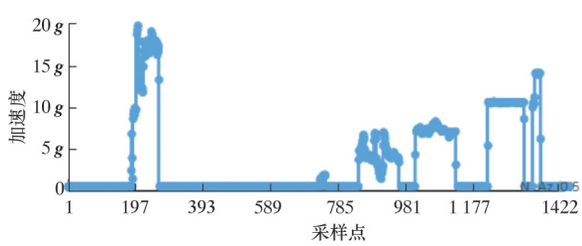



图 5　*z* 轴振动加速度曲线

Fig. 5　Measurement of vibration acceleration

### 3.3　转速测量标定试验

微型振动转速模块采集到了 7 个转速，分别为 21.28、46.43、73.98、97.61、98.56、174.61 和 238.25 r/min，与实际值最大偏差为 1.02 r/min。证明微型振动转速模块采集的数据准确可靠，能够用于钻头转速数据的采集。转速测试曲线如图 6 所示。

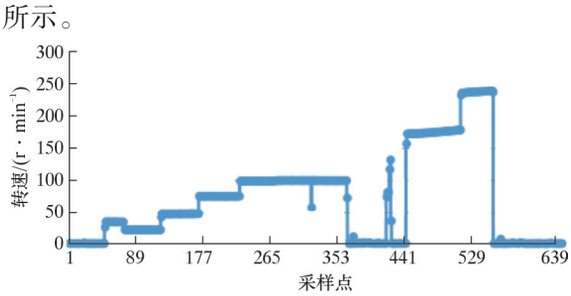



图 6　转速测试曲线

Fig. 6　Measurement of rotational speed

### 3.4　温度参数测试

在标准温度试验箱进行了 30～150 ℃升温测试，然后设备自动降温至 72 ℃。在目标测试温度（30～150 ℃）范围内，微型振动转速模块所测温度与标准仪器检测的温度基本一致，测量温度平均误差为 0.8 ℃。温度测试曲线如图 7 所示。

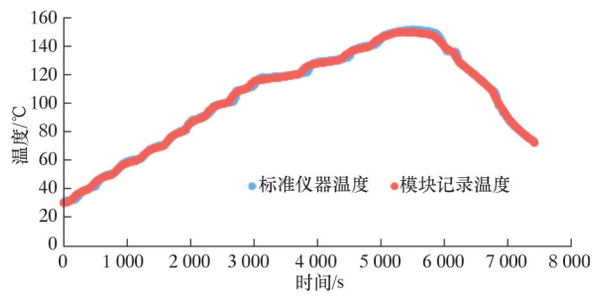



图 7　温度测试曲线

Fig. 7　Measurement of temperature

### 3.5　模块封装加压试验

经过 40、60、80、105 MPa，分别保压 5、5、5、30 min 的阶梯压力测试，在加压过程中模块没有出现掉压现象。从试压井里起出钻头内置工程参数测量系统，经拆卸检验槽孔里的纸巾仍然干燥，系统封装可靠，密封良好，没有泄漏，能够承压 105 MPa，可适用于垂深 5 000 m 以浅，钻井液密度 1.8 g/cm$^3$ 的井下参数测量。压力测试曲线如图 8 所示。

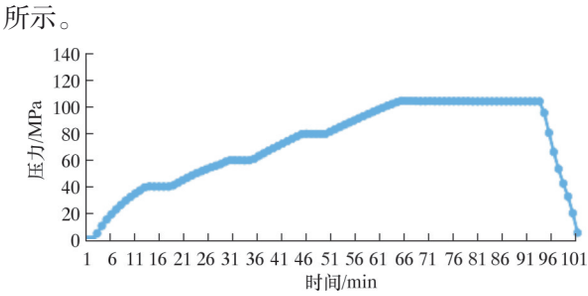



图 8　压力测试曲线

Fig. 8　Measurement of pressure

## 4　实钻模拟试验

为验证钻头内置工程参数测量系统在实际钻井环境中的性能，设计了实钻模拟试验[20-21]。试验装置包括钻井平台、模拟钻头、钻井液循环系统、数据采集系统。钻井平台主要参数如表 1 所示。钻井平台搭建了模拟钻头实际钻进条件，钻井液循环系统提供实际钻井液循环，数据采集系统记录测量数据。试验井段井眼直径为 ø215.9 mm，井深 310 m。在试验井冲击振动环境下，测试钻头内置工程参数采集模块工作的可靠

