

钻柱振动模拟测试自动化控制系统设计与实验研究

岳 榜, 蔡丰泽, 张 俊, 舒心怡, 钟玉伟, 游建沅, 李弘伟, 姚智勇, 杨应林

四川轻化工大学机械工程学院, 四川 宜宾

收稿日期: 2026年1月11日; 录用日期: 2026年2月4日; 发布日期: 2026年2月11日

摘 要

当前的油气资源开采设备在系统智能化、集成化、经济性等方面还存在欠缺, 无法满足现代工业在安全、高效、自动化和多功能方面的需求。基于实际钻井工况, 本文创新设计了一种钻柱振动模拟测试自动化控制平台, 可模拟钻柱在水平、斜直、垂直等不同井段下的工作状态。该平台由计算机辅助设计软件完成了三维模型搭建并进行方案可行性验证, 开发了钻柱振动模拟测试自动化控制系统, 它依托于Keil v5软件平台, 以STM32单片机作为控制核心, 通过上位机软件与单片机通信完成动力机构控制, 利用数据采集软件开展钻柱振动模拟试验测试, 将钻柱的不同方向与不同转速结合, 采集得到钻柱振动实验数据。实验结果表明, 通过测试不同参数条件下的钻柱振动, 转速对基频大小影响不明显, 但基频幅值随转速增加而变化, 且与相应干扰力与载荷条件有关。该系统对于油气资源勘探开发节约成本, 减小设备损坏、钻井事故发生具有积极意义, 可为钻柱系统非线性动力学的深入分析与智能控制研究奠定基础。

关键词

钻柱, 振动, 自动化, 控制系统, 实验测试

Design and Experimental Study of an Automated Control System for Drill String Vibration Simulation Testing

Bang Yue, Fengze Cai, Jun Zhang, Xinyi Shu, Yuwei Zhong, Jianfeng You, Hongwei Li, Zhiyong Yao, Yinglin Yang

School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin Sichuan

Received: January 11, 2026; accepted: February 4, 2026; published: February 11, 2026

文章引用: 岳榜, 蔡丰泽, 张俊, 舒心怡, 钟玉伟, 游建沅, 李弘伟, 姚智勇, 杨应林. 钻柱振动模拟测试自动化控制系统设计与实验研究[J]. 机械工程技术, 2026, 15(1): 53-63. DOI: 10.12677/met.2026.151006

Abstract

The current oil and gas resource extraction equipment still has shortcomings in system intelligence, integration, and cost-effectiveness, and cannot meet the modern industry's requirements for safety, efficiency, automation, and multifunctionality. Based on actual drilling conditions, this paper innovatively designs an automated control platform for drill string vibration simulation testing, capable of simulating the operating states of the drill string in different well sections, including horizontal, inclined, and vertical. The platform's three-dimensional model was constructed using computer-aided design software, and the feasibility of the plan was verified. An automated control system for drill string vibration simulation testing was developed, which relies on the Keil v5 software platform, uses an STM32 microcontroller as the control core, and controls the power mechanism through communication between the upper computer software and the microcontroller. Data acquisition software was used to conduct drill string vibration simulation tests, combining different directions and rotation speeds of the drill string to collect experimental vibration data. Experimental results show that by testing the drill string vibration under different parameter conditions, the rotation speed has little effect on the fundamental frequency magnitude, but the amplitude of the fundamental frequency changes with increasing rotation speed and is related to the corresponding interference force and load conditions. This system has significant implications for reducing costs in oil and gas exploration and development, minimizing equipment damage, and preventing drilling accidents. It can also provide a foundation for in-depth analysis and intelligent control research of the nonlinear dynamics of drill string systems.

Keywords

Drill String, Vibration, Automation, Control System, Experimental Test

Copyright © 2026 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

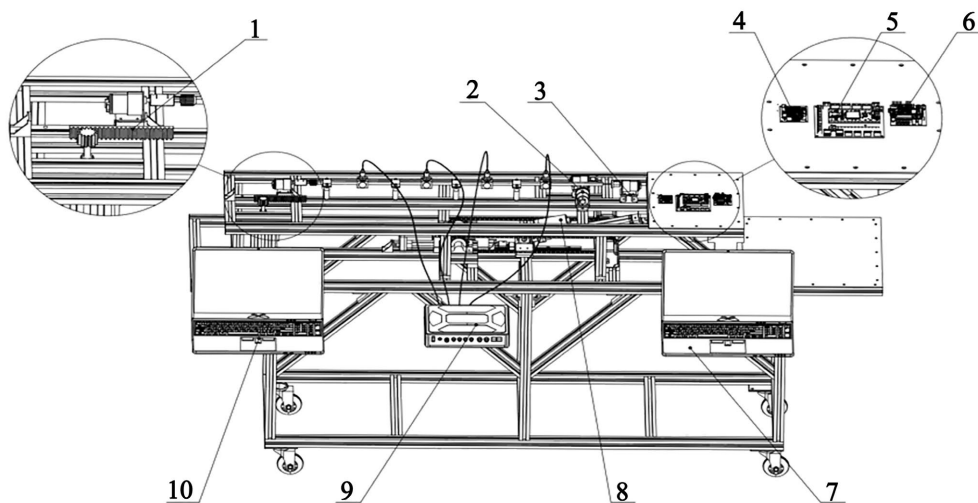
随着我国对油气勘探开发需求的日益增长, 钻井作业规模不断扩大, 非常规油气资源开采的难度也显著提升[1]。良好使用性能的钻井设备对油气资源开采起着关键作用, 决定了油气资源开采的效率、安全性和使用寿命[2]。因此, 如何有效保护钻井机械设备、降低故障风险, 成为亟待解决的问题[3]。如果钻井机械设备没有得到良好维护和管理, 将致使其故障风险上升, 降低工程作业效率, 还可能引发安全事故, 对作业人员生命构成威胁, 给开采企业带来直接经济损失[4]。

油气资源勘探开发时, 为了提高采收率, 一般采用定向井技术, 而定向井技术包括垂直井、斜直井、水平井等[5]。定向井工况复杂, 尤其是在非常规油气钻井过程中, 影响因素众多, 包括不同的入井角度、受载状态等[6]。近年来, 国内外学者根据钻柱动力学行为、振动特性分析及控制策略开展了大量研究, 并取得了诸多进展[7]。Liu 等利用机电一体化技术提升石油开采效率, 详细分析了其面临挑战与具体影响[8]。Kuang 等设计了一个简化的钻柱实验台, 研究了转速与扭矩对纵向振动的影响[9]。Hadi 等建立了一个可实现振动疲劳测定与分析的井筒稳定性测试模型, 但是平台功能较为单一, 未能测定不同载荷条件下的钻井工况[10]。总体而言, 上述研究多为仿真分析或简化实验, 缺乏能实现模拟多角度、多工况集成振动响应的实验测试平台, 尤其在结合自动化控制系统与实时数据采集方面存在明显不足。

因此本文设计了一种钻柱振动模拟测试自动化控制系统,集成了钻进模拟、径向/轴向力加载及角度调节等功能模块,能够真实模拟钻柱在水平、斜直、垂直等不同井段下的工作状态,并可通过上位机软件的可视化操作界面实时控制以 STM32 单片机为核心的控制系统。本系统通过探究转速、钻压、角度等参数对钻柱基频及幅值的影响,利用数据采集软件开展钻柱振动模拟试验测试,为钻柱振动特性分析和自动化控制体系的实际应用提供了实验,在降低钻井成本、减少技术设备损坏及事故风险方面具有重要的工程价值。

2. 模拟测试系统

钻柱振动模拟测试自动化控制系统主要分为上、下部结构和控制系统,结构展示如图 1 所示。上部结构由钻进模拟模块、径向力加载模块、轴向力加载模块组成,通过电机带动钻柱进行模拟钻进,而径向、轴向的力加载模块用于模拟径向与轴向的干扰力。下部结构主要由角度调节部分组成,通过二级电推杆进行举升以及角度调节进行钻柱多角度模拟。控制部分主要由软件部分和硬件部分组成,并由此对整个系统进行干扰参数调节以及整体装置控制,以达到在钻柱振动模拟测试时兼顾环境干扰模拟的作用。其中钻柱振动模拟测试自动化控制系统的主要工作原理是通过设计的上位机软件对装置的钻进模拟模块、径向力加载模块、轴向力加载模块以及角度调节模块进行参数设置与调节。上位机软件将指令传输到主控板上,主控板再将控制信号传输到具体模块以实现各个执行端的控制。角度调节模块是通过二级推杆机构将上部结构抬升到指定角度后,主动电机同步响应,驱动钻柱进入模拟钻进状态。在钻柱模拟钻进过程中,为实现钻井环境干扰项模拟,设计径向力加载模块驱动凸轮机构、轴向力加载模块驱动模拟岩面部分,使其同时对钻柱施加径向以及轴向作用力(载荷)进行干扰项模拟。再将采集到的数据通过传感器模块传输给计算机,完成实验数据处理。



1-钻进模拟模块, 2-径向力加载模块, 3-轴向力加载模块, 4-驱动模块, 5-主控模块, 6-降压模块, 7-上位机控制, 8-角度调节模块, 9-数据采集, 10-频谱分析

Figure 1. Simulation system structure composition

图 1. 模拟系统结构组成

2.1. 测试系统主要硬件参数

2.1.1. 系统钻柱

为真实模拟井下钻柱的动力学行为,本实验台架中的模拟钻柱采用直径 0.5 mm、长 100 mm 的 304

不锈钢制成。其主要物理与几何参数如表 1 所示。该材料的弹性模量与密度等比例低于现场钻柱，适用于室内缩比实验的振动特性研究，有助于反映钻柱在钻井过程中的振动反应与惯性特征。