性，以及较大的冲击载荷对采集模块采集工程参数的影响，验证采集模块工程参数信息采集功能。本轮模拟试验选择振动、转速和温度单元作为模拟试验对象。

表 1　钻井平台主要参数

Table 1　Main parameters of the drilling platform

| 序号 | 设备名称 | 主要参数 |
|---|---|---|
| 1 | F500 钻井泵 | 变频器调速，缸径 165 mm，额定压力 9.98 MPa，最大排量 35.69 L/s，功率 500 hp，电机功率 400 kW |
| 2 | JC-20D 主绞车 | 额定功率 55 kW，钢丝绳 29 mm，液压刹盘 |
| 3 | ZQ203/100 钻杆动力钳 | 最大扭矩 100 kN·m，适用管径 127.0 ~ 203.0 mm |
| 4 | SL-135 水龙头 | 最大静载荷 350 kN，最大工作压力 35 MPa |
| 5 | ø175 mm 转盘 | 输出扭矩 9 kN·m，电机功率 75 kW，输出转速 0 ~ 120 r/min |
| 6 | K25/80 井架 | 净空高度 25 m，钻塔最大承载 800 kN |
| 7 | 井口 | ø339.70 mm 套管，深 28 m |
| 8 | B 型吊钳 | 最大扭矩 160.0 kN·m，适用管径 28.57 ~ 228.60 mm |
| 9 | 卡瓦 | ø127.0 mm、ø177.8 mm |
| 10 | 钻铤 | ø127.0 ~ ø215.9 mm |

### 4.1　试验设备及参数设计

表 2 列举了模拟试验所需主要试验设备及工具。

表 2　主要试验工具

Table 2　Main test tools

| 序号 | 设备名称 | 主要技术参数 | 单位 | 数量 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 采集封装模块 | 加速度 200$g$ | 组 | 1 |
| 2 | 射流冲击器 | 提供振动冲击载荷 | 套 | 1 |
| 3 | 钻具组合 | 方钻杆+钻铤+射流冲击器+实钻模拟钻头（内置工程参数模块） | 串 | 1 |
| 4 | 钻井台架 | 提供试验环境，井下水泥塞长度 10 m | 台 | 1 |
| 5 | 笔记本电脑 | 串口缓存数据，数据提取工具 | 台 | 1 |

### 4.2　实钻模拟试验数据

模拟实钻在上述参数变化时对转速和冲击加速度的采集，同时，验证冲击钻进工艺在不同转速、钻压及排量参数下的钻进效率及设备性能。实钻井实钻参数如表 3 所示。

表 3　试验井实钻参数

Table 3　Real drilling parameters of the testing well

| 序号 | 纯钻时间/min | 进尺/m | 钻压/kN | 转速/（r·min$^{-1}$） | 排量/（L·s$^{-1}$） | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4 | 0.53 | 10 | 35 | 12 | 冲击器启动 |
| 2 | 6 | 4.57 | 10 | 45 | 20 | 调参数 |
| 3 | 3 | 1.32 | 15 | 55 | 25 | 调参数 |
| 4 | 2 | 1.20 | 15 | 60 | 29 | 调参数，试验结束 |

钻进井段 310.00 ~ 317.62 m，总进尺 7.62 m，纯钻时间 0.25 h，平均机械钻速 30.48 m/h。因上部模块重新设置时间，2 个模块时间相差 21 min 左右，上、下部三轴振动及转速测试曲线如图 9、图 10 所示。

工程参数测量模块记录到了 $x$ 轴振动加速度上部在 −50$g$ ~ 50$g$ 之间，下部在 −160$g$ ~ 160$g$ 之间。$y$ 轴振动加速度上部在 −30$g$ ~ 30$g$ 之间，下部在 −120$g$ ~ 120$g$ 之间。$z$ 轴振动加速度上部在 −75$g$ ~ 80$g$ 之间，下部在 −160$g$ ~ 200$g$ 之间。记录到转速在 20 ~ 70 r/min 之间，转速记录数据正常，测得井下温度为 22 ℃。