Table 1. Drill string geometric parameters

表 1. 钻柱几何参数

名称	数值	备注
材料	304 不锈钢	无
直径	0.5 mm	无
长度	100 mm	有效振动段长度
剪切模量	75.6 Gpa	根据几何尺寸计算得出
质量	0.00157 kg	根据几何尺寸计算得出
截面惯性矩	$3.07 \times 10^{-17} \text{ m}^4$	根据几何尺寸计算得出

2.1.2. 传感器与数据采集

为获取钻柱在模拟钻进过程中的振动状态参数，本系统采用 CA-YD-106 型压电式加速度传感器进行测量采集。该型号具有高灵敏度、宽频响与良好的线性度，可用于实验室环境下中低频振动的精确测量。其主要技术参数如下表 2 所示。

Table 2. Sensor technical specifications

表 2. 传感器技术参数

参数名称	数值/型号	说明
传感器型号	CA-YD-106	压电式加速度传感器
灵敏度	25 pC/g	标准值
量程	2000 g (峰值)	可测最大加速度范围
频率范围	0.5 Hz~12,000 Hz	有效工作频带
工作温度范围	-20℃~+120℃	系统满足该工作温度要求
输出接口	顶端 L5	连接至数据采集设备
安装方式	磁吸座安装	便于定位与拆卸

2.1.3. 动力与执行结构

系统各运动模块由相应的电机与驱动器驱动，其选型以满足所需推力、速度与控制精度为目标。主要执行机构参数如表 3 所示。

Table 3. Power and actuator parameters

表 3. 动力与执行机构参数

功能模块	执行结构	型号	参数
钻进模拟模块	两相混合式步进电机	ZDT_X57_V2	步距角： $1.8^\circ \pm 5\%$ 力矩：27.0 kg·cm 最小值
径向/轴向力加载模块	直流减速电机	JGB37-520	功率：2.2 w~14.4 w 最大扭矩：35 kg
角度调节模块	二级电动推杆	BJXL/XTL	推力：500 N/1000 N 速度：7/12 m/s

3. 控制系统

钻柱振动模拟测试自动化控制系统控制模块是围绕着 STM 系列开发板进行搭建的, 整体的控制系统是由四大模块组成, 具体为主控、电源电路、数据通信、以及电机控制模块。其中主控模块与上位机软件之间交互是通过串口进行通信进行。针对测试系统功能, 需要以电机控制模块进行控制来实现。对于角度调节模块, 需要实现分别对直流电推杆和步进电推杆用 PWM 信号和串口信号控制。对于钻进模拟模块, 需要实现对 57 步进电机使用串口信号控制。对于径向力加载模块、轴向力加载模块等主要由直流减速电机组成的模块, 需要实现对直流减速电机用 PWM 信号控制。主控模块的开发板主控电路是由 STMF407ZGT6 主控芯片、滤波电路等组成。可为整个控制系统做主导, 如图 2、图 3 所示。