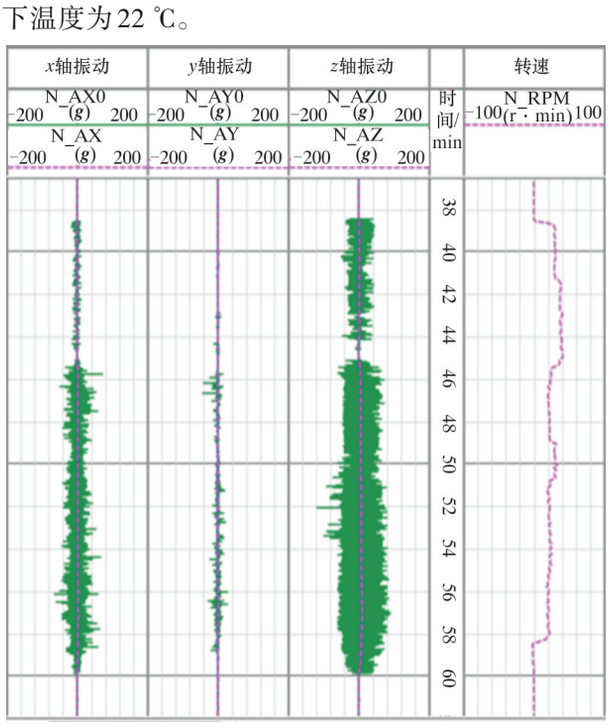



图 9　上部实钻测试曲线

Fig. 9　Drilling test logs of the upper module

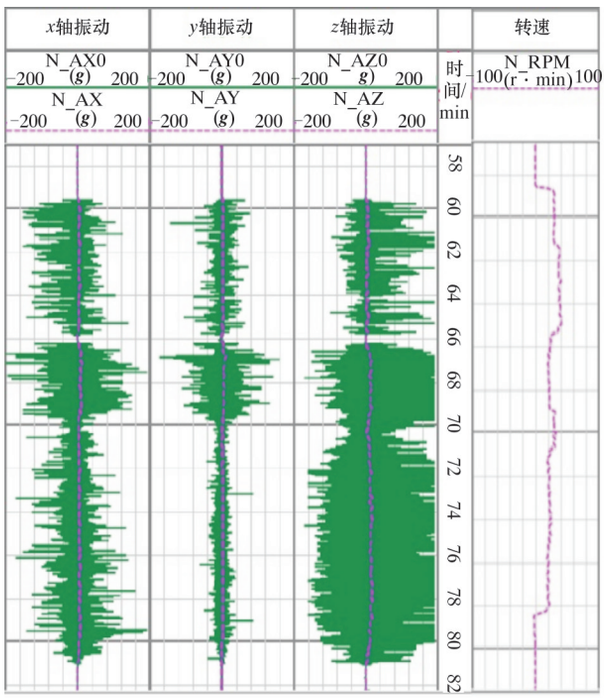



图 10　下部实钻测试曲线

Fig. 10　Drilling test logs of the lower module

## 5　结　论

（1）完成了工程参数测量模块置于射流冲击器上部和下部数据采集，振动数据记录准确。实钻模拟试验结果表明，系统能够准确测量振动加速度、转速和温度，测量数据与实际参数符合良好。

（2）在旋转状态下，采集模块记录到转速测量在 20 ~ 70 r/min 之间，转速数据记录正常。在转盘空转及模拟实钻钻进过程中，上下模块记录转速趋于一致，测量结果准确。

（3）工程参数测量模块内置钻头封装可靠，模块整体采集工作正常，加速度、转速和温度测量精度满足现场应用要求。

### 参　考　文　献

[1] 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.

[2] 刁斌斌,高德利,刘喆,等. 井深随钻测量误差校正与井眼位置不确定性计算方法[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2):181-186.
Diao Binbin, Gao Deli, Liu Zhe, et al. Well depth measured with MWD error correction and calculation of borehole position uncertainty [J]. Petroleum Drilling Techniques,2024, 52(2):181-186.

[3] 李中,吴怡,李辉,等. 海洋智能钻井井下工程参数实时测量技术及工具研发[J]. 钻采工艺,2025,48(1):63-69.
Li Zhong, Wu Yi, Li Hui, et al. Research and Development of Real-time Measurement Technology and Tools for Downhole Engineering Parameters in Intelligent Offshore Drilling[J]. Drilling and Production Technology, 2025, 48(1):63-69.

[4] 徐林. 深部丛式井电磁随钻测量信号传输[J]. 世界石油工业, 2024, 31(6): 98-105.
Xu Lin. Signal transmission of electromagnetic measurement-while-drilling in deep cluster wells[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(6): 98-105.

[5] 张泉滢,刘国斌,袁超,等. 基于井下 X 射线源的密度测井仪器优化设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2024,48(1):115-123.
Zhang Quanying, Liu Guobin, Yuan Chao, et al. Parameter optimization design of density logging tool based on underground X-ray source[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2024, 48(1):115-123.

[6] 王贺强, 郭海涛, 马翠岩, 等. 智能钻井系统在赵东油田的应用[J]. 世界石油工业, 2024, 31(3): 59-67.
Wang Heqiang, Guo Haitao, Ma Cuiyan, et al. Field application of automated drilling system in Zhaodong oilfield [J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(3): 59-67.

[7] Fan Jinchao, Fang Chao, Xu Zhaohui, et al. Vibration condition analysis based on surface-underground engineering measurement parameters [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2901: 012015.