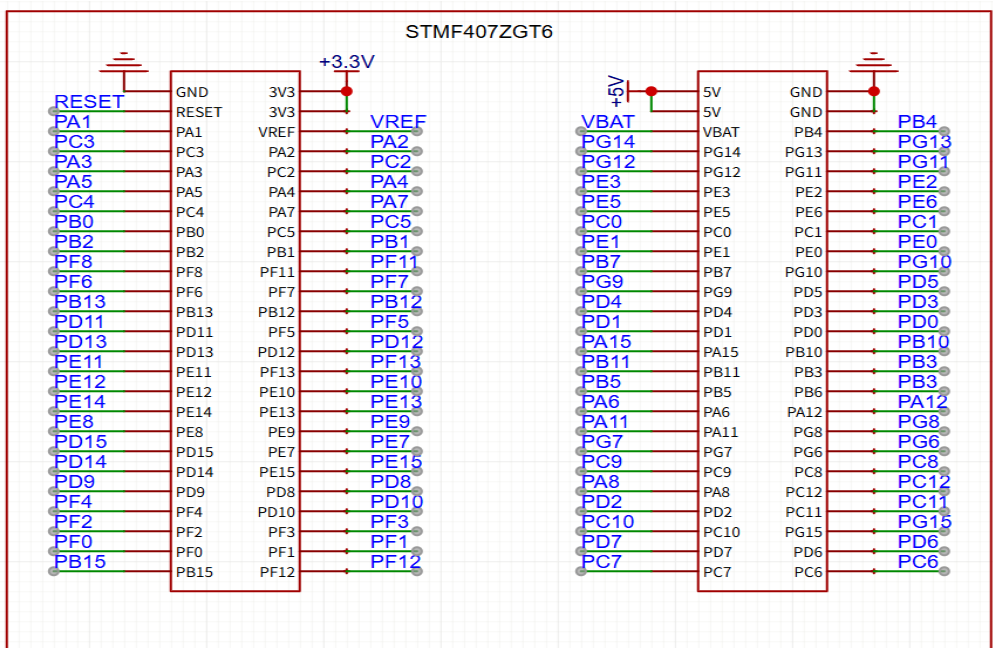


Figure 2. STMF407ZGT6 main control chip
图 2. STMF407ZGT6 主控芯片

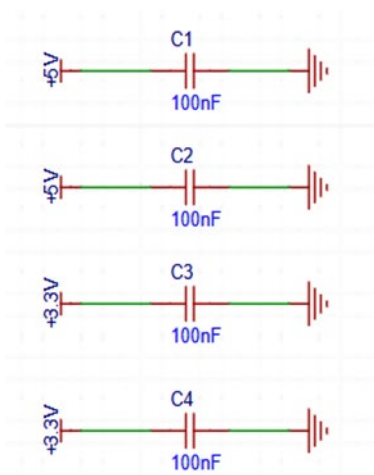


Figure 3. Filter circuit
图 3. 滤波电路

电源电路模块是整个控制系统的动力来源，主控模块所需电压为 5 V 直流电，电机驱动所需要的电压为 24 V 和 12 V 的直流电。因此通过设计的电源电路模块就可以将电流输入到各个模块，如图 4 所示。

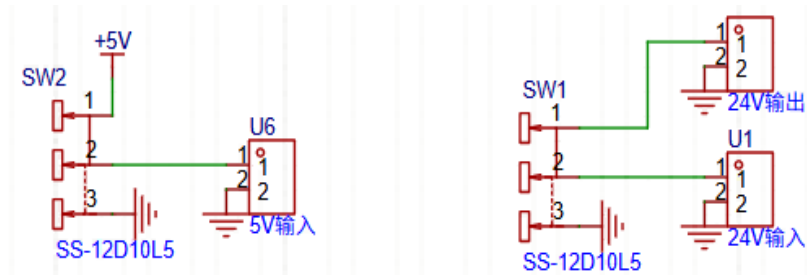


Figure 4. Power supply circuit module
图 4. 电源电路模块

数据通信模块的作用是实现 STMF407 核心板与上位机的信息交互且获取传感器数据。STMF407ZGT6 核心板通过串口与上位机进行交互，获取传感器发送的数据，以及实现对模块控制，如图 5 所示。

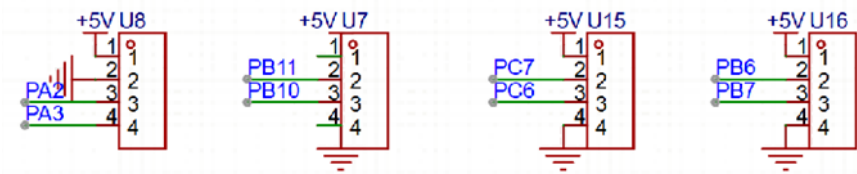


Figure 5. Data communication module
图 5. 数据通信模块

电机控制模块用于直流减速电机和步进电机以及电推杆的驱动。电机控制模块分为两个部分，第一个部分为 57 步进电机驱动，第二个部分为直流减速电机及直流电推杆的驱动设计，如图 6、图 7 所示。

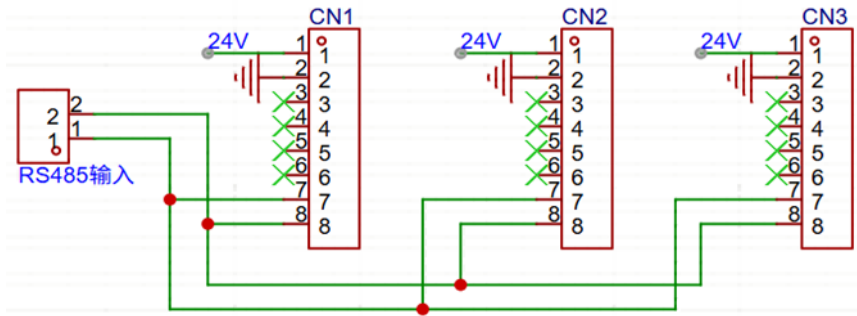


Figure 6. 57 stepper motor drive section
图 6. 57 步进电机驱动部分

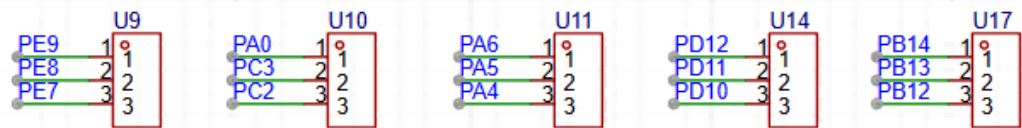


Figure 7. DC gear motor and DC electric actuator drive section
图 7. 直流减速电机及直流电推杆驱动部分

将以上四个模块进行组合、集成化设计绘制成 PCB 图，模型及实物展示如图 8 所示。

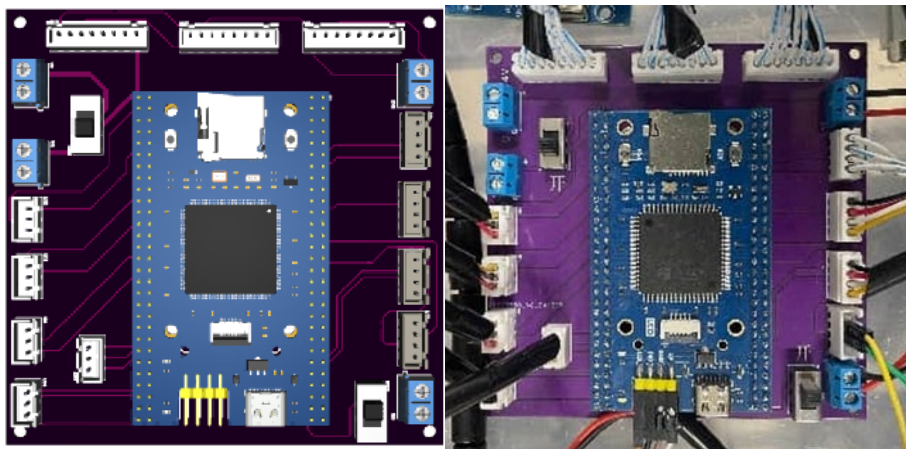


Figure 8. PCB model and physical display
图 8. PCB 模型及实物展示

4. 控制流程

钻柱振动模拟测试自动化控制系统是通过 PC 端开发的上位机软件与 STM32F407ZGT6 高性能处理器的控制核心构建的完整的控制链。该上位机软件采用 Qt 作为图形设计框架，通过无线通信使上位机可实现远距离控制系统的目的。针对钻柱振动模拟测试自动化控制系统设计的 UI 界面中的举升控制可以实现控制实验系统的角度调整，可通过滑动条或滑动条左右两边的增减按钮进行角度微调，按下确认修改按钮完成对设备角度的控制，也可以通过下方恢复初始按钮对角度控制实现初始化；UI 界面中的电机控制是对直流减速电机进行转速和转向控制，其中 ID 号 1-4 分别对应着是主动电机，反转电机，X 轴径向力以及 Y 轴径向力电机。其速度调节与举升角度调节方法一致，并且设计的复选框按钮可以对直流减速电机方向以及启停状态进行修改。UI 界面中的钻进控制是对钻柱的钻进状态进行模拟，可以通过点击不同按钮实现设备钻进和退出两种状态，其主要表现在主控模块收到指令后，驱动步进电机带动齿轮齿条改变力传递的方向，从而实现钻进和钻出的目的。上位机界面展示如图 9 所示。

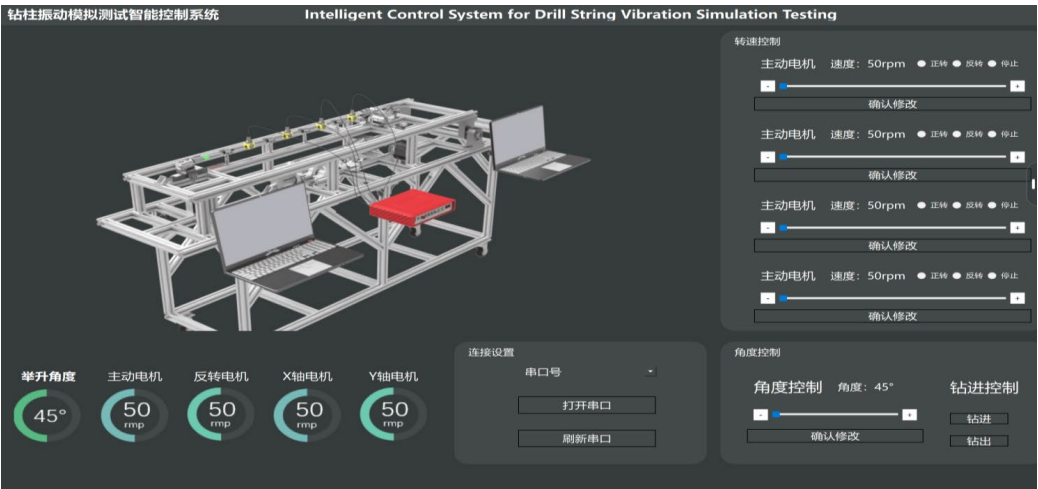


Figure 9. Host computer interface
图 9. 上位机工作界面

钻柱振动模拟测试自动化控制系统的控制部分，如图 10 所示。由步进电机驱动器通过串口 USART 通信接收主控模块的频率信号，再将其转换成脉冲控制信号赋予 57 步进电机，进而驱动步进电机实现钻进 - 钻出状态动作。当电机运动触碰到控制器限位时，表示该次控制已达到预定位置，将控制电机实现精确的停止。通过串口 USART 协议与六轴传感器实现数据交互，由主控模块发送串口指令和 PWM 占空比信号进行步进电推杆和直流电推杆运动控制。其六轴传感器模块采用上电自启动的方式，结合传感器安装位置，以翻滚角作为实时采集电推杆举升的参数，为主控模块自动返回实时的举升角度，再当到达预定的抬升角度时，控制电推杆停止。使用专用的直流减速电机驱动器，主控模块的 PWM 频率输出后，该驱动器将所接收到的 PWM 频率转换成脉冲控制信号，从而精准的控制电机并达到实时调整转速的目的。