[8] 付英军, 马天寿, 陈平, 等. 井下工程参数测量短节的有限元分析 [J]. 石油机械, 2011, 39 (5): 34-37.
Fu Yingjun, Ma Tianshou, Chen Ping, et al. Finite element analysis of underground engineering parameter measurement short section [J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39 (5): 34-37.

[9] 王超, 吴川, 王虎. 井下工程参数随钻测量系统研制[J]. 煤矿机械, 2024, 45 (2): 30-32.
Wang Chao, Wu Chuan, Wang Hu. Development of downhole engineering parameter measurement system while drilling [J]. Coal Mine Machinery, 2024, 45 (2): 30-32.

[10] 赵亮. 随钻钻压、扭矩工程参数测量方案研究[D]. 北京: 中国石油大学 (北京), 2017.
Zhao Liang. Research on measurement scheme of drill-

ing pressure and torque engineering parameters while drilling［D］. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.

［11］ Duan Yadi, Liu Huilin. Research on BIM technology-based measurement method of stress parameters of prefabricated building engineering［J］. International Journal of Critical Infrastructures, 2023, 19 (3): 199-210.

［12］ Engineering-Optical Engineering; Investigators from shanghai university zero in on optical engineering (Inertial measurement unit aided extrinsic parameters calibration for stereo vision systems)［J］. Journal of Engineering, 2020, 1215.

［13］ 丁露阳. 井下工程参数动态测量仪器关键技术研究［D］. 青岛：中国石油大学（华东），2019.
Ding Luyang. Research on key technologies of dynamic measurement instruments for underground engineering parameters［D］. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.

［14］ Kui Deng, Wei Hu, Liang Ge, et al. Study of downhole lateral force measurement modelling and devices in petroleum exploration［J］. Energies, 2022, 15 (15): 5724-5724.

［15］ 朱祖扬，刘江涛，杨明清，等. 井筒微芯片示踪器的深度定位研究［J］. 钻采工艺，2021，44（1）：7-12.
Zhu Zuyang, Liu Jiangtao, Yang Mingqing, et al. Depth location of microchip tracer in borehole［J］. Drilling & Production Technology, 2021, 44 (1): 7-12.

［16］ 杨春辉. 井下工程参数随钻测量仪的软硬件设计［D］. 北京：中国地质大学（北京），2023.
Yang Chunhui. Software and hardware design of downhole engineering parameter measurement instrument while drilling［D］. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2023.

［17］ 朱祖扬，李肖扬，冯雨晨，等. 一种微芯片示踪器录井方法研究［J］. 录井工程，2019，30（1）：1-6.
Zhu Zuyang, Li Xiaoyang, Feng Yuchen, et al. Research on a microchip tracer logging method［J］. Mud Logging Engineering, 2019, 30 (1): 1-6.

［18］ 胜亚楠. 基于井下参数测量的钻柱运动特征及异常状态分析方法［J］. 石油地质与工程，2024，38（2）：108-111，126.
Sheng Yanan. Analysis of drill string movement and working condition recognition based on down-hole engineering parameter measurement data［J］. Petroleum Geology and Engineering, 2024, 38 (2): 108-111, 126.

［19］ 姜海龙，柳贡慧，李军，等. 井下工程参数测量系统的研制与应用［J］. 钻采工艺，2020，43（1）：5-8.
Jiang Hailong, Liu Gonghui, Li Jun, et al. Development and application of underground engineering parameter measurement system［J］. Drilling & Production Technology, 2020, 43 (1): 5-8.

［20］ 朱祖扬. 随钻声波远探测声波速度成像数值模拟与试验［J］. 石油钻探技术，2022，50（6）：35-40.
Zhu Zuyang. Numerical simulation and test of velocity imaging for remote detection acoustic logging while drilling［J］. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50 (6): 35-40.

［21］ 常杨，郭修成，李永钊，等. 基于随钻工程参数测量数据的钻井风险识别试验［J］. 钻采工艺，2022，45（5）：150-153.
Chang Yang, Guo Xiucheng, Li Yongzhao, et al. Drilling risk analysis test based on engineering parameter measurement while drilling［J］. Drilling & Production Technology, 2022, 45 (5): 150-153.

**第一作者简介：**索忠伟，研究员，生于 1970 年，2006 年毕业于吉林大学地质工程专业，获博士学位，现从事钻井工艺及井下工具仪器研究工作。地址：（102249）北京市昌平区。电话：（010）56606107。email：suozhongwei123@163.com。

**修改回稿日期：**2026-03-15
（本文编辑　刘　锋）