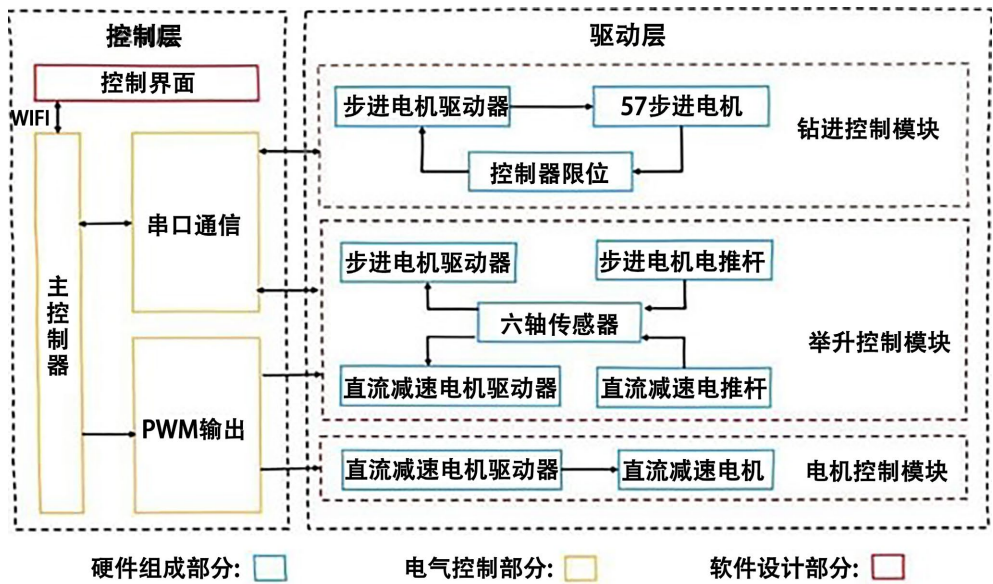


Figure 10. Intelligent control schematic
图 10. 智能控制思路图

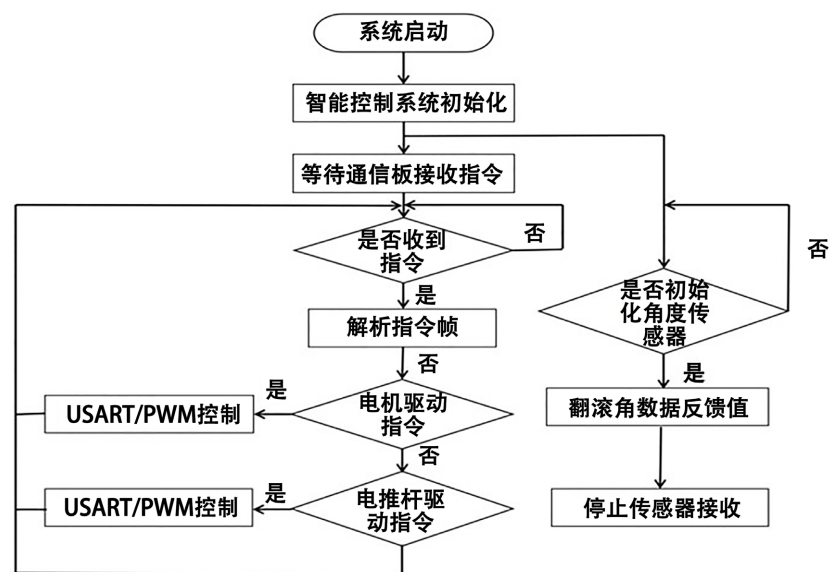


Figure 11. Main control flowchart
图 11. 主要控制流程图

流程控制思路如图 11 所示, 钻柱振动模拟测试自动化控制系统是通过上位机软件改变图形界面中的各项目参数值, 借助无线串口与主控模块通信, 再由主控模块将收到的信息进行解析, 分别转换成对钻进控制部分, 钻进控制部分, 举升控制部分控制信号。通过对三个部分的控制, 完成钻柱多角度钻进状态模拟, 最后再通过数据采集装置, 完成数据采集。

5. 实验研究

钻柱振动模拟测试自动化控制系统的主要控制模块为举升控制、电机控制和钻进控制, 搭建的实验样机如图 12 所示。

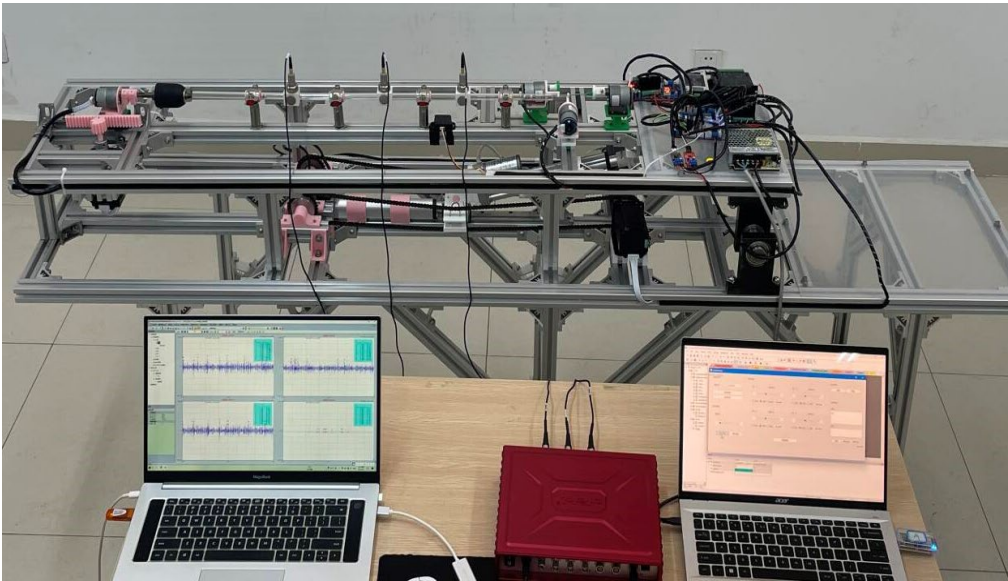
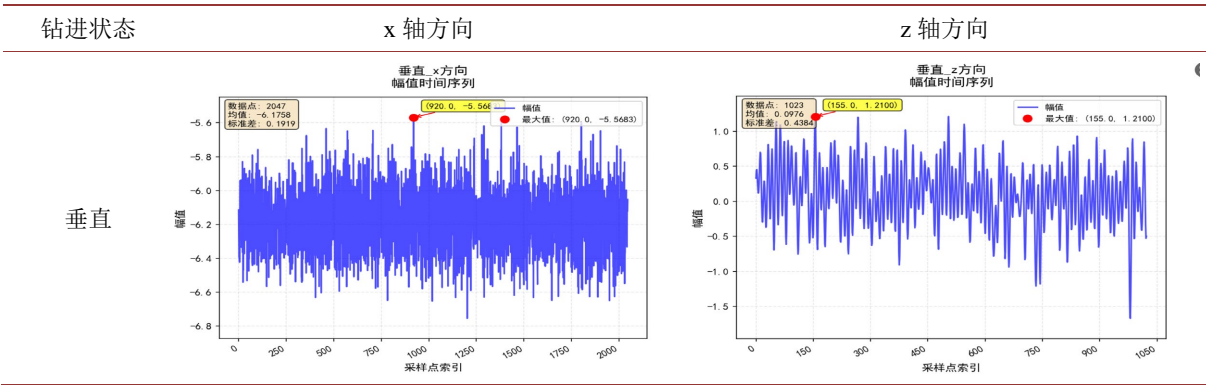


Figure 12. Simulation control system
图 12. 模拟控制系统

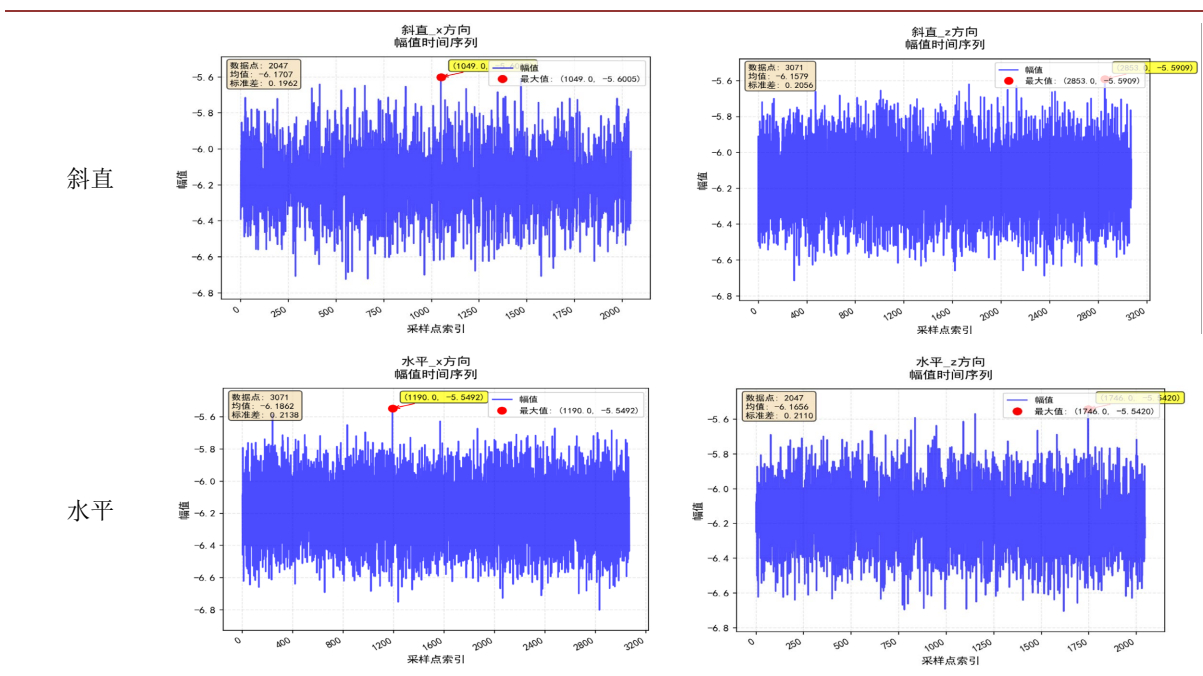
钻柱振动模拟测试自动化控制系统主要的实验研究开展在通电情况下, 插入 WIFI 模块连接 PC 端, 并打开对应的串口号实现与设备的连接, 再通过上位机设置并调节各个模块的参数, 以达到所需实验模拟数值, 最后再由传感器采集数据并传输至计算机, 完成实验数据处理。

通过上述给定的实验操作方式, 给定相应参数后, 进行实验测试, 实验结果如表 4 所示:

Table 4. Experimental test results
表 4. 实验测试结果



续表



频谱分析表明, 钻柱振动基频主要受结构固有属性影响, 转速对其影响微小, 该表现符合动力学规律; 而基频幅值对工况变化敏感, 总体上随转速增加呈单调上升趋势, 揭示了外部能量输入与系统振动响应的正相关关系, 且该关系受干扰力与载荷条件的显著调制。本系统结合时域与统计特性分析, 在不同钻进方向下幅值均值与波动性差异显著, 主要表现在垂直于 z 轴方向的振动频谱均值和标准差数值与其他钻进状态的分析结果呈现差异化。分析其主要原因应是源于不同方向上边界约束与干扰力耦合导致的能量放大或耗散程度不同。因此通过振动频率与幅值的解耦分析, 可为钻井实验提供明确指导: 调整载荷方向与优化减载是控制振动强度的有效手段, 而对基频的监测则为评估钻柱结构状态提供了稳定指标, 也为深刻理解钻柱非线性动力学行为及实现精准钻井状态分析起着关键作用。

6. 结论

针对目前石油天然气钻探行业存在的问题, 我们根据钻井环境设计了一款钻柱振动模拟测试自动化控制系统, 该系统主要是通过模拟真实钻进过程中钻柱受到干扰因素的影响来研究钻柱与井壁之间的振动特性。通过实验研究对因振动所产生的负面影响进行规避, 为降低钻井事故发生率提供理论依据。钻柱振动模拟测试自动化控制技术的应用, 能够提高钻井作业的效率, 保障施工安全性, 降低研发成本, 提升资源的开发利用。

结合搭建的钻柱振动模拟测试实验平台及自动化控制系统, 由新版数据采集器及采集软件对给定相关干扰因素的模拟钻进实验进行数据采集及处理分析, 输出相关振动频谱图, 得到在不同情况下振动特性对钻柱钻进过程的负面影响以实现技术规避。未来研究可加深对智能控制算法的探索, 并拓展至更复杂工况下的应用验证, 为开发更高效、可靠的智能钻井机械装备奠定理论与技术基础。

参考文献

- [1] 王延峰. 石油钻井设备机械机电一体化问题研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(9): 40-42.
- [2] 周波, 李冰, 王林聪, 等. 自适应钻井黏滑振动井下控制工具设计方法[J]. 石油机械, 2025, 53(6): 38-43.

-
- [3] 张良正, 缪鹏程. 非光滑钻柱系统的粘滑动力学研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2025, 1(1): 1-9.
 - [4] 刘巨川. 海洋石油钻井机械设备的管理与维护分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(9): 62-64.
 - [5] 陈宝喆. 定向井钻井技术常见问题与对策[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(21): 157-159.
 - [6] 陈小元, 刘纯仁, 王委. 钻柱双向扭摆控制系统的优化与应用研究[J]. 复杂油气藏, 2025, 1(2): 1-9.
 - [7] Morales, Y.B.S., Castello, D.A., Bez, L.F. and Ritto, T.G. (2026) Axial-Torsional Dynamic Model of a Drill-String Considering Thermal-Assisted Drilling. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **181**, Article 105279. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2025.105279>
 - [8] 张道华, 米永强, 吕红伟, 等. 石油钻机机械机电一体化问题分析[J]. 中国设备工程, 2024(S2): 335-337.
 - [9] 况雨春, 张涛, 林伟. 小尺度水平井钻柱动力学实验台架研制及应用[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(4): 15-23.
 - [10] Haghgouei, H., Lavrov, A. and Nermoen, A. (2025) An Elasto-Plastic Damage Model to Investigate the Wellbore Failure under Cyclic Load of Drill String. *Gas Science and Engineering*, **138**, Article 205607. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2025.205607>